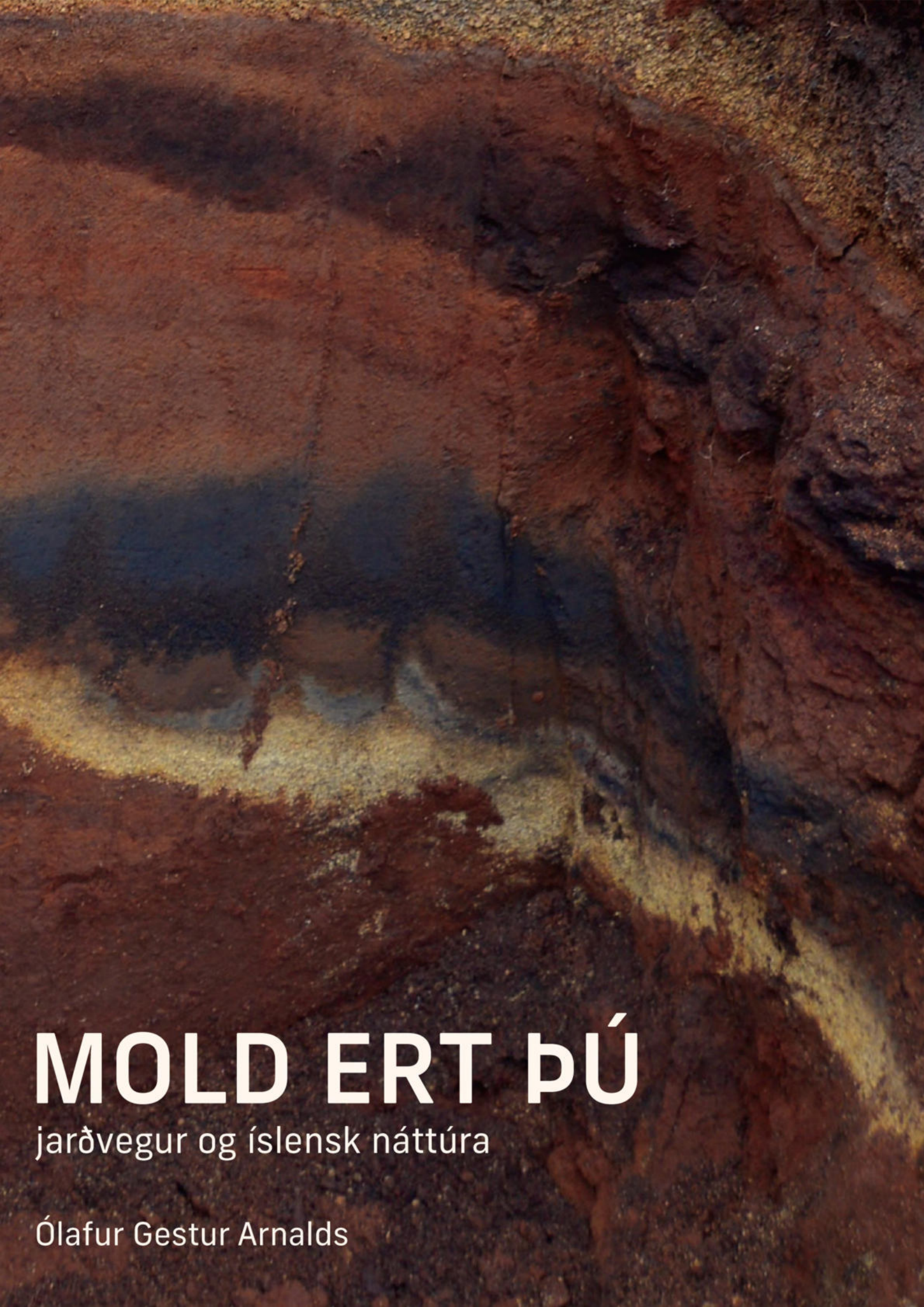


MOLD ERT ÞÚ

jarðvegur og íslensk náttúra

Ólafur Gestur Arnalds

1. hluti. Mold
Jarðvegsfræði – grunnþættir

1. Mold og jörð – innleiðing 10
2. Bergefni í moldinni 22
3. Hin lifandi jörð – lífverur og lífræn efni 36
4. Vatnið í moldinni – hagur lands og lífs 56
5. Moldin er síkvik efnasúpa 76
6. Eðlisþættir jarðvegs 94
7. Að lesa í moldina – jarðvegslög og jarðvegssnið 108
8. Jarðvegsmyndun – tíminn og vatnið og ýmislegt fleira 122
9. Moldin er misjöfn – helstu jarðvegsflokkar heimsins 140
10. Eldfjallajörð og glerjörð – jarðvegur eldvirkra svæða 158

2. hluti. Íslensk mold

11. Meginflokkar jarðvegs á Íslandi 184
12. Eðliseiginleikar jarðvegs, bergefni og íslensk náttúra 210
13. Efnaeiginleikar moldar móta náttúru landsins 230
14. Foldin þróast – jarðvegsmyndun 250
15. Næring og mold 268

3. hluti. Umhverfið
Mótun og ástand lands

16. „Á Ísa-köldu landi“ – frost í jarðvegi og ásýnd landsins 292
17. Sandur og ryk móta náttúru alls landsins 324
18. Jarðvegsrof og íslenskar rofmyndir 344
19. Umsátrið um landvistkerfi – hnignun og ástand lands 382
20. Hrun íslenskra vistkerfa 420
21. Rætur landhnignunar 448
22. Moldin og hlýnun jarðar 464
23. Mold og endurheimt landgæða – vistheimt 496

1 Mold og jörð – innleiðing

Mynd 1.1. Skúlptúrinn Jörð eftir Einar Jónsson.

1.1. Jarðvegur – mold

Moldin er brú á milli lífríkisins og hins lífvana berggrunns jarðar – miðill á krossgötum fjögurra heima: bergs, lofts, lífríkis og vatns. Orka og efni eru flutt á milli þessara kerfa fyrir tilstuðlan fjölbreyttrar lífsstarfsemi í moldinni. Það er jarðvegurinn sem sér gróðri fyrir þeim efnum sem nauðsynleg eru fyrir beislun sólarorku með ljóstillífun, en hann heldur einnig hluta orkunnar til haga í formi fjölbreyttra lífrænna efna. Jarðvegurinn er jafnframt meginhlekkur í hringrás næringarefna og vatns á yfirborði jarðar.

Latneska heitið yfir jarðveg er „sol“, dregið af „solum“ (jörð). Í rómönskum málum er orðið notað yfir jarðveg og heiti jarðvegsflokka enda sömuleiðis á -sol eða -zol í mörgum flokkunarkerfum fyrir mold, eins og t.d. Andosol og Podzol. Enska heitið er „soil“ en stafurinn „i“ er kominn inn í nafnið fyrir misskilning samkvæmt orðabók Websters (af orðinu „solium“ sem merkir sæti).

Jarðvegur er jafnan nefndur jörð á norrænum málum. Ekki er alveg ljóst af hverju moldin er kölluð jarðvegur á íslensku. Hugsanlega má rekja uppruna orðsins til latneskrar orðabókar frá 17. öld eftir Guðmund Andrésson (d. 1688) en þar er orðið jarðvegur notað fyrir latneska orðið „arvum“. Eiginleg merking þess er plægt land eða akuryrkjuland og vísar þá vegur í jarðvegur til plógfarsins, ef að líkum lætur (mynd 1.2). Bjarni Guðleifsson og Brynhildur Bjarnadóttir (2019) veltu því fyrir sér hvort hugtakið „jarðvegur“ gæti átt rætur í fjárgötunum sem liggja víða um landið í skemmtilegri hugleiðingu um moldina. Aðrir tengja það fremur gömlu þjóðleiðunum um landið.

Hugakið „mold“ er miklu eldra og í raun mun rökréttara, sem og orðið „jörð“ sem er notað í öðrum norrænum málum. Texti í Snorra-Eddu rennir stoðum undir þessa notkun: „Jörðin var gjör af holdi Ýmis, en björgin af beinunum.“ Hér má geta sér þess til að jörðin vísi til moldar en ekki jarðarinnar í heild, enda björgin gerð af beinum. Það er því vel við hæfi að nota hugtakið jörð til að einkenna heiti á jarðvegsflokkum, svo sem *mójörð* og *brúnjörð*, eins og síðar verður vikið að.

Texti nýrrar biblíuþýðingar rennir frekari stoðum undir notkun moldarhugtaksins en þar stendur: „Því að mold ert þú, og til moldar skaltu aftur hverfa“ (mynd 1.1). Ennfremur segir þar: „Þá mótaði Drottinn Guð manninn af moldu jarðar og blés lífsanda í nasir hans. Þannig varð maðurinn lifandi vera.“ Orðið Adam er eins konar orðaleikur, dregið af „adamah“ sem er jörð eða akurlendi.

Hugtakið „jarðvegur“ hefur fest sig í sessi í málinu, en hér verða hugtökin „jarðvegur“ og „mold“ notuð sömu merkingar. Ekki spillir fyrir að hugtakið mold er kvenkyns, sem er meira við hæfi en karlkynsorð um fósturmoldina. Hugtakið „jarðvegur“ er eldri notendum mjög tamt, ekki síst landbúnaðarfólki, en kannski verður hægt að þoka jarðveginum smám saman aftur til moldar eða jarðar.

1.2. Mold sem undirstaða jarðargróðurs og menningar

Stofn orðsins „kúltúr“ tengist hugtakinu að skera, sbr. að uppskera. Það er þó kannski of djúpt í árinni tekið að telja að engin menning hafi risið fyrr en maðurinn bætti jarðrækt við söfnun og veiðimennsku sem aðferð við fæðuöflun, en akuryrkja varð þess þó engu að síður valdandi að borgríki gátu tekið að myndast.

Moldin veitir okkur mönnunum margs kyns þjónustu. Hún er undirstaða meginatvinnuvegar jarðarbúa, sem er landbúnaður; moldin fæðir jafnframt jarðarbúa og klæðir. Stærsta hluta líffjölbreytileika á landi er ennfremur að finna ofan í moldinni og það má t.d. rekja mörg mikilvæg lyf til lífvera í jarðvegi. Moldin er í æ ríkari mæli notuð til framleiðslu á eldsneyti og olíuefnum eftir því sem olíulindir og kolalög í jörðu ganga til þurrðar. En jafnframt verður æ mikilvægara að skila hluta gróðurhúsalofttegunda til moldarinnar (sjá 18. kafla). Það er einnig mikilsvert að hafa í huga að moldin geymir sögu mannsins, hún er beður fyrir fornminjar og varðveitir ennfremur upplýsingar um gróðurfar og loftslag. Í þessari bók er lögð áhersla á að tengja saman mismunandi hluta vistkerfa, moldin þarfnast gróðurs sem keyrir orku inn í lífkerfin (blaðgrænan) í formi lífrænna efna. Án einstakra hluta (t.d. moldar eða gróðurs) hrynur virkni vistkerfanna, svo sem hringrásir vatns og næringar.

Áhersla jarðvegsfræða á landbúnað er skiljanleg – landbúnaður er langsamlega stærsta atvinnugrein veraldar. Það kostar um það bil 50–100.000 kr. að fæða og klæða hvert mannsbarn, og í ljósi þess að jarðarbúar eru um 8 milljarðar er verðmæti afurðanna ansi há tala ár hvert. Umhverfiskostnaður framleiðslunnar er einnig ótrúlega mikill ef hann væri mældur í krónum, og því er verndun jarðvegs meðal mikilvægustu umhverfismála samtímans (sjá 20. kafla). Því miður þarf sífellt að minna á að þróun mannsins og viðhald samfélagsins er háð því hvernig moldu jarðar reiðir af (sjá Hannam og Boer, 2002).

Mynd 1.2. „Jarðvegur“ – plógfarið. Hugsanlega má rekja hugtakið „jarðvegur“ til gamallar þýðingar á latneska hugtakinu „arvum“ – akuryrkjuland. Myndin er tekin úr klassískum texta Charles Kellogg frá 1957.

Á síðustu áratugum hafa vísindamenn tengt þróun fornra menningarríkja við jarðvegsauðlindina og hvernig farið var með hana (t.d. Juo og Wilding, 1997). Fall margra þessara ríkja tengist ofnýtingu jarðvegs og rangri meðhöndlun vatns til áveitu. Í Mesópótamíu, á milli ánna Efrat og Tígris, risu 11 menningarveldi á 7 000 árum sem hnigu til viðar í kjölfar skógarhöggs, ofbeitar og

Mold og menning

Menning mannsins óx upp af moldinni, sem færir honum næringu og klæði, allt frá upphafi landbúnaðar fyrir 10.000–15.000 árum. Alþjóðlegt hugtak yfir menningu (e. culture) merkir einnig að yrkja jörðina, cultivation – jarðrækt eða akuryrkja.

Mynd 1.3. Stór hluti yfirborðs lands á jörðinni er tekinn undir landbúnað – stærstu og mikilvægustu atvinnugrein heimsins sem fæðir og klæðir jarðarbúa. Landbúnaður er afar fjölbreyttur og hefur mismikil áhrif á moldina. Á myndinni sést búfjárræktarhérað á Asoreyjum en moldin þar er svipaðs eðlis og á Íslandi.

eyðingar jarðvegs. Menningarríki Maya í Mið-Ameríku, Grikkland til forna og Rómaveldi eru einnig dæmi um ríki sem risu með auði moldar en hnignuðu síðan með jarðvegsrofi og ofnýtingu.

Moldin við Miðjarðarhafið var frjó í árdaga en nú er hún víða mögur og stutt niður á klöpp. Þessi fornu veldi urðu sífellt víðfeðmari, ekki síst í stöðugri leit að frjórri jörð og öðrum auðlindum. Sem dæmi má nefna að um tíma var Norður-Afríka kornforðabúr Rómaveldis en Líbanon sá því fyrir timbri. Á þessum slóðum er land nú mjög rýrt. Eyðingin á sléttum Norður-Ameríku er nýjasta dæmið um ofnýtingu vistkerfa á mjög stóru landsvæði.

Segja má að á síðustu öldum hafi maðurinn gjörbreytt ásjónu jarðar og getu vistkerfa hnattarins til að framfleyta fólki. Neysla, alþjóðavæðing og fátækt víða um heim er nú helsta ástæðan fyrir ofnýtingu jarðvegs á jörðinni. Björn Sigurbjörnsson ritaði afar fróðlega grein um þetta efni í rit Landgræðslu ríkisins, *Græðum Ísland*, árið 1994, en einnig má benda á greinar Juo og Wilding (1997) og Rubio (1995), bækur Hillel (1991) og Anton Imeson (2012) og almennan texta í bókum og greinum um jarðvegsvernd (e. soil conservation) fyrir þá sem vilja fræðast meira um þetta efni. Síðustu kaflar bókarinnar miða að því að tengja saman jarðvegsfræði, almenna náttúrufræði og umhverfisfræði, en þar er einnig fjallað um ástand lands og hrun vistkerfa á Íslandi.

1.3. Hvað er mold?

Hvað er „mold“ eða „jarðvegur“? Í sannleika sagt er ekki auðvelt að skilgreina þetta fyrirbrigði sem er að mestu falið undir yfirborðinu. Því er það svo að moldin er skilgreind á afar ólíkan hátt eftir því hver á í hlut. Sem dæmi má nefna að margir verkfræðingar kalla öll laus jarðefni á yfirborðinu jarðveg og jarðfræðingar eiga sér að sama skapi aðrar skilgreiningar. Það er full ástæða til að staldra aðeins við moldarhugtakið því oftar en ekki rís vandi er varðar skilgreiningar á viðfangsefni þegar fjallað er um jarðveg, t.d. við umhverfismat, uppgræðslu, vistheimt o.fl.

Flestar eldri skilgreiningar jarðvegsfræðinga á viðfangsefninu mótast af gildi jarðvegs til ræktunar á fæðu og trefjum. Opinber skilgreining bandarískra jarðvegsvísindamanna er mótuð af þessu viðhorfi: „Jarðvegur er náttúruleg eining, gerð af föstu efni (steindum og lífrænu efni), vökva og gasi, og er á yfirborði lands, fyllir rými og einkennist af öðru eða hvorutveggja: jarðvegslögum sem eru greinanleg frá upprunalegu efni vegna viðbóta, taps, flutnings eða umbreytingar orku og efnis, eða hæfileika til að viðhalda plöntum með rætur í náttúrulegu umhverfi.“[1] Það verður nú að segjast eins og er að þetta er ansi tyrfin skilgreining.

Mikið hefur verið skrafað um skilgreiningar á moldinni (sjá t.d. Arnold, 1983) og þær eiga það til að vera

nokkuð flóknar, eins og dæmið hér að framan sannar. Sem dæmi má nefna skilgreiningu Birkelands (1999): „Jarðvegur er náttúruleg eining mynduð af misþykkum jarðvegslögum sem gerð eru úr steinefnum og lífrænum efnum, frábrugðin móðurefnunum í byggingu, eðlis-, efna- og steindaeiginleikum og eiginleikum lífrænna efna.“[2] Þarna er lögð áhersla á þær breytingar sem verða á yfirborðslögunum við jarðvegsmyndun.

Í ljósi mismunandi viðhorfa til þess hvernig skilgreina beri jarðveg er skilgreining FitzPatricks (1983) allrar athygli verð (ekki er gerð tilraun til að þýða hana á íslensku): „A soil is anything so-called by a competent authority.“

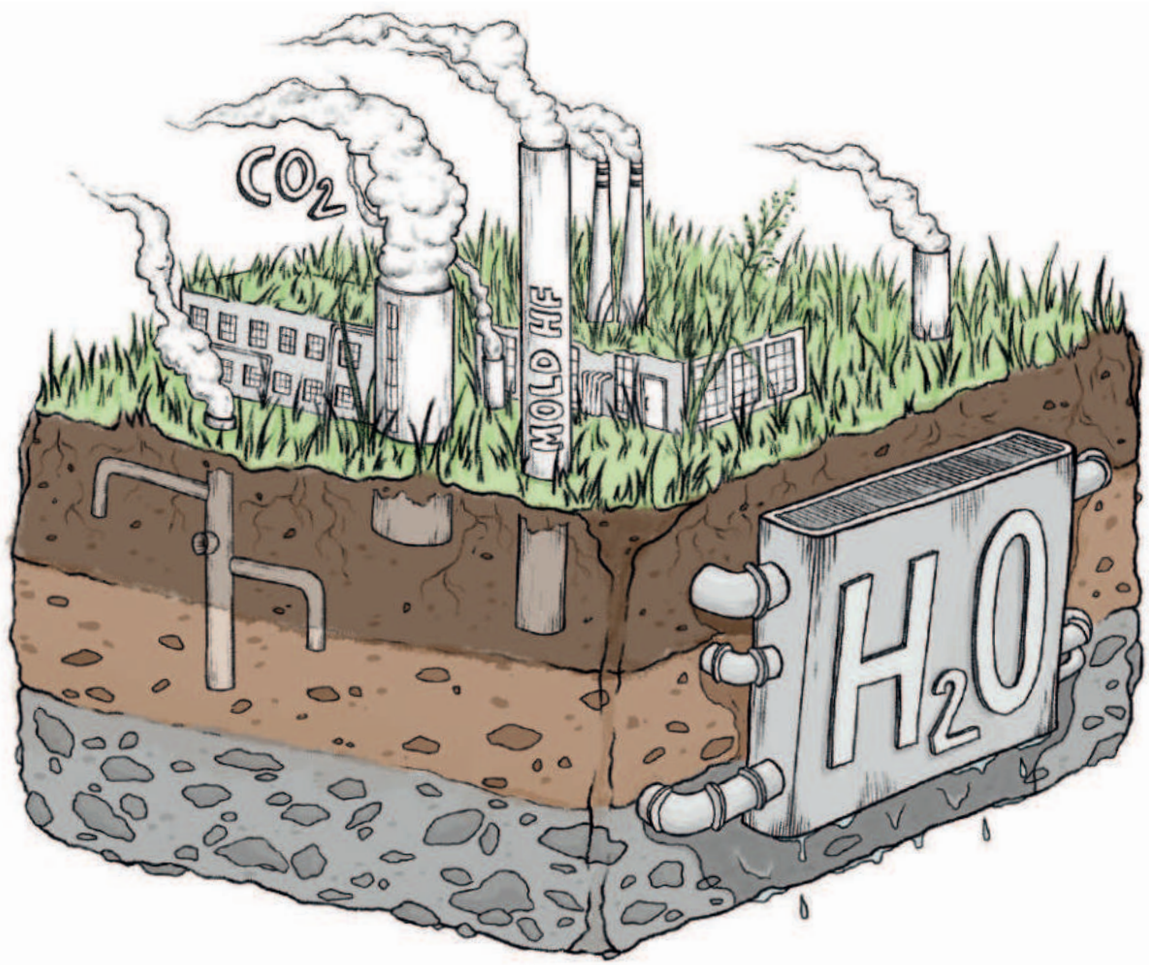
Höfundur þessara orða leggur á það áherslu að mold er virkur miðill lífs, orku, vatns og efnis. Það væri ekki fjarri lagi að lýsa jarðvegi sem eins konar efnaverksmiðju (mynd 1.4) þar sem bergefni brotna niður vegna veðrunar. Hluti efnanna sem losna úr berginu tapast með vatni en önnur verða uppistaða í nýjum efnasamböndum sem falla út (kristallast) í jarðveginum sem leirsteindir.

Lífverur eru helstu drifkraftar orkumiðlunar í þessari efnaverksmiðju en efnaferlin eiga sér stað í vatni. Moldin er hluti hringrásar næringarefna lífríkisins og því safnast ýmiss konar lífrænar sameindir fyrir í jarðveginum. Moldin veðrast hægt en með tímanum verður lítið eftir af hinu upprunalega móðurbergi jarðvegsins; þessi hluti yfirborðsins verður fullkomlega frábrugðinn berginu sem áður var. Því er sett fram tillaga um skilgreiningu hér til hægri:

Skilgreining:
Jarðvegur

Mold (jarðvegur) er hluti lífheimsins undir yfirborði jarðar þar sem efnabreytingar mynda moldarefni (jarðvegsmyndun).

Jarðvegurinn er jafnframt hluti vistkerfa og veitir þeim margs kyns þjónustu, m.a. sem hlekkur í orkunámi og hringrásum orku, næringarefna og vatns.



Mynd 1.4. Moldin er risastór efnaverksmiðja á yfirborði jarðar. Orka fæst úr sólinni, súrefni losnar við ljóstillífun, kolefni er unnið inn í kerfið úr andrúmsloftinu en sleppur einnig út við öndun (CO_2). Lífræn efni safnast í efsta lagið (A) og þar fer fram hringrás næringarefna. Leir er „framleiddur“ í moldinni, einkum í B-laginu, og smám saman nær veðrunin lengra niður (C-lag). Vatn er mikilvægur miðill efnahvarfa í kerfinu.

Íslendingar hafa stundum nokkuð aðra mynd af því en aðrir hvað jarðvegur sé. Sýn margra beinist fyrst og fremst að þeirri mold sem er brún og lífræn, helst með gjóskulögum. Það hefur jafnvel verið dregið í efa að auðnir, sem eru stór hluti yfirborðs landsins, hafi jarðveg – já eða mold.

Höfundi þessara lína líður seint úr minni þegar forystumaður í landbúnaði stóð upp á fræðslufundi og mótmælti þeirri staðhæfingu bókarhöfundar að allt yfirborð íslensku auðnanna væri þakið jarðvegi. Það er vitaskuld svo að allt yfirborð landsins er hulið mold, en hún er misþróuð og afar misfrjósöm. Í jarðvegi auðna er hlutfallslega lítið af lífrænum efnum og minna af leirsteindum sem myndast hafa í jarðveginum; alls staðar má þó finna einhver ummerki efnabreytinga, eða með öðrum orðum: jarðvegsmyndunar.

Höfundur átti eitt sinn í bréfaskriftum við erlendan jarðfræðing sem átti í miklum örðugleikum með að sjá íslenska *brúnjörð* sem jarðveg (e. soil) því að hans mati var sú mold er hann sá á Íslandi fyrst og fremst ómótað vindborið set.

Ástæðan fyrir þessum misskilningi er sú að erlendir náttúrufræðingar eru oftast vanir afar frábrugðnum jarðvegi með öðrum ummerkjum jarðvegsmyndunar en einkenna íslenskan jarðveg, t.d. mun skýrari merkjum um klassíska lagskiptingu (A-B-C, sjá síðar í þessu riti) en er að finna í íslenskum jarðvegi. Þá hafa staðhæfingar í íslenskum kennslubókum (m.a. í jarðfræði og kennslubókum um náttúrufræði), þess efnis að á Íslandi eigi sér stað lítil efnaveðrun og jarðvegsmyndun, ekki hjálpað til við að auka skilning á eðli íslensks jarðvegs.

Fyrrnefndar staðhæfingar eru fjarri sanni. Þetta er bagalegt og það er afar mikilvægt að breyta því viðhorfi að íslensk mold sé frekar dautt og ómótað efni, það er hún svo sannarlega ekki.

Tafla 1.1. Jarðvegsfræði kvíslast í margar undirgreinar.

UNDIRGREIN	UNDIRGREIN (E.)	LÝSING
Jarðvegseðlisfræði	Soil Physics	Rennsli vatns í jarðvegi, jarðvegur sem byggingarefni, hiti, frost, holrými o.fl.
Jarðvegsefnafræði	Soil Chemistry	Efnafræði, m.a. miðlun næringarefna, sölt í jarðvegi, efnaveðrun o.fl.
Flokkun og kortlagning	Classification and Survey	Flokkunarkerfi, lýsing jarðvegs, kortlagning.
Jarðvegsmyndun	Soil Genesis	Þróun jarðvegs, myndun jarðvegslaga, efnaveðrun o.fl.
Jarðvegslífræði	Soil Biology	Lífræði jarðvegs, lífverur, kolefni, umsetning næringarefna o.fl.
Jarðvegssteindafræði	Clay Mineralogy	Eiginleikar, myndun og greining steinda, veðrun.
Jarðvegs-næringarfræði	Soil Fertility	Miðlun næringarefna, áburðarfræði.
Moldin og umhverfið. Ástand lands, jarðvegsrof, jarðvegsvernd.	Soil Erosion Conservation Land condition	Ástand lands, hnignun, jarðvegsrof, jarðvegsvernd, ferli, líkön, kortlagning, umhverfislög og stjórnun.

1.4. Jarðvegsfræði – moldarfræði

Moldin er vettvangur sérstakrar vísindagreinar, jarðvegsfræðinnar – moldarfræði. Þessi fræðigrein þróaðist seint sé miðað við margar aðrar greinar náttúruvísinda. Jarðvegurinn er ekki sýnilegur en þó er skýringa á mörgu í náttúrunni fyrst og fremst að leita í honum. Framan af var jarðvegurinn óræður og myrkur heimur þangað til að þróuð var mælitækni til að greina byggingareiningar og eiginleika hans.

Rekja má árdaga jarðvegsfræðinnar til Rússaveldis á tímum keisaranna, en maður að nafni Dokuchaev (1846–1903) uppgötvaði að umhverfisþættir á borð við loftslag mótuðu jarðvegslögin undir yfirborðinu. Jarðvegsfræði stendur enn mjög traustum fótum í Rússlandi, en hún þróaðist líka hratt í upphafi 20. aldar í Þýskalandi. Síðar urðu framfarir mestar í Bandaríkjunum en fagið er nú orðið afar fjölþjóðlegt í eðli sínu og alþjóðleg samvinna er mikil. Jarðvegsfræðin er mikilvæg forsenda grænu byltingarinnar og hún hefur lengst af verið tengd landbúnaðarfræðum, m.a. í háskólum. Þó er talið að aðeins 5% þess fjár sem varið er til landbúnaðarrannsókna í heiminum renni til jarðvegsrannsókna (Yaalon, 2000).

Jarðvegsfræði er kennd sem sérstök vísindagrein í flestum háskólum þar sem lögð er stund á náttúruvísindi, landbúnaðarvísindi og umhverfisfræði. Hún skiptist í margar undirgreinar, eins og sjá má í töflu 1.1. Ýmsar kvíslar raunvísinda mætast á miðri leið í jarðvegsfræðinni, t.d. jarðfræði, líffræði, vistfræði, eðlisfræði og efnafræði, en þetta gerir hana að skemmtilegu viðfangsefni fyrir þá sem hafa áhuga á mörgum sviðum náttúrufræða – moldin er „vísindagrein fyrir fjölfræðinga“.

1.5. Ræktun, umhverfisvísindi, vistfræði

Mikilvægi moldarinnar fyrir fæðuframleiðslu hefur verið manninum ljós allt frá því að hann tók að yrkja jörðina. Jarðvegsvísindi hafa því löngum verið tengd akuryrkju, enda er framleiðsla fæðu og trefja langstærsta atvinnugrein mannsins, eins og áður gat, framleiðsla sem byggist á gæðum moldarinnar. Landbúnaður, og þá einkum akuryrkja, hefur löngum verið talinn helstu notin sem maðurinn hefur af moldinni.

Nýtingin hefur oft leitt til misnotkunar, ekki síst þegar reynt er að ná sem mestum ágóða á sem stystum tíma við ræktun eða búfjárbeit. Þeir sem yrktu jörðina gerðu sér iðulega ekki grein fyrir hve viðkvæm auðlind hún er – jarðvegur getur hæglega gengið fullkomlega úr sér á fáum árum eða áratugum.

Viðhorf mannsins til þessarar mikilvægustu auðlindar jarðarinnar hefur þó heldur betur breyst á undanförnum árum. Mönnum er nú æ ljósara að moldin er ekki aðeins efni til ræktunar, heldur risastór miðlun fyrir vatn og næringarefni; móðir jörð sem fóstrar allan jarðargróður. Moldin er að auki miðlæg í losun og bindingu gróðurhúsalofttegunda. Þó er það svo að moldarvísindi standa iðulega of einangruð frá öðrum fögum, t.d. í umfjöllun jarðvegsvísindamanna, eins og að moldin geti ein og sér séð fyrir öllum jarðarbúum. Gróðursérfræðingar eiga það einmitt til að einangra sín fög of mikið, t.d. í gróðurvistfræði þegar aðeins er litið til tegunda plantna án þess að tengja þau við jarðveginn. Beitarfræði snýst sömuleiðis ekki aðeins um dýr og gróður heldur vistkerfi í heild; áhrif nýtingar eru oft hvað mest og varanlegust á moldina. Það er mikilvægt að líta á moldina sem hluta af vistkerfum, það verða jarðvegsfræðingar jafnt sem aðrir náttúruvísindamenn að temja sér.

1.6. Jarðvegsvísindi á Íslandi

Jarðvegsvísindi á Íslandi spruttu upp úr jarðfræði annars vegar og ræktunarfræðum hins vegar.

Öskulög í íslenskum jarðvegi eru óvenjulega vel varðveitt og fjöldinn er einnig meiri en gengur og gerist. Það er því þessi hluti íslenskrar moldar sem augu manna hafa fyrst og fremst beinst að. Það er engin tilviljun að gjóskulagafræði (e. tephrochronology) þróaðist fyrst á Íslandi í heiminum með vinnu Sigurðar Þórarinssonar o.fl. um miðja síðustu öld. Gjóskulög í jarðvegi eru notuð við margvíslegar rannsóknir og gjóskulagafræði stendur með miklum blóma hér á landi. Þetta hefur þó valdið því að oft er fyrst og fremst litið til gjóskulaga þegar jarðlagasnið eru skoðuð en ekki til jarðvegsins sem auðlindar.

Sú ræktunarmenning sem spratt upp með tæknivæðingu í sveitum kallaði á rannsóknir á notkun áburðar, framræslu og fleiru er tengist landbúnaði. Mörg rit og ritgerðir hafa verið birtar á þessum sviðum, m.a. í tímaritunum *Íslenskar landbúnaðarrannsóknir* og *Búvísindi*, en einnig sem margvísleg fjölrit, m.a. Fjölrit Rala (nú hluti Landbúnaðarháskóla Íslands) og í ritröðinni *Fræðaþing landbúnaðarins*.

Þessar tvær megináherslur, gjóskulög og ræktun, hafa að hluta til einkennt jarðvegsfræðina á Íslandi en einnig leitt til þess að fáir hafa menntast á þessu sviði hér á landi. Því hefur almennt efni um jarðvegsfræði verið af skornum skammti þar til nú. Rit Björns Jóhannessonar frá 1960, *Íslenskur jarðvegur*, var notað til kennslu sem og *The Soils of Iceland* eftir höfund þessa rits (2015). Árið 2018 birtist síðan bók Þorsteins Guðmundssonar, *Jarðvegsfræði. Myndun, vist og nýting*. Fyrri hluti þessarar bókar hér á margt sameiginlegt með riti Þorsteins þar sem fjallað er um jarðvegsfræði og er lesendum bent á að kynna sér það, ekki síst nemendum sem eru að öðlast skilning á ferlum og hugtökum.

Í þessu riti um moldina er hins vegar lögð mun ríkari áhersla á náttúru landsins og ástand lands, umhverfismál og fleiri þætti, og efnistök eru að mörgu leyti ólík efnistökum Þorsteins.

Um heimildir og endurtekningar

Rit af því tagi sem hér um ræðir eru iðulega notuð sem uppflettirit um ákveðna þætti. Mörg atriði sem lesandinn kýs að kynna sér krefjast skilnings á undirstöðuatriðum sem tafsamt getur verið að kafa eftir í öðrum köflum ritsins. Reynt er að auðvelda lesendum notkun ritsins með því að endurtaka stuttlega mörg mikilvæg þekkingarbrot á milli kafla og þá með tilvísun í ítarlegri umfjöllun í öðrum köflum.

Heimildalisti fylgir hverjum kafla fyrir sig til þess að auðvelda lestur um hvert umfjöllunarefni hverju sinni. Almenn rit um efni hvers kafla eru nefnd í stuttu máli á undan eiginlegum heimildalistum. Þegar vitnað er til höfundar ritsins er tilvitnun skammstöfuð sem ÓA (t.d. ÓA 2015).

Heimildir

Sú kennslubók sem langmest er notuð við kennslu í jarðvegsfræði er kennd við N.C. Brady: *The Nature and Properties of Soils.* Reyndar eru tveir höfundar að bókinni nú (Brady og Weil og síðar Weil og Brady). Sem dæmi um vinsældir þessarar bókar má nefna að nýjasta útgáfa hennar er sú 16. í röðinni. Hún er einnig til í styttri útgáfu sem tekur mið af almennri kennslu, m.a. í umhverfisfræðum: *Elements of the Nature and Properties of Soils.*

Að auki er til fjöldinn allur af öðrum kennslubókum í almennri jarðvegsfræði og eru nemendur hvattir til að kynna sér það úrval á veraldarvefnum. Síðan er til mikið ritað efni um einstök undirfög jarðvegsfræðinnar, svo sem líffræði og örverufræði, eðlisfræði, efnafræði, jarðvegsmyndun, rit um einstaka jarðvegsflokka o.s.frv.

Vert að vekja athygli á afar yfirgripsmikilli bók um jarðveg: *Handbook of Soil Science* (REF). Bókin fjallar um allar hliðar jarðvegsfræðinnar, en er jafnframt aðgengileg og textinn skýr. Til eru þrjár aðrar meginútgáfur af alfræðiritum um jarðveg. Útgáfa Kluwers (Chesworth, 2008), sem mælt er eindregið með, er í einu þykku hefti. Að auki eru *Encyclopedia of Soil Science* (Lal, 2007) og *Encyclopedia of Soils in the Environment* (Hillel, 2005).

Fagfélag jarðvegsfræðinga í Bandaríkjunum (Soil Science Society of America) hefur gefið út margar bækur um jarðveg. Kosturinn við þá útgáfustarfsemi er að hún hefur ekki hagnaðarsjónarmið að leiðarljósi, bækurnar eru því hlutfallslega ódýrar, auk þess sem fagfélagið gerir miklar kröfur um fagleg gæði. Mörg tímarit eru helguð jarðvegsfræði, m.a. *Soil Science*, *American Journal of Soil Science*, *Catena*, *Geoderma*, *European Journal of Soil Science*. Mörg stærri ríkja heims gefa út sérstök tímarit helguð jarðvegi (t.d. *Australian Journal of Soil Science* og *Canadian Journal of Soil Science*), en auk þess má finna greinar um mold í hinum ýmsu tímaritum um náttúrufræði og umhverfi, t.d. *Journal of Arctic, Antarctic and Alpine Research*, og ekki síður í ritum um landbúnað, t.d. í hinu íslenska *Icelandic Journal of Agricultural Sciences*.

Nú er þó svo komið að auðvelt er að sækja sér efni á veraldarvefinn um flestar hliðar jarðvegsfræða. Þar er rétt að benda á mikinn fróðleik sem gefinn hefur verið út af stofnunum Sameinuðu þjóðanna (FAO, UNEP, UNCCD), Evrópusambandinu, bandarískum alríkisstofnunum (NRCS-USDA) o.fl. aðilum. Þessar útgáfur eru yfirleitt mjög aðgengilegar og ríkulega myndskreyttar. Þá er einnig hægt að finna fyrirlestra og glæruefni víða um vefinn.

Arnold, R.W. 1983. Concepts of soils and pedology. Í: L.P. Wilding, N.E. Smeck og G.F. Hall (ritstj.), Pedogenesis and Soil Taxonomy. I. Concepts and Interactions. Bls. 1–21. Elsevier, Amsterdam.

Birkeland, P.W. 1999. Soil and Geomorphology. 3. útg. Oxford University Press, New York.

Björn Jóhannesson 1960. Íslenskur jarðvegur. Rannsóknastofnun landbúnaðarins (nú LbhÍ), Reykjavík. Endurprentun 1988 með viðauka.

Björn Sigurbjörnsson. 1994. Jarðvegseyðing – mesta ógn jarðarbúa. Græðum Ísland V:45–56. Ritstjóri Andrés Arnalds. Landgræðsla ríkisins.

Brady, N.C. og R.R. Weil. 2002. Elements of the Nature and Properties of Soils. 2. útg. Pearson-Prentice Hall, New Jersey, USA.

Dixon, J.B. og D.G. Schulze (ritstj.). 2002. Soil Mineralogy with Environmental Applications. Soil Science Society of America Book Series 7, Madison, Wisconsin. Bls. 389–414.

FitzPatrick, E.A. 1983. Soils. Their formation, classification and distribution. Longman Group Limited, Harlow, Essex, UK.

Hannam, I. og B. Boer. Legal and Institutional Frameworks for Sustainable Soils. IUCN Environmental Policy and Law Paper No. 45; Bonn, Þýskaland.

Hillel, D. (ritstj.). 2005. Encyclopedia of Soils in the Environment. Elsevier, Amsterdam, Holland.

Hillel, D.J. 1991. Out of the Earth. Civilization and the Life of the Soil. The Free Press, New York. USA.

Imeson, A. 2012. Desertification, land degradation and sustainability. Paradigms, processes, principles and policies. Wiley-Blackwell, Chichester, UK.

Juo, A.S.R. og L.P. Wilding. Land and Civilization. Journal of Sustainable Agriculture 10:3–7.

Kellogg, C. (ritstj.) 1957. Soil. USDA Yearbook of Agriculture, USDA, Washington, USA.

Lal, R. (ritstj.) 2007. Encyclopedia of Soil Science. Dekker, New York, USA.

Ólafur Arnalds. 1996. Jarðvegsfræði. Reykjavík. Útgefið af höfundi.

Ólafur Arnalds. 2015. The Soils of Iceland. Springer, Dordrecht, Holland.

Rubio, J.L. 1995. Desertification: evolution of a concept. Í: Desertification in a European Context. Physical and Socio-economic Aspects. R. Fantechi, D. Peter, P. Balabanis og J.L. Rubio (ritstj.). European Commission, Report EUR 15415 EN, Brussels. Bls. 5–13.

Þorsteinn Guðmundsson. 1994. Jarðvegsfræði. Reykjavík. Búnaðarfélag Íslands. Reykjavík.

Þorsteinn Guðmundsson. 2019. Jarðvegsfræði. Myndun, vist og nýting. Háskólaútgáfan, Reykjavík.

Eftirmálsgreinar

1. „A soil is a natural body comprised of solids (minerals and organic matter), liquid, and gases, that occurs on the land surface, occupies space, and is characterized by one or both of the following: horizons, or layers, that are distinguishable from the initial material as a result of additions, losses, transfers, and transformations of energy and matter, or the ability to support rooted plants in a natural environment“ (Soil Taxonomy; USDA-NRCSS, 1999). Eldri útgáfa af þessari skilgreiningu er eftirfarandi: „The collection of natural bodies on the earth's surface, in places modified or even made by man, of earthy materials, containing living matter and supporting or capable of supporting plants out of doors.“

2. „A soil is a natural body consisting of layers (horizons) of mineral and/or organic constituents of variable thicknesses, which differ from the parent materials in their morphological, physical, chemical, and mineralogical properties and their biological characteristics.“ Birkeland 1999 (bls. 2).

2 Bergefni í moldinni

Mynd 2.1. Bergefni mynda móðurefni moldar. Þau eru af margvíslegri gerð, stærð, efnasamsetningu og kristalbyggingu. Sum bergefnanna – leirsteindir – myndast í moldinni. Á myndinni ber mikið á líparíti sem bergefni, en jarðvegsrof hefur fjarlægt mikið af þeirri mold sem hér hafði þróast og aukið á berangurinn sem opnar sýn á bergefnin.

Bergefni og lífræn efnasambönd eru grunneiningar moldarefna – en moldarefni teljast þær agnir sem eru minni en 2 mm í þvermál. Grófari bergefni taka lítinn þátt í starfsemi moldarinnar. Inn á milli þeirra er holrými sem ýmist er þurrt og fyllt lofttegundum á borð við súrefni og koltvísýring eða að hluta eða öllu leyti fyllt vatni (mynd 2.2).

Í vatninu eru margvísleg efni sem taka þátt í lífsstarfsemi og efnahvörfum í moldinni. Bergefni eiga sér uppruna í því bergi sem var til staðar þegar jarðvegurinn tók að myndast eða eru steindir og önnur efnasambönd sem myndast við lífsstarfsemi og efnaveðrun í moldinni sjálfri (sjá 8. kafla um jarðvegsmyndun). Að auki geta bergefni bæst við moldina við setflutninga með vatni og vindi, t.d. með áfoki, sem er heldur betur ráðandi þáttur í jarðvegsmyndun á Íslandi.

Bergefni í jarðvegi eru flokkuð eftir gerð þeirra og kornastærð. Smæstu bergefnin teljast til svokallaðra örefna (e. colloids – sem einnig teljast lífræn efni). Meginhluti bergefna í þessum flokki eru leirsteindir. Örefnin, þ.e. leirsteindir ásamt lífrænum efnasamböndum, ljá moldinni flesta af mikilvægustu eiginleikum hennar, svo sem efnavirkni og vatnsheldni. Því er lögð áhersla á leirsteindir í þessum kafla um bergefni en síðar fjallað um lífræn efni.

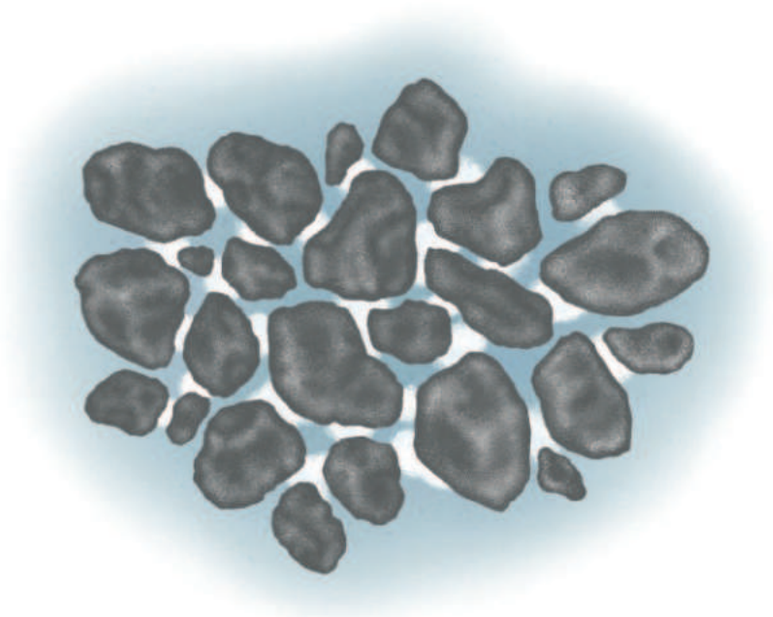
Efnistök í þessum kafla eru almenns eðlis, en svipaða kafla er að finna í flestum kennslubókum og alfræðiritum um jarðveg (t.d. Weil og Brady 2017) – en sjónarhóllinn er þó íslenskur. Sjónum verður einkum beint að kornastærð og leirsteindum en í 8. kafla er fjallað um jarðfræði og bergtegundir í tengslum við jarðvegsmyndun. Leirsteindafræðin stendur traustum fótum innan jarðvegsfræðinnar, enda myndast flestar algengustu leirsteindirnar fyrst og fremst í jarðvegi.

Ummyndun bergs stuðlar einnig að myndun leirsteinda. Hérlendis myndast leirsteindir ennfremur á háhitasvæðum – steindir sem algengar eru erlendis, t.d. götheít, klórít og smektít. Að auki myndast margvíslegar holufyllingar í bergi, t.d. geislasteinar (e. zeolites).

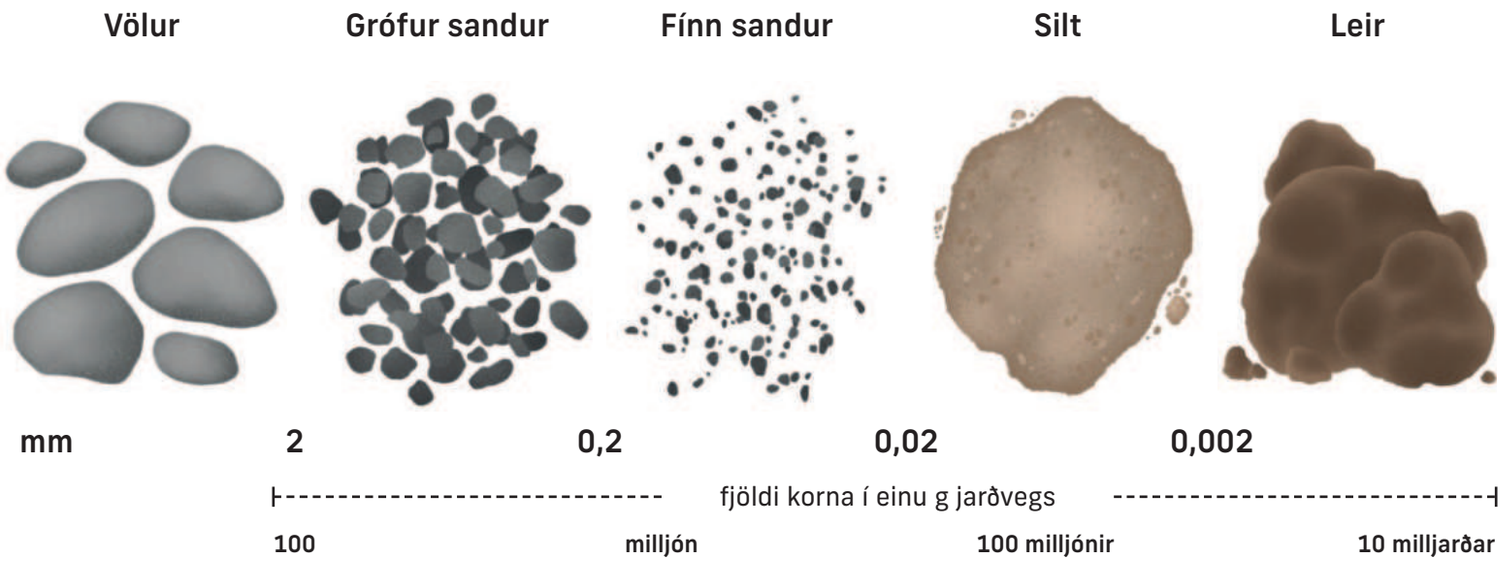
2.1. Kornastærð

Bergefnum í jarðvegi er skipt í fjóra flokka eftir kornastærð: völur, sand, silt og leir (mynd 2.3). Stundum er því haldið fram að silt verði fyrst og fremst til við svörfun jökla en leir við efnaveðrun í mold.

Mörg ferli geta af sér sandinn, m.a. svörfun vatnsfalla, sjávar, jökla sem og hitabrigði og frostveðrun. Þá geta allar þessar kornastærðir losnað við veðrun og rof á setlögum, þ.e. sandsteini, siltsteini eða ýmsum setlögum ríkum af leir. Hugtakið „silt“ er notað um millistærð korna (0,002–0,02 mm) en heitið „méla“ hefur einnig verið notað á íslensku, líklega til að endurspegla tilurð þessa efnis við svörfun jökla, að „mylja bergið mélinu smærra“. Hugtakið „méla“ hefur því ákveðna kosti og Þorsteinn Guðmundsson (2018) notar



Mynd 2.2. Inn á milli bergagna og lífrænna efna er loftrými sem rúmar vatn og gas.



Mynd 2.3. Flokkun bergefna í mold eftir stærð (mm). Eins og sjá má er skalinn stigfallandi, kornin verða tífalt minni með hverjum flokki. Eins og sjá má eru um 100 milljónir korna í hverju grammi silts en tugir milljarða í hverju grammi leirs.

það í jarðvegsfræðibók sinni. Orðið „silt“ fellur hins vegar betur að alþjóðlegum hefðum en orðið méla og auðveldar nemendum að tileinka sér fræðin. Þetta er þokkafullt nafn og vinsæl rokkhljómsveit að nafni „Botnleðja“ tók einmitt upp enska hljómsveitarnafnið „Silt“, sem var vel við hæfi. Siltkorn sjást ekki með berum augum og áferðin minnir á hveiti. Íslenskir jöklar eru gríðarlega mikilvirkir við framleiðslu á silti (mynd 2.4) og þeir endurspegla aðstæðurnar sem einkenndu jökla-umhverfi norðurhvels jarðar á ísöldum sem m.a. gáfu af sér víðáttumikil og þykk setlög sem einkennast af silti (löss, e. loess). Lösslögin mynda nú frjósömustu ræktarsvæði Evrópu og Bandaríkjanna og er fjallað nánar um þau síðar í þessu riti. Fjallað er um silt með tilliti til frostnæmi og jarðverkfræði í 6. og 16. kafla.

Völur eru stærri en 2 mm í þvermál (steinar, grjót) og ekki taldar til virkra moldarefna og því er horft fram hjá þeim þegar kornastærð er flokkuð samkvæmt kornastærðarþríhyrningi (sjá síðar). Grjótvölur hafa eigi að síður mikil áhrif á moldina; þær minnka hlutfall og þar með heildarrúmmál virkra moldarefna. Grjótið hefur áhrif á frosthreyfingu og ýmsa eðlisþætti jarðvegsins sem og ræktunarhæfni hans.

Nokkuð er á reiki hvar skilin eru dregin milli sands og silts í ólíkum flokkunarkerfum fyrir laus jarðefni. Hér er miðað við 0,02 mm en stundum eru skilin dregin við 0,05 mm. Hlutföll sands (>0,02 mm), silts (0,002–0,02 mm) og leirs (<0,002 mm) eru notuð til þess að flokka kornastærð jarðvegs í 12 flokka. Þá er stuðst við svokallaðan kornastærðarþríhyrning (mynd 2.5). Hann er alls ekki eins flókið fyrirbrigði og kann að virðast við fyrstu sýn. Þrír ásar þríhyrningsins endurspegla hlutfall hvers kornastærðarflokks. Ásinn sem vísar upp gefur til kynna hlutfall leirs (%), hlutfall sands er sýnt niðri til vinstri á þríhyrningnum en hlutfall silts til hægri.

Blanda allra kornastærða er nefnd „loam“ á ensku en viðskeytið -mold er notað sem þýðing á „loam“, þannig að „silt loam“ er þýtt sem siltmold en „loamy“ sem myldinn, sbr. myldinn leir (e. loamy clay). Það er þó ókostur að orðið „mold“ er einnig notað í sömu merkingu og jarðvegur, en hér er verið að lýsa mismunandi „mold“ út frá kornastærð sem styður þessa notkun

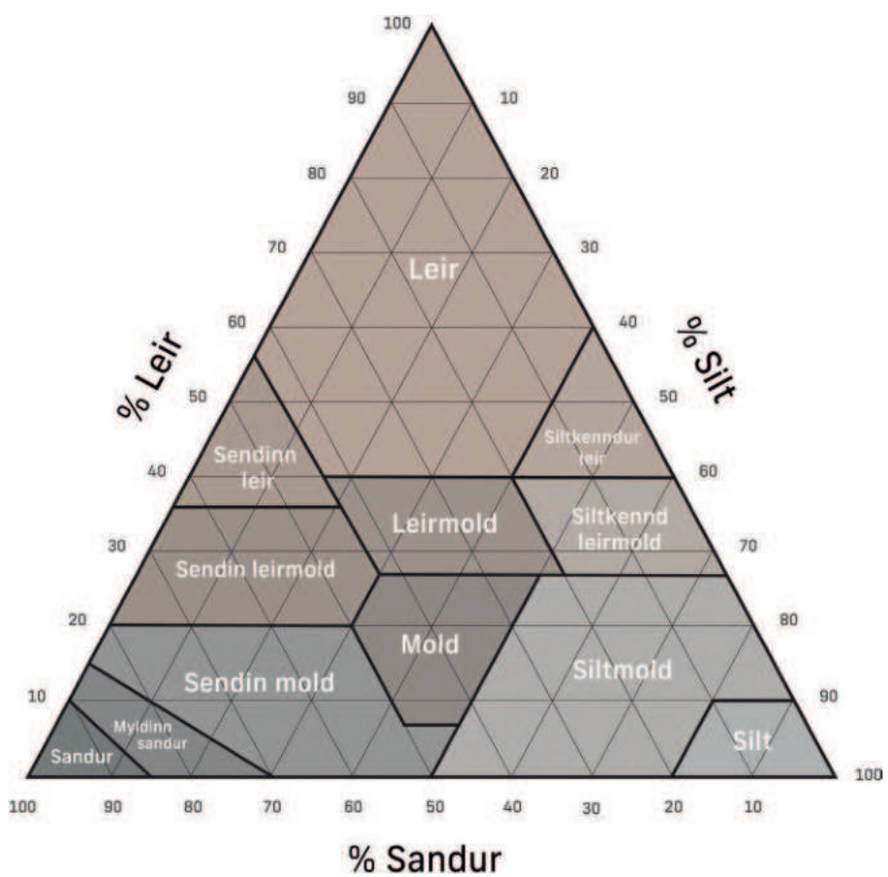
Silt mótar náttúru landsins

Silt er víðast hvar ráðandi kornastærð í íslenskum jarðvegi. Siltinu fylgja mikilvægir eðliseiginleikar, svo sem ör vatnsleiðni, sem veldur því að jarðefni verða viðkvæm fyrir frosti og hætta er á skriðuföllum.

Mynd 2.4. Jökulumhverfið. Gríðarlega mikið magn fokefna getur borist frá jökuljöðrum og myndað áfok – þykk setlög fjarri upprunastað sem nefnd eru löss. Áfok hefur afgerandi áhrif á myndun íslensks jarðvegs. Myndin sýnir Mælifellssand og Mýrdalsjökul, Mælifell vinstra megin við miðju. Nokkuð fok á sér stað í fremur stilltu en þurru veðri (2020).

á hugtakinu. Finnist annað betra orð er sjálfsagt að breyta til.

Kornastærðarþríhyrningurinn (mynd 2.5) (ósköp er þetta langt orð!) er mikilvægt tæki í jarðvegsfræði því að með því að tiltaka kornastærðarflokkinn fást hagnýtar upplýsingar um moldina. Erlendir bændur sem plægja jörðina hafa gjarnan ýmis önnur hugtök um kornastærð á hraðbergi, enda eru ræktunarskilyrði mjög breytileg eftir því hver kornastærðin er.



Mynd 2.5. Kornastærðarþríhyrningurinn. Kornastærðin er flokkuð eftir hlutföllum leirs, silts og sands. Hugtakið mold er notað um „loam", sökum vöntunar á betra íslensku hugtaki. Mold er blanda kornastærðanna. Leirmold er blanda sem er rík af leir, siltmold er blanda sem er rík af silti o.s.frv. Siltmold er algengasta kornastærðin á Íslandi.

Tungumál þjóða sem búa yfir ríkri hefð í akuryrkju eiga gnótt hugtaka sem lýsa eiginleikum þessara flokka (t.d. þung *leirjörð*). Leirríkur jarðvegur (leir, sendinn leir, siltkennd leirmold) er oft erfiður í ræktun, mikla orku þarf t.d. til að plægja slíka mold en hún varðveitir raka mjög vel.

Bestu skilyrðin til ræktunar eru að jafnaði í moldarflokkunum (e. loam), þ.e. mold, leirmold, siltmold og sandmold. Sendinn jarðvegur loftar vel en helst illa á vatni og hentar því illa til ræktunar á þurrum svæðum. Silt leiðir vatn greiðlega um jarðveginn, sem getur verið mikill kostur en veldur því að þar sem jörð frýs verður frostverkan mikil (frostnæmi, e. frost susceptibility, sjá 16. kafla um frost og mold). Af þessum dæmum má sjá að hegðun jarðvegs er afar misjöfn eftir kornastærð.

Kornastærð hefur afgerandi áhrif á hversu hætt moldinni er við rofi af völdum vatns og vinda. Siltkornum ásamt fínum sandi er hættast við bæði vatns- og vindrofi. Siltkornin eru létt og því þarf lítinn vind eða vatnsrennsli til að hreyfa við þeim. Að auki skortir þau samloðun sem gæti hamlað rofi. Leirkornin loða yfirleitt vel saman sem minnkar hættu

á rofi. Því minnkar rofgirni með auknu hlutfalli leirs í moldinni. Fínum sandi er almennt hætt við rofi en hættan minnkar með vaxandi kornastærð því þá þarf sífellt meiri orku til þess að hreyfa við kornunum. Kornastærð er mikilvægur þáttur í alþjóðlegum líkönum sem notuð eru til að spá fyrir um vatnsrof eða vindrof við mismunandi aðstæður.

Kornastærð er lykilþáttur í líkönum um afdrif regnvatns og vatnshag (e. hydrology). Kornastærð kemur jafnvel fyrir sem þáttur í gríðarlega flóknum útreikningum veðurspálíkana sem keyrð eru á ofurtölvum samtímans. Rakaheldin mold skilar t.d. uppgufun á heitum dögum, sérstaklega ef vatnsleiðnin er góð (siltkennd mold), sem getur haft áhrif á þróun veðurkerfa og veðurfars yfir landi. Jarðvegsgögn eru því notuð við gerð veðurspáa, m.a. í líkönum sem notuð eru fyrir Ísland.

2.2. Leirsteindir

Sem dæmi um mikilvægi leirs má nefna að þótt leirinnihald jarðvegs sé aðeins 1% er nær öll efnavirkni moldarinnar bundin við leirinn – nema umtalsvert magn lífrænna efna sé til staðar. Á hinn bóginn ber að geta þess að yfirborð og efnavirkni leirsteinda er misjöfn eftir því hvaða leirsteind á í hlut, en þær eru afar fjölbreytilegar að gerð. Sem fyrr sagði myndast leirsteindirnar við efnaveðrun í jarðveginum, en þær geta einnig verið til staðar sem hluti bergefnanna sem jarðvegurinn myndast í (t.d. leirrík setlög og leirsteinn).

Ástæðuna fyrir hinni miklu efnavirkni leirs má rekja til smæðar leiragnanna. Flestar leirsteindir sem finnast í mold erlendis eru blaðlaga silíköt (ýmist nefnd blaðsilíköt eða lagsilíköt, e. phyllosilicate, layer silicate) þar sem grunneiningar, nokkur atóm á þykkt, raðast upp í tvær áttir og öðlast þá gríðarlegt yfirborðsflatarmál miðað við þykkt. Eins og nafnið silíkat gefur til kynna er kísill (e. silica) grunneining í þessum lögum. Reyndar eru einnig til leirsteindir þar sem ál og járn eru uppistaðan í grunneiningunum, eins og síðar verður vikið að.

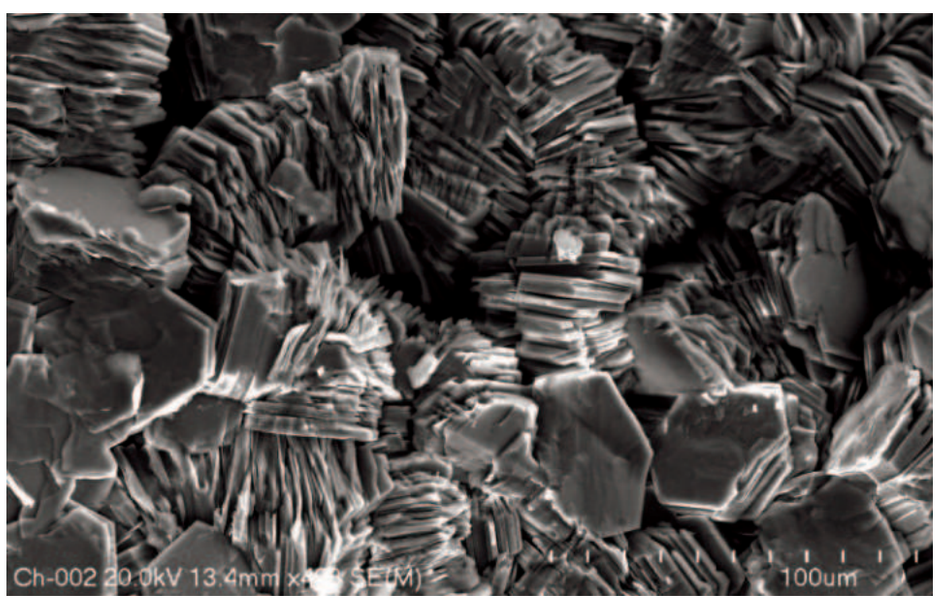
Lögin í steindunum raðast hvert ofan á annað svo að úr verður hlaði örmjórra blaða (mynd 2.6). Á milli hvers lags er rými sem er oftast nægjanlegt til þess að vatnssameindir geti smogið inn á milli grunneininganna. Þessum hlaða mætti líkja við bók í stóru broti með mjög mikið flatarmál (margir hektarar ef réttum hlutföllum er haldið) en inn á milli blaðsíðnanna væri rými sem vatn og uppleyst efni gætu borist um. Þetta veldur því að leirsteindir af þessu tagi hafa ótrúlega mikið yfirborðsflatarmál. Þannig getur 1 g af smektíti (algengur leir) haft allt að 800 m² yfirborð! Eitt gramm efnisins samsvarar botnfylli í teskeið. Það er mjög erfitt að sjá fyrir sér eða skynja hvað þetta yfirborðsflatarmál er rosalega mikið.

Til skýringar mætti taka sem dæmi furunál sem væri lögð við hlið Hallgrímskirkju. Ef við ímyndum okkur að sandkorn sé á stærð við Hallgrímskirkju

Leir ræður efnavirkni og vatnsheldni í mold

Efnavirkni og vatnsheldni moldarefna er mjög háð kornastærð. Sandur og silt hafa lítið yfirborð á hverja þyngdareiningu (m²/g) og því hafa þessar kornastærðir mjög litla efnavirkni og halda litlu vatni.

Leirinn hefur aftur á móti mjög mikla efnavirkni og getur bundið ógrynni vatns. Því eru leirsteindir mikilvægastar af bergefnunum með tilliti til efnaeiginleika moldarinnar og vatnsheldni.

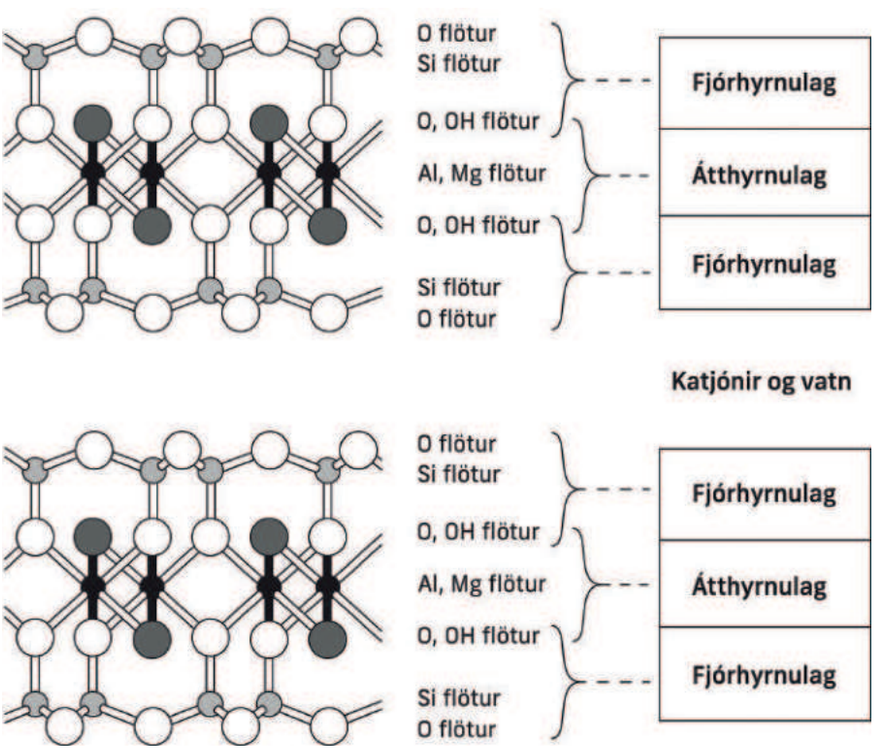


Mynd 2.6. Hlaðar af lögum leirs (blaðsilíkat). Járnríkt klórít. Myndin er tekin með rafeindasmásjá. Inn á milli laganna eru bil sem vatn getur borist um. Yfirborðsflatarmál leirsins er því gríðarlegt á hvert gramm efnis. Mynd: Michal Skiba. Myndin er fengin af vef „Images of Clay Archive“ of the Mineralogical Society of Great Britain & Ireland and The Clay Minerals Society (https://www.minersoc.org/images-of-clay.html).

þá væri stærð leiragnar svipuð og furunálarinnar við hliðina. Það væri hægt að koma býsna mörgum furunálum inn í Hallgrímskirkjuturn!

Áður en lengra er haldið er rétt að geta þess að það eru ekki aðeins eiginlegar leirsteindir sem falla undir kornastærðina leir í jarðvegi. Mulið berg getur talist til leirs sem kornastærðarflokks ef kornin eru <0,002 mm í þvermál. Þar má nefna ýmsar steindir í berginu, t.d. kvars, glerkorn, ólivín, pýroxen og plagióklas, sem eru algengar steindir í íslensku bergi, ýmist sem einstakir kristallar eða hluti af bergbroti með mörgum tegundum steinda. En rétt er að ítreka að það eru fyrst og fremst blaðlaga steindir og aðrar leirsteindir sem hafa myndast í jarðveginum við jarðvegsmyndun sem gefa honum efnaeiginleika (steindir sem hafa kristallast úr vatnslausn í mold).

Leirsteindir falla undir flokk ummyndunarsteinda og síðsteinda í jarðfræði, þ.e. þær eru ekki til staðar í frumberginu heldur myndast við veðrun á móðurefninu. Sem fyrr segir eru margvíslegar leirsteindir algengar á hverasvæðum landsins þar sem aðstæður eru til örrar veðrunar á bergefnum, en þeim verður ekki gerð frekari skil hér.



Mynd 2.7. Byggingareiningar blaðsilíkata.

2.2.1. Byggingareiningar leirsteinda og hleðsla

Kísill (Si) og ál (Al) ásamt súrefni (O) og vetni (H) eru langalgengustu frumefnin í jarðskorpunni. Það er því engin tilviljun að þessi efni eru uppistaðan í mörgum algengustu steindum í bergi – og þar með í moldinni. Þó er það svo að við langvarandi efnaveðrun verður veðrunarleifin (moldin) æ ríkari af járni (Fe) og áli (Al), en kísill (Si) veðrast smám saman úr jarðvegi, sérstaklega í hitabeltinu.

Grunneiningar blaðsilíkata eru tvenns konar: fjórhyrningur myndaður af Si^{4+} og O^{2+} í svokallaðri tetrahedra-einingu (fjórhyrna) og hins vegar átthyrningur úr Al^{3+} og OH^{-} í svonefndri oktahedra-einingu (átthyrna) (mynd 2.7). Hvor eining um sig raðast saman í tvívítt rúm, örmjóar þynnur, sem leggjast hvor að annarri. Þær hafa sem fyrr sagði gríðarlegt flatarmál (lengd og breidd) miðað við þykkt. Blaðsilíköt hafa eitt átthyrnulag (oktahedra; Al-OH) en ýmist eitt eða tvö fjórhyrnulög (tetrahedra; Si-O) og eru því oft nefndar 1:1 eða 2:1 steindir. Kaólínít er dæmi um 1:1 blaðsilíkat með eitt átthyrnulag og eitt fjórhyrnulag en smektít er 2:1 leirsteind.

Aðrar katjónir geta tekið sæti kísils (Si^{4+}) og áls (Al^{3+}) í kristalgrindinni og því myndast nokkrar tegundir leirsteinda með svipaða byggingu eftir því hvernig þessum sætaskiptum er háttað. Þannig getur Al^{3+} tekið sæti Si^{4+} í fjórhyrnunni en t.d. Mg^{2+}, Fe^{2+}, Fe^{3+} eða Ca^{2+} sæti Al^{3+} í átthyrnu grindinni. Þetta eru nefnd sætaskipti eða stöðuskipti (e. isomorphic substitution) en hugtakið „isomorphic“ gefur til kynna sömu kristalbyggingu en mismunandi efnasamsetningu. Þetta leiðir til þess að leirinn tekur á sig neikvæða hleðslu

(Al^{3+} er minna jákvætt hlaðið en Si^{4+}). Ójafnvægið hverfur við það að jákvætt hlaðnar jónir, katjónir (plúsjónir), raðast með vatnslausn utan á steindina og jafna út hleðsluna. Na^{+}, K^{+}, Ca^{2+} og Mg^{2+} eru algengustu katjónirnar sem loða við leirsteindir.

Jónrýmd (CEC) gefur miklar upplýsingar um eðli jarðvegsins, frjósemi hans og stundum vandamál sem tengjast söltum jarðvegi. En það er einnig svo að sumar steindir geta tekið á sig jákvæða hleðslu og þá geta neikvætt hlaðnar jónir (anjónir – mínusjónir) fest sig við leirinn og moldin fær þá anjónrýmd (e. anion exchange capacity, AEC).

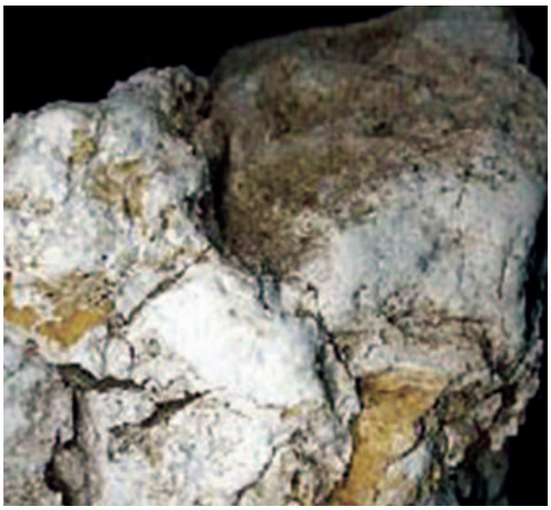
2.2.2. Algengur leir í mold

Nokkrar leirsteindir eru algengastar í jarðvegi heimsins. Þær segja yfirleitt mikið um moldina sem þær myndast í, sumar bera þess merki að vera unglingar á meðal jarðvegsgerða – ómótaðs jarðvegs – en aðrar eru einkenni moldar sem hefur veðrast í langan tíma – öldunga. „Miðaldra“ mold hefur gjarnan sitt lítið af hverju þegar kemur að leirsteindum. Moldin segir sögu og leirsteindir eru mikilvægar persónur í frásögninni. Eiginleikar jarðvegsins eru mismunandi eftir því hvaða steindir eru ráðandi í moldinni – eiginleikunum mætti líkja við skapferli manna sem mótast af umhverfinu.

Illít (2:1 steind) er mjög algeng leirsteind, skyld múskvóíti og bíótíti (mica steindir). Illít er sérstaklega algeng leirsteind á norðurslóðum þar sem áfoks gætti frá meginlandsjöklum ísaldarinnar og hún er talin einkennandi fyrir ungan eða lítið veðraðan jarðveg. Þessi steind er mikilvæg á kornræktarsvæðum Norður-Evrópu og Norður-Ameríku. Illít var töluvert notað áður við leirbrennslu því það brennur við tiltölulega lágan hita og myndar þá efni svipað postulíni. Þessari steind fylgir sá vandi í ræktun að hún bindur bæði K^{+} og NH_4^{+} í jarðvegi sem verða þá ekki aðgengileg rótum plantna. Það er þó ekki vandamál hérlendis enda steindin ekki í íslenskum jarðvegi. Falleg græn steind sem nefnist seladónít og finnst sem holufylling í íslensku bergi er mjög skyld illíti (Kristján Sæmundsson og Einar Gunnlaugsson, 1999).

Vermikúlít er 2:1 steind með mikla jón- og vatnsrýmd og því hefur vermikúlít afar jákvæð áhrif á frjósemi jarðvegs. Það finnst gjarnan á svipuðum slóðum og illít. Vermikúlít springur út við mikinn hita og þannig má framleiða létt og frauðkennt efni sem hefur mikið einangrunargildi gagnvart hita og hljóði. Vermikúlít er einnig mikið notað við garðrækt til að bæta eiginleika jarðvegs o.fl.

Smektít (2:1 steind) einkennir iðulega jarðveg sem hefur sæmilega hátt pH-gildi og þá sérstaklega Ca-ríkan jarðveg (mynd 2.8). Þetta er afar virk steind með mikið yfirborð. Smektítríkan jarðveg er einkum að finna þar sem moldin þróast í leirríkum setlögum, t.d. á óshólmasvæðum (forsögulegum eða óshólmum nútímans). Smektít hefur þann eiginleika að bólgna út ef það er vatnsmettað, jafnvel svo mikið að það verður að eins konar geli. Það skreppur hins vegar saman og verður grjóthart ef það þornar. Af þessum sökum er jarðvegur ríkur af smektíti



Mynd 2.8. Smektít. Dæmigerðir litir, gráir og gulleitir, sem einkenna smektít. Mynd: Wikipedia, frjáls afnot (public domain).

þungur í vinnslu (*leirjörð*). Vegalagning í smektítríku yfirborði er erfið sökum óstöðugleika, og oft er það augljóst þegar ekið er á ósléttum vegum erlendis að ekið er yfir smektítrík svæði. Smektít er útbreidd steind, sérstaklega í tempraða og heittempraða belti jarðar. Það er notað í iðnaði sem efnasía o.fl. Smektít er algeng steind á hverasvæðum hérlendis sem og í rauðum millilögum basaltstaflans, ásamt kaolíniti, járn- og álsteindum.

Kaolínit er meðal algengustu steinda í mold og telst einkennissteind heittempraða beltisins þótt hún sé algeng bæði á kaldari og heitari svæðum jarðar. Hún hefur eina fjórhyrnu og eina átthyrnu (tetrahedra og oktahedra; 1:1 steind). Steindin er einnig kölluð kaolín, en strangt til tekið tekur það heiti til hóps steinda með svipaða eiginleika og kaolínit (White og Dixon, 2002). Postulín er unnið úr kaolíni. Leirbrennsla er hins vegar flókið ferli og rétt að hafa í huga að það tók Kínverja árþúsund að fullkomna sitt postulín, en það er brennt við afar háan hita, 1200–1400°C, og blandað öðrum efnum. Postulín er vitaskuld afar mikilvægt efni í hreinlætistækjum o.fl. sem kemur við sögu í daglegu lífi.

Kaolínit er mikið notað sem íblöndunarefni, t.d. til að binda saman ís, í súkkulaðihjúp (bráðnar síður), tannkrem (loðir saman), pappír (pappírsgljái) og ótal margt annað. Kaolínítnámur eru því afar verðmætar. Því miður hefur örplast verið notað í stað kaolíns í vaxandi mæli sem bindiefni, en á því verður vonandi breyting á næstu árum.

Mynd 2.9. Mikið veðruð mold í Úganda sem einkennist einkum af járn- og álsteindum ásamt breytilegu magni af kaolíniti.

Járnsteindir og álsteindir. Ál og járn er unnið í stórum stíl úr leir sem myndast hefur í jarðvegi. Það var því ekki að ósekju að jarðveginum var líkt við mikilvirka efnaverksmiðju í fyrsta kafla, efnaverksmiðju sem m.a. framleiðir leir. Margar tegundir járnsteinda og álsteinda eru algengar í jarðvegi, sérstaklega í mjög veðraðri mold (mynd 2.9). Þær eru ekki allar blaðsilíköt því sumar innihalda engan kísil, en margar hafa svipaða byggingu, svo sem gibbsít. Það er raunar eitt mikilvægasta einkenni jarðvegsmyndunar að hlutfall áls og járns eykst í jarðvegi með tímanum.

Ef veðrun gengur mjög langt og moldin er orðin mjög gömul og mikið veðruð í heitu og röku loftslagi er orðið lítið eftir af öðrum steindum en þeim sem gerðar eru af járni og áli. Götheít (e. goethite, heitir eftir skáldinu Goethe) er ein algengasta járnsteindin. Nokkuð er misjafnt hvernig hún er rituð á íslensku, m.a. götít og goethít, en mikilvægt verður að teljast að halda nafni Göthe í heiti steindarinnar, eins og Kristján Sæmundsson og Einar Gunnlaugsson (1999) gera í Íslensku steinabókinni og því er götheít notað hér. Hematít, maghemít, magnetít og lepidókrósít (blaðsilíkat) eru einnig algengar járnsteindir í jarðvegi, en kristalbygging er breytileg (ekki eru allar blaðsilíköt).

Ferrihýdrít er algeng járnsteind á Íslandi, en um hana er fjallað sérstaklega síðar. Orðið brúnjárnsteinn (límonít) hefur verið notað sem eins konar samheiti yfir margs kyns járnsteindir sem koma fyrir í íslenskum jarðvegi (Kristján Sæmundsson og Einar Gunnlaugsson, 1999). Járn er unnið í töluverðum mæli

úr járnríkum leir, m.a. var það gert hér á landi langt fram eftir öldum.

Gibbsít er álsteind (oktahedra-grind) sem er mjög algeng í hitabeltinu. Báxít er mikið veðraður gibbsítjarðvegur og er notað sem hráefni við álvinnslu. Steindir hitabeltisins, svo sem gibbsít og götheít, hafa takmarkaða jónrýmd. Þessi litla jónrýmd (fjallað er ítarlegar um jónrýmd síðar) er ein af ástæðum þess að mold hitabeltisins er ekki eins frjó og mold norðurslóða, en þar koma vitaskuld fleiri þættir við sögu.

Mikilvægi leirs sem einnar af grunneiningunum í náttúru jarðarinnar annars vegar og sem auðlindar sem notuð er á ótalmarga vegu hins vegar verður vart ofmetin. Leirinn ljær moldinni efnaeiginleika sem eru undirstaða fyrir frjósemi vistkerfa. Maðurinn hagnýtir sér leir með margvíslegum öðrum hætti. Leir er notaður í fjölbreytilegum iðnaði og svo hefur verið frá örófi alda. Um þriðjungur húsa heimsins er byggður úr leir, ýmist brenndum eða þurrkuðum (mynd 2.10). Þegar hann er blautur er auðvelt að móta leirinn í hæfilega stórar einingar til að stafla upp í veggi og annað þarflegt sem síðan þorna í sólinni í þróunarlöndunum eða eru hertar í ofnum eins og víða þekkist á Vesturlöndum.

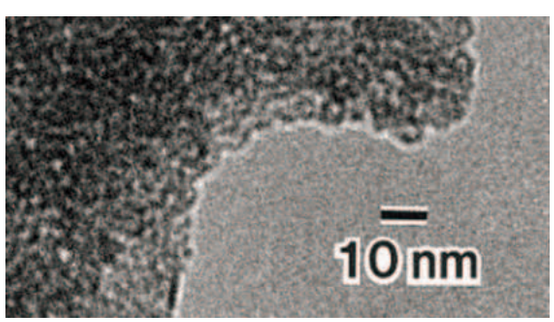
Þá má geta þess að saga menningarinnar er að hluta til skráð í leir. Í fornöld var leir mótaður í plötur sem stafir og tákn voru rist í, líkt og gerist með bækur nútímans. Þannig hafa varðveist upplýsingar um sögu mannkyns þúsundir ára aftur í tímann. Leirplöturnar eru mikilvægur minnisvarði um að helgisögur á borð við Nóaflóðið eru síendurtekin minni í sagnaheimi og trúarbrögðum mannkyns um víða veröld og eru sem slíkar mikilvæg gögn til að andmæla bókstafstrú og hindurvitnum sem eru í mótsögn við vísindalega þekkingu (Montgomery 2012).

Mynd 2.10. Dómkirkja reist úr gamalli mold – mársteinum. Stór hluti bygginga heitari svæða er byggður úr mársteinum sem oft eru þurrkaðir og jafnvel brenndir moldarkögglar ríkir af leirsteindum.

2.2.3. Leir í *eldfjallajörð*

Mikilvægt er að fjalla sérstaklega um þann leir sem einkum finnst á eldfjallasvæðum jarðar, en það verður þó gert ítarlegar þegar rætt verður um *eldfjallajörð* og íslenskan jarðveg.

Allófan er einkennissteind *eldfjalla-jarðar*. Það er ekki blaðsilíkat heldur steindin kúla sem er um 5 nm í þvermál (mynd 2.11). Byggingareiningar kúlunnar eru þó mjög svipaðar byggingareiningum kaólíníts að gerð en kristalgrindin er ófullkomin, sérstaklega oktahedra-lagið. Steindin hefur ekki fasta efnasamsetningu, Al/Si-hlutfallið í grindinni reikar á milli <1 til >2. Allófan er stundum kallað „illa kristölluð steind“ (e. poorly crystalline mineral) en einnig steind með stutt efnatengi (e. short-range order mineral). Þá hefur allófan einnig verið nefnt ókristallaður leir (e.



Mynd 2.11. Allófan í íslenskum jarðvegi. Leirinn myndar holar kúlur sem eru um 5 nm í þvermál (50 Angström). Myndin er tekin með rafeindasmásjá í Japan.

non-crystalline clay) eða „structured nanomineral“ (sjá Churchman og Lowe, 2012). Allófan myndast þar sem gjóska veðrast hratt í fremur röku loftslagi. Vatnslausnin í moldinni mettast af Al^{3+} og Si^{4+} vegna örrar veðrunar glersins sem einkennir gjóskuna svo út fellur eða „kristallast“ þessi sérkennilega steind. Segja má að hröð veðrun valdi því að ekki er nægjanlegur tími til að mynda „almennileg“ blaðsilíköt. Steindin er ekki stöðug til langframa (oftast í styttri tíma en 10 000 ár), en veðrast yfirleitt áfram og verður að halloysíti sem síðar ummyndast í kaólínít, en einnig getur myndast smektít. Allófan er ýmist talið litlaust eða dökkrauðbrúnt (einkennislitur *brúnjarðar*).

Ímógólít er önnur einkennissteind *eldfjallajarðar*. Í stað kúlulögunar allófans er ímógólít nálarlaga og Al/Si-hlutfallið er jafnara og yfirleitt mjög nálægt 2.

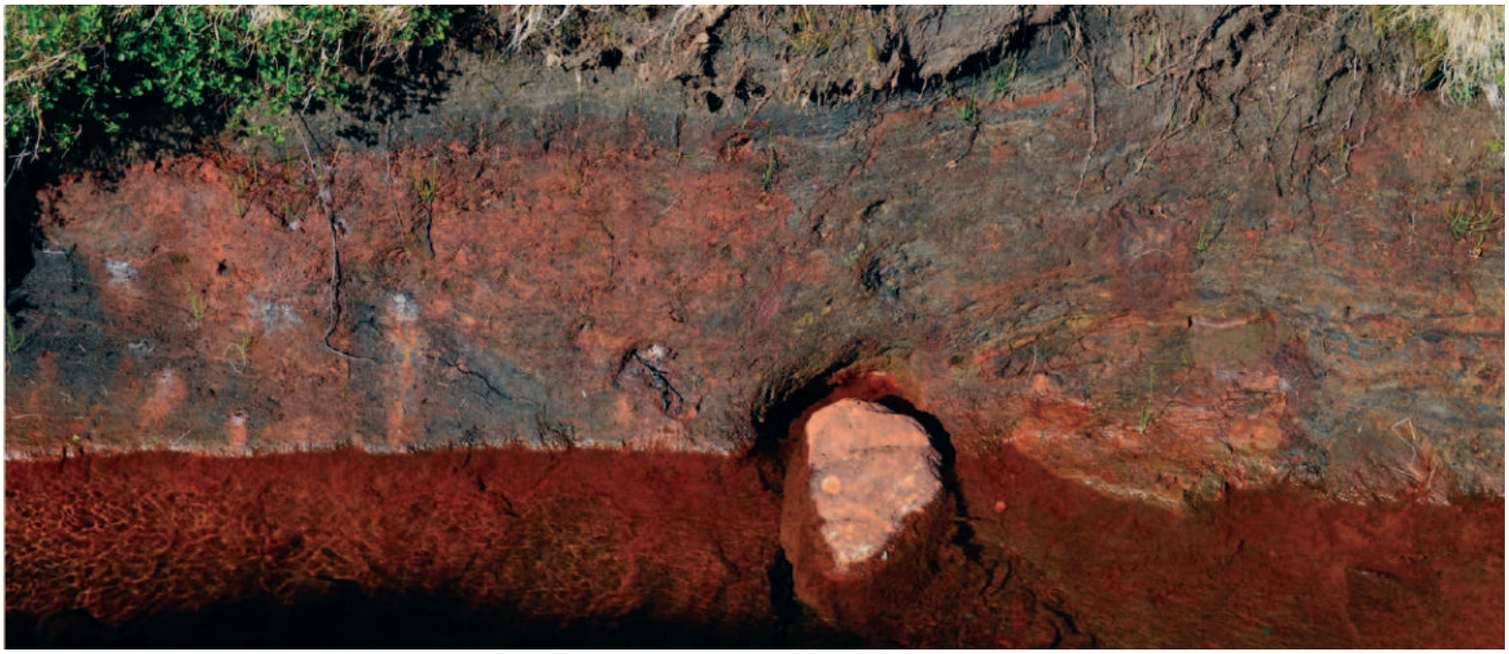
Ferrihýdrít (mýrarauði) er afar algeng steind í íslenskum jarðvegi. Hún gefur jarðveginum hinn rauða lit (mynd 2.12), en dökkt basaltglerið, lífræn efni og rauðbrúnt allófan hafa einnig áhrif á lit moldarinnar. Ferrihýdrít myndar eins konar gel; það er yfirleitt illa kristallað og telst ekki stöðugt til langframa í jarðvegi. Þó er það svo að ferrihýdrít varðveitist vel í íslenskri mold og einkennir mörg þúsund ára gömul jarðvegslög neðst í jarðvegssniðum.

Halloysít er algengt í eldfjallajarðvegi hitabeltisins. Það er náskylt kaólíníti og telst til kaólínsteinda. Líklega er það skilyrði fyrir myndun þess að jarðvegur þorni vel á milli þess sem hann helst vel rakur, sem einkennir t.d. loftslagið við Miðjarðarhaf.

2.3. Mælingar á kornastærð og leir í jarðvegi

2.3.1. Kornastærðarmælingar

Það er vitaskuld mikilvægt að geta mælt eða metið kornastærð jarðvegs. Með æfingu er unnt að meta hlutfall kornastærðarflokkanna nokkuð nákvæmlega í mörkinni með því að velta rökum jarðvegi á milli fingra (e. hand-texturing). Við vissar aðstæður, m.a. á eldfjallasvæðum, er þessi aðferð áreiðanlegri en aðrar venjulegar mælingar á kornastærð. Því er „fingraaðferðin“ mikilvæg hér á landi.

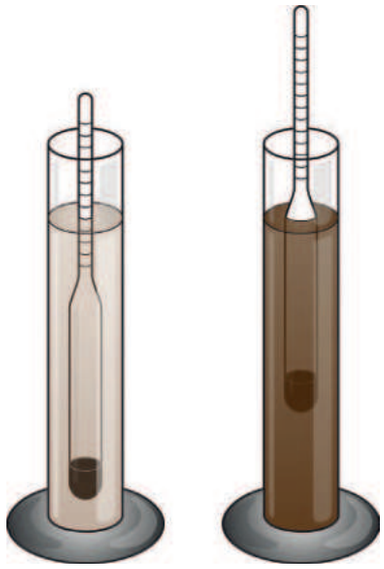


Mynd 2.12. Talið er að mýrarauði í skurðum á Íslandi sé að stórum hluta ferrihýdrít sem einnig litar jarðveginn á myndinni rauðan.

Það er algengt að sigta jarðveg til að fá hugmynd um kornastærðardreifingu, en sú aðferð er aðeins nothæf niður að u.þ.b. 0,05 mm sem marka efri stærðarmörk silts. Því er sigtun fyrst og fremst hentug aðferð fyrir sand eða sendinn jarðveg. Bæði þekkist að blautsigta og þurrsigta jarðveg. Við blautsigtun er vatn notað til þess að hjálpa til við að koma kornunum niður í gegnum sigtið. Þurrsigtun hentar vel fyrir mælingar í tengslum við rannsóknir á vindrofi en blautsigtun brýtur yfirleitt samkornin betur niður. Ef mæla á silt og leir verður að beita öðrum aðferðum.

Yfirleitt er kornastærð mæld á rannsóknastofum með því að láta jarðveg setjast til í vatni. Aðferðin byggist á því að setja lítið jarðvegssýni í vatnslausn í háu mæliglasi og síðan er hrært vel í. Jafnframt er calgon (natríum-metafosfat, algengt sápuefni) bætt í lausnina, en það efni stuðlar að því að sundra jarðvegsögnum sem annars vilja loða saman. Smám saman falla kornin til botns í bikarnum. Við það breytist eðlisþyngd vatnsins, það léttist í réttu hlutfalli við magn efnanna sem fellur til botns úr lausninni. Stærstu kornin eru þyngst og falla fyrst til botns, sandur á innan við tveimur mínútum en leirinn tefur í upplausn mjög lengi.

Hægt er að reikna samhengi tímans og stærðar kornanna sem eftir eru í vökvasúlunni, og því er hægt að ákvarða kornastærð með því að mæla eðlisþyngd vökvans með vissu millibili. Þessi aðferð er nefnd flotaðferð (e. hydrometer) og byggist á því að lesa af flotholti sem flýtur ofan á lausninni. Flotholtið hefur verið kvarðað fyrirfram (mynd 2.13). Það sekkur æ dýpra eftir því sem vatnslausnin léttist og jarðvegsefnin setjast til í henni. Þessi aðferð var einmitt notuð til að ákvarða styrk alkóhóls í brugghúsum því það hefur annan eðlisþunga en vatn.



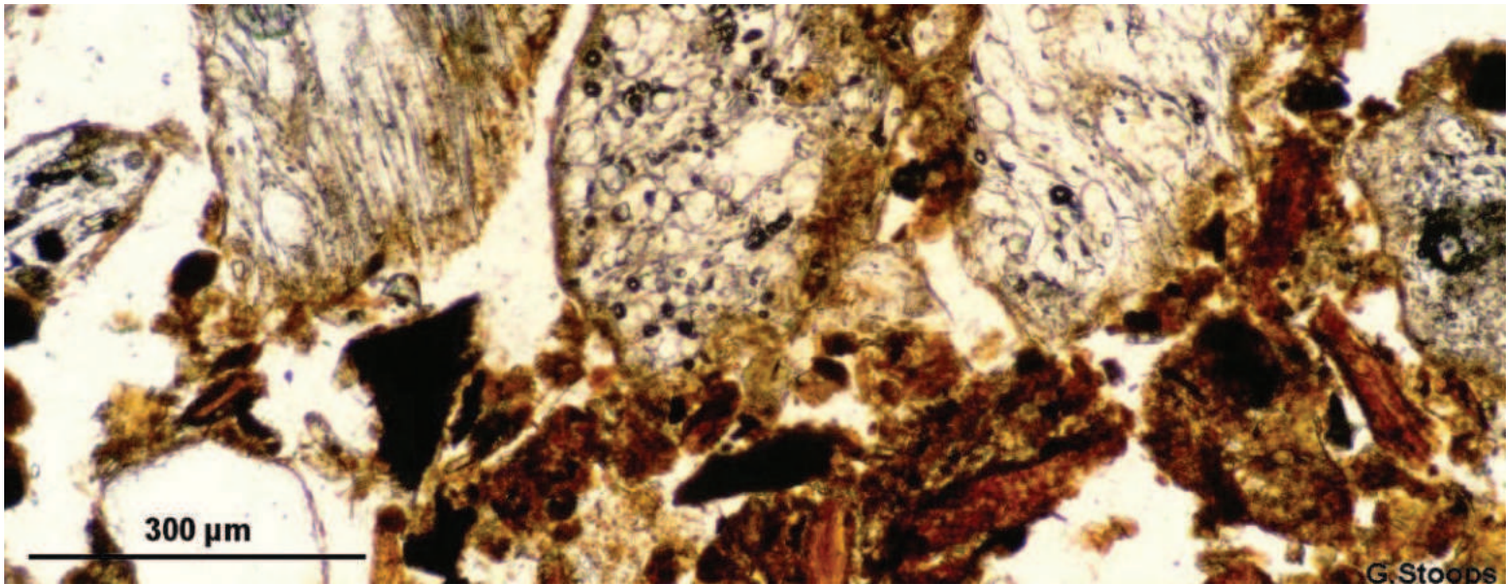
Mynd 2.13. Mæling á kornastærð með flotholti. Eftir því sem kornin falla til botns léttist lausnin og þar með sígur flotholtið dýpra. Stærri kornin setjast til fyrst en leirinn er lengi að botnfalla.

Með pípettuaðferð er sýni dregið upp úr lausninni með vissu millibili, en það síðan þurrkað og vegið. Ef mikið er af jarðvegi í lausninni löngu eftir að hrært var í henni inniheldur jarðvegssýnið mikið af leir. Pípettuaðferðin þykir nákvæmari en flotaðferðin, en þó er það umdeilt (sjá t.d. Skopp 2000). Þessar aðferðir eru einfaldar, fljótlegar og ódýrar og mikið notaðar víða um heim við kornastærðarmælingar. Þær henta þó ekki fyrir mold á eldfjallasvæðum á borð við Ísland, eins og síðar verður vikið að.

Nokkrar aðrar aðferðir eru notaðar við kornastærðarákvörðun. Nú er m.a. beitt flóknum leysigeislabúnaði við kornastærðarmælingar og eru þær aðferðir taldar mun nákvæmari en hefðbundnar mælingar en hafa þó sína annmarka.

2.3.2. Röntgengeislar (XRD)

Blaðlaga leirsteindir hafa mjög regluleg bil á milli byggingareininganna. Unnt er að greina þessi bil með því að beina röntgengeislum (bylgjum) skáhallt að leirnum með bylgjulengd sem er svipuð og þykkt byggingareininga leirsins. Við



Mynd 2.14. Mold séð með bergfræðismásjá. Fremur lífrænn jarðvegur frá Auðkúluheiði. Gróf gjóskukorn (ljós Heklugjóska) með kápu af leir sem hefur myndast á yfirborðinu við efnaveðrun. Einnig smærri og dekkri glerkorn.

ákveðið horn endurkastast geislarnir og er það horn háð bilinu á milli byggingareininganna og bylgjulengdinni sem er notuð við mælingarnar (Braggslíking). Tæki til þessara mælinga eru nokkuð algeng á rannsóknastofum og þessum mælingum er einnig beitt við bergfræðirannsóknir í jarðfræði og rannsóknir á lífrænum sameindum. Þó fylgir þessari aðferð sá annmarki að hún dugar ekki á þann leir sem oftast finnst í íslenskum jarðvegi (allófan, imógólít og ferrihýdrít) því þar er lítið um blaðsilíköt (sjá einnig ÓA 1993).

2.3.3. Ammoníum-oxalat-skolun

Sú aðferð sem algengast er að beita við ákvörðun á leir í *eldfjallajörð* er að leysa jarðvegssýni upp í súrri ammoníum-oxalat-lausn. Aðferðir af þessu tagi eru nefndar „selective dissolution" á ensku. Ammoníum-oxalat-lausnin leysir auðveldlega upp hringlaga leirsteindir og illa kristölluð efni, en hún leysir ekki upp blaðsilíköt og aðrar vel kristallaðar steindir. Á þessu eru nokkrar undantekningar sem sjaldan skipta máli við mælingar á leir í *eldfjallajörð*. Með því að mæla Al, Si og Fe sem leysast upp í ammoníum-oxalat-lausninni (nefnt Al_{ox}, Si_{ox} og Fe_{ox}) fæst mælikvarði á magn leirsins í sýninu. Nánar er fjallað um þessa aðferð í köflum um *eldfjallajörð* og íslenskan jarðveg, en henni hefur verið lýst m.a. af Parfitt (1990) og Parfitt og Childs (1988).

2.3.4. Smásjárskoðun

Fjórar meginaðferðir eru notaðar við að skoða mold í smásjá: áfallandi ljós (víðsjá), bergfræðismásjá (þunnsneiðar), rafeindasmásjá með áfallandi ljósi (e. scanning electron microscopy, SEM) og rafeindasmásjá með gegnumlýsandi ljósi (e. transmission electron microscopy, TEM). Leir sést illa í bergfræðismásjá, en notkun rafeindasmásjár er mikilvæg við staðfestingu á tilvist allófans eða imógólíts í jarðvegi. Ekki er ástæða til að fjalla um þessar aðferðir að sinni, en þess ber að geta að þeim hefur lítið verið beitt við rannsóknir á íslenskum jarðvegi.

Örbygging (e. micro-morphology) er ein undirgreina jarðvegsfræðinnar, en þar er ekki aðeins bergfræði jarðvegsins ákvörðuð, heldur einnig lífræn efni, holrými og á hvern hátt helstu byggingareiningar jarðvegsins raðast saman. Á mynd 2.14 er sýnt dæmi um mynd sem tekin er með bergfræðismásjá af jarðvegi á Auðkúluheiði.

Heimildir

Rétt er að benda hér sérstaklega á „biblíu“ um leirsteindir í jarðvegi, Minerals in Soil Environments, sem mikið er vitnað til (ritstýrt af Dixon og Schulze, 2002) og langan en aðgengilegan kafla um myndun og eðli leirsteinda í Handbook of Soil Sciences (Churchman og Lowe, 2012). Þeim sem hafa áhuga á frekari upplýsingum um allófan og ímógólít er bent á yfirlitsgreinar eftir Dahlgren (1994), Harsh o.fl. (2002) og McDaniel o.fl. (2012), en einnig má geta umfjöllunar ÓA í Náttúrufræðingnum (1993) um leir í íslenskum jarðvegi.

Churchman, G.J. og D.J. Lowe 2012. Alteration, formation and occurrence of minerals in soils. Í: P.M. Huang, Y. Li og M.E. Sumner (ritstj.), Handbook of Soil Sciences. Properties and Processes. 2. útg. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.

Dahlgren, R.A. 1994. Quantification of allophane and imogolite. Í: J. Amonette og L.W. Zelazny (ritstj.), Quantification Methods in Soil Mineralogy. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.

Dixon, J.B. og D.G. Schulze (ritstj.) 2002. Soil Mineralogy with Environmental Applications. Soil Science Society of America Book Series 7, Madison, Wisconsin, USA.

Harsh, J.B., J. Chorover og E. Nizeyimana 2002. Allophane and Imogolite. Í: J.B. Dixon og D.G. Schulze (ritstj.), Soil Mineralogy with Environmental Applications. Soil Science Society of America Book Series 7, Madison, Wisconsin, USA. Bls. 291–322.

Kristján Sæmundsson og Einar Gunnlaugsson 1999. Íslenska steinabókin. Forlagið, Reykjavík.

McDaniel, P., D.J. Lowe, Ólafur Arnalds og C-L. Ping 2012. Andisols. Í: P.M. Huang, Y. Li, M.E. Sumner (ritstj.), Handbook of Soil Science 2. útg. CRC Press, Taylor & Francis, Boca Raton, Florida, USA. Bls. 33:29–33, 48.

Montgomery, D.R. 2012. The Rocks Don’t Lie: A Geologist Investigates Noah’s Flood. W.W. Norton & Co, New York, USA.

Ólafur Arnalds 1993. Leir í íslenskum jarðvegi. Náttúrufræðingurinn 63:73–85.

Parfitt, R.L. 1990. Allophane in New Zealand – A review. Australian Journal of Soil Research 28:343–360.

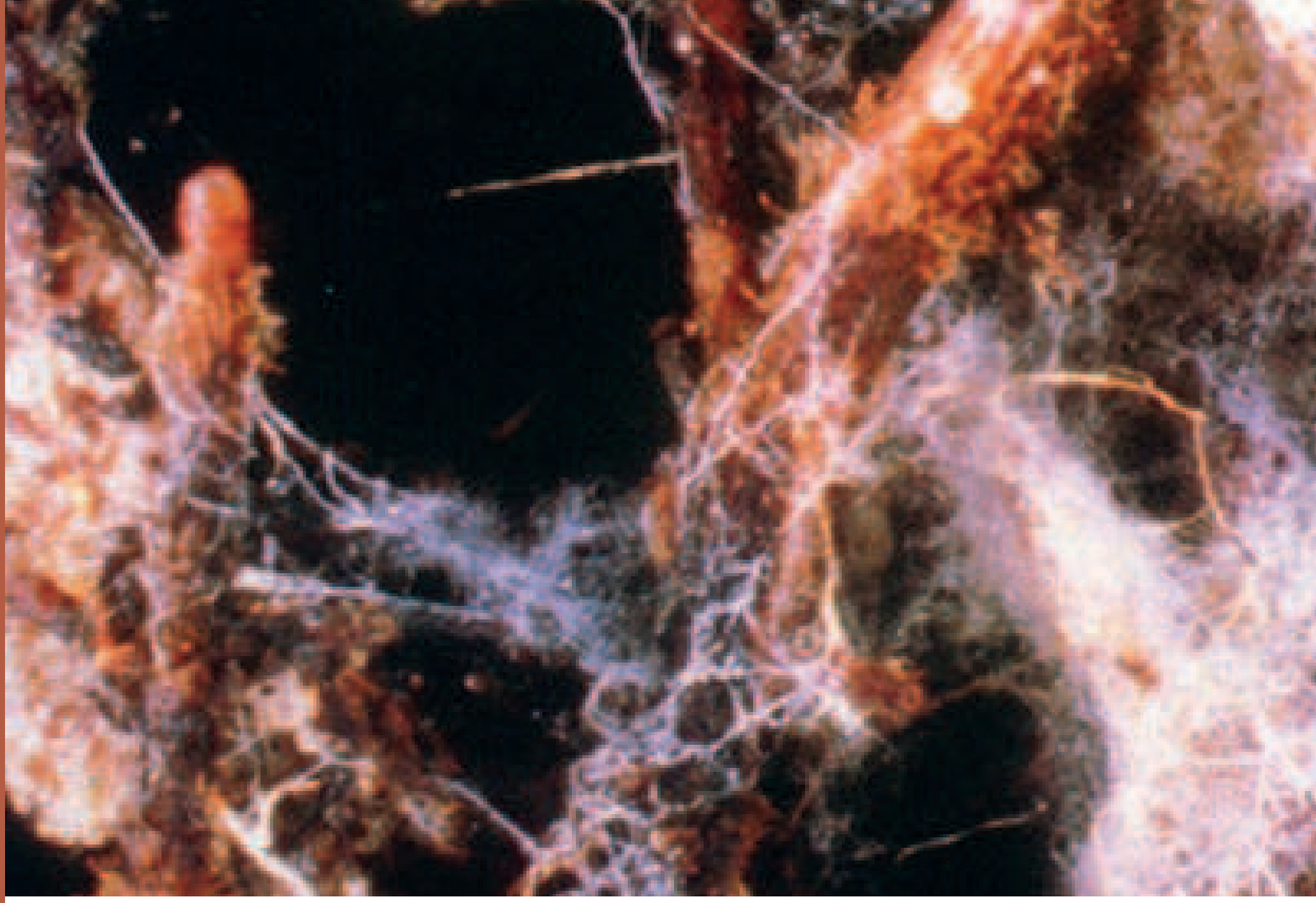
Parfitt, R.L. og C.W. Childs 1988. Estimation of forms of Fe and Al: A review, and analysis of contrasting soils by dissolution and Moessbauer methods. Australian Journal of Soil Research 26:121–144.

Skopp, J.M. 2000. Physical properties of primary particles. Í: M.E. Sumner (ritstj.), Handbook of Soil Science. Bls. A3–17.

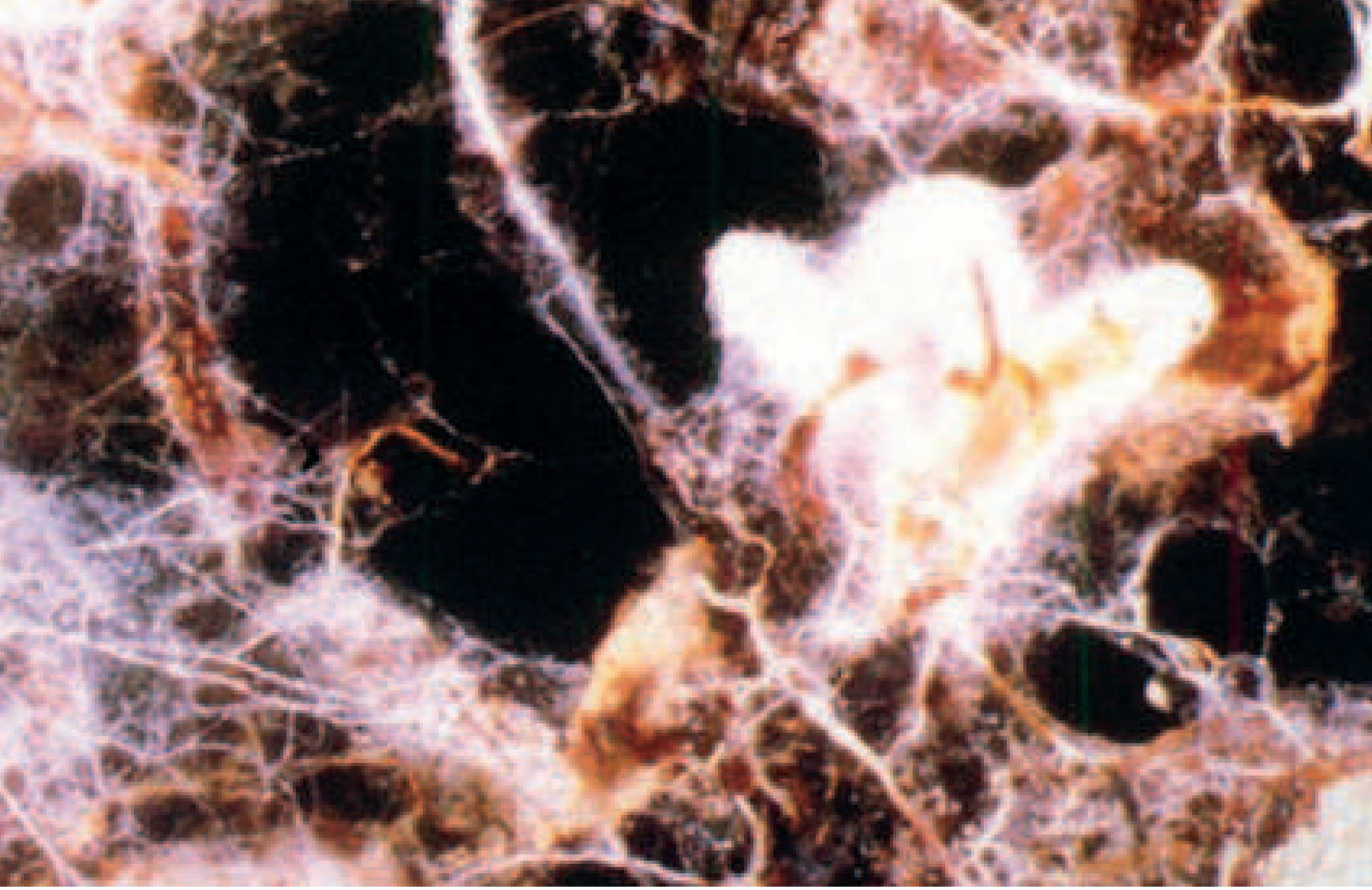
Weil, R.R. og N.C. Brady 2017. The Nature and Properties of Soils. Pearson, Boston, USA.

White, N.G. og J.B. Dixon 2002. Kaolin – Serpentine minerals. Í: J.B. Dixon og D.G. Schulze (ritstj.), Soil Mineralogy with Environmental Applications. Soil Science Society of America Book Series 7, Madison, Wisconsin, USA. Bls. 389–414.

Þorsteinn Guðmundsson 2018. Jarðvegsfræði. Myndun, vist og nýting. Háskólaútgáfan, Reykjavík.



3 Hin lifandi jörð – lífverur og lífræn efni



Mynd 3.1. Svepprót sem losar næringarefni til plantna. Svepprætur tengjast m.a. örefnum í jarðveginum og liðka fyrir næringarefnaupptöku. Mynd: NRCS Soil Biology Primer.

Mælikvarði á stöðu vistkerfa

Magn kolefnis eða lífrænna efna í moldinni er einn algengasti mælikvarðinn sem er notaður við mat á stöðu og ástandi vistkerfa. Frjósöm jörð hefur ríkulegan forða lífrænna efna, mikið af kolefni á afoxuðu formi og þá er moldin oft dökk á litinn (mynd 3.2). Eitt helsta einkenni hnignunar vistkerfa er tap á kolefnisforðanum.

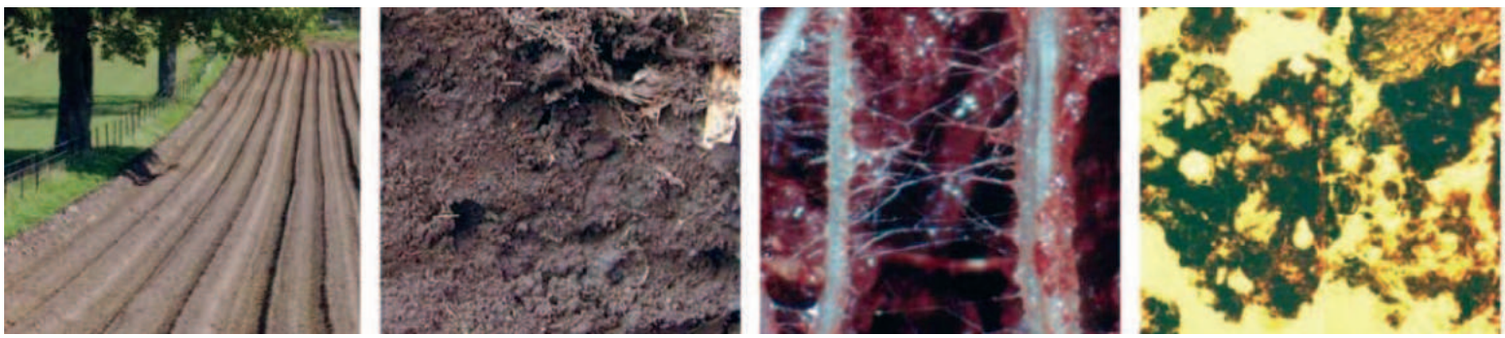
3.1. Orkuhringrásin og lífið

Lífið á jörðinni er drifið áfram af orku sólar. Þar sem hún skín lóðrétt niður á jarðarflötinn nemur orkan >1 000 W á hvern fermetra, sem er væntanlega meira en flestir hefðu gert sér í hugarlund. Meðaltal geislunarinnar er þó nær því að vera um 150 W á fermetra. Þetta er vitaskuld feykilega mikið innstreymi orku sem jörðin nýtur, enda er það svo að sólarorka sem numin er með „sólarsellum“ er smám saman að verða meginorkugjafinn fyrir starfsemi mannsins á sólríkum svæðum jarðar.

Til þess að lífverur geti hagnýtt sér orku sólar er henni umbreytt í kolefnissambönd. Vistkerfi jarðar, landbúnaður – og þar með maðurinn – eru algjörlega háð þessu orkunámi og því að hringrásir orku, vatns og næringar séu virkar til að standa undir orkunáminu. Mælikvarðar sem lýsa þessari virkni hringrásanna eru notaðir til þess að meta gæði vistkerfa og ástand lands (sjá t.d. *Methods for Assessing Soil Quality*, Doran og Jones 1996 og *Að lesa og lækna landið*, ÓA og Ása L. Aradóttir 2015), eins og lýst er nánar í 20. kafla þessa rits. Það er blaðgræna gróðurs sem nemur orku sólarinnar og bindur hana í kolefnissamböndum með efnaferli sem kallast ljóstillífun. Kolefnið er á afoxuðu formi í plöntum (sjá 5. kafla um efnaeiginleika), en síðan tekur við flókin „atburðarás“ og fjölbreyttar „sviðsmyndir“ þegar orkuforðinn dreifist um vistkerfið og er notaður af hinum ýmsu leikendum í hringrás lífsins. Sumt er geymt sem forði í jarðvegi eða gróðri, t.d. lífrænt efni í mold og viður í trjám. Við lok hringrásarinnar losnar um kolefnið sem tekur þátt í þessari hringrás við öndun. Við öndun oxast kolefnið, það „brennur upp“ – orkan sem geymd var í afoxuðu kolefni losnar að nýju. Kolefnið berst til andrúmsloftsins á ný sem CO_2 – hringrásin lokast.

Lífverur keyra hringrás orkunnar eða öllu heldur kolefnisins, en orkunámið er vitaskuld háð skini sólar og blaðgrænu plantna. Undir yfirborðinu er lífheimur sem tekur ríkulegan þátt í þessu ferli. Þar er að finna fjölbreyttari heim lífvera og efnahvarfa en orð fá lýst. Það er t.d. býsna sláandi staðreynd að mun fleiri tegundir lífvera þrífast ofan í moldinni en á yfirborðinu, sem eru sannindi sem mörgum eru ókunn. Lífverur moldarinnar stuðla að rotun lífrænna efna, geymslu kolefnissambanda og síðan framboði á nauðsynlegri næringu fyrir lífið, bæði það sem þrífst ofanjarðar og ofan í moldinni.

Líffræðileg virkni vistkerfa, stöðugleiki þeirra og þanþol mótast verulega af lífrænum efnum og starfsemi lífvera í moldinni. Lífverurnar nýta þau lífrænu efni sem falla til moldarinnar og skila til baka nauðsynlegum næringarefnum til annarrar lífsstarfsemi, svo sem til róta plantna. Raskist þetta flæði hefur það áhrif á vistkerfið í heild, en við það getur t.d. gróðurfar breyst mikið. Þá



Mynd 3.2. Fjölbreytileiki lífsins í moldinni er meiri en orð fá lýst. Lífræn efni geyma orku í moldinni og lita hana dökka en lífverurnar drífa hringrás næringarefna og þar með fæðuframleiðslu jarðarbúa.

eru mengunarvarnir moldarinnar afar þýðingarmiklar. Lífverurnar vinna úr mengunarefnum sem falla til jarðar og gera þau óskaðleg áður en þau berast áfram inn í grunnvatnskerfi eða til annarra hluta vistkerfa. Á því sviði eru bakteríur og sveppir mjög mikilvirkar lífverur. Hreinsunin tekur m.a. til sýkla, þungmálma og ýmissa lífrænna mengunarefna.

Lífverur móta byggingareiningar jarðvegs með því að hnýta agnir moldarinnar saman í samkorn, sem síðan tengjast í stærri byggingareiningar. Samkornin auka holrými jarðvegsins og auðvelda flæði vatns og súrefnis um moldina. Þessar byggingareiningar auka því mjög á frjósemi jarðvegsins, vatnsrými og vatnsleiðni og bæta aðra þætti sem eru mikilvægir fyrir gróður og vistkerfi. Auk þess getur mikið vatn loðað við lífrænu efnin sem síðan er unnt að miðla til róta plantna; lífræn efni bæta því vatnsheldni moldarinnar.

Stór hluti þess kolefnis sem kemur við sögu í kolefnishringrás jarðar er geymdur í jarðveginum sem lífræn efni og þau eru gríðarlega mikilvæg í samhengi við magn gróðurhúsalofttegunda í andrúmsloftinu og hlýnun jarðar, eins og síðar er vikið að.

Samspil lífvera í moldinni er afar flókið: þetta er „ógnvænlegur“ heimur þar sem hver lífvera lifir á þeirri næstu. Lífverur í mold hafa margs kyns aðferðir á takteinum til að verjast öðrum lífverum, t.d. veirum og bakteríum, og þessar varnir geta haft hagnýta þýðingu fyrir mannlífið. Lífverur ættaðar úr mold eru því mikilvægar í lyfjaframleiðslu og æ fleiri tegundir nytsamlegra efnasambanda og lífvera finnast með ári hverju. Fúkkalyf eiga t.d. uppruna sinn í moldinni (pensillín, streptómýsín, fyrstu virku lyfin sem læknuðu berkla o.fl.). Lífverur jarðvegs eru mikilvægar í fæðu- og efnaiðnaði og eru notaðar við jógúrtframleiðslu og bjórgerð, svo dæmi séu tekin. Á hinn bóginn geta nokkrir sjúkdómar borist í fólk úr jarðvegi, m.a. stífkrampi. Eyðing regnskóganna ásamt því að sífellt stærri svæði eru tekin undir akuryrkju er ógn við líffjölbreytileika moldarinnar, sem alþjóðastofnanir á borð við Umhverfisstofnun Sameinuðu þjóðanna (UNEP) og Samningurinn um líffjölbreytileika (UN-CBD) hafa varað við (IPBES 2019).

Fjöldi tegunda er yfirleitt í réttu hlutfalli við framleiðni kerfisins, en hvorki fjöldinn né framleiðnin eru þó einhlítir mælikvarðar á líffjölbreytileika því mikilvægar en sjaldgæfar tegundir lifa á svæðum þar sem framleiðni er mun minni, t.d. á norðurslóðum og í eyðimörkum. Þá getur fjölbreytileiki í moldinni verið mikill enda þótt gróðurfar sé einsleitt. Varðveisla fjölbreytilegra vistgerða og búsvæða, sem og fjölbreytileika í landslagi, felur í sér gild verndunarsjónarmið.

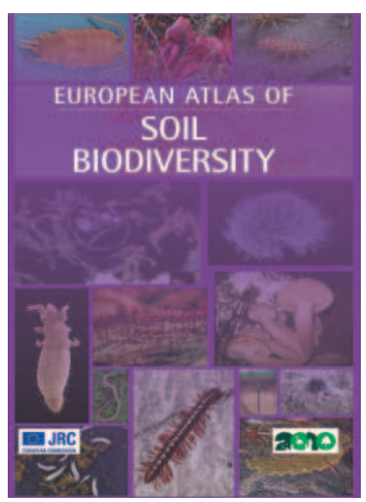
Nokkuð ber á að fjöldi háplöntutegunda í tilteknum reitum sé notaður sem slíkur mælikvarði, en hann er aðeins einn af mörgum og getur verið afar villandi með tilliti til skilnings á líffjölbreytileika, svo dæmi sé tekið. Það er semsagt mikilvægt að horfa einnig til verndunar vistkerfa og búsvæða í heild, sem vitaskuld tekur þá einnig til moldarinnar, en ekki aðeins til einstakra tegunda ofanjarðar þegar gætt er að verndun líffjölbreytileikans (mynd 3.3).

Tækni til rannsókna á lífinu neðanjarðar hefur fleygt fram á síðustu árum. Þróuð hafa verið tæki til myndatöku sem gerir mönnum kleift að skyggnast inn í þennan dulda heim. Einnig er ör þróun í tækni til að mæla og auðkenna hinar margvíslegu lífrænu sameindir sem eru í jarðveginum. Þessi kafli styðst m.a. við myndefni sem nýtir þessa tækni, og þá einkum myndefni sem stofnanir bandaríska landbúnaðarráðuneytisins (USDA) og stofnanir Evrópusambandsins hafa gefið út til fræðslu.

Lífræn efni í mold

Við rotnun á leifum jurta og dýra myndast margvíslegar lífrænar sameindir, sem ásamt lífverunum mynda lífræn efni í moldinni (e. organic matter, skammstafað OM eða OC fyrir lífrænt kolefni).

Það eru þessi lífrænu efni í yfirborðslögum moldarinnar sem eru, eins og fyrr sagði, einn helsti mælikvarðinn á frjósemi vistkerfa og landbúnaðarlands.



Mynd 3.3. Evrópski atlasinn um líffjölbreytileika í moldinni. Efnið er aðgengilegt á netinu og ætlað til fræðslu á öllum stigum menntunar og fyrir almenning (Jeffery o.fl. 2010).

3.2. Lífverur

Því hefur verið haldið fram að fjöldi þeirra tegunda sem á eftir að lýsa og greina í jarðvegi séu fleiri en allar þær tegundir sem þrífast ofanjarðar. Það ætti að gefa nokkra hugmynd um auðgi tegunda í moldinni. Sú umfjöllun sem hér fylgir er engan veginn tæmandi en gefur hugmynd um helstu flokka lífvera í mold og sýnir fram á hve líf í moldu er fjölskrúðugt og mikilvægt. Þá er vert að geta þess hér að fjöldi skordýra lifa á einhverju þroskastigi ofan í moldinni, sem enn eykur á fjölbreytnina.

Vírusar og bakteríur. Gríðarlegur fjöldi vírusa og baktería lifir í jarðvegi og þessar lífverur sjá um fyrsta stig endurvinnslu á lífrænu efni. Síðan eru aðrar lífverur sem annaðhvort lifa á bakteríum eða þeim efnum sem losna við starfsemi vírusa og baktería. Talið er að í einu grammi skógarjarðvegs geti verið allt að 40 000 tegundir baktería og fæstum hefur verið lýst til hlítar. Rhizobía-bakteríur lifa í sambýli við ýmsar plöntutegundir og hafa þann eiginleika að vinna nitur úr andrúmsloftinu. Plantan nýtir hluta þessa niturs en miðlar orku á formi kolefnissambanda o.fl. á móti og hefur mikinn hag af samstarfinu. Lúpína og smári eru dæmi um öflugar plöntur sem lifa í sambýli við rhizobía-bakteríur. Sambýli af þessu tagi er mikilvægt fyrir margar nytjaplöntur (mynd 3.4).

Mynd 3.4. Rhizobía-bakteríur lifa í sambýli við ýmsar plöntutegundir og hafa þann eiginleika að vinna nitur úr andrúmsloftinu. Plantan nýtir hluta þessa niturs en miðlar orku (C) o.fl. á móti og hefur mikinn hag af samstarfinu. Myndin er úr European Atlas of Soil Biodiversity (Jeffery o.fl. 2010).

Lífverur sem nefndar hafa verið **blágrænþörungar** (e. cyanobacter), en eru í raun sérstök deild lífvera, eru mikilvægar fyrir niturnám og hringrás næringarefna. Þetta lífsform er víða nauðsynlegt fyrir landnám gróðurs og er hluti þeirrar jarðvegsskánar sem hylur yfirborð þurrlendis víða um heim (e. crust, soil crust, biocrust).

Á Íslandi er þessi skán mikilvæg í landgræðslu og oft forsenda landnáms plantna, því skánin gerir yfirborðið stöðugt og ver það gegn frostlyftingu og rofi um leið og nitri er smám saman safnað í vistkerfið. Fleiri lífverur en bakteríur af þessu tagi mynda skánina, svo sem ýmsar fléttur og mosategundir. Bók Harðar Kristinssonar (2016) er afar merkileg heimild um fléttur í náttúru Íslands. Allar þessar lífverur eru mikilvægar fyrir mold og vistkerfi landsins enda þótt þær láti lítið yfir sér miðað við stórvaxnari tegundir.

Blágrænþörungar gegndu forvitnilegu lykilhlutverki í sögu jarðar og lífsins, en þeir komu fram fyrir um 3 milljörðum ára. Talið er að breiður blágrænþörunga í hafinu hafi smám saman byggt upp súrefnisforða andrúmsloftsins, sem er bæði forsenda veðrunar (oxun), jarðvegsmyndunar og svo vitaskuld starfsemi vistkerfa á jörðinni (orkuskipti sem byggjast á afoxun og oxun/bruna kolefnis).

Blessuð skánin

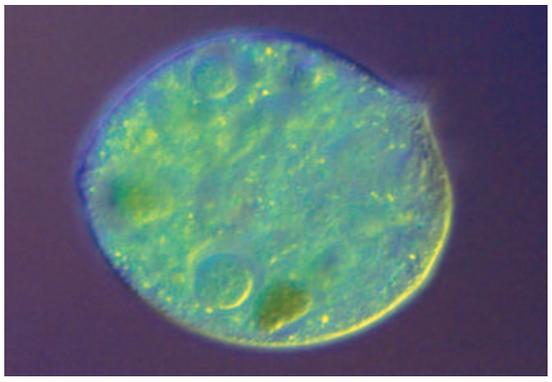
Lífræn jarðvegsskán er útbreidd um heiminn, ekki síst á þurrlendissvæðum og þurrum svæðum jarðar. Hún hefur afar mikil áhrif á jarðvegsyfirborðið og vistkerfi. Hún eykur samkornamyndun og myndar varðbelti á yfirborðinu sem minnkar eða stöðvar rof. Á Íslandi skiptir einnig miklu að skánin stöðvar myndun ísnála (sjá 16. kafla um kulferli), sem er forsenda þess að uppgræðsluaðgerðir takist sem skyldi. Hún stuðlar að auknu ísigi vatns sem dregur úr yfirborðsrennsli og einnig stórlega úr uppgufun úr moldinni, sem bætir vatnsbúskap. Þetta er einkar mikilvægt þar sem moldin er sendin og heldur litlu vatni, að ekki sé talað um þar sem yfirborðið hitnar í sól vegna þess að það er mjög dökkt, eins og á við um íslenskar sandauðnir.

Niturnám skánarinnar er afar mikilvægt fyrir vistkerfi jarðar. Skánin nemur nitur úr andrúmsloftinu og skilar því til annarra hluta vistkerfisins. Nitursöfnunin getur numið tugum kg á ha hvert ár, m.a. hér á landi – þetta er gríðarlegt magn niturs en hluti þess tapast með útskolun eða er fjarlægt með beit. Jarðvegsskán stuðlar að uppsöfnun lífrænna efna í moldinni sem eykur frjósemi vistkerfa. Skánin er ennfremur mikilvæg að því leyti að hún býr til örugg „set“ þar sem góð skilyrði eru fyrir fræplöntur að komast á legg. Lífræn jarðvegsskán er afar viðkvæm fyrir raski á borð við akstur utan vega og traðki manna og búfjár. Þar sem gróður er lítill er yfirferð búfjár oft mikil sem hefur skaðleg áhrif á skánina og því er mikilvægt að hlífa slíkum svæðum við beit.

Mynd 3.5. Jarðvegsskán. Þarna er að finna fjölbreyttar lífverur sem auka stöðugleika yfirborðsins og móta það fyrir landnám háplantna á borð við víðinn til hægri á myndinni.

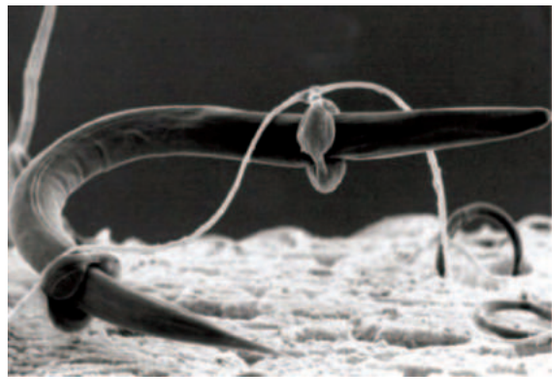
Þetta er í raun mesta umhverfisbylting í sögu jarðarinnar og henni olli þessar smáu en mjög svo mikilvægu lífverur. Benda má á aðgengilega yfirlitsgrein um jarðvegsskán eftir Jayne Belnap (2003), sjá einnig Weber o.fl. 2016 fyrir þá sem vilja fræðast meir.

Frumdýr (e. protozoa) eru einkjörnungar. Þau eru gríðarlega margbreytileg; um 2 000 tegundum hefur verið lýst, sem er trúlega um 10% af tegundum frumdýra í jarðvegi. Frumdýr lifa fyrst og fremst á bakteríum og þrífast því best í rakri mold. Þau gegna mikilvægu hlutverki í næringarhringrásinni (mynd 3.6).



Mynd 3.6. Frumdýr – angarsmáar lífverur sem eru mikilvægur hlekkur í næringarhringrás moldarinnar. Mynd: NRCS Soil Biology Primer.

Þráðormar (e. nematodes) eru óliðskiptir ormar, oftast það smáir að þeir sjást ekki með berum augum (allt að því nokkrir mm á lengd). Jarðvegur sem hefur tiltölulega mikið af stóru holrými, svo sem sendinn jarðvegur (og væntanlega *eldfjallajörð*), er ákjósanlegur bústaður þráðorma því þar rúmast þeir best. Þeir lifa sem afræningjar og hræætur og éta jafnvel aðra þráðorma. Sumar tegundir þeirra geta valdið miklum skaða á rótum gróðurs og ræktartegundum á ökrum. Því eru eiturefni mikið notuð til að stemma stigu við þráðormum við jarðrækt, en nú færist í vöxt að hvíla akra og planta tímabundið í þá tegundum sem hafa eituráhrif á þráðorma, t.d. ýmsum harðviðartegundum. Við það fækkar þeim svo að þeir valda ekki skaða fyrr en stofninn nær sér á strik á ný. Sumar ræktartegundir eru ónæmar fyrir þráðormum, t.d. sojabaunir. Fjöldi tegunda þráðorma sem hefur verið lýst er um 15 000, en kann að reynast >100 000 þegar öll kurl koma til grafar (mynd 3.7).



Mynd 3.7. Þráðormur genginn í gildru svepps sem vex umhverfis orminn og herðir að og sogar síðan úr honum næringuna. Myndin er úr European Atlas of Soil Biodiversity, Jeffrey o.fl. 2010 (bls. 94).

Ánamaðkar eru mjög mikilvæg jarðvegsdýr (mynd 3.8). Þeir þrífast á plöntuleifum og lífrænum efnum í moldinni. Úrgangur þeirra verður að tiltölulega stórum samkornum (mm) sem einkenna oft efstu lög jarðvegs (kornótt bygging, sjá 7. kafla um jarðvegslög). Ánamaðkar melta feiknalega mikið af mold á ári hverju. Kornótt bygging bætir jarðvegseiginleika á marga lund. Úrgangur þeirra inniheldur t.d. meira af auðnýtanlegri næringu fyrir rætur plantna en jarðvegurinn umhverfis. Einnig má nefna að vatn streymir greiðlega um göngin sem ánamaðkarnir grafa um jarðveginn.

Mynd 3.8. Gríðarlegur fjöldi ánamaðka býr í moldinni. Þeir eru afar mikilvægir fyrir næringarhringrásina eins og önnur dýr í moldinni, en einnig mynda þeir loftrásir og stuðla að kornóttri byggingu jarðvegsins.

Fjöldi ánategunda sem hefur verið lýst er yfir 3 600, en fáar tegundir eru algengastar í Evrópu og Bandaríkjunum. Ástæða er til þess að benda sérstaklega á grein Hólmfríðar Sigurðardóttur um ánamaðka í *Náttúrufræðingnum* (1994). Þess má geta að Charles Darwin var frumkvöðull í rannsóknum á ánamöðkum og áhrifum þeirra á frjósemi jarðvegs.

Maurar og termítar hafa mikil áhrif á jarðveg heitari landa, einkum á gresjum og í skógum hitabeltisins. Þekktar eru um 2 000 tegundir termíta. Sumar þeirra byggja stóra hrauka sem eru áberandi, m.a. á gresjum Afríku (mynd 3.9). Maurar eru afar algengir í jarðvegi og nú þegar hefur verið lýst um 9 000 tegundum þeirra.

Mynd 3.9. Termítahraukur. Myndin er tekin í Níger. Mynd: Hafdís Hanna Ægisdóttir.

Mítlar og köngulær (e. mites). Köngulær og mítlar (sem eru skyldir köngulóm) eru oft heldur ægilegir ásýndum þegar þeir eru skoðaðir í öflugri smásjá. (myndir 3.10 og 3.11). Um 45 000 tegundum mítla hefur verið lýst, en talið er að það sé aðeins um 5% heildarfjölda tegunda þeirra.

Mítlar og köngulær, eins og flestar aðrar tegundir lífvera í jarðvegi, gegna mikilvægu hlutverki við losun næringarefna. Esther Marloes Kapinga (2020) gerði rannsóknir á mítlum og mordýrum í uppgræðslutilraun á Geitasandi á Rangárvöllum sem sýna hvernig fjöldi og fjölbreytni þessara dýra eykst eftir því sem vistkerfum vex ásmegin.

Mynd 3.10. Mítlar gegna mikilvægu hlutverki í næringarhringrás í moldinni við losun næringarefna. Mynd: NRCS Soil Biology Primer.

Mynd 3.11. Heldur ófrýnileg könguló sem lifir í mold. Mynd: NRCS Soil Biology Primer.

Mordýr. Stökkmor (e. springtail) er oft algengasta liðdýrið í jarðvegi (mynd 3.12), það geta jafnvel verið >10 000 þeirra undir einum fermetra. Stökkmor er hlutfallslega algengast í köldu loftslagi. Nafnið hlýtur dýrið af því að að undir afturbol þess liggur hali sem það getur látið smella niður, og þar með tekst dýrið á loft. Á þann hátt getur það forðað sér undan aðsteðjandi hættum. Stökkmor er talið hafa jákvæð áhrif á vistkerfi og vöxt gróðurs.

Mynd 3.12. Stökkmor eru algeng liðdýr í jarðvegi. Það stekkur um með því að spyrna við með afturendanum. Við vissar aðstæður, t.d. ef rótað er í frjósömum jarðvegi, getur mikil mergð komið í ljós og stokkið um. Mynd: European Atlas of Soil Biodiversity.

Sveppir (e. fungi). Helgi Hallgrímsson (2010) hefur ritað ítarlega bók um sveppi og sveppafræði og einnig Bjarni D. Sigurðsson (2015), sem gaf út aðgengilega bók um matarsveppi. Vert er að gefa þessum bókum gaum því þessar lífverur eru svo snar þáttur í starfsemi vistkerfa. Sveppir mynda langa þræði sem vaxa inn á milli jarðvegskorna, róta og bergs (mynd 3.13).

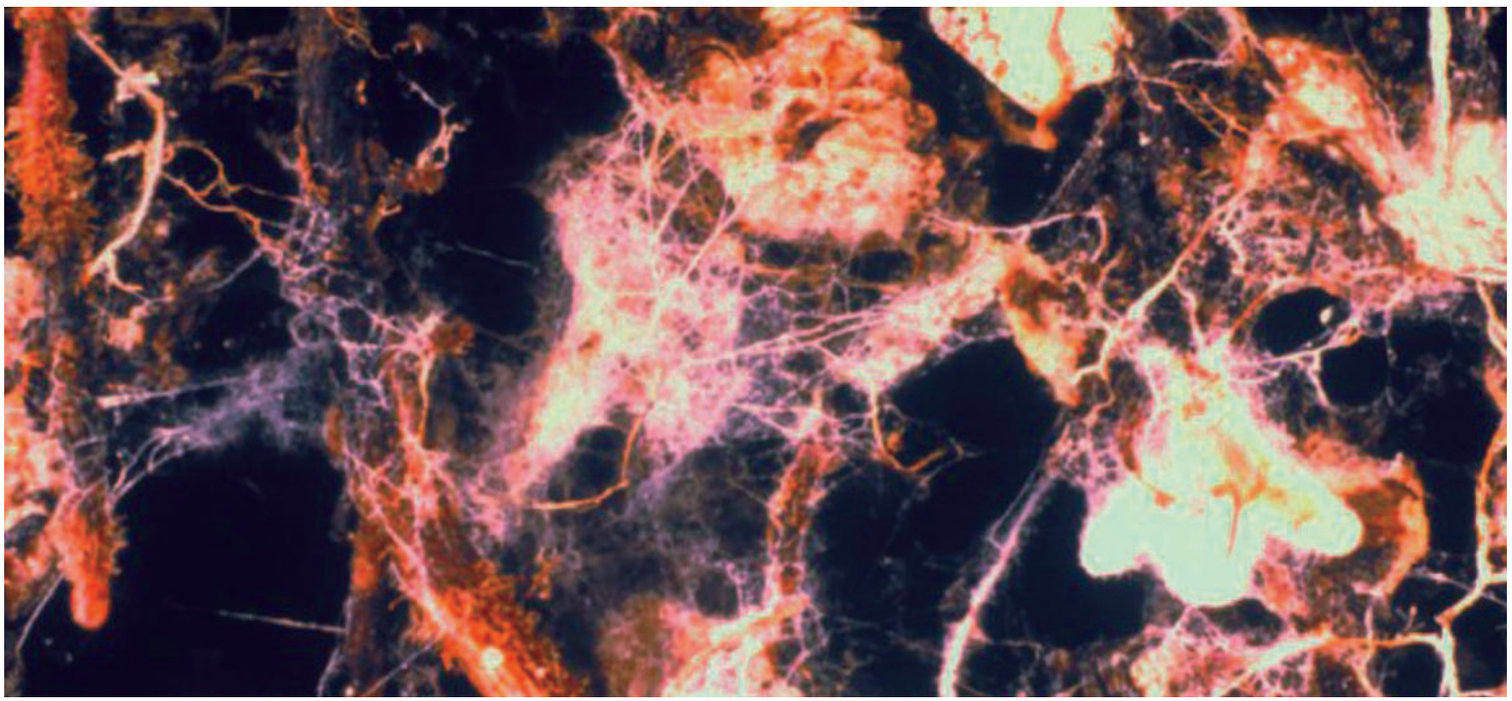
Sveppir eru mikilvægir fyrir sundrun efnis, en sumir vaxa í sambýli við aðrar lífverur (t.d. rætur plantna) sem ýmist getur valdið skaða eða verið nauðsynlegt viðkomandi lífverum. Myglusveppir (e. molds) stuðla að sundrun lífrænna efna og eru mikilvægari að því leyti en hattsveppir (m.a. átsveppir). Yfirborðshluti hattsveppa er aðeins lítill hluti lífveranna. Starfsemi myglusveppa er mjög sérhæfð og tegundasamsetning þeirra mótast að hluta af samsetningu lífræna efnisins sem er til boða. Svepprót (e. mycorrhiza) er sérstaklega þýðingarmikil fyrir margar tegundir plantna því hún greiðir fyrir næringarupptöku þeirra (mynd 3.13).

Sveppir geta verið mikilvægir fyrir vatnsbúskap – þeir mynda m.a. brú fyrir vatn frá yfirborði og niður í mold og stuðla þannig að vatnsflæði í moldinni þegar það er takmarkað. Þekkt er að í eyðimörkum miðla sveppir vatni upp til róta plantna.

Sveppir eru einkanlega fjölbreyttir í skóglendi og frjósemi landsins eykst verulega eftir því sem þeim fjölgar. Talið er að til séu um 72 000 tegundir af sveppum en að aðeins 5% þeirra hafi verið lýst. Um helmingur þeirra flokkast sem jarðvegssveppir.

Geislasveppir (e. actinomycetes), sem eiga bæði skyldleika við bakteríur og sveppi, stuðla að rotnun lífræns efnis, ekki síst efna sem eru tiltölulega torleyst, svo sem ligníns, sellulósa og lípíða. Þeir mynda gríðarlega víðtæka þræði um moldina.

Geislasveppir eru liður í hringrás næringarefna í mörgum vistkerfum. Athyglisvert er að þeir þrífast best á tiltölulega þröngu sýrustigsbili (pH 6–7,5). Margir geislasveppir gefa frá sér efni sem drepa örverur, sem er mikilvægur eiginleiki sýklalyfja; t.d. er aktínómísín mikið notað sýklalyf en það er unnið úr geislasveppum.



Mynd 3.13. Svepprót sem losar næringarefni til plantna. Svepprætur tengjast m.a. örefnum í jarðveginum og liðka fyrir næringarefnaupptöku. Mynd: NRCS Soil Biology Primer.

Plöntuskaðvaldar. Ljóst er að margar tegundir þeirra lífvera sem hér hafa verið nefndar geta valdið miklu tjóni í ræktarlandi, þar á meðal eru sveppir, bakteríur, veirur og skordýr. Skaðvaldar sem lifa í mold geta auðveldlega borist á milli landa, til dæmis með pottaplöntum, og ber því að varast slíka flutninga eins og kostur er.

Plöntuskaðvaldar eru vettvangur sérstakrar fræðigreinar, enda er mikið í húfi að slíkir skaðvaldar eyðileggi ekki uppskeru. Rótarflókasveppur (*Rhizoctonia solani*) er algengur skaðvaldur í kartöflurækt og finnst hér á landi (Sigurgeir Ólafsson 2006) og lirfur kálflugu (*Delia radicum*) eru alvarlegasti skaðvaldurinn í ræktun káls og rófna (Guðmundur Halldórsson 1989).

Aðrar lífverur í mold gegna oft mikilvægu hlutverki við að draga úr tjóni af völdum plöntuskaðvalda. Til dæmis getur svepprót dregið úr skaðsemi skordýralirfa sem naga rætur plantna og það sama má segja um jarðvegssveppi sem sníkja á skordýrum (Edda S. Oddsdóttir 2010).

Mælingar á virkni jarðvegslífs. Nokkrar aðferðir eru notaðar til að mæla virkni jarðvegslífs. Algeng aðferð er að stinga bómullarstrimlum ofan í jarðveginn og meta síðan hve hratt jarðvegsörverur vinna á þeim. Notaðir eru strimlar sem framleiddir eru sérstaklega í þessu skyni. Svokölluð flæming er einnig mikið notuð aðferð þar sem jarðvegsdýr eru flæmd úr sýnum með hita. Þá er hitaperu komið fyrir ofan við moldarsýni sem veldur því að það þornar ofan frá og jarðvegsdýrin flæmast niður úr sýninu og lenda ofan í vatnskari með rotvarnarvökva, þaðan sem þau eru síðan tekin til greiningar.

Mæling á örverumassa í jarðvegi (e. microbial biomass) er stundum talin ein besta aðferðin til að meta gæði og heilbrigði jarðvegs (Dudal 1998).

3.3. Rotnun og C/N-hlutfall

3.3.1. Öndun – rotnun

Allar þær lífverur sem búa í moldinni þurfa næringarefni til viðhalds og vaxtar. Virkni lífvera og þar með vistkerfisins er því háð því hve mikið leggst til af nýjum næringarefnum. Lífræn efni eru misjafnlega auðleysanleg í jarðvegi, þ.e. lífverur ráða misvel við að melta hin ýmsu efni. Sykrur og mörg prótein eru mjög auðmelt en sellulósi, ýmsar fitusýrur og lignín eru aftur á móti torleystari.

Segja má að rotnun í mold sé ferli þar sem kolefni á afoxuðu formi (verður til við ljóstillífun) í ýmsum lífrænum sameindum er oxað (lífverurnar nota til þess súrefni) og út rýkur koldíoxíð (CO_2). Orku ljóstillífunarinnar er skilað aftur en þau næringarefni sem losna við „brunann“ eru gripin á ný af öðrum lífverum og rótum plantna um leið og nýjar lífrænar kolefnissameindir myndast fyrir atbeina sólarljóssins. Því losnar mikið af CO_2 úr jarðveginum og þá losun er tiltölulega auðvelt að mæla með þar til gerðum mælitækjum – moldin andar. Styrkur þess CO_2 sem jarðvegurinn andar frá sér er mælikvarði á niðurbrotsstarfsemi en um leið enn einn mælikvarðinn sem hægt er að nota á virkni kerfisins.

Þess ber að geta að niðurbrot lífræns efnis á sér einnig stað við loftfirrtar aðstæður (skortur á súrefni) og þá losnar fyrst og fremst metangas (CH_4), t.d. í mýrlendi. Mjög sérhæfðar lífverur stuðla að niðurbroti lífræns efnis við þessar aðstæður. Umtalsverð orka er þá enn til staðar – hægt væri að oxa (brenna) kolefnið mun betur við meiri loftun, enda má nota CH_4 (metan) til brennslu, t.d. á bílvélar. Metangas hefur 10–50 sinnum meiri gróðurhúsaáhrif en CO_2 (háð reikniaðferðum) og því er mjög óæskilegt að losa metan út í andrúmsloftið.

3.3.2. C/N-hlutfall

Lífverur þurfa mikið magn af nitri (N) fyrir vöxt sinn og viðgang og því er það mikilvægt fyrir rotnun á lífrænum efnum. Nitur er jafnframt iðulega takmarkandi þáttur fyrir lífsstarfsemina og er þess vegna næmur mælikvarði á frjósemi vistkerfa. Það má segja að virkni jarðvegslífvera takmarkist m.a. af því magni lífrænna efna sem er tiltækt til rotnunar (eldsneyti til oxunar – bruna) og því framboði af nitri sem nauðsynlegt er fyrir niðurbrotið. Vitaskuld hafa aðrir þættir áhrif, t.d. hitastig, rakastig, sýrustig og framboð á súrefni (sem er t.d. lítið í afoxuðum, súrefnissnauðum votlendisjarðvegi).

Eftir því sem minna er af nitri í samanburði við framboð á lífrænu kolefni (C), þeim mun óhægara eiga lífverur moldarinnar um vik, skortur á N hamlar þá lífsstarfseminni.

Hugtakið „C/N-hlutfall“ er notað til þess að lýsa þessu samhengi. Eftir því sem C/N-hlutfallið er hærra (minna af N samanborið við C) þeim mun takmarkaðra er framboð niturs fyrir lífverur. Frjósöm jörð hefur C/N-hlutfall á bilinu 8-12, en hún er orðin verulega ófrjó við C/N >25, jafnvel þótt verulega mikið sé af lífrænu efni í moldinni. Dæmi um C/N-hlutfall í plöntuleifum, lífverum og jarðvegi er sýnt í töflu 3.1. Efni með mjög hátt C/N-hlutfall, t.d. viðarkurl, getur af þessum sökum tafið fyrir landnámi og vexti plantna og því er það notað í stígagerð í þessu skyni.

Tafla 3.1. C/N-hlutfall.

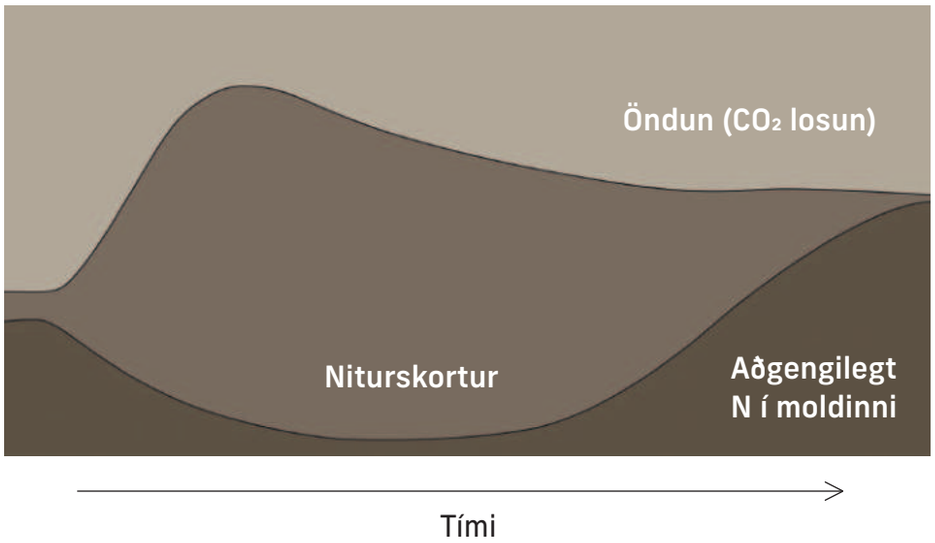
EFNI	C/N-HLUTFALL
Viðarsag	300–600
Pappír	80–150
Hey	15–40
Efni í lífrænni tunnu[1]	10–15
Seyra	7
Jarðvegsörverur	5–8
Mold almennt A-lag	8–20 (12–14)[2]
Mór (O-lög)	30–90[3]

1: í safntunnu fyrir lífrænan úrgang, háð rotnunarstigi o.fl. **2**: C/N er oft á bilinu 12-14 en er þó afar breytilegt. **3**: þó oft lægra á Íslandi, t.d. 25.

3.3.3. Rotnun og þörfin fyrir nitur

Hegðun vistkerfa stjórnast iðulega af samspili niturs og framboði lífrænna efna. Starfsemi jarðvegsörvera tekur kipp við það að fá nitur inn í kerfið. Þegar mikið leggst til af efni með lágt C/N-hlutfall (hlutfallslega mikið af N, t.d. í moltu og seyru) eykst starfsemi lífvera mjög hratt (mynd 3.14). Ef C/N-hlutfallið er hátt getur orðið skortur á N og á meðan svo er gengur niðurbrotið hægt fyrir sig. Jafnframt tína lífverurnar upp allt laust N í jarðveginum um leið og það losnar og því fer að gæta nituskorts hjá gróðri.

Gott dæmi um þetta á Íslandi er þegar uppskerumikið land er friðað fyrir beit, en við það raskast jafnvægi kerfisins.



Mynd 3.14. Niturskortur verður í kjölfar þess að sina eða annað efni með hátt C/N-hlutfall leggst til við yfirborðið. Örverur nýta allt laust nitur sem leggst til í þeirri viðleitni að brjóta niður sinuna og því verður tímabundinn niturskortur í moldinni. Landið virðist þar af leiðandi ófrjórra – í bili. Enda þótt lítið sé um nitur fyrir plöntur er öndun mjög ör vegna starfsemi örvera og mikil losun á CO_2. Þegar jafnvægi kemst á að nýju býr vistkerfið að auknum niturbirgðum og meiri frjósemi.

Gróður vex upp, hann er ekki fjarlægður með beit og verður síðan að sinu. Sinan hefur hátt C/N-hlutfall og þar með taka jarðvegslífverur að grípa allt nitur jafnharðan og það losnar til að hafa undan við niðurbrotið. Því getur N nánast týnst úr kerfinu um tíma og þá leggst gróðrinum lítið til fyrr en nýju jafnvægi er náð (e. nitrogen depression period). Kerfinu ofanjarðar getur þá farið aftur með tilliti til grósku. Þetta hefur stundum verið kallað að „landið fari í sinu", sem mörgum bóndanum þykir slæmt.

Þegar jafnvægi er náð í kjölfar niturskortsins er kerfið í heild orðið frjósamara í þeim skilningi að meira er af lífrænum efnum og nitri. Þetta birtist oft sem eins konar „sprenging" í gróðurfari þar sem land hefur verið friðað um hríð (oft í áratugi).

Blómplöntur á borð við blágresi verða þá ríkjandi, en þær eru margar hverjar háðar frjórri mold og geta betur nýtt sér mikið framboð niturs en ýmsar aðrar tegundir (mynd 3.15). Aðrir þættir spila þarna inn í, t.d. einangrun sinunnar, en áhrif niturhringsins í þessu ferli hafa lengi verið vanmetin hérlendis, enda þótt þau séu vel þekkt erlendis.

Þetta samhengi þarf að hafa í huga þegar gerður er samanburður á aðstæðum í beittu og óbeittu landi – samanburðurinn er óraunhæfur ef fremur stutt er síðan land var friðað fyrir beit – því vöxtur innan friðaða landsins kann að vera mun minni en á beitta svæðinu og í ójafnvægi til að byrja með. Rétt er samt að hafa í huga að hófleg beit á vel grónum og öflugum vistkerfum (t.d. graslendi) getur örvað hringrás næringarefna og frjósemi landsins.

Hægt er að nýta þekkingu á niturhringrásinni til þess að búa til beitiland sem hentar til nýtingar á ákveðnum tímum. Sinubrennsla gerir yfirborðið svartleitt og það hitnar því fyrr í sól. Um leið er fjarlægð einangrun yfirborðsins sem flýtir fyrir því að jarðvegurinn hlýni að vori. Og nú vantar samkeppnina um nitrið sem losnar, gróðurinn nýtur þess og svæðin grænka fljótt að vori og gefa góða uppskeru. Mjög þung beit árið áður hefur sömu áhrif, beit sem fjarlægir alla uppskeru. Með þessum hætti er hægt að skapa vorbeitarhólf, en þá er sérstaklega mikilvægt að hafa í huga að þessi aðferð byggist á því að gengið er á lífrænan forða jarðvegsins og endurtekin sinubrennsla getur valdið hruni vistkerfisins með sama hætti og ofbeit ár eftir ár.

Mynd 3.15. Blómskrúð sem hefur myndast í kjölfar friðunar og að loknu tímabili þegar nitur hefur skort í kerfinu. Myndin til hægri er úr Þórsmörk frá árinu 2007, en þetta land er nú óðum að hyljast víðikjarri og birkiskógi með frjósömum blómlendum o.fl. inn á milli.

Frjósöm mold er auðug af lífrænum efnum. Þegar land er brotið til ræktunar losnar um þessi efni og framboð á nitri er því yfirleitt gott í upphafi ræktunar. En sé uppskorið oft án þess að neinu sé skilað til baka til moldar tekur að ganga á lífrænan forða landsins. Mjög gott dæmi um þetta er landnám bænda á gresjum Bandaríkjanna þar sem uppskera var í fyrstu afar góð án þess að notaður væri áburður. En það gekk hratt á lífrænan forða moldarinnar sem að lokum leiddi til uppskerubrests og nú er yfirleitt ekki hægt að nytja þessa akra án áburðar. Líklega hefur eitthvað svipað gerst við landnám Íslands, jörðin hefur verið afar frjó í upphafi áður en tók að ganga á lífrænan forða í yfirborðslögum með fjölbreytilegum afleiðingum (sjá 20. kafla).

Framræsla mýra hefur sömu áhrif (mynd 3.16) en súrefni á þá greiðari aðgang að moldinni og lífsstarfsemin eykst – moldin tekur að anda. „Mýrin brennur“ er einnig sagt (bruni er í raun ekkert annað en oxun). Við það að kolefnið „brennur“ og hverfur sem CO_2 losnar um mikið af nitri sem eykur bændum heyfeng. En smám saman getur gengið á

Mynd 3.16. Framræst mýri á Suðurlandi. Við framræsluna tekur kolefni að oxast (brenna) en þá losnar um nitur og frjósemi til ræktunar verður umtalsverð. En meðan á þessu stendur gengur smám saman á lífrænan forða kerfisins.

þennan forða og yfirborðið tekur jafnvel að lækka. Sumir evrópskir bændur þurfa að glíma við sérkennileg vandamál þegar þetta gerist, mýrarnar brenna upp. Sums staðar er nú örþunnur jarðvegur, sem stendur jafnvel neðan sjávarmáls en er varinn af strandgörðum, þar sem áður voru margra metra djúpar mýrar, t.d. við Englandsstrendur og strendur Norðursjávar.

3.4. Lífræn efni í jarðvegi

Stærsti hluti þeirra lífrænu efna sem bætast við á ári hverju rotnar á tiltölulega skömmum tíma, jafnvel innan árs, nema þar sem umhverfisaðstæður koma í veg fyrir rotnun, svo sem í mýrum á norðurslóðum þar sem er kalt og súrefnisþrýstingur lítill. Hluti efnanna verður þó ávallt eftir í jarðveginum og myndar lífrænu efnin í moldinni sem taka síðan þátt í mun hægari hringrás lífrænna efna.

3.4.1. Tegundir lífrænna efna

Flokkun lífrænna efna í jarðvegi ber þess merki hve erfitt er að „sjá“ efnin. Lífræn efni í jarðvegi eru einnig nefnd húmus. Þeim er skipt niður í húmínefni (e. humic) og einföld húmínefni (e. non-humic), en þau síðarnefndu eru frekar einföld og auðbrjótanleg húmusefni. Húmínefnin eru síðan aðgreind frekar með efnafræðilegum aðferðum sem fela í sér skolun í mismunandi sýrum og bösum.

Hefðbundin skipting húmínefna er í húmín, húmínsýru og fúlvínsýru og efnin eru svört og mjög stöðug. Húmínsýrur eru brúnleitar og leysast upp í basa en ekki sýru, en fúlvínsýrur eru gular eða rauðar og leysast upp í sýrum. Þær eru einnig óstöðugastar gagnvart rotnun. Þessi skipting var mjög ráðandi í skrifum um lífræn efni í mold en byggist á

gamaldags aðferðum og er ekki eiginleg skipting á gerð eða virkni lífrænna efna í jarðvegi. Því er ekki lögð áhersla á hana hér, en þó er rétt að hafa þessa skiptingu í huga því hún kemur víða fram í skrifum um jarðvegsfræði. Nýjar aðferðir, sem m.a. byggjast á notkun gasgreinis (e. gas chromatography), innrauðum geislum o.fl. tækjum, ryðja sér nú til rúms.

Í jarðvegslögum er greint á milli mismunandi gerða lífrænna efna og þeim lýst með stöðluðum aðferðum sem þó eru nokkuð breytilegar á milli landa. Þar ræður m.a. rotnunarstig, t.d. hvort efnin eru fremur órotnaðar plöntuleifar, úrgangur stórra jarðvegslífvera eða mikið rotnuð efni sem geta verið tengd bergefnum jarðvegsins.

3.4.2. Dreifing og magn í jarðvegi

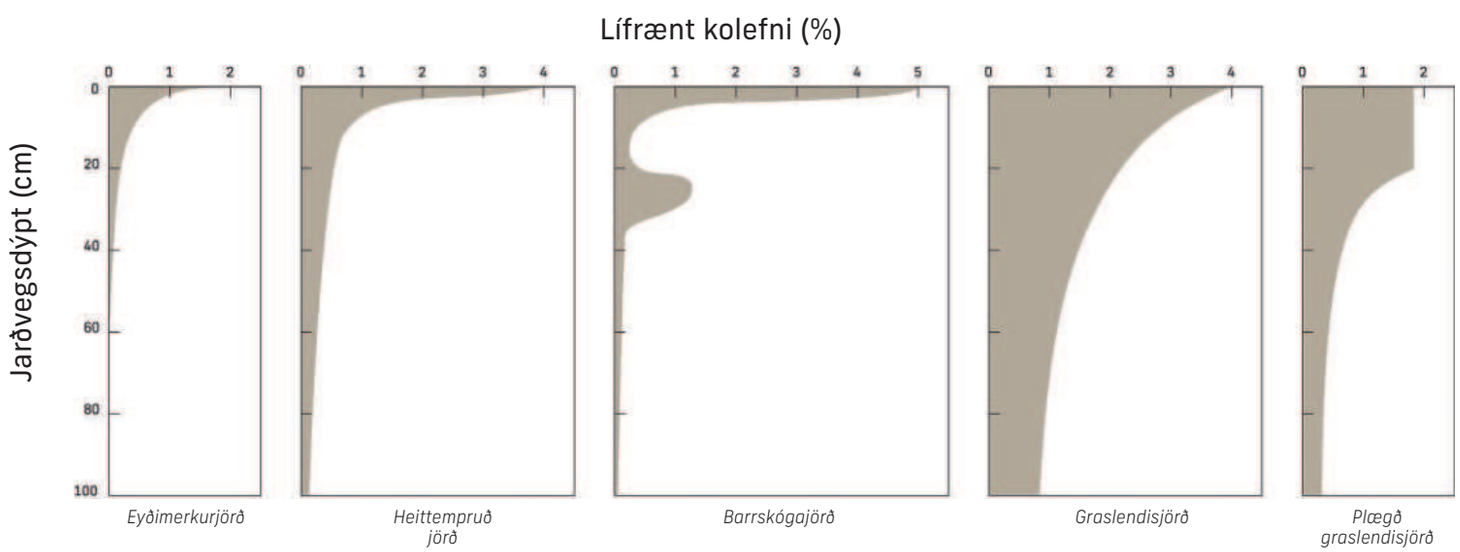
Lífrænt kolefni (OC) og lífræn efni (OM)

Lífræn efni eru að langmestu leyti mynduð úr kolefni en einnig súrefni, vetni og nitri – mun minna er af öðrum efnum. Þeir mælikvarðar sem notaðir eru til að meta magn lífræns efnis eru yfirleitt annaðhvort heildarmagn lífrænna efna (OM, e. organic matter) eða lífræns kolefnis (OC). Hér er yfirleitt talað um kolefnið (OC eða bara C). Kolefni er hægt að mæla beint með ýmsum aðferðum en heildarmagn lífrænna efna er mælt með bruna (hve mikið brennur úr sýninu við háan hita í ofni). Bruni er góð mælistika á lífrænu efnin (OM), enda eru það þau í heild sem skipta máli. Mæling sem tekur mið af heildarbruna á lífrænu efni er þó ónákvæmari mælikvarði á C (orkuna) en bein mæling á kolefni (C), enda er hluti þess efnis sem losnar við bruna á jarðvegi vatn sem bundið er í sýnunum. Kolefni tengist einnig pælingum um gróðurhúsalofttegundir og því er æskilegra að mæla OC en OM. Til að reikna OM út frá OC er yfirleitt margfaldað með stuðlum frá 1,6–1,8.

Í þessari umfjöllun er aðeins rætt um þann hluta kolefnis sem er hluti af lífrænu efnunum í jarðveginum, en auk þess getur verið mikið af kalki (sem inniheldur vitaskuld kolefni, $CaCO_3$) í honum, sérstaklega á þurrum svæðum jarðar eða þar sem móðurefni jarðvegs eru kalkrík, en það á ekki við hérlendis, með fáum undantekningum þó (*kalkjörð*, sjá 9. kafla).

Dreifing

Yfirleitt er langstærsta hluta lífræns efnis í mold að finna í yfirborðslögunum (mynd 3.17). Í mörgum vistkerfum, t.d. skóglendi og graslendi, er eins konar



Mynd 3.17. Dreifing kolefnis í yfirborðslögum í nokkrum jarðvegsflokkum (sjá 9. kafla um flokkun jarðvegs heimsins).

motta efst með lifandi og dauðu efni þar sem kolefnisinnihald er oft >12% C. Síðan fellur hlutfall kolefnis hratt eftir því sem neðar kemur í moldina. Í þurrlendisjarðvegi er yfirleitt 1–3% kolefni í yfirborðslögum en svæði sem búa við litla úrkomu (eyðimerkurloftslag) hafa enn minna kolefni, oft <1%. Í jarðvegi barrskóga safnast lífræn efni iðulega fyrir í sérstöku lagi nokkru undir yfirborðinu, sem er eins konar einkennislag *barrskógajarðar*, eins og fjallað verður um síðar.

Lífræn jarðvegslög (sjá umfjöllun í 7. kafla um jarðvegslög) eru táknuð sem O- eða H-lög. Þau innihalda >12% kolefni og ef slík lög eru nægjanlega þykk (og mörg) telst jarðvegurinn vera lífrænn jarðvegur (*mójörð*). Raunar er markið sett nokkru hærra en 12% C ef moldin er leirrík – allt upp að 16% í mjög leirríkri mold. Þetta er gert til að gefa áhrifum leirsins gildi, sem eru mikil í leirríkri mold, en annars eru lífrænu efnin ráðandi þáttur.

Mójörð (Histosol) hefur langmest af lífrænum efnum í heildina, oft >100 kg m^{-2} (þ.e. magn kolefnis undir einum fermetra lands) en meðaltal jarðvegs heimsins er aftur á móti 5–15 kg m^{-2} eftir því hvernig er reiknað. *Eldfjallajörð* (Andosol), sem er jarðvegur eldfjallasvæða, hefur nokkra sérstöðu því í þeim jarðvegi er dreifing kolefnis mjög ójöfn og oft er mikið af kolefni niður allt jarðvegssniðið. *Eldfjallajörð* hefur einnig þann eiginleika að binda lífræn efni, eins og rætt er um í kaflanum um þessa jarðvegsgerð. Því er mun meira af lífrænum efnum í *eldfjallajörð* en öðrum jarðvegi þurrlendis (meðaltal 25–35 kg m^{-2}).

Loftslag

Loftslagið hefur áhrif á heildarmagn lífrænna efna í jarðvegi því bæði vöxtur gróðurs og rotnun eru háð hita og vatni í jarðvegi, sem m.a. stjórnast af úrkomu. Lítið er af lífrænum efnum í mold í heitum eyðimörkum því kolefnið oxast fljótt við slíkar aðstæður, fyrir utan að ofanjarðarvöxtur er iðulega lítill. Einnig er hlutfallslega lítið af lífrænum efnum í rakri mold þar sem er heitt sökum örrar rotnunar og umsetningar lífrænna efna, jafnvel þótt ofanjarðarvöxtur sé mikill.

Í hitabeltinu er lífmassinn „geymdur“ í ofanjarðarhluta vistkerfanna, svo sem í regnskógunum. Það sem fellur til af dauðum lífmassa rotnar mjög hratt og er tekið inn í lífkerfið að nýju. Meira safnast fyrir þar sem er þurrara því rotnun og umsetning er þá hægari, en aðeins upp að vissu marki því í mjög þurru og heitu loftslagi oxast kolefnið tiltölulega ört, sem áður sagði. Því er kolefnisinnihald *eyðimerkurjarðar* lágt. Alla jafna er mest af lífrænum efnum í svölu og sæmilega þurru loftslagi, sem er loftslag graslendis tempraða og kaldtempraða beltisins. Þetta eru iðulega stöðug og frjósöm kerfi með mikið þanþol, t.d. gagnvart beit, en ræktun án áburðargjafar lækkar kolefnisinnihaldið smám saman, sem og ofbeit. Beit örvar hins vegar þessi kerfi upp að ákveðnu marki, enda hafa þau þróast samhliða beit árþúsundum saman og jafnvel lengur, svo sem í Afríku.

Hve lengi?

Eins og áður sagði rotna flest þau efni sem leggjast til jarðvegsins innan hvers árs (hringrás) en hluti þeirra bætist við lífrænan forða moldarinnar. Talið er að fúlvínsýrur endist í jarðvegi í áratugi en húmínsýrur í aldir eða lengur. Þá geta lífræn efni grafist undir nýrri lögum (t.d. í *mójörð* eða þar sem gætir skriðufalla eða áfoks) og geta þá orðið mjög gömul og grafist djúpt í jörðu. Einnig virðast lífræn efni geta orðið meira en 100 000 ára gömul í *eldfjallajörð* þar sem myndast mjög stöðug málm-húmus-knippi (sjá 10. kafla um *eldfjallajörð*).

Lífhvolf 2.0

Gott dæmi um mikilvægi þekkingar á áhrifum umhverfis á kolefni í mold og hringrás kolefnissambanda tengist tilraun sem gerð var í suðurhluta Arizona-fylkis í Bandaríkjunum. Þar var reist gríðarlega stórt og sögufrægt „Lífhvolf“ (Biosphere 2) þar sem reka átti fullkomlega sjálfbært vistkerfi einangrað frá andrúmslofti jarðar (mynd 3.18). Stefnt var að því að ræktun gróðurs myndi skila matvælum til íbúa hvolfsins og hreinsa andrúmsloftið af CO_2 og skila súrefni til baka. Íbúarnir ákváðu að byrja með góða lífræna mold til að tryggja góða uppskeru (sjá Weil og Brady 2017). En lífræn efni í svo kolefnisríkri mold eru aðeins stöðug í loftfirrtum aðstæðum votlenda eða þar sem loftslagið er nægjanlega kalt til að hamla rotnun.

Eins og sagði hér að ofan er yfirleitt lítið af lífrænum efnum í þurrlendisjarðvegi rakra og heitra svæða. Íbúar hvolfsins tóku eftir því að styrkur CO_2 í andrúmslofti hvolfsins jókst mjög mikið eftir að búskapurinn hófst innandyra og súrefnisstyrkurinn féll niður að hættumörkum fyrir heilsu fólks. Að lokum þurfti að dæla inn súrefni og lækka styrk CO_2. Hin lífræna mold var tekin að oxast, rétt eins og votlendin á Íslandi þegar þau voru ræst fram og losuðu mikið magn af CO_2, meira en ljóstillífun í hvolfinu réð við. En einnig kom í ljós að umtalsvert magn af CO_2 hvarf úr kerfinu (og súrefni þar með sem hluti af koltvísýringi) og það tók langan tíma að finna skýringu á því. Ástæðan var upptaka CO_2 í steypuna, aðferð sem notuð er við niðurdælingu á CO_2 við Hellisheiðarvirkjun. Arizona-háskólinn í Tucson hefur nú tekið yfir rekstur á þessu merkilega lífhvolfi og notar það til margvíslegra tilrauna (sjá www.biosphere2.org).

Mynd 3.18. Lífhvolf 2 (Biosphere 2) í nágrenni Tucson, Arizona. Lífhvolf 1 er jörðin í þessu samhengi. Aðeins lítill hluti bygginganna sést á þessari mynd. Mynd: Ása L. Aradóttir.

Viðarkol – „char“

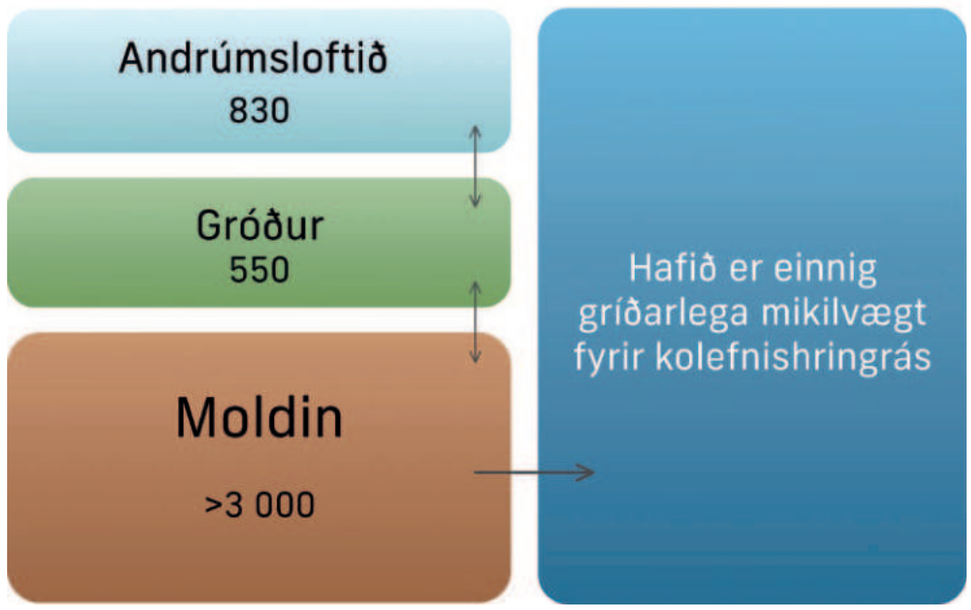
Hér er rétt að minnast aðeins á það sem nefnt hefur verið lífkol (e. biochar) sem myndast við bruna lífræns efnis við fremur lágt hitastig við sinu- og kjarrelda. Efnið inniheldur meira kolefni (C) en lífræn efni almennt þar sem hluti súrefnisins og vetnisins tapaðist við brunann. Efnið er væntanlega svipaðs eðlis og viðarkol sem gert var að á Íslandi í birkiskógum fyrr á tíð. Hið lága hitastig brunans tryggir að efnið brennur ekki til fulls. Eftir situr mjög gropið, svart lífrænt efni með mikið yfirborðsflatarmál (allt að 2 500 m^2/g; sjá Weil og Brady 2017, bls. 548) sem hefur afar hagstæða eiginleika með tilliti til frjósemi jarðvegs, svo sem vatnsheldni, jónrýmd o.fl. Efnið er enn fremur stöðugra og brotnar hægar niður en önnur lífræn efni. Telja má víst að þessi kolefnissambönd eigi margt sameiginlegt með hinum svartleitu „melanic“ jarðvegslögum í eldfjallajarðvegi (sortueiginleikar, sjá 10. kafla um *eldfjallajörð*), enda er talið að sortuefnin í slíkum jarðvegi tengist sinueldum á gresjum eldfjallasvæða. Þessi „viðarkol“ eru eftirsótt til ræktunar og stundum mærð sem eins konar töfraefni fyrir ræktun.

3.5. Hnattræn hringrás kolefnis og lífrænna efna

Lífræn efni taka þátt í sívirkri hringrás lífsins. Meginuppistaða þeirra er vitaskuld kolefni og því er það iðulega notað sem mælikvarði á frjósemi jarðvegs, eins og áður gat. En kolefni ásamt súrefni mynda einnig koltvísýring (CO_2) í andrúmslofti sem síðan er tekinn upp við tillífun plantna og myndar þá kolefnissambönd (í lífríki) og súrefni (í andrúmslofti). Heildarstyrkur CO_2 í andrúmsloftinu hefur mótandi áhrif á loftslag jarðarinnar vegna gróðurhúsaáhrifa. Rétt er að benda hér á bók Sigurðar R. Gíslasonar (2012) um kolefnishringrásina, en síðar í þessu riti er sérstakur kafli sem er tileinkaður mold og kolefnishringrásinni.

Ætla mætti af umræðu um gróðurhúsalofttegundir að mest væri af kolefni í andrúmsloftinu eða gróðri, en svo er alls ekki. Heildarmagn kolefnis í hnattrænni (e. global) hringrás skiptist milli nokkurra megingeyma. Hafið er langstærsti geymirinn, inniheldur um

C í lífrænni hringrás



Mynd 3.19. Hinir ýmsu „geymar“ kolefnis sem eru í hringrás við andrúmsloftið. Moldin er með langmesta magnið, að hafinu undanskildu. Nánar er fjallað um þessa mynd í 22. kafla.

36 000 Pg (petagrömm, 10^{15} g, 10^{9} t), en jarðvegurinn kemur þar á eftir, með 1 500–3 000 Pg eftir því hver telur (mynd 3.19). Ef allt kolefni í lífrænum jarðvegi heimskautasvæðanna væri talið (1600 Pg, sjá hér neðar) væri þessi tala >3200 Pg. Mun minna af kolefni er í andrúmslofti (750 Pg) og gróðri (560 Pg).

Stærstu geymarnir eru þó í kalksteini sem fellur út í hafinu og kolefnis-eldsneyti (kol, olía, gas), en þessir geymar taka þó ekki þátt í eiginlegri hringrás lífrænna efna nema við brennslu á kolefniseldsneyti, þ.e. kolum, gasi og olíu.

Af þessum tölum er ljóst að jarð-vegur er afar þýðingarmikill með tilliti til hringrásar gróðurhúsalofttegunda. Einnig má telja víst að stór hluti þess kolefnis sem hefur valdið aukningu á styrk CO_2 í andrúmsloftinu síðustu tvær aldirnar komi úr jarðvegi, einkum við jarðrækt en einnig vegna ofbeitar á útjörð. Við ofnýtingu er gengið á lífrænan forða jarðvegsins og kolefnið endar þá í andrúmsloftinu sem koltvísýringur. Þegar nýtingu á landi er aflétt geta vistkerfi tekið að binda kolefni á ný í auknum mæli, eins og síðar er vikið að. Við það lækkar styrkur CO_2 í andrúmsloftinu.

Í nýlegri vísindagrein (Koch o.fl. 2019) er þeirri tilgátu varpað fram að með dauða tuga milljóna frumbyggja á amerísku meginlöndunum við komu hvíta mannsins upp úr árinu 1 500 hafi upptaka gróðurs og moldar á kolefni stóraukist vegna minna álags á landið. Höfundar færa fyrir því rök að upptakan hafi verið það mikil að dregið hafi úr styrk CO_2 í lofthjúpnum. Við það hafi loftslag kólnað, sem m.a. hafi valdið kuldaskeiði sem nefnt er Litla ísöld á norðurslóðum. Slíkar kenningar eru umdeildar, en þær varpa eigi að síður ljósi á samspil andrúmslofts, loftslags og vistkerfa.

Eins og áður sagði er afar mikinn forða kolefnis að finna í votlendum jarðar. Við framræslu losnar þetta kolefni smám saman. Losun þess frá framræstu votlendi á Íslandi jafnast á við losun frá öllum iðnaði og samgöngum samtals (sjá ÓA og Jón Guðmundsson 2020). Nú hefur minnkun á losun frá votlendi verið bætt við gildar aðgerðir til þess að sporna við lofslagshlýnun, meðal annars fyrir tilstilli íslenskra rannsókna Hlyns Óskarssonar, Jóns Guðmundssonar og félaga og samninganefndar Íslands á vettvangi loftslagssamningsins. Endurheimt votlendis hefur þann kost að virka strax, losunin hættir um leið og fyllt er upp í skurðina. Fjallað er mun ítarlegar um losun gróðurhúsalofttegunda frá votlendi og hnignun mólendis á Íslandi síðar í þessu riti.

Á heimskautasvæðunum eru *mójörð* (Histosol) og *frerajörð* (Cryosol) algengar jarðvegsgerðir sem geyma mikið magn lífrænna efna eða >1 600 Pg. Sumt af þessu kolefni liggur á meira en 3 m dýpi (Tarnocai o.fl. 2009). Þegar loftslag hlýnar er hætt við að dragi úr útbreiðslu þessara jarðvegsgerða.

Sífrerinn á sinn þátt í að binda hið mikla magn af lífrænum efnum með því að halda moldinni rakri og koma í veg fyrir að hún ræsist fram. Þegar ísinn bráðnar eykst framræsla – moldin tekur að anda og lífrænu efnin að rotna og „brenna“ (oxast). Þetta getur losað umtalsvert magn af CO_2 út í andrúmsloftið í framtíðinni þegar loftslag tekur að hlýna; ferill sem raunar er hafinn nú þegar í Alaska, Kanada og Síberíu. Sú losun er hluti af vítahring loftslagshlýnunar sem kallar fram enn meiri losun gróðurhúsalofttegunda.

Að endurnýta

Lífræn efni eru auðævi sem leitast ætti við að skila aftur til moldar. Það hefur verið gert um langa hríð í landbúnaði þar sem mykja er nýtt til áburðar, enda getur það falið í sér umtalsverðan sparnað á áburði.

Á þéttbýlustu svæðum jarðar er skólpi frá fólki skilað á akra ásamt lífrænum úrgangi húsdýra. Þetta hafa Kínverjar gert um þúsundir ára og við það getur jarðvegurinn öðlast afar sérstæða eiginleika.

Jarðgerð á lífrænum úrgangi fer nú mjög vaxandi sem hluti af breyttum lífsháttum. Þar sem metangas losnar við jarðgerð er æskilegt að nýta það til brennslu vegna slæmra áhrifa metans á andrúmsloftið. Metani er víða safnað á sorpeyðingarstöðvum og notað sem eldsneyti, m.a. á Íslandi.

Mynd 3.20. Það er ekki úr vegi að ljúka þessum kafla um lífríkið með því að birta mynd af stærstu lífverum jarðar, risafurunum í Sierra Nevada-fjöllunum í Kaliforníu. Risafururnar gera miklar kröfur um aðgengi að vatni í moldinni og vaxa gjarnan í útjaðri votlendissvæða eða í eins konar hallamýrum.

Takið eftir fólkinu sem stendur undir trjánum. Þetta eru meðalstórar risafurur en alls ekki þær stærstu. Þær geta orðið mörg þúsund ára gamlar og hafa varist áföllum af völdum veðurfars og skógarelda allan þennan tíma. Tilvist þeirra eru nú í mikilli hættu vegna loftslagsbreytinga.

3.6. Áhrif lífrænna efna á jarðvegseiginleika og umhverfið

Lífræn efni í jarðvegi móta nánast alla helstu eiginleika hans og þar með vistkerfa á landi. Áður er nefnt að lífverur móta byggingu jarðvegsins sem hefur áhrif á loftun og vatnseiginleika. Lífrænu efnin hafa mikla jónrýmd sem gerir jarðveginn frjósaman. Þessi gerð jónrýmdar eykst með hækkandi sýrustigi (pH-háð jónrýmd – sem nánar er fjallað um í 5. kafla um efnaeiginleika). Lífrænu efnin innihalda enn fremur önnur nauðsynleg næringarefni svo sem nitur, fosfór, brennistein o.fl. Jónrýmdin eykur á stuðpúðaeiginleika (böffer) moldar. Lífrænu efnin móta einnig sýrustig jarðvegsins og þannig getur mómold verið mjög súr. Þá hafa lífræn efni mikið holrými og geta bundið margfalda jafnþyngd sína af vatni, en vatnsmiðlun lífrænna efna er grundvallareiginleiki fyrir vistkerfi jarðar.

Uppgröftur úr blautu mýrlendi er að stærri hluta vatn en jarðvegur. Lífræn efni leiða vatn mjög vel, sem er m.a. mikilvægt fyrir gróður en einnig fyrir framræslu. Lífræn efni binda jarðvegskorn, sem hamlar jarðvegsrofi, og þau auka einnig ísig sem minnkar afrennsli og vatnsrof (sjá næsta kafla um vatnið í moldinni). Þessir þættir móta því hvorttveggja vatns- og hitaeiginleika jarðvegs.

Lífrænu efnin eru jafnframt mikilvæg til að binda mengunarefni í jarðvegi. Ítarlegar er fjallað um þessi áhrif í tengslum við umfjöllun um hvern eiginleika fyrir sig í 5. og 6. kafla um efna- og eðliseiginleika.

Heimildir

Jarðvegslíffræði (Soil Biology) er sérstök undirgrein bæði jarðvegsfræði og líffræði. Á engu sviði jarðvegsfræða eru framfarir jafnörar nú og í jarðvegslíffræði. Sérstakar bækur eru tileinkaðar faginu (t.d. mikill fjöldi bóka í Amazon-netversluninni).

Æ meiri áhersla er lögð á hina lífrænu þætti í mörgum kennslubókum um jarðveg. Kafli í kennslubók Weil og Brady (2017) er auðlesinn, fróðlegur og nokkuð ítarlegur. Hér er m.a. stuðst við þann kafla en einnig ýmislegt efni frá USDA á netinu (www.soils.usda.gov/sqi), kafla í Handbook of Soil Science (Baldock og Broos 2012), kafla í Encylopedia of Soil Science og World Atlas of Biodiversity (Groombridge og Jenkins 2002). Evrópusambandið gaf út stóra kortabók sem nefnist European Atlas of Soil Biodiversity (Jeffery o.fl. 2010) þar sem er að finna mikinn fróðleik og glæsilegt myndefni um lífið í jarðveginum, en það efni er aðgengilegt á veraldarvefnum. Sjá einnig Guðmund Halldórsson o.fl. 2002 um smádýr á íslensku.

Baldock, J.A. og K. Broos 2012. Soil organic matter. Í: Handbook of Soil Sciences. Properties and Processes 2. útg. P.M. Huang, Y. Li og M.E. Sumner (ritstj.), CRC Press/Taylor Francis, Boca Raton, Florida, USA. Bls. 11.1–11.52.

Belnap, J. 2003. The world at your feet: desert biological soil crusts. Frontiers in Ecology and the Environment 1:181–189.

Bjarni D. Sigurðsson 2015. Sveppahandbókin. Mál og menning, Reykjavík.

Doran, J.W. og A.J. Jones 1996. Methods for Assessing Soil Quality. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.

Dudal, R.C. 1998. Soil microbial biomass – what do the numbers really mean? Australian Journal of Experimental Agriculture 38:649–665.

Edda S. Oddsdóttir 2010. Distribution and identification of ectomycorrhizal and insect pathogenic fungi in Icelandic soil and their mediation of root-herbivore interactions in afforestation. Doktorsritgerð við Líf- og umhverfisvísindadeild Háskóla Íslands, Reykjavík.

Esther Marloes Kapinga 2020. Samfélög mítla (Acari) og stökkmors (Collembola) í mismunandi gróðurframvindu, 20 árum eftir uppgræðslu á Geitasandi. BS ritgerð, Náttúru- og umhverfisfræði, Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.

Groombridge, B. og M.D. Jenkins 2002. World Atlas of Biodiversity: Earth's Living Resources in the 21st Century. University of California Press, California.

Guðmundur Halldórsson 1989. Kálflugan og varnir gegn henni. Fjölrit RALA nr. I34.

Guðmundur Halldórsson, Oddur Sigurðsson og Erling Ólafsson 2002. Dulin veröld. Smádýr á Íslandi. Mál og mynd, Reykjavík.

Helgi Hallgrímsson 2010. Sveppabókin. Íslenskir sveppir og sveppafræði. Skrudda, Reykjavík.

Hólmfríður Sigurðardóttir 1994. Ánamaðkar. Náttúrufræðingurinn 64:139–148.

Hörður Kristinsson 2016. Íslenskar fléttur. Opna, Reykjavík.

IPBES 2019. Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. S. Díaz, J. Settele, E.S. Brondízio, H.T. Ngo, M. Guèze, J. Agard, A. Arneth, P. Balvanera, K.A. Brauman og 20 fleiri (ritstj.), Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, IPBES secretariat, Bonn, Þýskaland.

Jeffery, S., C. Gardi, A. Jones, L. Montanarella, L. Marmo, L. Miko, K. Ritz, G. Peres, J. Römbke og W.H. van der Putten (ritstj.) 2010. European Atlas of Soil Biodiversity. European Union, Lúxemborg.

Koch, A., C. Brierley, M.M. Maslin og S.L. Lewis 2019. Earth system impacts of the European arrival and Great Dying in the Americas after 1492. Quaternary Science Review 207:13–36.

Ólafur Arnalds og Ása L. Aradóttir 2015. Að lesa og lækna landið. Landvernd, Landgræðsla ríkisins og Landbúnaðarháskóli Íslands, Reykjavík.

Ólafur Arnalds og Jón Guðmundsson 2020. Loftslag, kolefni og mold. Rit LbhÍ nr. 133. Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.

Sigurður Reynir Gíslason 2012. Kolefnishringrásin. Umhverfisrit Bókmenntafélagsins. Hið íslenska bókmenntafélag, Reykjavík.

Sigurgeir Ólafsson 2006. Rótarflókasveppur. Bændablaðið 2. tbl. 27/1, 2006 https://timarit.is/page/5756533

Tarnocai, C., J.G. Canadell, E.A.G. Schuur, P. Kuhry, G. Mazhitova og S. Zimov 2009. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. Global Geochemical Cycles 23:GB2023, doi:10.1029/2008GB003327.

Weber, B., B. Büdel, J. Belnap (ritstj.) 2016. Biological Soil Crusts: An Organizing Principle in Drylands. Ecological Studies 226, Springer, Sviss.

Weil, R.R. og N.C. Brady 2017. The Nature and Properties of Soils 15. útg. Pearson, Boston, USA.

4 Vatnið í moldinni – hagur lands og lífs

Mynd 4.1. Moldin myndar eins konar svamp á yfirborði lands sem miðlar ferskvatni sem er grunnur starfsemi vistkerfa á landi.

Vatnsmiðlun moldar

Orka sólar er beisluð á yfirborði jarðar með ljóstillífun gróðurs en vatn er nauðsynlegur miðill þessa mikilfenglega orkuvers sem er grundvöllur lífsins á hnettinum.

Það er hlutverk moldarinnar að miðla vatni svo það verði nýtilegt lífríkinu. Jafnframt eru efnahvörf sem stuðla að þróun jarðvegsins og nýmyndun steinda fullkomlega háð þessari vatnsmiðlun.

4.1. Moldin og vatnsmiðlun

Úrkoma á landi staldrar við í moldinni. Það má líkja jarðvegi við svamp sem drekkur í sig úrkomu en miðlar henni síðan aftur til yfirborðsins eftir þörfum – gróðurinn „kreistir“ vatnið úr moldinni þegar þornar. Nægur raki getur verið í jörðu til þess að gagnast gróðri enda þótt ekki hafi rignt svo vikum skipti. Á meginlöndunum er stórum hluta vatnsins skilað aftur til gróðurs og andrúmsloftsins vegna öndunar og uppgufunar (e. evapotranspiration) en hluti regnsins berst áfram til grunnvatns.

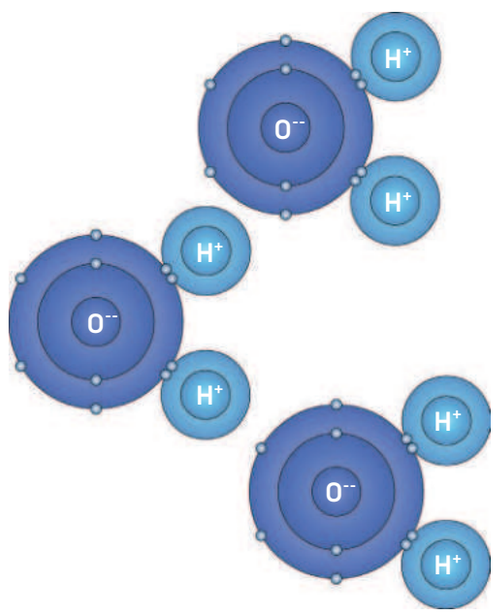
Jarðvegur hefur það hlutverk að sía vatn og hreinsa það af mengandi efnum. Vatnmiðlun jarðvegs kemur einnig í veg fyrir að úrkoma renni viðstöðulaust í burtu út í ár og læki án þess að nýtast innan vistkerfa, en mikið afrennsli á yfirborðinu veldur hættu á flóðum.

Það er einmitt eitt helsta einkenni landhnignunar, þar sem gengið hefur á jarðvegsauðlindina, að tíðni flóða stóreykst og mikið af moldarefnum berst á braut með vatninu. Ferskvatn er takmörkuð auðlind á yfirborði jarðar. Hreint ferskvatn er ennþá takmarkaðri auðlind.

Jarðvegsvernd felur í sér verndun vatnshringrásarinnar. Á svæðum þar sem úrkoma er lítil eru áveitur iðulega undirstaða fyrir fæðuframleiðslu. Við þær aðstæður er mikilsvert að fara vel með vatnið og spilla því ekki, t.d. með mengun eða yfirborðsrennsli sem gruggar vatnið.

Vegna hlutverks moldar við vatnsmiðlun og mikilvægi vatns sem auðlindar eru rannsóknir á hegðun vatns í jarðvegi og áveitum sérstök undirgrein jarðvegsfræðinnar.

Síðast í kaflanum er fjallað um nokkur atriði er snúa að vatnshag og vatnafari (e. hydrology) en um vatn í íslenskum jarðvegi er rætt síðar í köflum um íslenskan jarðveg. Kaflinn er afar almenns eðlis og eru efnistök svipuð og í flestum almennum kennslubókum um jarðveg, svo sem Weil og Brady 2017.



Mynd 4.2. Vatnssameindin er skautuð með neikvæðum (--) og jákvæðum (+) hliðum. Sterk binding myndast á milli sameindanna þar sem neikvæðar og jákvæðar hliðar tengjast saman (vetnistengi). Sameindirnar loða því saman, sem veldur mörgum sérkennilegum eiginleikum vatns.

4.2. Vatn er afar sérstætt efnasamband

Við tökum vatni sem sjálfsögðum hlut – „vatn er bara vatn“. Vatn kemur ansi víða við í daglegu amstri fólks; við neytum þess og notum það á ótal marga vegu. Mannslíkaminn er að stórum hluta vatn. En vatn er fullt af sérkennilegum leyndardómum – það er sannarlega afar sérstætt efnasamband. Skýringar á virkni vistkerfa má oftlega rekja til þessara sérkennilegu eiginleika vatnsins; eiginleika sem eru nauðsynlegir til viðhalds lífsins á jörðinni. Því er rétt að veita þessu efnasambandi nánari athygli. Sameind vatnsins, H_2O, er mynduð annars vegar af tveimur vetnisatómum (prótónum,

róteindum) og hins vegar súrefnisatómi (sjá mynd 4.2). Súrefnisatómin hafa neikvæða hleðslu (O^{--}) en prótónurnar jákvæða (H^+) og atómunum er skipað þannig saman að hleðslurnar raðast niður gangstætt hver annarri, neikvæð hleðsla súrefnisins (O^{--}) er öðrum megin en jákvæðar hleðslur vetnisins (H^+) sitja hinum megin utan á súrefninu. Sameindin er því skautuð (hún hefur bæði jákvæð og neikvæð skaut utan á sér). Neikvæð hlið súrefnisatómsins (-) dregur að sér prótónu (+) í næstu vatnssameind og svo koll af kolli, þannig að vatnseindirnar loða saman enda þótt þær séu í vökvaformi, vatnið hefur samloðun (e. cohesion).

Á myndinni eru sýndar þrjár sameindir sem eru tengdar. Sú staðreynd að vatn er skautað er sannarlega heppilegt fyrir lífríkið á jörðinni. Tengingarnar á milli vatnssameinda er grundvöllur hárpípukraftsins sem tryggir flæði vatns um jarðveg og í plöntum.

Skautun H_2O veldur því að vatn er á vökvaformi við þær aðstæður sem ríkja við yfirborð jarðar – sem verður að teljast æði mikilvæg staðreynd. Annars væri það í gufuformi (gastegund) líkt og aðrar léttar sameindir á borð við H_2S (brennisteinsvetni) og NH_3 (ammoníak).

Vetnistengingin á milli vatnssameindanna „festir" þær saman, sem veldur því að efnið getur tekið við mun meiri orku en ella án þess að sundrast og verða að gufu. Því er hægt að dæla ótrúlega mikilli orku í vatnið án þess að það fari að sjóða. Semsagt: eðlisvarmi vatns er gríðarlega mikill, þ.e. vatn getur tekið í sig mikinn varma, sem einnig má m.a. rekja til sérkennilegrar skautunar vatnsins og tenginganna á milli vatnssameinda. Við hitun fer orkan að stórum hluta í að breyta byggingu vatnsins, það er að minnka stöðugleika tenginga á milli vatnssameinda frekar en að auka hreyfiorku þeirra. Því getur vatn tekið í sig mikinn varma án þess að breyta um form. Með öðrum orðum: vatn helst lengi í vökvaformi við hitun án þess að taka á sig gufuform. Enda er það helsta efnið sem notað er fyrir kælingu í iðnaði, t.d. brunavélar o.s.frv. Þegar vatn kólnar losnar mikil hitaorka úr vatninu, en sú staðreynd liggur til grundvallar húshitunar með vatni. Mikil orka losnar úr læðingi þegar vatn frýs, sem er mikilvægt að hafa í huga þegar vikið verður að kulferlum (frosti) í jarðvegi.

Vatnið getur haldið umtalsverðum styrk jóna í lausn vegna skautunar þess sem gerir það að leysiefni, t.d. Ca^{++}, Na^+, K^+, Cl^-, NO_3^-, NH_4^+, OH^- og H^+. Þessi eiginleiki er undirstaða efnahvarfa í vatni. Til eru önnur leysiefni, flest búin til úr lífrænum efnum og sem hafa þá neikvætt og jákvætt hlaðin skaut. Þau eru mikið notuð í iðnaði en einnig að einhverju leyti á heimilum. Slík efni eru t.d. algeng sem hreinsiefni og í málningariðnaði. Önnur leysiefni en vatn eru flest afar eitruð og mörg þeirra eru krabbameinsvaldandi.

Einn sérstæðasti eiginleiki vatnsins er að rúmmál þess eykst við það að frjósa, þ.e. þegar vatn fer úr formi vökva yfir í fast efni. Ísinn er því léttari en vatn og hann flýtur á því. Þessu eru öfugt farið hjá flestöðrum efnum þar sem sameindirnar raða sér þéttar saman í föstum efnum en í vökvaformi, enda er mun minni hreyfiorka til staðar í föstum efnum en vökvum sama efnis. Það er í raun þversögn að ís skuli fljóta á vatni, en sú staðreynd er afar mikilvæg fyrir vistkerfi jarðar.

Auðvelt er að finna umfjöllun á netinu um það hve einkennilegt efni vatnið er, t.d. má benda á skemmtilega grein í vísindahorni breska blaðsins The Guardian (Alok Jha 2015, sjá einnig bók Alok Jha 2001). Rétt er að benda á góða umfjöllun Stefáns Arnórssonar (2017) um eiginleika vatns í bókinni *Jarðhiti og jarðarauðlindir*, en þar er einnig athyglisverð frásögn af kenningum um

Vatn sem leysiefni

Skautun vatns er einnig grunnur að öðrum mikilsverðum eiginleika: vatn er leysiefni.

Efnasambönd á borð við salt (NaCl) leysast upp í vatni, Na^+ tengist neikvæðum enda vatnssameindarinnar en Cl^- þeim jákvæða.

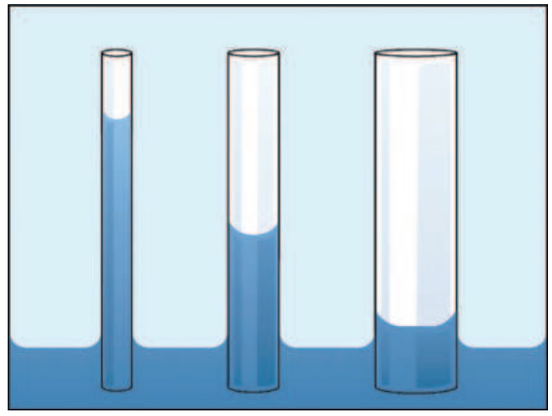
uppruna vatns á jörðinni. Þá má benda lesendum á hið magnaða rit Guðmundar Páls Ólafssonar (2013), *Vatnið í náttúru Íslands*, þar sem vatninu er gerð skil frá mörgum sjónarhornum.

Vatnssameindir loða ekki aðeins hver við aðra heldur veldur skautun vatnsins því að það loðir við nánast hvaða yfirborð sem er (viðloðun; e. adhesion). Örþunn vatnshimna þekur yfirborð allra hluta í andrúmslofti jarðar, en þessi himna er oft mjög þunn, sérstaklega þar sem loftraki er lítill og heitt er í veðri. Mikla orku þarf til þess að ná innsta vatnslaginu af yfirborði hluta. Vatn loðir sömuleiðis við yfirborð allra efna í jarðvegi – en í mismiklum mæli eftir því hversu þurr hann er.

Samloðun vatns og viðloðun við agnir í jarðvegi er undirstaða hárpípukraftsins í mold (mynd 4.3). Hann virkar jafnt í allar áttir í moldinni, hvort heldur sem er upp, niður eða til hliðanna, þ.e.a.s. hann er ekki háður þyngdaraflinu. Þegar vatn minnkar á einum stað í moldinni, t.d. vegna uppgufunar eða upptöku plantna, berst vatn að þeim stað sem er þurrari fyrir tilverknað hárpípukraftsins. Vatn smeygir sér um allt holrými sem finnst í moldinni. Þannig er vatni miðlað um jarðveginn, m.a. í rigningartíð frá yfirborðinu til neðri laga, eða að rótum og til yfirborðs löngu eftir úrkomuatburð.

4.3. Jarðvegsvatn – form og vatnsspenna

Viðloðun vatns við jarðvegskorn og samloðun þess gerir það að verkum að regnvatn helst í moldinni í stað þess að hripa niður í grunnvatnið. Ef jarðvegur mettast af vatni lekur það þó niður í gegnum grófasta holrýmið og niður úr moldinni fyrir áhrif þyngdaraflsins (e. gravitational water). Þetta gerist þar sem fjarlægð vatnssameindanna frá moldarögnum er orðin of mikil til að



Mynd 4.3. Hárpípukrafturinn. Vatn loðir við allt yfirborð og þess vegna getur það leitað upp veggi röranna, því hærra sem rörið er mjórra.

vatnið loði við yfirborð jarðvegsagna. Þetta vatn er kallað **laust vatn** til aðgreiningar frá **bundnu vatni** sem loðir við moldina. Þessu má líkja við að svampi sé dýft í vatn og hann mettaður með vökvanum en síðan tekinn upp úr aftur. Þá lekur lausa vatnið úr honum en eftir situr bundna vatnið sem losnar ekki nema við kreistum svampinn.

Eins og áður sagði helst vatn í jarðvegi vegna viðloðunar þess við moldaragnir og samloðunar vatnsins (vatnssameindir tengdar hver annarri) vegna þess að vatnssameindirnar eru skautaðar. Þær sameindir sem eru næst jarðvegskornum loða mjög fast við þau, það er ógjörningur að ná því vatni burtu, jafnvel þótt moldin sé sett í ofn. Eftir því sem fjær dregur jarðvegsögninni er vatnið lausar bundið og minna afl eða orku þarf til þess að ná því í burtu. Mælikvarðinn á hve „fast“ vatnið er í jarðveginum nefnist **vatnsspenna**. Hún er gagnstæð þrýstingi sem t.d. myndast undir djúpri vatnssúlu (laust vatn).

Hefðbundin eining fyrir vatnsspennu í jarðvegi var lengi vel bar (bör í fleirtölu, þrýstingseining). Sú eining endurspeglar algenga aðferð við að mæla vatn í jarðvegi, sem byggist á því að setja þrýsting á moldarsýni í þrýstipottum til þess að vega upp á móti hinni neikvæðu vatnsspennu sem heldur vatninu föstu, en við það losnar vatnið. Þeim mun neikvæðari sem vatnsspennan er

(t.d. frá -1 niður í -15 bör), þeim mun meiri þrýsting þarf til að ná vatninu úr jarðveginum, þ.e. þeim mun fastar er það bundið. Laust vatn er aftur á móti undir áhrifum þyngdaraflsins og hefur jákvæða spennu, og þeim mun meiri sem vökvasúlan er hærri eða eftir því sem dýpra er farið.

Í sumum tilfellum kann að vera þægilegt að skilgreina stærðirnar sem jákvæð tölugildi og er þá talað um **togspennu**, sem er jákvæð eining fyrir bundið vatn (og þá hefur laust vatn neikvæða togspennu). Mestu gildir þó að gera sér grein fyrir því að vatn í jarðvegi er bundið jarðvegsögnum og því þarf afl eða orku til að leysa það og ná því frá kornunum. Sums staðar er verið að hverfa frá því að nota eininguna bar sem grundvallareiningu til að meta vatn í jarðvegi – ekki síst í vísindagreinum.

Sú eining sem nú er æ oftar notuð er þrýstingseiningin Pa (Pascal) og þá ýmist MPa eða KPa. Sem dæmi eru -15 bör (visnunarmark) = -1 500 KPa eða -1,5 MPa, en -0,3 bör (vatnsmettun) = -30 KPa eða -0,03 MPa. Hér verður þó einkum notuð einingin bar, ekki síst vegna þess að skalinn er einkar heppilegur, nýtanlegt vatn fyrir plöntur er undir togspennu á milli 0,3 og 15 bara (sjá hér á eftir).

4.4. Vatnsheldni – vatnsinnihald

Fjögur hugtök eru mikilvæg þegar rætt er um hve mikið vatn er í moldinni: **vatnsinnihald**, **mettun**, **visnunarmark** og **vatnsheldni** (nýtanlegt vatn).

Að auki skiptir flæði vatnsins miklu, sem og ísig, hugtök sem verða rædd nánar hér á eftir.

Vatnsinnihald, eða hve mikið er af vatni í jarðvegi á hverjum tíma, er yfirleitt táknað sem hlutfall af þurrvigt jarðvegsins, þ.e. hve mikið er af vatni deilt með þunga jarðvegsins eftir að hann hefur verið þurrkaður:

(g vatns/g þurrs jarðvegs) x 100

Vatnsmettun (e. saturation eða field capacity) er vatnsinnihald moldarinnar þegar laust vatn hefur lekið úr henni en jarðvegurinn er mettaður með tilliti til bundins vatns. Oft er vatnsmettun skilgreind við tiltekna vatnsspennu og oftast við -0,33 bör (-0,033 MPa) en einnig oft við -0,1 bar. Það skal tekið fram að erfitt er að skilgreina nákvæmlega eitt viðmið fyrir vatnsmettun á þennan hátt, hún er t.d. breytileg eftir jarðvegsgerð.

Visnunarmark (e. wilting point) er það ástand í moldinni þegar lítið er orðið um vatn og það litla sem eftir er það fastbundið við moldaragnir að gróður nær ekki að nýta sér það. Alla jafna er miðað við -15 bara spennu, enda þótt það sé breytilegt eftir plöntutegundum hvenær gróður nær ekki lengur að taka upp vatn. Við visnunarmark er jarðvegurinn orðinn þurr og þá tekur gróður að visna.

Vatnsheldni (e. water holding capacity) jarðvegs er skilgreind sem mismunurinn á vatnsmagni við vatnsmettun annars vegar og visnunarmarks hins vegar – það vatn sem jarðvegurinn getur miðlað til gróðurs. Hér er einnig notað hugtakið nýtanlegt vatn (e. plant available water), þ.e. það vatn sem moldin getur geymt og miðlað til baka til plantna. Sem dæmi má nefna að ef vatnsinnihald við mettun er 80% en við visnunarmark um 20% er vatnsheldni 60% af þunga jarðvegsins, þ.e. 60% miðað við þurrvigt moldarinnar. Það er að segja: nýtanlegt vatn telst 60%. Vatnsheldni er vitaskuld afar mikilvægur eiginleiki og veigamikill mælikvarði á frjósemi moldarinnar, án hennar eru miklar líkur á að vistkerfið skrælni fljótt í þurrkum. Eða öllu heldur að litlar líkur eru á að frjósöm vistkerfi geti þróast

Hugtök

Fjögur hugtök eru mikilvæg þegar rætt er um hve mikið vatn er í moldinni:

vatnsinnihald, mettun, visnunarmark og vatnsheldni.

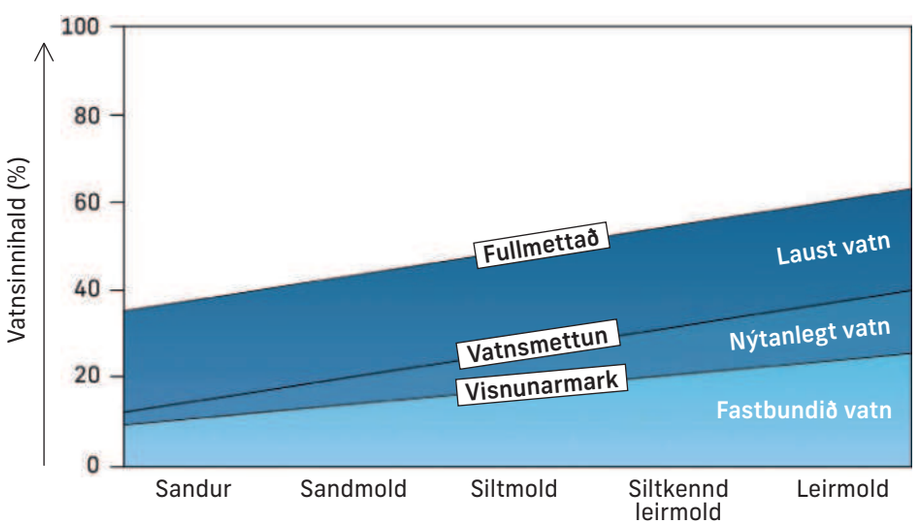
við slíkar aðstæður – vatnsheldni er einn þeirra þátta sem móta hvers kyns vistkerfi dafna á hverjum stað.

Þeir þættir sem mestu ráða um hve miklu vatni jarðvegur getur haldið er kornastærðin og magn lífrænna efna. Þeim mun meira sem er af mjög smáum ögnum í jarðveginum (leir og lífræn efni), því stærra er yfirborðsflatarmál korna í moldinni samtals. Eins og að líkum lætur er vatnsheldni malar og sands mjög lítil því þessir kornastærðarflokkar hafa lítið yfirborðsflatarmál sem heldur í vatnið. Vatnsinnihald leirríkra og lífrænna jarðvegsflokka getur verið mjög mikið, jafnvel við visnunarmark (mynd 4.4).

Gott dæmi um þetta samhengi er að grófur sandur og möl eru notuð sem „frostfrítt" efni vegna þess að vatnsheldni þeirra er nær engin; vatn hripar viðstöðulaust niður í gegnum mölina en það vatn sem eftir er þegar þornar um er mjög lítið. Þar af leiðandi er lítið af vatni í kerfinu þegar það frýs og því verða ekki frostskemmdir.

Öðru máli gegnir um leir og lífræn efni. Þegar leirrík eða lífræn mold er vatnsmettuð er mikið vatn í jarðveginum, jafnvel eftir að tekið er að þorna og lausa vatnið er runnið niður úr moldinni. Gott dæmi um kerfi með litla vatnsheldni eru svokölluð sandatún á Íslandi (tún ræktuð á söndum og sandríku undirlagi) sem verða iðulega fyrir miklum áföllum vegna ofþornunar í þurrkatíð.

Rúmþyngd jarðvegs og vatnsrými (vatnsrýmd) eru mjög tengdir þættir. Eftir því sem rúmþyngdin er minni má ætla að holrými (e. porosity) í jarðveginum sé meira. Rúmþyngd *mójarðar* (lífrænn jarðvegur votlendis) er alla jafna minnst, en vatnsinnihald við -15 bara spennu (visnunarmark) getur t.d. verið mjög hátt, jafnvel >100% (miðað við þurrvigt jarðvegsins), þ.e. moldin inniheldur jafnmikið af vatni og þurrefni jarðvegs en telst þó þurr. Það sama gildir um *eldfjallajörð* sem yfirleitt hefur lága rúmþyngd, eins og síðar verður vikið að.



Mynd 4.4. Vatnseiginleikar breytast með kornastærð. Dæmigerðar tölur fyrir jarðveg nágrannalandanna. Sandur inniheldur lítið nýtanlegt vatn en leirinn mikið af fastbundnu vatni og nýtanlegu vatni. „Fullmettað" er kerfi áður en laust vatn (e. gravitational) rennur úr því. Votlendi getur innihaldið mikið af lausu vatni. Rétt er að hafa í huga að jarðvegur er afar breytilegur en grafið gefur góða hugmynd um stærðir og hvernig nýtanlegt vatn eykst með minnkandi kornastærð. Mælikvarðinn á myndinni (y-ás) er rúmur og nær allt upp í 100% á þessari mynd, en í umfjöllun um *eldfjallajörð* (mold á Íslandi) er dregin upp sama mynd þar sem *eldfjallajörð* hefur verið bætt við grafið til samanburðar.

4.5. Vatnsflæði í og um jarðveg

Laust vatn og bundið vatn hegðar sér á ólíkan hátt þegar það berst um jarðveg. Laust vatn streymir hlutfallslega hratt um stærri rýmin í moldinni en bundið vatn seytlar mun hægar – því rólegar sem vatnsspennan er neikvæðari (minna er af vatni) og vatnssameindirnar sem eftir eru í kerfinu eru nær moldarögnunum.

Ísig er hugtak sem notað er um flæði vatns niður í jarðveginn (e. infiltration). Þegar rignir seytlar vatnið mishratt ofan í moldina. Gróf og vel samkornuð mold (e. aggregated) hleypir vatni örar niður í moldina en mjög fínkorna jarðvegur. Sprungur á yfirborðinu, sem einkum er að finna í mjög leirkenndum jarðvegi, en einnig frostsprungur, hraða ísiginu til muna. Dæmi um algengan ísigshraða eru sýnd í töflu 4.1. Gróður og rótarkerfi hafa einnig áhrif á ísig. Víðtækt rótarkerfi graslendis tryggir jafnt ísig

Tafla 4.1. Ísigshraði er mjög háður kornastærð jarðvegsins. Byggt á Hillel 1982, 1988.

JARÐVEGSGERÐ *(kornastærð)*	**ÍSIG** *mm/klst.*
Sandur	>20
Sandmold	10–20
Siltmold	8–15
Mold	5–10
Leirmold	1–5

en stólparætur (t.d. lúpína) búa oft til rennsli meðfram rótinni að sumri. Ísig er oftast ákvarðað með því að reka víð rör eða hólka, t.d. úr blikki, nokkra tugi cm ofan í jörðina. Vatni er hellt ofan á yfirborðið innan rörsins nógu hratt til að viðhalda 2–4 cm vatnsborði. Síðan er fylgst með því hve mikið vatn þarf til að viðhalda þessu vatnsborði, sem má síðan yfirfæra í vatnsflæði eða ísigshraða (mm/klst). Vatnið streymir hraðast niður fyrst en síðan verður flæðið nokkuð stöðugt og það er gildið sem skráð er fyrir ísig. Stundum eru notuð tvö rör (e. double ring method) og vatni þá hellt í innri hringinn.

Á Íslandi er yfirborðsþekja meginþáttur sem ræður ísigi vatns ofan í jarðveg (Berglind Orradóttir o.fl. 2008, Zaqout o.fl. 2022). Með yfirborðsþekju er m.a. átt við hvort yfirborðið sé gróið, hvernig gróðurinn sé eða hvort yfirborðið sé illa gróið. Á sumrin hripar úrkoma víðast hvar greiðlega ofan í moldina nema þegar moldin er fullmettuð í stórrigningum, eins og oft vill verða á haustin, en þá tekur að gæta yfirborðsrennslis. En afar mikilvægt er að hafa í huga að stóran hluta ársins er vetur á Íslandi og jarðvegur iðulega frosinn. Holklaki hindrar ísig, en það er þó misjafnt hve mikið eftir því hvernig gróðurhulan er.

Holklaki sem myndast í gróskumiklum gróðurlendum, t.d. í birkiskógum, frjóu graslendi eða blómlendi, er nokkuð gegndræpur, jafnvel á vetrum. Snjósöfnun í skjóli gróðursins hefur einnig áhrif á vistkerfið og dregur úr jarðvegsfrosti. Á auðnum myndast hins vegar þéttur ís sem hleypir vatni ekki niður og því getur orðið mikið yfirborðsrennsli og rof á auðnum á vetrum. Mjög þéttur holklaki getur þó einnig sprungið og sprungur leitt vatnið niður mjög ört, jafnvel án viðkomu í yfirborðslögum, sem getur valdið mengun og aukið á skriðuhættu (Zaqout o.fl. 2022). Meira verður fjallað um þennan þátt í kaflanum um Ísland og í sérstökum kafla um kulferli.

Vatnsleiðni (e. hydraulic conductivity) er mikilvægur eiginleiki moldar. Bæði er talað um **mettaða vatnsleiðni** (e. saturated hydraulic conductivity, lögmál Darcys) og **ómettaða vatnsleiðni** (e. unsaturated hydraulic conductivity). Mettuð vatnsleiðni á við um það þegar laust vatn streymir um mettaðan jarðveg. Ómettuð vatnsleiðni tekur aftur á móti til færslu bundins vatns um moldina. Þessar stærðir eru, eins og gefur að skilja, afar mismunandi eftir kornastærð jarðvegsins (mynd 4.6).

Mynd 4.5. Mæling á ísigi á Geitasandi nærri Gunnarsholti. Vatni er hellt í hringinn og viðhaldið 2–3 cm vatnsborði. Hér er ísigið mjög hægt að vetrarlagi og hætta á yfirborðsrennsli í vatnsveðrum og snjóbráð með tilheyrandi vatnsrofi.

Mettuð vatnsleiðni er hlutfallslega ör í grófum jarðvegi. Ef vatn er bundið er það kornastærðin silt sem leiðir vatnið örast. Hins vegar hægir á ómettaðri vatnsleiðni þegar jarðvegur verður fínkorna (leirkenndur) en einnig í grófkorna mold: sandur er of grófur til að leiða bundið vatn. Þá er mikilvægt að hafa í huga að það hægir á ómettaðri vatnsleiðni eftir því sem minna er af vatni í jarðveginum (aukin togspenna) – vatnið verður þá æ fastar bundið við moldaragnirnar uns leiðnin er orðin afar takmörkuð þegar vatnsspennan nær visnunarmörkum.

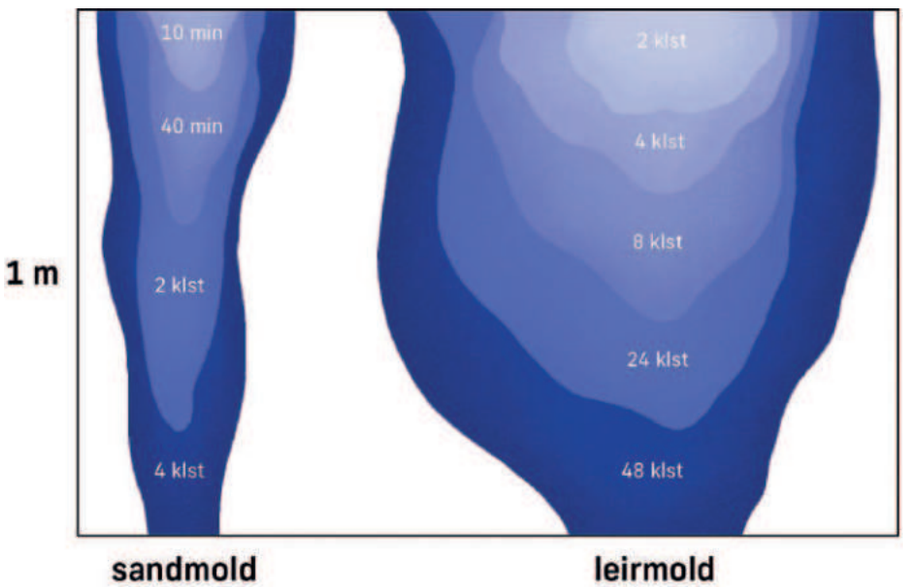
4.5.2. Vatnsflæði og kornastærð

Þegar litið er til jarðvegs sem auðlindar, t.d. til ræktunar eða vatnsmiðlunar almennt, er sú mold sem hefur blandaða kornastærð, þ.e. myldin (e. loamy), yfirleitt best. Hún hefur nægjanlega hátt hlutfall silts til að leiða vatnið greiðlega um jarðveginn, en þó það mikið af leir að vatnsheldni er góð. Sandur stuðlar síðan að betri loftun jarðvegsins svo að hæfileg blanda af öllum kornastærðum gefur frjóustu moldina. Lífræn efni eru vitaskuld einnig afar mikilvæg fyrir vatnseiginleika og frjósemi. Þar sem jarðvegur er lagskiptur er kornastærð iðulega breytileg innan sama sniðsins á milli einstakra jarðvegslaga. Miklar og skarpar breytingar í kornastærð hafa afgerandi áhrif á vatnsleiðni um moldina. Tökum sem dæmi jarðveg sem hefur myldið yfirborðslag en sendið jarðvegslag (t.d. gjóskulag) þar fyrir neðan, nokkru undir yfirborðinu (mynd 4.7).

Í rigningu hripar vatnið sæmilega greiðlega með ómettuðu flæði niður frá yfirborðinu, enda hefur myldið yfirborðslagið jafnt hlutfall leirs, silts og sands og góða vatnsleiðni. Þegar kemur niður á sandlagið stöðvast flæðið því yfirborð kornanna í sandlaginu er ekki nógu stórt til að viðhalda hárpípuflæði vatnsins – vatnið leiðir ekki á milli kornanna. Á meðan rignir heldur vatnsflæðið áfram niður á við að sandlaginu, þar sem vatn tekur að safnast fyrir, þar til vatnsspennan nálgast núll (vatn verður laust). Þá má segja að stíflan bresti, mettað flæði óbundins vatns hefst niður í gegnum lagið fyrir tilstuðlan þyngdaraflsins. Ef jarðvegslagið neðan þessa sandlags er mjög fínt hægir það svo mikið á hinu mettaða flæði að það nánast stöðvast svo að sandlagið verður að eins konar polli í moldinni. Það getur verið afar hættulegt út frá verkfræðilegum sjónarmiðum, að ekki sé talað um hættu á skriðuföllum í hlíðum, en það er önnur saga (sjá kafla 6.5.2).

Sandlagið hefur vitaskuld einnig áhrif á vatnseiginleika moldarinnar þegar hún er þurr. Þegar jarðvegur þornar og vatni er miðlað úr neðri lögum verður til hindrun þar sem sandlagið er. Það stöðvar ómettað flæði vatns til yfirborðsins – neðri hluti sniðsins virkar ekki sem vatnsgeymir fyrir allan jarðveginn, eins og tilfellið væri ef sandlagið væri ekki til staðar í moldinni.

Vert er að hafa í huga að þykkt sandlagsins þarf ekki að vera mikil til að



Mynd 4.6. Ísig og mettuð vatnsleiðni. Sandurinn leiðir vatnið greiðlega niður í moldina við vatnsmettun, en leiðnin er mun hægari í leirmold. Sandmoldin leiðir hins vegar lítið vatn þegar moldin er ekki mettuð af vatni.

hafa áhrif á ómettað sandflæði. Þetta er vitaskuld mjög mikilvægt hér á landi þar sem gróf gjósku- og áfokslög eru víða í jarðveginum sem hafa slæm áhrif á eiginleika íslensku moldarinnar. Þetta á sérstaklega við á gosbelti landsins sem gerir jarðveginn þar tiltölulega viðkvæman fyrir áföllum, moldin hefur í raun minni stöðugleika og skert þanþol (e. resilience) af þessum sökum (sjá 17. og 19. kafla).

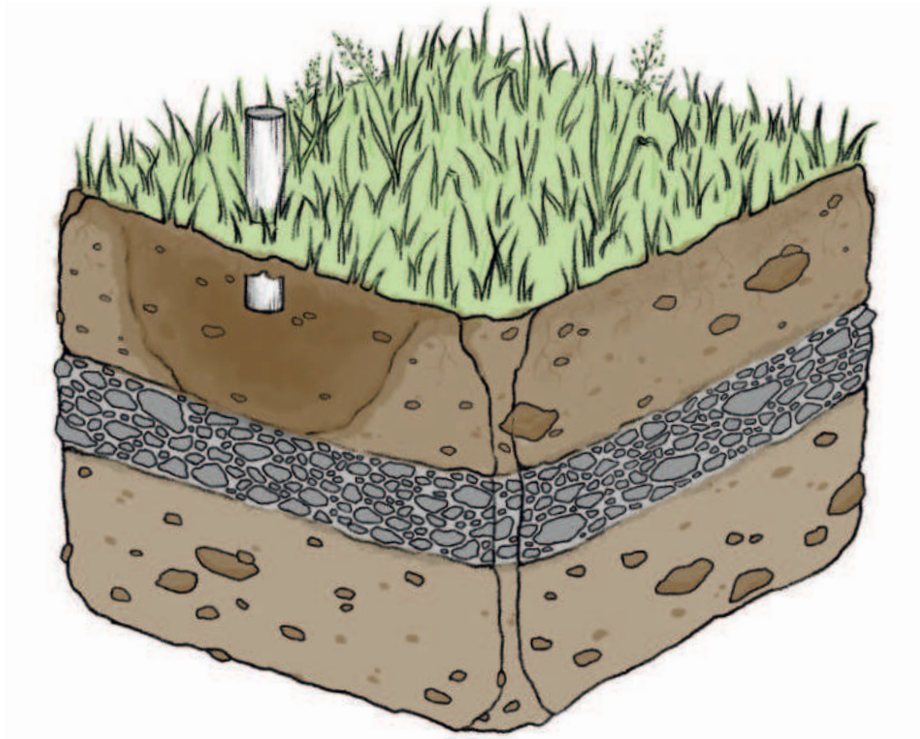
4.6. Mælingar á vatni í jarðvegi

Margar aðferðir má nota til að mæla vatn í jarðvegi, bæði á vettvangi og á rannsóknastofum. Einfaldast er að mæla vatnsinnihald sýnis með því að vigta það, þurrka það síðan (oft við 100–120°C hita) og vigta það aftur. Algengt er að mæla vatnsinnihald í jarðvegssýnum í þrýstipottum við mismunandi þrýsting. Þegar þrýstingur er settur á pottana pressast vatnið úr moldinni og það er síðan leitt út úr pottinum í gegnum sérstaka himnu. Þannig er unnt að kanna vatnsmagn í jarðvegi við tiltekinn þrýsting – þ.e. vatnsmagn við mismunandi togspennu, eins og t.d. 0,3 og 15 bör, til þess að mæla vatnsheldni (nýtanlegt vatn, e. water holding capacity).

Að auki er til fjölbreytt úrval af tækjum sem mæla bæði vatnsmagn og vatnsspennu í jarðvegi. Þessi mælitæki eru mikilvæg í ræktun, ekki síst á áveitusvæðum, en einnig sem rannsóknartæki, og þau hafa verið mikið notuð hér á landi.

4.7. Vatnshagur – vatnafar

4.7.1. Vatn og vatnasvið



Mynd 4.7. Gróf jarðvegslög hindra ómettað innflæði vatns. Þar sem gjóskulagið fyrir miðri myndinni er gróft leiðir það ekki vatn niður í neðri lögin. Það á einnig við um vatnsleiðni upp í gengum lagið, vatn berst ekki upp jafnvel þótt yfirborðslögin þorni. Gróf jarðvegslög hafa því neikvæð áhrif á vatnseiginleika og frjósemi moldar.

Hugtakið vatnshagur er hér notað sömu merkingar og enska heitið hydrology. Orðið vatnafar hefur stundum verið notað svipaðrar merkingar. Vatnshagur er fræðigrein sem fjallar um ferla vatns í og við yfirborð jarðar, t.d. grunnvatns, rennsli straumvatna og grunnvatns, sem og ferla vatns í jarðvegi og nýtingu þess bæði í vistkerfum og af manninum sjálfum í margvíslegum tilgangi. Vatnshagur varðar einnig og ekki síst gæði vatnsins. Vatnsvernd og jarðvegsvernd eru afar tengd viðfangsefni. Mikilvægur hluti lagasetningar á sviði náttúru og umhverfis, m.a. á alþjóðavettvangi, lýtur að nýtingu og verndun vatnsauðlinda, svo sem Vatnatilskipun Evrópusambandsins (e. Water Directive) sem Ísland er aðili að.

Langstærsti hluti vatns á jörðinni er saltvatn sjávar, eða >97% vatnsins. Ferskvatnsbirgðirnar eru að mestu bundnar í jökulhvelum heimskautanna en aðeins lítinn hluta þess er að finna í jarðvegi, ám og vötnum (<1%).

Geymslugeta moldar

Moldin geymir drjúgan hluta ferskvatnsins sem er í hringrás hverju sinni, eða um 33% af því eina prósenti sem er ekki bundið í sjó eða jöklum. Mikilvægi jarðvegsins í þessu samhengi er því augljós.

Það er einnig athyglisvert hve lengi vatn dvelur í einstökum þáttum vistkerfanna, þ.e. taftími vatns. Taftími vatns er að meðaltali um 10 dagar í andrúmsloftinu, 20 dagar í vatnsföllum en 30 dagar í jarðvegi.

Við rannsóknir á vatni eru vatnasvið (e. watersheds) oft mikilvægustu einingarnar. Hægt er að skilgreina mörg stig vatnasviða, allt frá litlum svæðum, þaðan sem rennur lækur eða lítil á (t.d. dalverpi á Íslandi), að vatnasviðum stóránna, svo sem Jökulsár á Fjöllum og Þjórsár, og allt til fljótanna miklu Amasón, Nílar, Gulafljóts og Mississippi o.fl. Hér er rétt að benda aftur á mikið rit Guðmundar Páls Ólafssonar, *Vatnið í náttúru Íslands* (2013), sem geymir mikinn fróðleik um vatn og vatnshag á Íslandi og á jörðinni almennt.

Á meginlöndunum er mælt hve mikil úrkoma fellur á tiltekið vatnasvið og fylgst grannt með vatnsmettun í jarðvegi til þess að meta hættu á flóðum. Til þess eru notuð gögn um jarðvegsgerðir sem segja til um hve mikil úrkoma geymist í moldinni, landslagið (einkum halli), yfirborðsgerð (t.d. skógur, graslendi, akur, malbik o.fl.), hve mikið hefur rignt ásamt spám um hve mikið muni rigna á næstunni o.fl. Þessar upplýsingar eru notaðar til að segja fyrir um hvernig úrkomunni reiðir af og hvort hætta sé á flóðum. Einnig er hægt að nota upplýsingar af þessu tagi til að spá fyrir um uppskeru á stórum landsvæðum og hvernig unnt sé að haga nýtingu áveituvatns með sem hagkvæmustum hætti. Vatnasvið eru einnig mjög mikilvægar einingar við mælingar á mengun, t.d. frá iðnaði og landbúnaði.

Það er eftirtektarvert að á stórum þéttbýlum svæðum meginlandanna er orðið afar erfitt að finna hreint og ómengað vatn í náttúrunni. Grunnvatn er víða mengað af áburðarefnum úr landbúnaði en iðnaður, skólp og námagröftur hafa mengað vatnsföllin. Neysluvatn er því afar verðmætt á þessum svæðum og er keypt á brúsum í matvöruverslunum. Þessi menning hefur skotið rótum á Íslandi enda þótt gæði kranavatns hérlendis sé yfirleitt með því besta sem þekkist á jörðinni – það eru miklar líkur á að vatnsgæði kranavatnsins séu betri en gæði vatns sem keypt er í verslunum. Þó kunna að vera á þessu undantekningar á svæðum þar sem erfitt er að afla lindarvatns. Fjármálaspekúlantar og jafnvel þjóðríki keppast nú um að kaupa vatnsréttindi þar sem það er hægt, m.a. í þróunarlöndunum. Einhver viðamestu dómsmál samtímans má rekja til baráttu fylkja í suðvesturríkjum Bandaríkjanna um vatn og vatnsréttindi, t.d. á vatnasviðum Colorado- og Rio Grande-fljótanna.

4.7.2. Útgufun og uppgufun

Úrkoma hleður upp vatni í jarðveginum sem tapast á ný við notkun plantna. Vatnið gufar síðan upp af gróðrinum (útgufun, e. transpiration, T) ásamt beinni uppgufun úr mold (e. evaporation, E), ekki síst þar sem skortir gróðurhulu á plægðum ökrum og auðnum. Lagður er sameiginlegur mælikvarði á hvort tveggja, heildarútgufun (e. evapotranspiration, ET). Þar sem vatn er af skornum skammti er oft reiknað út hve mikil útgufun yrði ef vatn væri ávallt til staðar, svokölluð möguleg heildarútgufun (e. potential evapotranspiration, PET). Þessi stærð er háð loftslagsþáttum á borð við úrkomu, rakastig, hitastig, skýjafar, gróðurfar og vindhraða.

Þurrkasvæði og eyðimerkur einkennast m.a. af því að möguleg heildarútgufun (PET) er meiri en meðalúrkoman. Þurr vindur þurrkar moldina fljótt á auðnum en mun síður þar sem jarðvegsskán eða gróður er til staðar. Kornastærðin skiptir einnig máli, meira gufar upp úr grófri siltmold en leirmold. Uppgufun frá vel grónum svæðum getur verið allt að því

helmingi hægari en af ógrónu yfirborði. Svart yfirborð íslenskra auðna er afar óhagstætt hvað þetta varðar því það hitnar í sól. Möguleg heildarútgufun er mikið notuð til að skilgreina tegundir vistkerfa og umhverfisaðstæður (mynd 4.8). Loftslagsbreytingar sem nú hrjá vistkerfi jarðar hafa áhrif á alla þá þætti sem móta mögulega heildarútgufun (PET).

Þar sem stór hluti yfirborðs jarðar telst til þurrlendis beinist mikil athygli að því að stjórna vatnsnotkun í þéttbýli og á landbúnaðarsvæðum. Þá verða þessir þættir sem hér voru ræddir, svo sem uppgufun og útgufun, afar mikilvægir, m.a. til að hanna ræktunartækni sem takmarkar tap á vatni. Hér á landi er úrkoma það mikil og ræktarland svo lítið að þessum þáttum er minni gaumur gefinn en erlendis. Þó má ætla að vatnsskorts taki að gæta hér í vaxandi mæli á mörgum svæðum landsins ef loftslagsbreytingar auka sumarþurrka á landinu, ekki síst innan gosbeltisins og á auðnasvæðum þar sem jarðvegur hefur litla vatnsheldni.

Á þéttbýlum svæðum erlendis er neysluvatn oft framleitt með hreinsun á menguðu vatni. Víða er það jafnframt leitt langar leiðir frá ómenguðum svæðum eða því veitt frá ám sem renna um dreifbýl svæði til þéttbýlisins. Landnýting og gróðurþekja hefur mikil áhrif á vatnshringrásina og því þarf að huga að þessum þáttum við öflun neysluvatns. Á Íslandi, t.d. í Bláfjöllum, er sú úrkoma sem sígur niður til grunnvatns það mikil að takmörkuð landnýting hefur ekki áhrif á vatnsmagnið eða vatnsgæði. En þar sem gróðurhula hefur rofnað og yfirborðsvatn rennur um moldarsvæði getur grunnvatn og þá sérstaklega vatnsból hæglega mengast. Áhrif vatnsveðra eru einnig mikil ef frost er í jörðu því þá rennur mikið vatn á yfirborði sem getur síðan mengað vatnsból, ekki síst ef yfirborðið hefur takmarkaða gróðurhulu. Það er mikilvægt að hafa í huga sem áður sagði að moldin síar mengunarefni úr regnvatni fyrir utan að miðla vatninu. Vandinn skapast fyrst og fremst þar sem vatn nær að renna á yfirborði um rofið land þannig að moldin tekur að berast með vatninu.

Það er líklegt að aðstæður þar sem myndast þéttur ís og sprungur í moldina á vetri geti stuðlað að mengun grunnvatns – t.d. þar sem eru lúpínubreiður eða sígrænn skógur á vatnsverndarsvæðum (sjá m.a. Zaqout o.fl. 2022). Nánar er fjallað um þennan þátt í 16. kafla um kulferli. Þar sem úrkoma er lítil getur yfirborðsþekja, svo sem skóglendi, dregið til sín of stóran hluta vatnsins þannig að lítið vatn sígur niður til grunnvatns sem er ætlað að hlaða grunnvatnsgeyma til að afla neysluvatns, t.a.m. fyrir stórborgir.

Mynd 4.8. Tvær eyðimerkur þar sem uppgufun verður ör. Til vinstri má sjá svæði norðan Tungnár, nálægt Jökulheimum, til hægri Kofafjöll í suðvesturhluta Arizona (ársúrkoma <100 mm). Yfirboð beggja auðna hitnar mikið í sólskini og uppgufun verður ör. Undir yfirborði auðnarinnar í Arizona er þó leir sem hamlar uppgufuninni og gróðurinn er aðlagaður þurrkum og hjarir af. Beit hefur skaðað kerfið í Arizona en eldgos hafa viðhaldið auðninni til vinstri. Þar skortir vatnsheldni og uppgufun er ákaflega ör í sólskini.

Vatnsmiðlun og jarðvegur

Víða um heim eru reist gríðarleg mannvirki til þess að hemja stórfljótin og minnka flóðatoppa. Þau eru gjarnan einnig notuð til þess að framleiða rafmagn. Dæmi um slík mannvirki er Hoover-stíflan í Colorado-ánni í USA og Þriggja gljúfra stíflan í Gulafljóti í Kína sem getur framleitt um 22 000 MW þegar fullt rennsli er í fljótinu. Mannvirki til að stýra rennsli eru feykilega dýr og alls ekki öll hönnuð til rafmagnsframleiðslu. Það er hins vegar vert að gefa því gaum að það sem iðulega veldur miklum þunga flóða í stórfljótum er skert geta vistkerfa ofar á vatnasviðunum til að miðla vatni. Ástæðan er landnýting, en vandamál henni tengd geta átt sér langa sögu, sbr. umfjöllun í 20. kafla.

Þar sem ástandið er verst verður rof sem skilar ógrynni moldarefna í árnar þar sem þau setjast að upp að vissu marki og breyta rennsli vatnsfalla og fylla uppistöðulón. Tjónið er gífurlegt. Sums staðar er moldin og bergrunnurinn mjög laus í sér, eins og löss-lögin á vatnasviði Gulafljóts, sem skilar kynstrum af jarðefnum út í fljótið, enda er Gulafljót sú elfur sem hefur mestan aurburðinn. Undirliggjandi vandamál er að gróðurhula hefur verið skert með nýtingu (beit, akuryrkju, skógarhöggi o.s.frv.). Af einhverjum orsökum er oft byrjað á verkfræðilegum lausnum sem iðulega skapa ný vandamál sem geta orðið mjög kostnaðarsöm, eins og algengt er við flóðavarnir þegar þrengt er að stórfljótum. Oft er margfalt ódýrara að ráðast í vistfræðilegar aðgerðir til að endurheimta vistkerfi á vatnasviðunum og vatnsmiðlun þeirra og gefa fljótum aukið rými. Kínverjar verja nú miklum fjármunum í landgræðslu á vatnasviðum stórfljótanna og hafa náð umtalsverðum árangri í að minnka setflutninga.

Því er oft reynt að laga gróðurfarið að vatnsnýtingu (t.d. með því að takmarka skógarhulu). Þá þarf einnig að hafa í huga að sé PET hátt gufar hraðar upp af illa grónum svæðum en yfirborði með gróðurhulu. Sums staðar er gróður og mold fjarlægð nálægt opnum vatnsbólum, sem er yfirleitt gert til að koma í veg fyrir dýralíf við vatnsbólin og mengun af þess völdum. En annars staðar er gróður, m.a. skógarhula, algjörlega nauðsynlegur til þess að halda moldinni á yfirborðinu, hindra yfirborðsrennsli og stemma stigu við

Mynd 4.9. Til vinstri: Graslendi viðhaldið á miðri götu í Santa Cruz, Tenerife, til að auka innflæði vatns og minnka hættu á flóðum. Til hægri: Ofanvatnslausnir í Portland, Oregon. Grænu reitirnir safna yfirboðsvatni, sía það og hlaða grunnvatnsgeyma auk þess sem hætta á flóðum í ofsaregni minnkar. Ljósm. Ása L. Aradóttir.

flóðum, auk þess sem gróðurinn er nýttur með margvíslegum hætti.

4.7.3. Útskolun og framræsla

Tap á lausu vatni niður í gegnum moldina er nefnt útskolun (e. leaching). Verði útskolun tapast næringarefni með vatnslausninni sem getur valdið mengun á grunnvatni og í straumvötnum. Útskolun á nitri og fosfór frá landbúnaðarsvæðum hefur valdið gríðarlegri mengun á víðfeðmum svæðum á meginlöndunum. En það er oft einnig afar mikilvægt að koma jarðvegsvatni burtu, t.d. frá híbýlum og öðrum mannvirkjum, vegna notkunar á rotþróm eða við framræslu votlendis til landbúnaðarnota. Framræsla þarf að taka mið af jarðvegsþáttum á borð við vatnsleiðni. Þá eru gróf efni notuð til þess að ræsa laust vatn frá byggingum (drenlagnir) en einnig til þess að bundið vatn leggist ekki að byggingarhlutum sem annars myndu eyðileggjast smám saman – ryðga eða grotna. Segja má að um þetta hafi þróast sérstök fræði, bæði á vettvangi verkfræði og jarðtækni og í tengslum við landbúnað.

Þeir sem móta landslag í borgum þurfa að vera afar vel að sér um þætti sem móta vatnshag, t.d. landslagsarkitektar, arkitektar og skipulagsfræðingar. Þéttbýli hefur gríðarlega mikil áhrif á afdrif regnvatns og oft afar neikvæð þar sem vatnið lendir að mestu í lagnakerfi sem síðan ræður ekki við stóratburði þegar rignir mikið eða öra snjóbráð. Í Þýskalandi eru settar hömlur við því hve stór hluti lands má teljast til yfirborðs sem skilar ekki vatni niður í mold. Á þessu sviði er ör þróun nútildags. Oft er vatn sem kemur af olíumöl mengað vegna mengunar frá umferð og undirlaginu sjálfu, sem m.a. hefur verið kannað hér á landi (Hrund Andradóttir og Vollertsen, 2015).

Skipulag borga tekur í vaxandi mæli tillit til vatnsverndar með svokölluðum „bláum ofanvatnslausnum“ (mynd 4.9). Við byggingu Urriðaholtssvæðisins í Garðabæ var í fyrsta skipti hugað að ofanvatnslausnum á Reykjavíkursvæðinu við skipulag byggðarinnar, meðal annars til þess að vernda aðliggjandi vistkerfi á borð við Urriðavatn.

Á þéttbýlissvæðum koma víða upp vandamál þegar vatnskerfi hafa ekki undan við að koma vatni burtu í rigningartíð, og þessi vandi fer vaxandi eftir því sem byggð þéttist og æ stærri hluti moldar er hulinn malbiki og byggingum. Flóð af þessu tagi eru í raun skyld „skyndiflóðum“ (e. flashfloods) sem verða á þurrum svæðum í orkumiklum hellidembum þar sem annars þurrir vatnsfarvegir geta yfirfyllst á augabragði. Vandamál vegna skorts á nægu ísigi vatns vaxa nú hröðum skrefum í Bretlandi og víðar, m.a. vegna hönnunar frárennslis sem tekur mið af minni úrkomu, en loftslagsbreytingar með aukinni úrkomu herða enn á vandanum. Ekki verður annað séð en að sums staðar á Íslandi sé gengið ansi hart fram við að hylja stór svæði með malbiki án þess að huga að miðlun moldarinnar (mynd 4.10).

4.7.4. Vatn er mikilvæg alþjóðleg auðlind

Vatn er takmörkuð auðlind á alþjóðavísu. Það þekkja vel íbúar þeirra landa sem búa við minni úrkomu en Íslendingar. Stórfljót meginlandanna streyma í gegnum hvert ríkið á fætur öðru svo að mengun á einum stað veldur skaða í mörgum öðrum löndum neðar á vatnasviðinu.

Árvatn er mikið notað til áveitu í landbúnaði, en oft er deilt um hve mikið hvert ríki fyrir sig má taka til sín af vatninu í þessum tilgangi, deilur sem hæglega verða að styrjöldum. Colorado-áin, sem kemur upp í Klettafjöllum Bandaríkjanna, er smáspræna þar sem hún rennur á landamærunum við

Varanleg vatnsvernd

Í Bandaríkjunum er unnið að svipuðum reglugerðum um vatnsvernd, en andstaða hagsmunaaðila sem telja vegið að landbúnaði og ýmsum iðnaði er mikil. Á tímum Trumps var dregið úr gildi umhverfis- og neytendaverndar, m.a. er lýtur að vatnsvernd og vörnum gegn mengun í Bandaríkjunum.

Það sýnir vel hve mikilvægt er að renna traustum stoðum undir lagasetningu á þessu sviði þannig að vatn, umhverfið almennt sem og neytendur njóti varanlegrar verndar sem erfitt er að hrófla við í pólitísku umróti.

Mynd 4.10. Borgarnesmalbikið, nokkrir hektarar að flatarmáli. Hér á vatn ekki greiða leið niður og mikil hætta getur verið á mengunarslysum.

Mexíkó þar sem áður rann mikil móða í ólgandi boðaföllum. Vatnið er notað til landbúnaðar og af stórborgum á vatnasviðinu, en það er m.a. leitt í skurðum hundruð km vegar til borga á borð við Tucson og Phoenix í Arizona og Las Vegas í Nevada. Mexíkóbúar fá lítið af vatninu úr Colorado- og Rio Grande-fljótunum vegna mikillar nýtingar í Bandaríkjunum. Spánverjar og Portúgalir deila um vatnsréttindi, að ekki sé talað um deilurnar um vatnsnotkun fyrir botni Miðjarðarhafs. Vatnið er í sífelldri endurnotkun, enda þótt einhver telji sig eiga tiltekið vatn í heimalæknum eða á flösku mun það brátt berast aftur út í mold, ár eða andrúmsloftið. Hver vatnssameind getur verið milljarða ára gömul – við erum bara með vatnið að láni eins og hverja aðra auðlind sem maðurinn nýtir sér til viðurværis.

Mynd 4.11. Drykkjarvatn til heimabrúks sótt í nærliggjandi á. Landnýting á svæðinu veldur rofi og setburði í ánni og vatnið er einnig mengað af fjölbreyttum lífrænum efnum sem valda sjúkdómum. Réttur til aðgangs er alls ekki tryggður fyrir alla. Myndin er frá Eþíópíu.

Margar lagagreinar og reglugerðir á Íslandi fjalla um vatnsvernd, en líkt og á við um jarðvegsvernd eru málin nokkuð flókin er varða umhverfisrétt og lög. Íslendingar eru aðilar að Vatnatilskipun Evrópusambandsins (e. Water Directive) sem mun án efa hafa mikil áhrif á jarðvegs- og vatnsvernd á Íslandi í framtíðinni. Þessi tilskipun markar merkileg tímamót því hún stuðlar að samræmingu laga á milli landa og tekur til alls vatns, þ. á m. yfirborðsvatns, grunnvatns og strandsjávar.

Tilgangurinn er að tryggja aðgang Evrópubúa að góðu vatni um alla framtíð. Stórár Evrópu renna um mörg ríki og við þær aðstæður er mikilvægt að hafa ströng samræmd lög um verndun vatns á öllu vatnasviðinu. Ríkulegar kvaðir eru lagðar á ríki Evrópu um vöktun vatns og á Íslandi er hafin þróun til að fylgja öðrum Evrópuþjóðum eftir á þessu sviði. Það má m.a. gera með stjórnarskrárbundnum ákvæðum um rétt til aðgengis að góðu vatni. Virðing fyrir vatni þarf að verða að náttúrulegum hluta daglegs lífs almennings óháð dyntum stjórnmálamanna sem iðulega lúta stjórn gagnstæðra skammtímahagsmuna.

4.8. Mannvirki og þéttbýli

Þekking á jarðvegi er mikilvæg við skipulag og hönnun byggðar. Oft þarf að fjarlægja alla mold af byggingarstað, en iðulega er farið offari og óþarflega mikið af moldinni er fjarlægt. Mannvirki sem ekki er ætlað að bera mikinn þunga geta auðveldlega flotið á moldarpúða, ekki þarf alltaf að grafa „niður á fast“. Í

stórum hluta þess efnis sem ekið er burt frá framkvæmdasvæðum er vatn bundið í moldinni, en tímabundin þurrkun getur stórlega minnkað vatnsmagnið og sparað þar með flutningskostnað, ekki síst ef efnið er flutt um langan veg. Þá gætir þess oft að ekki hefur verið hugsað fyrir því hvar á að setja jarðveginn sem þarf að fjarlægja. Moldin sem tekin er úr grunnum húsa er í raun lífræn auðlind sem nýta má á ýmsa vegu, auk þess sem slíkt efni er vitaskuld verðmætt efni til landslagsmótunar, ekki síst þar sem landslag er flatt.

Mold er oft notuð í hljóðmanir en sá ljóður er iðulega á þeim framkvæmdum að yfirborðið er jafnað út þar sem hrjúft yfirborð væri æskilegra og gagnlegra, auk þess sem ofnotkun á grasi er vandamál. Gras er dýrt í viðhaldi og veldur ofnæmisviðbrögðum hjá mörgum. Oft og tíðum er unnt að nota grjót, lyng og kjarrtegundir sem þarfnast lítils viðhalds í stað túnræktunarinnar. Hljóðmanir ætti ekki að hugsa sem skrúðgarðyrkju einvörðungu heldur sem tilraun til að skapa náttúru sem miðlar vel vatni og krefst lítilla inngripa mannsins (mynd 4.12).

Mynd 4.12. Sléttar hljóðmanir með grasyfirborði eru iðulega ekki heppilegar: slétt yfirborðið brýtur hljóð ekki eins og hrjúft yfirborð, þær þarfnast mikils viðhalds, langar sléttar manir geta myndað vindstrengi, en á vetrum rennur vatn óhindrað niður brattann. Hrjúft náttúrulegt yfirborð með grjóti og kjarri á borð við birki og víði hefur mun betri virkni á flestum sviðum og þarfnast minna viðhalds.

Það er vandasamt að hanna íþróttavelli á borð við golfvelli og knattspyrnuvelli með tilliti til vatns. Mikilvægt er að framræsla sé góð þannig að ekki liggi vatn á yfirborði í miklum rigningum, auk þess sem slíkt getur valdið kali á vetrum. Ísig þarf því að vera ört sem og mettað flæði, sumar sem vetur. Hins vegar verður moldin bæði að halda og

Mynd 4.13. Settjarnir til að vernda vatnasvið og ósasvæði Úlfarsár komi til mengunarslyss við hin miklu umferðarmannvirki á mótum Grafarholts og Vesturlandsvegar í Reykjavík. Bætt þekking á vatnshag stuðlar að mengunarvörnum og vatnsvernd af þessu tagi í auknum mæli hérlendis.

Mynd 4.14. Árhelgi. Svæði sem árnar hafa helgað sér hafa iðulega hagstætt rakastig í moldinni og mjög mikinn líffjölbreytileika. Mikilvægt er að gefa vatnsföllum rúm og vernda vistkerfin til að koma í veg fyrir mengun þeirra, sem og vegna mikilvægis þessara vistkerfa almennt. Myndin er frá Tucson í Arizona, en umhverfis ána eru lífkerfi eyðimerkurinnar. 2018.

miðla nægjanlega miklu vatni, sem og næringarefnum, til að hún teljist nægjanlega frjósöm. Mikið af silti eykur frostáhrif – það væri heldur til vansa að fá búfur í fótboltavöllinn. Plöntuval, áburðargjöf (magn, form, samsetning, tíðni, tímasetning o.fl.) og meðhöndlun svarðarins eru einnig mikilvæg atriði við hönnun og viðhald íþróttavalla. Íþróttavallafræði er sérstök fræðigrein þar sem jarðvegsvatn og moldarfræði gegna lykilhlutverki.

Jarðvegur er mikilvæg sía til að koma í veg fyrir að mengunarefni berist niður í grunnvatn – moldin bindur þau. Mold og gróður koma einnig í veg fyrir að eiturefni berist á braut með yfirborðsvatni. Þegar æ stærri svæði eru tekin undir samgöngumannvirki, bílastæði o.fl. minnkar það yfirborð sem getur miðlað vatni. Það bakar margvísleg vandræði, m.a. flóð í úrfelli, auk þess sem mengunarefni berast af strætum og torgum og valda mengun í ám, vötnum, grunnvatni og á grunnsævi.

Nú eru gjarnan hannaðar sérstakar settjarnir til að taka við mengun af þessu tagi, t.d. á mótum Grafarholts og Vesturlandsvegar (mynd 4.13) til að koma í veg fyrir mengun í Úlfarsá (sem einnig er kölluð Korpa). Oft er óþarfi að malbika stór samfelld svæði, heldur hanna mannvirki á þann hátt að mold og gróður fái að njóta sín þannig að vatn komist ofan í moldina, um leið og fólki er búið aðlaðandi umhverfi.

4.9. Árhelgi

Mold og lífríki meðfram ám og lækjum mynda afar mikilvæg vistkerfi. Þau sjá um að koma í veg fyrir of ört yfirborðsrennsli að vatnsfarvegum, sía út mengunarefni, t.a.m. úr landbúnaði, og þau eru oft og tíðum mikilvæg búsvæði fjölbreyttra lífvera.

Nærsvæði vatnsfarvega veita vatnsrennslinu rými í flóðum og mynda náttúrulegar flóðavarnir. Vistkerfin á vatnsbakkanum eru jafnframt mikilvæg fyrir lífríki vatnakerfanna, þau tempra hitastig, minnka flóð og sjá þeim fyrir jöfnum og hæfilegum skammti af næringu. Þessi „árbakkakerfi“ heita „riparian zone“ á ensku en hafa verið nefnd „árhelgi“ á íslensku (mynd 4.14). Víða gilda ströng lög um verndun árhelginnar í nágrannalöndunum, ekki síst gagnvart akuryrkju, að viðlögðum sektum og niðurfellingu á búnaðarstyrkjum. Árhelgin nýtur afar takmarkaðrar verndar í íslenskum lögum nema er varðar röskun á búsvæðum laxfiska. Stefnt er að aukinni verndun í reglugerð um sjálfbæra landnýtingu samkvæmt lögum um landgræðslu frá 2018.

Ummerki um röskun árhelginnar er að finna vítt um landið (mynd 4.15). Hófleg beit er notuð víða erlendis til að viðhalda sterkum grassverði við ár og læki, en ofbeit og bullandi rof innan árhelgarinnar telst vera landníðsla af versta tagi. Vonandi fá þessi svæði aukna vernd íslenska samfélagsins í lögum, reglugerðum og með auknum skilningi landnotenda á mikilvægi árhelginnar.

„Samfella“ er mikilvægt hugtak í vistfræði. Það er brýnt að óröskuð svæði meðfram ám og lækjum fái að vera áfram óröskuð, ekki síst á árósasvæðum þar sem fléttast saman mikilvægi vatnsmiðlunar moldar, mengunarvarnir hennar, afar fjölbreytt búsvæði lífvera og flóðavarnir. Umhverfismatsskýrslur vilja stundum vera því marki brenndar að skoðaðir eru einstakir hlutar vistkerfa í sitthvoru lagi, m.a. tegundir fugla og plantna, án þess að huga að samfellunni.

Hugtakið „samfella“ hefur einnig mikið vægi í landslagsfræðum og landslagsmótun. Enn þann dag í dag eru byggð mannvirki yfir verðmæt ósasvæði við þéttbýli á Íslandi en aftur á móti er víða kappkostað að fjarlægja slík mannvirki erlendis.

Mynd 4.15. T.v.: Árhelgi er ekki virt ofan vegar, mikið flæði moldarefna út í vatnsfarveginn. Sami farvegur neðan vegar þar sem betur er farið með landið. T.h.: Nærmynd af svæði ofan vegar til vinstri. Víða erlendis liggja sektir við landnýtingu af þessu tagi. Oftast er vanþekkingu og hugsunarleysi um að kenna þegar svona á sér stað.

Heimildir

Alok, J. 2001. The Water Book. Headline Book Publishing, London, UK.

Alok, J. 2015. Water: the weirdest liquid on the planet. The Guardian. https://www.theguardian.com/global/2015/may/11/water-weirdest-liquid-planet-scientists-h2o-ice-firefighters. Skoðað í nóvember 2018.

Berglind Orradóttir, S.R. Archer, Ólafur Arnalds, L.P. Wilding og T.L. Thurow 2008. Infiltration in Icelandic Andisols: The role of vegetation and soil frost. Arctic, Antarctic and Alpine Research 40:412–421.

Guðmundur Páll Ólafsson 2013. Vatnið í náttúru Íslands. Forlagið, Reykjavík.

Hillel, D. 1982. Introduction to Soil Physics. Academic Press, New York, USA.

Hillel, D. 1998. Environmental Soil Physics. Academic Press, London, UK.

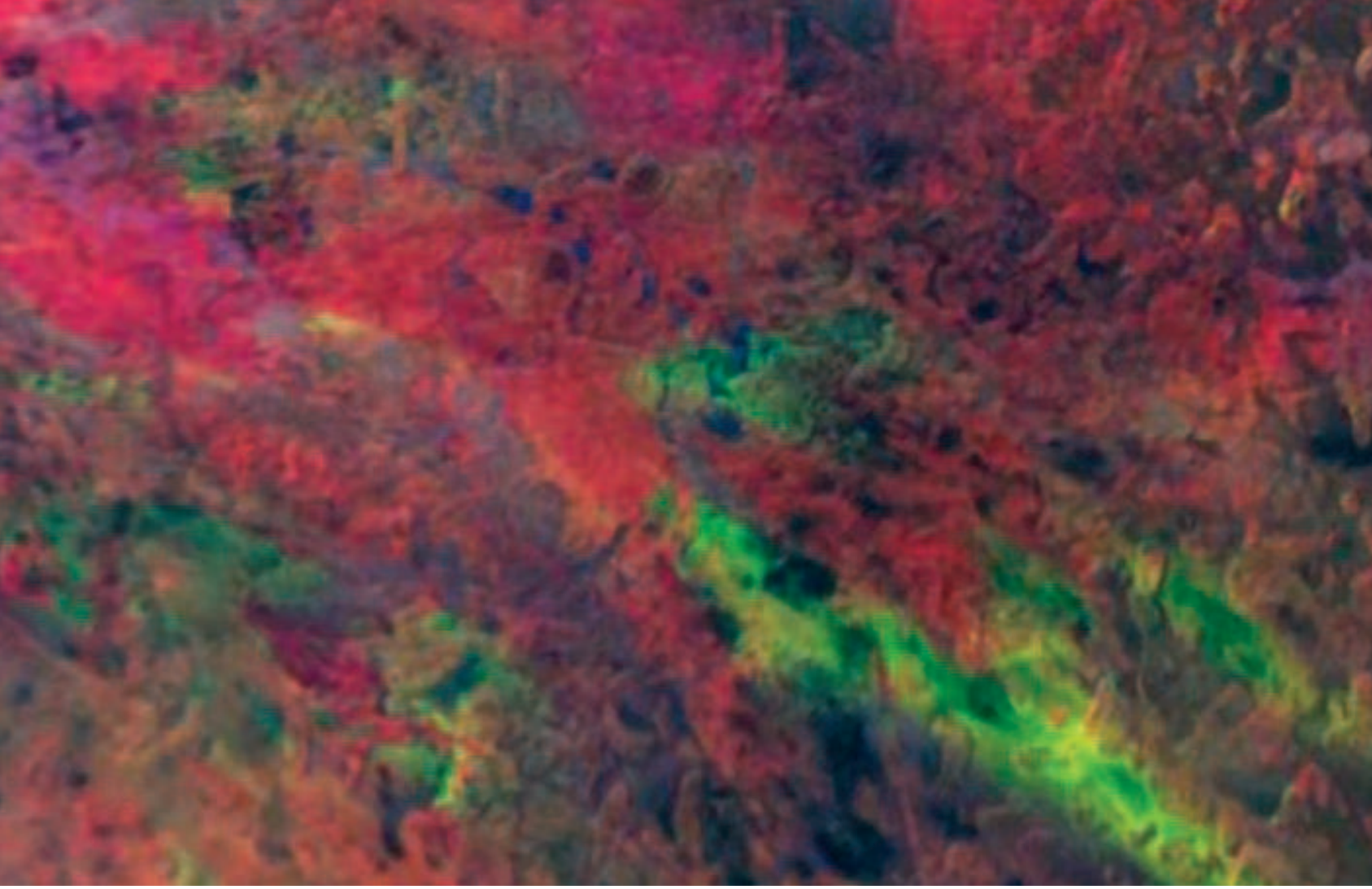
Hrund Ólöf Andradóttir og G.E. Vollertsen 2015. Temporal variability of heavy metals in suburban road runoff in rainy cold climate. Journal of Environmental Engineering, ASCE 141:04014068.

Stefán Arnórsson 2017. Jarðhiti og jarðarauðlindir. Umhverfisrit Bókmenntafélagsins, Hið íslenska bókmenntafélag, Reykjavík.

Weil, R.R. og N.C. Brady 2017. The Nature and Properties of Soils. 15. útg. Pearson, Boston, USA.

Zaqout, T., Hrund Ólöf Andradóttir og Ólafur Arnalds 2022. Infiltration capacity in urban areas undergoing frequent snow and freeze-thaw cycles: Implications on sustainable urban drainage systems. Journal of Hydrology 607:127495.

5 Moldin er síkvik efnasúpa



Mynd 5.1. Moldin er fjölbreytt og síkvik efnasúpa. Málverk Veronique Maria sem birtist í bókarkafla með ljóðum og myndverkum um jarðvegsmyndun eftir Veronique Maria og ÓA (2019).

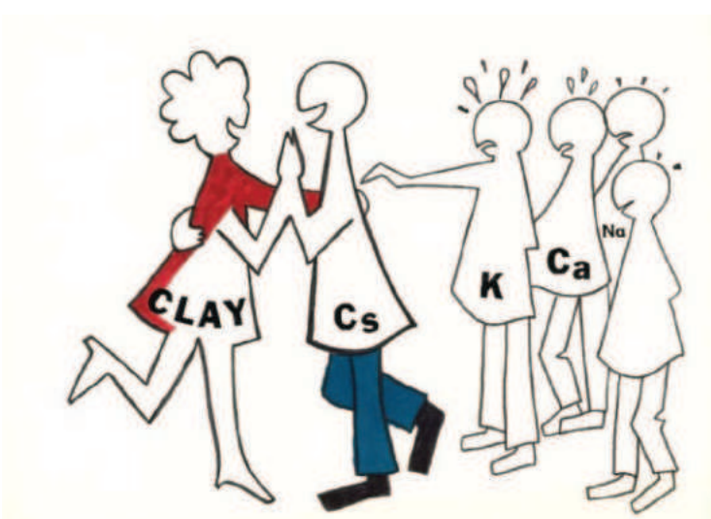
Moldin hefur hleðslu

Jarðvegur öðlast jónrýmd vegna þess að örefni (e. colloids) á borð við leiragnir, lífræn efni og málm-húmus-knippi hafa hleðslu.

Þessi hleðsla veldur því að jónir með rafhleðslu loða við yfirborð örefnanna, t.d. K^+, Ca^{++}, Mg^{++}, NH_4^+, Na^+ og margar aðrar mikilvægar jónir, en einnig Al^{3+} og H^+ í einhverjum mæli.

Efnahvörf reka áfram þróun moldarinnar og þar með eðli þeirra eiginleika sem hafa áhrif á frjósemi hennar. Þættir sem stýra þessum efnahvörfum eru mikilvægir fyrir skilning á moldinni. Hér er einkum lögð áhersla á tvö atriði, **jónrýmd** og **sýrustig**, sem eru grundvallarþættir sem móta efnavirkni í moldinni. Einnig er vikið nokkuð að **afoxunarspennu** í moldinni, sem einnig hefur áhrif á efnavirkni hennar. Þessum þáttum er yfirleitt gefið gott rúm í kennslubókum um jarðveg. Ýmis önnur atriði sem má telja til efnaþátta, svo sem næringarefni í mold o.fl., eru til umfjöllunar í öðrum köflum ritsins.

Oft helgast umfjöllun um jónrýmd og sýrustig af vandamálum í landbúnaði og ræktun sem hljótast af of lágu eða of háu sýrustigi sem minnkar frjósemi og uppskeru. En sýrustigið er ekki síður mikilvægt með hliðsjón af efnaveðrun og virkni jarðvegs sem hluta af vistkerfum. Sýrustigið mótar framleiðni vistkerfa og samsetningu búsvæða, afdrif mengunarefna, framboð næringarefna, og getur haft áhrif á efnasamsetningu gróðurs og þar með lýðheilsu. Sýrustig ræður því m.a. á hvaða formi ýmis næringarefni eru í moldinni og þar með aðgengi þeirra fyrir plöntur, bæði meginefni og snefilefni (sjá 15. kafla um næringu í mold). Flest mikilvæg efnahvörf í jarðveginum eru háð sýrustigi að einhverju leyti og margt sem fyrir augu ber í moldinni er mótað af pH-gildi og afoxunarferlum. Hér verður fjallað um jónrýmd á undan sýrustigi, því þekking á henni er nauðsynleg til að átta sig á sýrustigi í mold.



Mynd 5.2. Cs-jónin tengist jónrýmdarstöðum leirefna mjög fast og varanlega og ýtir um leið öðrum jónum út í lausnina. Hinar jónirnar „eiga engan séns“. Mynd: Tish Herrish (teiknuð fyrir MS-verkefni ÓA).

5.1. Jónrýmd

Jónrýmd er hæfileiki moldar til að halda í og miðla síðan katjónum og anjónum í jarðvegslausn og til róta plantna. Tekið skal fram að það hjálpar að glöggva sig á kaflanum um eðli vatns (4.2) og kaflanum um leir (2.2) til að átta sig á því hvað jónrýmd er. Jarðvegur öðlast jónrýmd vegna þess að örefni (e. colloids) á borð við leiragnir, lífræn efni og málm-húmus-knippi hafa hleðslu. Þessi hleðsla veldur því að jónir með rafhleðslu loða við yfirborð örefnanna, t.d. K^+, Ca^{++}, Mg^{++}, NH_4^+, Na^+ og margar aðrar mikilvægar jónir, en einnig Al^{3+} og H^+ í einhverjum mæli. Einkum er átt við katjónir (jákvætt hlaðnar agnir) því flest örefni hafa fyrst og fremst neikvæða hleðslu.

Þó hafa sum örefni, ekki síst lífræn efni, einnig jákvæða hleðslu, eins og síðar er fjallað um. Á ensku er eiginleikinn að halda í jónir með hleðslu nefndur „Exchange Capacity“, og þá er bæði talað um „Cation Exchange Capacity“, skammstafað CEC, og „Anion Exchange Capacity“, AEC, fyrir þær jarðvegsgerðir sem hafa slíkan eiginleika. Jónrýmd veldur því að þegar katjónirnar (og að hluta anjónir) losna við veðrun á bergefnum eða bætast við með regni teppast þær í kerfinu og verða til gagns þegar á þarf að halda.

Jónir sem staldra við í jarðvegi vegna jónrýmdar eru margar hverjar mikilvæg næringarefni fyrir gróður – jónrýmd gerir það að verkum að plöntur ná

nauðsynlegum meginefnum á borð við kalsíum, magnesíum, natríum og kalí úr moldinni, sem og mörgum snefilefnum (t.d. Mn^{2+}, Ni^{+}, Fe^{2+}). Jónrýmd veldur því einnig að eitraðar jónir og ýmis mengunarefni geta bundist í moldinni, t.d. sink (Zn^{2+}), blý (Pb^{2+}), kopar (Cu^{2+}), kadmín (Cd^{2+}) og nikkel (Ni^{2+}) og lífræn eiturefni. Sumar katjónir sem eru nauðsynleg næringarefni geta valdið eituráhrifum sé of mikið af þeim í moldinni. Sesín (^{137}Cs) er eitt helsta geislavirka efnið sem fellur til jarðar með regni eftir kjarnorkuslys og atómbombur. Sesínjónir (Cs^{+}) bindast afar fast við jónrýmdarsæti jarðvegs í efstu sentimetrum moldarinnar, þær ýta öðrum jónum úr jónrýmdarsætunum og sitja þar enn sem fastast áratugum eftir geislavirkt úrfelli, m.a. á Íslandi (Magnús Á. Sigurgeirsson o.fl. 2005).

Algengasti mælikvarðinn á hleðslu öragna sem teppir jónir er milli-ekvivalentar hleðslu á hver 100 g jarðvegs (eða meq/100g), sem gefur þægilega stærðargráðu fyrir hleðsluna í jarðvegi (yfirleitt 3–50 meq á hver 100 g jarðvegs). Í þeirri viðleitni að færa einingar til alþjóðlegra staðla er einingin $cmol_c$/kg oft notuð í vísindaritum (sentimól hleðslu (e. charge) á hvert kíló), sem er í raun sama einingin og sú gamla (meq/100g jarðvegs) sem ennþá er mest notuð í skrifum um jarðveg og í samskiptum jarðvegsfræðinga.

Neikvætt hlaðnar anjónir geta líka staldrað við í jarðveginum, einkum þó í *eldfjallajörð*, mómold og jarðvegi hitabeltisins. Anjónirnar geta bæði verið nauðsynleg næringarefni (t.d. nítrat, NO_3^-, mólýbden (sem MoO_4^{2-}) og selen (sem SeO_3^{2-} og SeO_4^{2-}), en þau síðasttöldu geta þó verið eitruð ef of mikið er af þeim. Svo má einnig nefna mjög mengandi anjónir á borð við arsen (sem AsO_4^{3-}) og króm (sem CrO_4^{2-}).

Leirsteindir í mold erlendis tilheyra fyrst og fremst lagsilíkötum (einnig nefnd blaðsilíköt, e. phyllosilicates og layer silicates). Þær hafa að mestu fasta hleðslu sem helst stöðug þótt pH moldarinnar breytist. Járnoxíð sem oft einkenna hitabeltið hafa jónrýmd sem breytist með sýrustigi. Þetta fyrirbrigði mætti kalla **pH-háða hleðslu** (e. pH dependent charge). Eftir því sem sýrustigið hækkar (verður basískara) eykst jónrýmdin, en hún er samt alla jafna lág í jarðvegi hitabeltisins. Jónrýmd íslenskrar moldar er afar háð pH, eins og síðar verður vikið að.

5.1.1. Summa katjóna og mæling á jónrýmd

Mæling á jónrýmd felst í því að metta jarðveginn með einhverri ákveðinni jón sem alla jafna er lítið af í jarðvegi, t.d. NH_4^+ eða Ba^{2+}. Þær stugga burt öðrum jónum úr jónrýmdarsætunum og taka sætin í þeirra stað. Moldin er mettuð með vatni sem inniheldur þessar jónir, og því vatni sem lekur úr moldarsýninu er jafnframt safnað. Hægt er að mæla styrk jónanna sem losna í jarðvegslausninni og leggja þær saman. Með þessari aðferð fæst hlutfallslegt magn jónanna sem losna frá jónrýmdarstöðunum, en þessar upplýsingar eru notaðar til þess að reikna út basamettun (BS) sem fjallað er um aftar í þessum kafla.

Hluti þeirra katjóna sem sitja í jónrýmdarsætum eru Al^{3+} og fleiri Al-sambönd, sem og H^+ sem teljast súrar katjónir, eins og síðar er vikið að í umræðu um pH. Þegar moldarsýni er mettað og skolað með NH_4^+-lausn, eins og algengt er, tíðkast að mæla aðeins basísku katjónirnar sem losna, þ.e. K^+, Ca^{++}, Mg^{++} og Na^+; hér vantar súru katjónirnar Al^{3+} og H^+ (mynd 5.3).

Basísku katjónirnar gefa ekki fullnaðarmynd af jónrýmd, heldur er þessi stærð kölluð summa katjóna (e. sum of cations). Summa katjóna getur verið góður mælikvarði á jónrýmd í fremur basískum jarðvegi en alls ekki

Moldin safnar eitri

Stór hluti fæðuframleiðslu jarðarbúa fer fram þar sem vatni er veitt á sáðakra. Vatnsgæði eru afar mikilvæg til að tryggja að unnt sé að nýta moldina ár eftir ár til ræktunar.

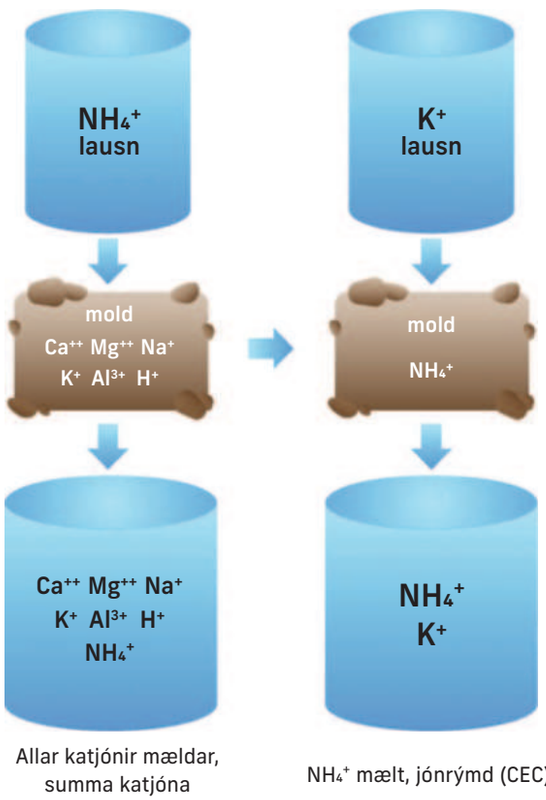
Ef eitraðar jónir á borð við arsen og selen eru í áveituvatninu mengast jarðvegurinn smám saman. Þetta á ekki síður við ef sölt á borð við natríum taka að safnast fyrir í moldinni á jónrýmdarsætin.

Jarðvegurinn verður með öðrum orðum smátt og smátt eitraður eða ófrjósamur og að lokum ónothæfur. Vandamál af þessu tagi eru algeng víða um heim, t.d. er arsen-mengun algeng í hrísgrjónarækt í Bandaríkjunum og Bangladess, enda er iðulega varað við mjög mikilli eða einhæfri neyslu á hrísgrjónum, ekki síst fyrir börn.

Söltun jarðvegs (einkum vegna natríums) er gríðarlegt vandamál á áveitusvæðum, t.d. í Pakistan og á Indlandi.

á jónrýmd í súrum jarðvegi eða mold með pH-háða jónrýmd (sjá hér neðar). Í súrum jarðvegi er stór hluti þeirra jóna sem sitja í jónrýmdarsætum Al^{3+} og fleiri álsambönd, sem og H^+ eins og áður sagði.

Þegar jónrýmd er mæld með því að metta jónrýmdarsætin með t.d. NH_4^+ eða Ba^{2+} við fyrstu jarðvegsskolun er önnur lausn notuð til að skipta út hinni fyrstu. Til dæmis er K^+ notað til að skola út NH_4^+ sem var notað í fyrstu skolun. Þá er orðið auðvelt að mæla hve mikið losnar af fyrri jóninni; NH_4^+ í okkar dæmi sem er skipt út úr jónrýmdarsætum með K^+ (sjá mynd 5.3). Með mælingu á styrk fyrri jónarinnar, sem notuð var til að reka út þær sem fyrir voru í moldinni í náttúrunni, hefur fengist mæling á jónrýmd moldarinnar, bæði basískum katjónum og þeim súru.



Mynd 5.3. Mæling á jónrýmd. Í fyrstu er moldin með ýmsar katjónir í jónrýmdarsætum (fyrri brúni kassinn), svo sem Ca^{++}, Mg^{++}, Na^+, K^+, Al^{3+} og H^+, en þegar moldarsýnið er skolað með lausn með ofgnótt NH_4^+ mettast sýnið af NH_4^+ en þær jónir sem sátu á jónrýmdarsætum skolast niður í lausnina fyrir neðan (ásamt einhverju af NH_4^+). Unnt er að mæla katjónirnar í þeirri lausn og fæst þá summa katjóna. Sé moldarsýnið, sem nú er mettað af NH_4^+, skolað á ný með K^+ lausn er unnt að mæla það NH_4^+ sem kemur niður úr jónrýmdarsætunum og í vökvann fyrir neðan. Nú voru jónrýmdarsætin einmitt mettuð af NH_4^+ og gefur mæling á þeirri jón í skolvatninu til kynna heildarjónrýmd í moldinni. Mynd byggð að hluta á Weil og Brady 2017.

5.1.2. Jónrýmd örefna og jarðvegsgerða

Moldin hefur afskaplega mismikla jónrýmd eftir því hvaða leirgerð er ríkjandi og hve mikið er af leir og lífrænum efnum í henni. Í töflu 5.1 eru gefin dæmi um jónrýmd ýmissa örefna (lífræn efni og leirefni, „colloids“) í mold sem og algengra jarðvegsgerða.

Taflan sýnir að lífræn efni hafa mikla jónrýmd. Dæmi um leirtegund með mikla jónrýmd er smektít, enda er hún mikið notuð leirsteind í efnaiðnaði vegna mikillar efnavirkni. Leirsteindir hitabeltisins hafa litla jónrýmd, sem hefur neikvæð áhrif á frjósemi hitabeltiskerfa og gerir vistkerfi þeirra viðkvæm fyrir raski og ofnýtingu. *Graslendisjörðin* er alla jafna frjósöm mold með jónrýmd 15–30 meq/100 g, en athygli vekur mikil jónrýmd *eldfjallajarðar* og *mójarðar* sem þó er mjög háð sýrustigi – hún lækkar ört ef sýrustig lækkar.

Rétt er að leggja áherslu á það hér að mæling á jónrýmd getur verið ýmsum annmörkum háð, sérstaklega þar sem jónrýmd er pH-háð. Ef notað er mun hærra sýrustig í seinni mælingunni (sem gefur heildarjónrýmdina, CEC) en moldin hefur í náttúrunni fæst mun hærra CEC-gildi en moldin hefur í raun og veru og niðurstaðan verður lág tala fyrir basamettun (BS). Sýrustig getur einnig breyst meðan á skolun moldarinnar með annarri hvorri lausninni stendur (sú fyrri t.d. með NH_4^+), sem hefur áhrif á niðurstöðuna. Sem fyrr sagði verður mæling á basamettun röng ef ekki er notað sama sýrustig á milli fyrstu og seinni skolunarinnar ef jónrýmdin er pH-háð – það er í raun verið að breyta forsendum mælinganna ef pH er ekki það sama. Þetta hefur háð mælingum og birtingu á vísindaniðurstöðum fyrir bæði *mójörð* og *eldfjallajörð*, svo dæmi séu tekin, m.a. í rannsóknaniðurstöðum fyrir íslenska mold.

5.2. Hvað er pH?

Eiginleikar vatns ráða miklu um starfsemi lífs á jörðinni, eins og áður hefur komið fram, meðal annars hve vatn er sérkennilegt efni. Sökum þess að vatn er skautað efnasamband verkar það sem leysir, þ.e. það getur geymt jónir í upplausn, t.d. salt (Na^+ og Cl^-). Efnahvörf í vatni eiga sér einmitt stað á milli jóna sem eru í upplausn í vatninu.

H^+ jónir leita sér súrefnis (t.d. í málmi) eða kolefnis, svo dæmi séu tekin, og ganga í samband við þessi efni sem verður til þess að þau tærast. Við tæringuna myndast vatn, OH^-, CH_4 o.s.frv. H^+ leysir upp málma og grjót sé lausnin nógu sterk, þ.e. ef sýrustigið er nógu lágt. Sé mikið af H^+ er lausnin talin súr, en OH^- er ráðandi í basískri lausn. Til þess að skilgreina virkni H^+ í vatni er notaður pH-kvarði. Hann er lógaritmískur, en samkvæmt honum er:

$$pH = -\log (H^+)$$

þar sem (H^+) er skilgreint sem virkni H^+, sem yfirleitt lætur nærri að vera það sama og styrkur H^+ (mælt í mól/lítra). Styrkur OH^- er í öfugu hlutfalli við styrk H^+ í lausninni, en við ákveðinn styrk, 10^{-7} mól í lítra, er jafnmikið af báðum, en þá er pH = 7 (sjá töflu 5.2). Við pH 7 er styrkur H^+ = 0,0000001 mól/l og einnig styrkur OH^-; lausnin er hlutlaus.

Það er mikilvægt að tileinka sér pH-kvarðann því efnaferli í náttúrunni eru mjög háð sýrustigi, eins og áður sagði. En pH er einnig mikilvægt í mörgu því sem fólk tekur sér fyrir hendur, bæði í starfi og í sambandi við mat og drykk, þekking á pH er því mikilvæg fyrir daglegt líf. Mjög súrt vatn eða mjög basískt vatn er eitrað fyrir lífverur og getur m.a. leyst upp algengar lífrænar sameindir, sem er eiginleiki sem er notaður í hreinsiefnum. Efni sem notað er í uppþvottavélar er baneitrað, það getur m.a. auðveldlega

Tafla 5.1. Jónrýmd örefna (e. colloids; leir og lífræn efni) og dæmigerð jónrýmd nokkurra jarðvegsgerða. Tölurnar gefa hugmynd um stærðargráðu, en jónrýmd er nokkuð breytileg innan jarðvegsgerða eftir aðstæðum, svo sem leirmagni, gerð leirs og lífrænum efnum. Þá er jónrýmdin breytileg eftir dýpt en hér er miðað við yfirborðslög. Oft hefur pH moldar (og pH sem notað er við mælingu á jónrýmd) afgerandi áhrif (sjá aftasta dálkinn).

Örefni/ Jarðvegsgerð	Jónrýmd við pH 7 *$cmol_c$ /kg*	pH-háð jónrýmd
Lífræn efni	150–250	mjög
Smektít	100	lítið
Vermikúlít	150	lítið
Kaólínít	8	mjög
Gibbsít (Al-oxíð)	4	algjörlega
Götheít (Fe-oxíð)	4	algjörlega
Allófan	30–60	mjög
Mójörð (Histosol)	80–150	mjög
Barrskógajörð	8–12	nokkuð
Graslendisjörð	15–30	lítið
Hitabeltisjörð	2–8	mjög
Eldfjallajörð	20–50	mjög

Tafla 5.2. pH-kvarðinn. Til vinstri er sýndur styrkur H^+ en til hægri er styrkur OH^- og pH er sýnt í miðjunni. Brúnleitur hluti sýnir algengt sýrustig (pH) í jarðvegi. Vökvi með pH undir 2 eða yfir 11 er mjög eitraður.

Styrkur H^+ (mól/l)	pH	Styrkur OH^- (mól/l)
0,01	2	0,000000000001
0,001	3	0,00000000001
0,0001	4	0,0000000001
0,00001	5	0,000000001
0,000001	6	0,00000001
0,0000001	7	0,0000001
0,00000001	8	0,000001
0,000000001	9	0,00001
0,0000000001	10	0,0001
0,00000000001	11	0,001
0,000000000001	12	0,01

Vatn er ekki bara H_2O

Vatn er aldrei fullkomlega „hreinræktað“ safn H_2O-sameinda, í því er alltaf eitthvað af H^+ og OH^- jónum sem „flækjast um“ í lausninni innan um vatnssameindirnar, rétt eins og Na^+ og Cl^- í söltu vatni.

Styrkur H^+ og OH^- í lausninni ræður mestu um efnafræðilega virkni vatnsins, m.a. á hvaða formi aðrar jónir eru í upplausn í vatninu, hvaða efnahvörf eiga sér stað og hve hröð þau eru. H^+ er afar virk jón, vægast sagt, hún er örsmá og sé nóg af henni smýgur hún inn í hvaða flöt sem er, jafnvel málmyfirborð.

Mynd 5.4. Sýrustig og ýmis efni sem við neytum eða koma fyrir í náttúrunni. Mjög hátt og mjög lágt sýrustig er afar eitrað; sýra með pH lægra en 1 leysir upp berg og málma.

leyst upp hluta magans komist óvitar í slíkar töflur. Algengt sýrustig jarðvegs er á milli pH 4 og pH 8, en bæði er til súrari og basískari jarðvegur, en utan þessa bils á gróður þó yfirleitt erfitt uppdráttar. Á meðfylgandi mynd 5.4 er kvarðinn sýndur ásamt sýrustigi ýmissa hluta sem við þekkjum úr umhverfi okkar.

5.3. Sýrustig í moldinni

5.3.1. Hvað stjórnar sýrustiginu?

Jónrýmd er mikilvæg forsenda þess að sýrustig jarðvegs sé sæmilega stöðugt. Annars gæti það stjórnast af sýrustigi úrkomunnar sem fellur til jarðar. Katjónir (t.d. Ca^{++} og K^+) loða við jarðvegsagnirnar vegna þess að þær hafa neikvæða hleðslu. Katjónirnar eru einnig í vatnslausninni því að þetta kerfi er kvikt, katjónir losna sífellt frá jónrýmdarstöðum og aðrar taka sæti þeirra. Það sem við mælum (þ.e. hvaða katjónir eru fastar þegar jónrýmd er mæld) er eins konar meðaltalsástand þessa síkvika kerfis. Meðal þessara jóna er H^+ sem er sífellt að festast eða losna frá jónrýmdarstöðum og er því bæði í lausn og á jónrýmdarstöðum, í þeim mun meira mæli sem pH er lægra (súrara).

Ef moldin hefði ekki jónrýmd þyrfti afskaplega lítið af súru eða basísku vatni til að breyta sýrustigi jarðvegsins, en jónrýmdin og efnafræði áls (sjá síðar) sjá til þess að pH helst stöðugt. Eftir því sem sýrustigið er lægra, þeim mun meira er af H^+ í jónrýmdarsætum sem miðlast aftur út í vatnið eftir þörfum og heldur sýrustigi jarðvegs nokkuð stöðugu ásamt álsamböndum – moldin er súr. Eftir því sem sýrustigið er hærra er minna af H^+ í jónrýmdarsætum, en Ca^{2+}, K^+, Na^+ og Mg^{2+} eru ráðandi í jónrýmdarsætum – moldin er basísk.

5.3.2. Hlutverk álsambanda – stuðpúðar

Hér á undan var dregin upp mynd af áhrifum styrks H^+ og OH^- á sýrustig, en hún var þó kannski helst til einföld til að fá mætti sæmilegan skilning á sýrustigi jarðvegs. Þar gegna ál (Al^{3+}) og álhýdroxíð meginhlutverki við að gera sýrustigið stöðugt og þar með minnka áhrif aðkomuefna, t.d. efna sem falla til jarðar með úrkomu, áburðarefna og efna vegna mengunar. Álsamböndin virka sem eins konar „stuðpúði“ (e. böffer) í moldinni. Því má segja að mæling á sýrustigi jarðvegs sé einnig að hluta mæling á virkni ál-efnasambanda. Gott er að hafa það í huga að ál er annað meginefni jarðskorpunnar ásamt kísli – það er ákaflega mikið af áli í umhverfinu!

Til að skilja þessi áhrif er nauðsynlegt að velta fyrir sér „efnakeðjunni“ sem hér er sett fram:

$$Al^{3+} \longleftrightarrow AlOH^{2+} \longleftrightarrow Al(OH)_2^+ \longleftrightarrow Al(OH)_3^o$$

Hér er ekki um eiginlega efnajöfnu að ræða, heldur mismunandi form álsins sem ræðst af pH. Al^{3+} er ráðandi jón í mjög súrum jarðvegi en $Al(OH)_3$ er ráðandi við pH 7 og þar yfir. Ef H^+ er bætt við lausn þar sem $Al(OH)_3$ er ráðandi álform hvarfast það við $Al(OH)_3$ og úr verður vatnssameind og $Al(OH)_2^+$ en sýrustigið breytist ekki:

$$Al(OH)_3^o + H^+ = H_2O + Al(OH)_2^+$$

Það sama gerist ef $Al(OH)_2^+$ eða $AlOH^{2+}$ er ráðandi:

$$Al(OH)_2^+ + H^+ = H_2O + Al(OH)_2^+$$

$$Al(OH)_2^+ + H^+ = H_2O + Al^{3+}$$

Sýrustigið breytist ekki fyrr en styrkur hvers ál-efnasambands hefur minnkað mjög mikið. Það sama á sér stað nema í gagnstæða átt þegar OH^- bætist við

jarðvegslausnina, t.d.:

$$Al^{3+} + OH^- = Al(OH)^{2+}$$

$$Al(OH)^{2+} + OH^- = Al(OH)_2^+$$

$$Al(OH)_2^+ + OH^- = Al(OH)_3^0$$

Þannig sjá þessi efnasambönd til þess að sýrustigið haldist nokkuð stöðugt í moldinni. Eftir því sem það er lægra er meira af Al^{3+} í jónrýmdarsætum, og ef ætlunin er að breyta sýrustiginu þarf að hafa í huga hve jónrýmdin er mikil og hve mikið af H^+ og Al^{3+} er til staðar því það ræður því hve miklu af OH^- þarf að bæta í jarðveginn til að vega upp á móti (mynd 5.5).

Al^{3+} er eitrað fyrir lífríkið. Þar sem pH fer niður úr öllu valdi, m.a. á námasvæðum meginlandanna, blasa við ógróin svæði sem illa gengur að rækta á ný nema með mjög miklum tilkostnaði. Þá þarf að bæta við ýmsum efnum svo sem kalki til þess að reyna að hækka sýrustigið. Sýrustig er víða lágt í votlendi á Íslandi en þar grípa lífrænar sameindir hið lausa ál svo að úr verða ál-húmus-knippi eða fjölliður (sjá umfjöllun um *eldfjallajörð*) sem draga úr áhrifum Al^{3+} í lausninni.

Ál losnar tiltölulega hratt við veðrun á basískri gjósku, en við sýrustig sem er hærra en pH 5 fellur það jafnharðan út með kísli (þ.e. „kristallast“) sem einnig losnar við veðrunina. Saman mynda þessi efni t.d. allófan og ímógólít ásamt súrefni og hýdroxíði (sjá 10. kafla um *eldfjallajörð*).

5.4. Mæling á pH

Mæling á sýrustigi er frekar einföld og er framkvæmd með elektróðum. Slíkur búnaður er til staðar á langflestum efnagreiningarstofum, en til eru sérstakar elektróður sem ætlaðar eru fyrir jarðveg. Moldin er sett í lítið glas og eimuðu vatni blandað saman við þar til hún verður vatnsmettuð eða í hlutfallinu einn hluti jarðvegs á móti tveimur hlutum vatns. Hrært er í vatnslausninni til að jafnvægi náist milli lausnar og jarðvegs.

Á meðan á þessari mælingu stendur er hluti þeirra katjóna sem tekur þátt í efnaskiptum bundinn á jónrýmdarstöðum, m.a. Al^{3+} og H^+. Með því að bæta við veikri lausn með K^+ (t.d. KCl) eða Ca^{2+} ($CaCl_2$) er hægt að reka Al^{3+} og H^+ út í jarðvegslausnina úr jónrýmdarsætunum (K^+ eða Ca^{2+} taka sætin í staðinn). Við það lækkar sýrustigið í jarðvegslausninni. Algengt er að sýrustig mælist einni einingu lægra þegar það er mælt í veikri KCl- eða $CaCl_2$-lausn. Það á t.d. við um íslenskan jarðveg. Slík mæling segir til um „virka sýrueiginleika“ jarðvegsins.

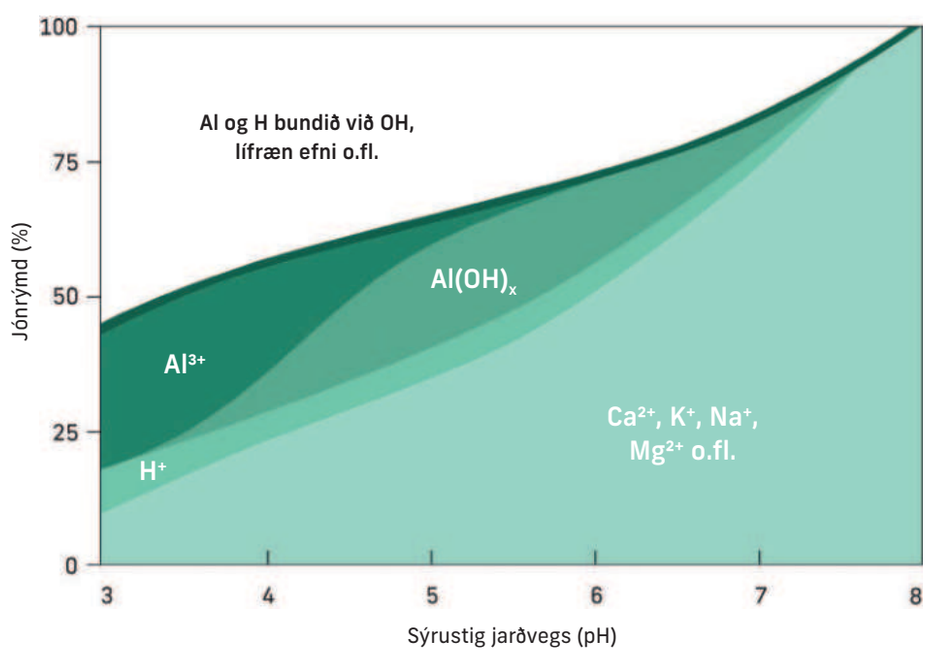
5.5. Basamettun

Bæði H^+ og Al^{3+} eru skilgreindar sem súrar katjónir, en Ca^{2+}, K^+, Na^+ og Mg^{2+} sem basískar katjónir í jarðvegi. Hugtakið basamettun (e. base saturation) er notað til að skilgreina hlutfall basískra

Moldin er stuðpúði

Þessi stuðpúðaeiginleiki jarðvegs er afar mikilvægur. Án hans hefði súrt regn gert jarðveg iðnríkja mjög súran og ófrjóan og tiltölulega litla efnaveðrun hefði þurft til að lækka pH niður úr öllu valdi.

Þessir eiginleikar álsambanda og samspil við jónrýmd gera jarðveginn að hlutfallslega stöðugu umhverfi með tilliti til efnahvarfa; moldin færir vistkerfinu stöðugleika sem er afar mikilsverður. Af töflu 5.1. er augljóst hvaða jarðvegsgerðir eru viðkvæmastar fyrir súru regni: sá jarðvegur sem hefur minnsta jónrýmd.



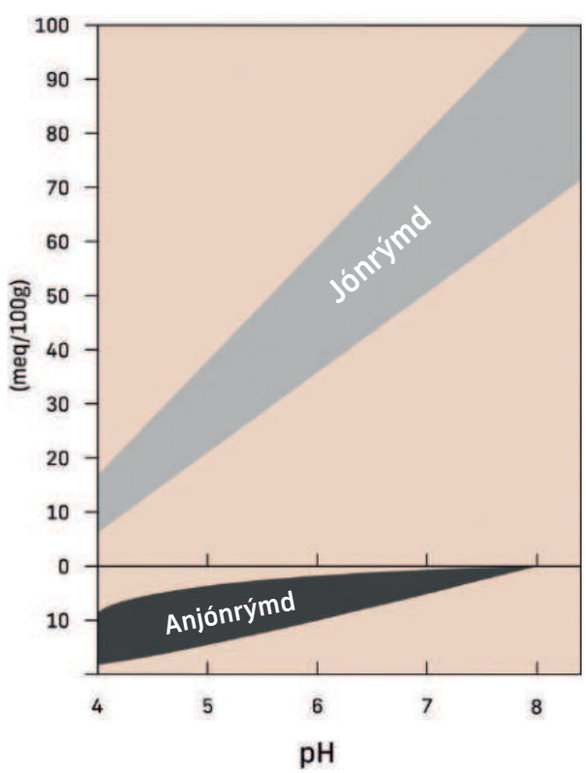
Mynd 5.5. Styrkur Al-sambanda og pH Al^{3+} er aðeins í lausn í einhverjum mæli við mjög lágt sýrustig, en það er eitrað. Styrkur Al(OH)-sambanda eykst með hækkandi sýrustigi. Við það verða basísku katjónirnar ráðandi (Ca^{++}, Mg^{++}, Na^+, K^+) á jónrýmdarsætum – en basamettun (BS) er mælikvarði á hlutfall þeirra í jónrýmdinni. Byggt á Brady og Weil 2002.

katjóna miðað við jónrýmd (CEC) og er skammstafað BS:

$$BS = (\text{basískar katjónir}/CEC) \times 100$$

Eins og kom fram áður skolar NH_4^+ út öðrum jónum úr jónrýmdarsætum í fyrstu skolun og þá er auðvelt að mæla basana (Ca^{2+}, K^+, Na^+ og Mg^{2+}) í skolinu sem losnar, en þá eru súru katjónirnar ekki mældar (H^+ og Al^{3+}). Önnur skolunin gefur hins vegar mælingu á heildarfjölda jónrýmdarsætanna, þ.e. jónrýmd (CEC). Há basamettun (>80%) er einkenni frjósams jarðvegs þar sem sýrustig er sæmilega hátt, en lág basamettun (t.d.< 50%) takmarkar frjósemi jarðvegsins og einkennir oft mikið veðraðan jarðveg með lágt sýrustig.

Jónrýmdin (fjöldi hleðslna) og basamettunin spila saman og gefa til kynna hve mikið þarf af OH^--jónum til þess að hækka sýrustigið. Það er yfirleitt gert með kalkáburði sem losar OH^- sem hvarfast við H^+ og myndar vatn (H_2O).



Mynd 5.6. Hækkandi jónrýmd með hækkandi pH í allófani. Myndin er einnig í 10. kafla um *eldfjallajörð* og skýrð betur þar.

Þessi hvörf verða ekki skýrð hér nánar en þau eru mikilvæg í landbúnaði þar sem jarðvegur er mjög súr.

Hér á landi eru nokkur landsvæði með súra mold, eins og síðar verður fjallað um, en það er mjög dýrt að bera kalk á tún, auk þess sem mjög mikið þarf af kalki hérlendis því jónrýmd íslensks jarðvegs er alla jafna mikil. Veðrun á basalti getur einnig af sér katjónir sem hækka sýrustigið og áburðargjöf með basískri ösku, sem og gjóskufall eða áfok, getur hækkað pH og aukið frjósemi jarðvegsins til muna.

Allófan, einkennissteind *eldfjallajarðar*, hefur pH-háða jónrýmd. En öfugt við steindir hitabeltisins hefur allófan mikla jónrýmd. pH-háð jónrýmdin leiðir til þess að *eldfjallajörð* hefur mun meiri jónrýmd eftir því sem pH er hærra (mynd 5.6). Þetta hefur mikilvægar afleiðingar sem vert er að hafa í huga þegar basamettun *eldfjallajarðar* er skoðuð.

Niðurstöður mælinga á jónrýmd *eldfjallajarðar* eru háðar því við hvaða sýrustig (pH) skiptanlegu katjónirnar eru mældar, þ.e. Ca^{2+}, K^+, Na^+ og Mg^{2+} (basísku jónirnar) eða H^+ og Al^{3+} (súru jónirnar), og við hvaða sýrustig jónrýmdin er mæld (heildin, allar jónir). Oft er ekki notað sama pH við mælingu á skiptanlegum katjónum og jónrýmd, sem kemur ekki að sök við útreikning á basamettun (BS) þar sem leiragnirnar eru venjuleg lagsilíköt (blaðsilíköt), t.d. á hinum Norðurlöndunum. En þar sem *eldfjallajörð* á í hlut verður útreikningur á basamettun með þessum hætti marklaus.

Eins og fyrr sagði getur verið erfitt að stjórna sýrustigi jarðvegs við mælingu á skiptanlegum katjónum og jónrýmd í *eldfjallajörð*, sýrustig breytist gjarnan meðan á mælingunni stendur. Því borgar sig að túlka tölur um basamettun *eldfjallajarðar* með varúð, og það á við hérlendis.

5.6. Veðrun og áhrif loftslags á sýrustig

Veðrun og aldur jarðvegs hefur áhrif á hvaða leirsteindir eru í moldinni. Þær hafa, eins og áður hefur komið fram, afskaplega mismikla jónrýmd. Lítið veðruð mold sem er rík af smektíti, illíti eða vermikúlíti hefur mikla jónrýmd (tugir $cmol_c$/kg eða meq/100 g). Mikið veðraður jarðvegur sem einkennist af kaólíníti, járnsteindum og álsteindum hefur litla jónrýmd (<10 $cmol_c$/kg). Þar sem jónrýmdin er lítil er basamettun lítil og pH er því oft lágt í hitabeltisjarðvegi.

Þar sem úrkoma er lítil veldur uppgufun því að leysanleg sölt berast ofar í jarðveginn í þurrkum, en þeim skolar síðan aftur niður í úrfelli. Þessi sölt stuðla að háu sýrustigi. Jarðvegur á þurrum svæðum hefur yfirleitt hátt pH og ef $CaCO_3$ er í kerfinu festist sýrustigið nálægt 8,4. Hins vegar þarf Na^+ að vera til staðar eigi sýrustigið að verða ennþá hærra, en þá hættir venjulegur gróður að geta þrifist.

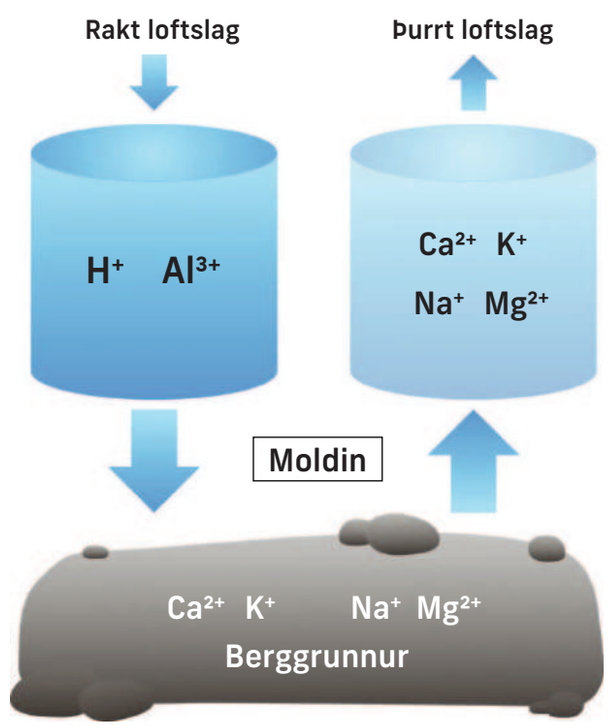
Þar sem úrkoma er mikil skolast þessi sölt ofan í neðri lög jarðvegsins eða út úr honum (útskolun) og þar með þær jónir sem teljast basískar (Ca^{2+}, K^+, Na^+ og Mg^{2+}). Við það eykst hlutur Al^{3+} og H^+ í jónrýmdinni, basamettunin lækkar og að lokum einnig pH (mynd 5.8). Því er sýrustig í gömlum jarðvegi í röku loftslagi oft tiltölulega lágt – jarðvegurinn er súr. Vert er að hafa í huga að áfok á Íslandi bætir sífellt nýjum bergefnum við yfirborðið sem kemur í veg fyrir að jarðvegur á Íslandi súrni (sjá 13. kafla um íslenskan jarðveg).

5.7. Súrt regn

Brennsla á lífrænum orkugjöfum á borð við kol og olíu leiðir til þess að ýmis efni sem sýra yfirborðið falla til jarðar með úrkomu. Lengi vel stóðu deilur um það hvort súrt regn hefði í raun og veru áhrif á jarðveg; því var jafnvel haldið fram að áhrifin væru nánast engin vegna stuðpúðaeiginleika jarðvegsins. Olíu- og kolaiðnaðurinn hafði og hefur enn á sínum snærum snjallt fagfólk á sviði afneitunarfræða.

Deilur um súrnun jarðvegs vegna brennslu á jarðefnaeldsneyti eru nú að baki að mestu, súrt regn hefur sannanlega haft umtalsverð áhrif á sýrustig jarðvegs á gríðarlega stórum svæðum. Þó eru þessi áhrif mun minni en ætla mætti í jarðvegi vegna stuðpúða-eiginleika moldarinnar. Súrt regn hefur aftur á móti valdið mun sýnilegri skaða í ám og vötnum því vatnskerfin skortir dempun moldarinnar. Súrt regn og útblástur frá samgöngum valda líka skaða á byggingum og listaverkum úr kalksteini, svo fleiri dæmi séu tekin.

Mikilvægustu skaðvaldarnir í súrri úrkomu eru brennisteinsdíoxíð (SO_2) og nituroxíð (NO_x) sem aðallega verður til við rafmagnsframleiðslu (Vance, 2002). Þegar þessi efni oxast verða til prótónur



Mynd 5.7. Í röku loftslagi skolar basískum katjónum niður úr efsta laginu og súru jónirnar (H^+ og Al^{3+}) verða ráðandi. Basamettunin verður lítil með tímanum. Þessu er öfugt farið í þurru loftslagi.

Mengunin getur farið víða

Mengunarefni geta borist tugi og hundruði kílómetra í andrúmsloftinu. Þannig átti stór hluti af súru regni sem féll á Noreg uppruna á Bretlandi – sem nú hefur hætt kolavinnslu að mestu.

Til Svíþjóðar berst umtalsverð mengun frá Austur-Evrópu, sem fór þó ört minnkandi eftir fall Berlínarmúrsins. Vandamálið er hnattrænt í eðli sínu. Þessi mengun fer nú víðast hvar minnkandi í iðnríkjum, en vex sums staðar örum skrefum í þróunarríkjum.

Mengunin er mest þar sem kolum og olíu er brennt á iðnaðarsvæðum, m.a. í norðausturríkjum Bandaríkjanna, í Texas og Mississippi, Mið-Evrópu og Kína. Stjórnmál á sviði umhverfismála hafa vitaskuld áhrif á þessa þróun, sem sást m.a. af eflingu kolaiðnaðar í Bandaríkjunum í skjóli Trump-stjórnarinnar.

(H^+) sem sýra umhverfið. Aukinn styrkur H^+ veldur einnig því að basískar katjónir skolast út úr jarðvegskerfinu því þeim er ýtt úr jónrýmdarsætum af H^+. Sem áður sagði er mold því viðkvæmari fyrir súru regni sem jónrýmdin er minni. Vistkerfi eru því misnæm fyrir súru regni. Barrskógar hafa orðið sérstaklega illa úti, m.a. vegna minni stuðpúða í jarðvegi þeirra og vegna þess að súr úrkoman rennur niður trjástofna og eykur mjög sýrustyrk í moldinni næst trjánum. Ennfremur getur súr úrkoma valdið tjóni á laufum trjánna.

Talið er að um 35% skóglendis í Evrópu hafi orðið fyrir áhrifum af súru regni og þar eru sums staðar rekin viðamikil verkefni þar sem borið er kalk á skóglendi úr lofti.

5.8. Afoxunarspenna og litur moldar

5.8.1. Afoxunarspenna

Rafeindir (elektrónur) og rafeindaskipti gegna meginhlutverki í efnahvörfum, sérstaklega í orkuflutningi í lífheiminum, en einnig í ýmsum ólífrænum efnahvörfum. Þessi rafeindaskipti valda því að mörg frumefni taka mismunandi hleðslu eða oxunarstig. Til dæmis má nefna járn sem er ýmist tvígilt (táknað sem Fe(II) eða Fe^{2+}) eða þrígilt (Fe(III) eða Fe^{3+}). Þessi mismunandi form járns gegna mikilvægu hlutverki við flutning súrefnis í blóði dýra.

Kolefni og nitur geta tekið mörg oxunarstig sem eru notuð við orkubúskap lífheimsins. Tilhneigingunni til að taka við eða gefa frá sér rafeind (e^-) er lýst sem rafspennu kerfisins, þ.e. afoxunarspennu, táknuð sem Eh. Þessi mælieining er afstæð og er efnajafnan (hálfhvarfið) fyrir mismunandi hleðslu vetnis notuð til viðmiðunar. Efnahvörf í náttúrunni takmarkast í raun af afoxunarspennu vatns annars vegar og súrefnis hins vegar sem mynda til samans eins konar útverði efnahvarfa lífheimsins. Umfjöllunin hér um afoxunarspennu gárar aðeins yfirborðið á þeirri efnafræði sem tengist afoxunarspennu í jarðvegi, en bent er á nokkrar heimildir aftast í kaflanum.

5.8.2. Loftfirrð: afoxun

Efni sem oxa önnur efni (e. oxidizing agent) taka við rafeindum (e-) en efni sem gefa auðveldlega frá sér rafeindir eru afoxandi efni (e. reducing agent). Súrefni er einmitt mjög sterkur oxari – eins konar elektrónu-fíkill og getur tekið við rafeindum frá mörgum öðrum frumefnum. Loftháð öndun þarfnast súrefnis til þess að taka við rafeindum þegar lífverur taka til sín orku við að oxa (brenna) lífræn kolefnissambönd. Eða með öðrum orðum: nýting á þeirri orku sem felst í kolefnissamböndum sem mynduð eru með tillífun plantna eru ferli oxunar og lífverur nota til þess súrefni. Með tilliti til súrefnis er þessu lýst með hálfhvarfinu:

$$\tfrac{1}{2}O + 2H^+ + 2e^- = H_2O$$

(oxunarstig súrefnis breytist frá 0 í ½O í -2 í H_2O).

Afoxunarspenna í jarðvegi takmarkast bæði af súrefnisþrýstingi og sýrustigi. Þessu samhengi er lýst á mynd 5.8 þar sem pH er varpað á x-ásinn en afoxunarspennu á y-ásinn. Þar sem nægjanlegt súrefni er til staðar er jarðvegskerfið loftað (e. aerobic) en loftfirrt (e. anaerobic) þar sem súrefni skortir. Við loftháða öndun (rotnun) getur gengið á súrefni kerfisins nema súrefnisbirgðirnar endurnýist.

Ef súrefnisþrýstingur í jarðveginum minnkar lækkar afoxunarspenna sömuleiðis. Slíkar aðstæður ríkja oft í votlendi þar sem skortur er á súrefni. Þar nýta

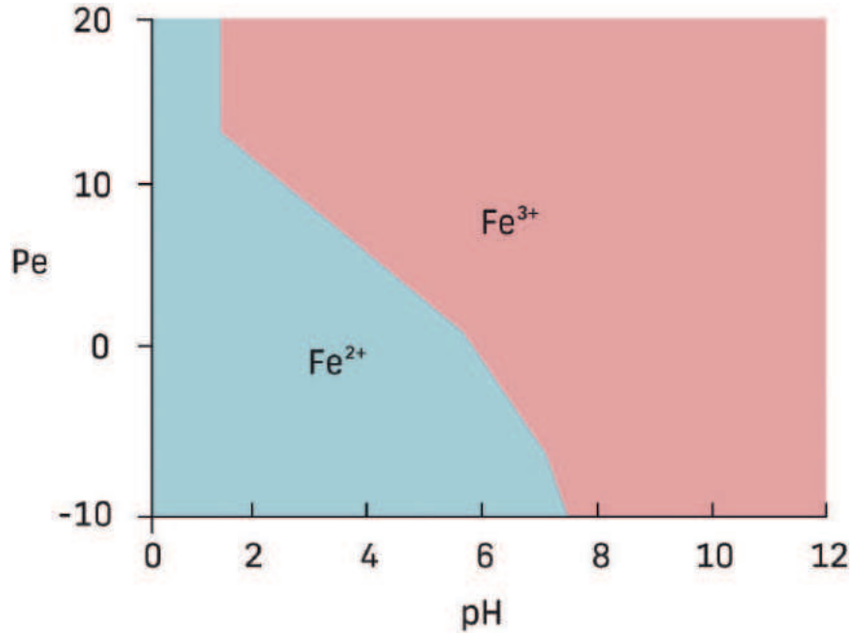
lífverur súrefnið á meðan það endist en síðan taka við sérhæfðar lífverur sem lifa í loftfirrtu umhverfi. Þá er afoxunarspennan orðin lág. Sýrustig hefur sömu áhrif, afoxunarspenna lækkar eftir því sem sýrustigið lækkar.

5.8.3. Afoxun nokkurra algengra efna í jarðvegi og litur jarðvegs

Þau efni sem eru hvað viðkvæmust fyrir breytingum á afoxunarspennu í jarðvegi eru járn og mangan (Mn). Skilin á milli Fe(II) og Fe(III) annars vegar og Mn(I) og Mn(II) hins vegar liggja einmitt á því bili sem Eh sveiflast tíðum í jarðvegi. Það á sérstaklega við þar sem skiptast á þurrir og votviðrasamir kaflar eða þar sem grunnvatn rís og hnígur í jarðveginum eftir árstíðum, veðurfari og holklaka. Þegar jarðvegurinn er votur afoxast þessi efni (verða Mn^{+} og Fe^{2+}) en þegar hann þornar oxast þau á ný (Mn^{2+} og Fe^{3+}) og ganga í efnasamband við OH^{-} eða súrefni. Á afoxaða forminu (Mn^{+} og Fe^{2+}) geta þau borist með vatni frá upprunastað og fallið síðan út þar sem loftunin er nóg til að oxa þau.

Þegar járn afoxast (á formið Fe^{2+}) verður það mjög „hreyfanlegt" (e. mobile) og berst auðveldlega um jarðveginn í vatnslausn og jafnvel út úr honum. Það sama á við um afoxað mangan (Mn^{+}). Við viss skilyrði getur jarðvegurinn aflitast af þessum sökum, hann verður grár á litinn (grámi, e. gleying). Afoxað járn er bláleitt og er algengt næst upptökum vatns í virkum skurðum á Íslandi, þ.e. þar sem afoxað járn seytlar með vatni út í þá (mynd 5.9).

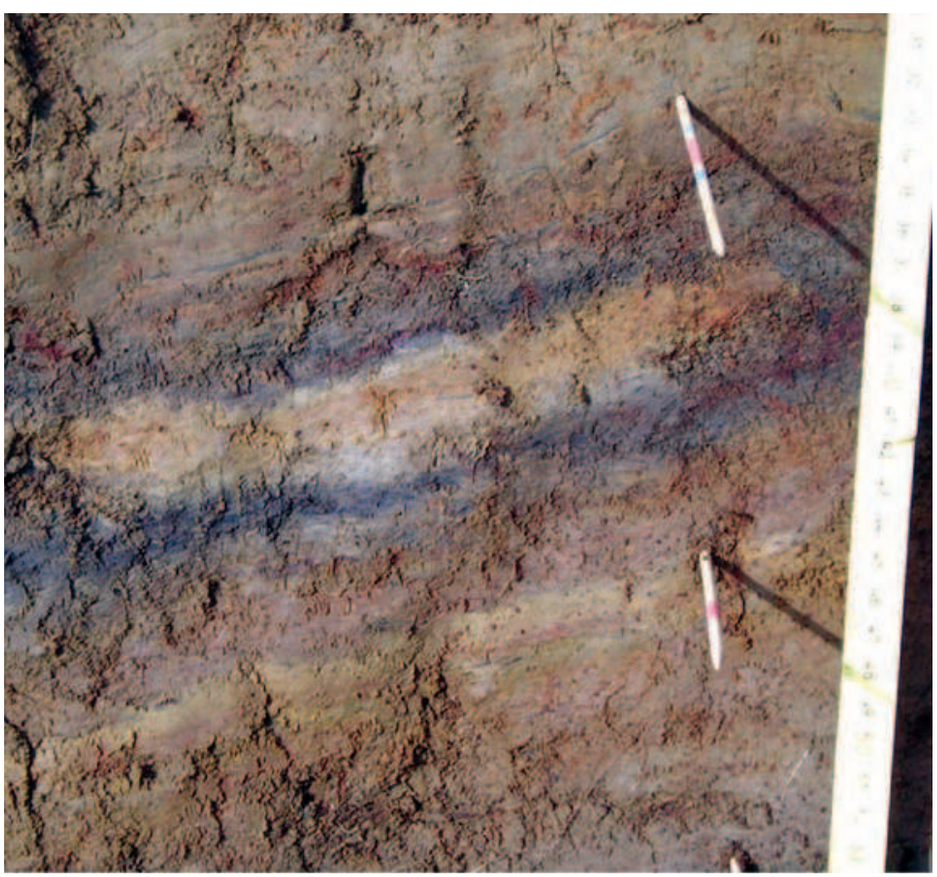
Þar sem járn fellur út aftur myndast skærrauðir litir þegar þrígilt járn (Fe^{3+}) fellur út sem hýdroxíð, í flestum tilfellum ferrihýdrít hérlendis, en það er einmitt rauði liturinn á vatni í skurðum og víðar þar sem járnið hefur komist í snertingu við afoxað vatn (mynd 5.10).



Mynd 5.8. Sýrustig (pH) og rafspenna í jarðveginum ráða á hvaða formi hin ýmsu efni eru, ekki síst Fe og Mn.

Mynd 5.9. Blátt afoxað járn (Fe^{+2}) streymir úr mold út í nýgrafinn skurð.

Mynd 5.10. Rauðlitað vatn í skurði litað af ferrihýdríti við oxun á Fe^{++}.



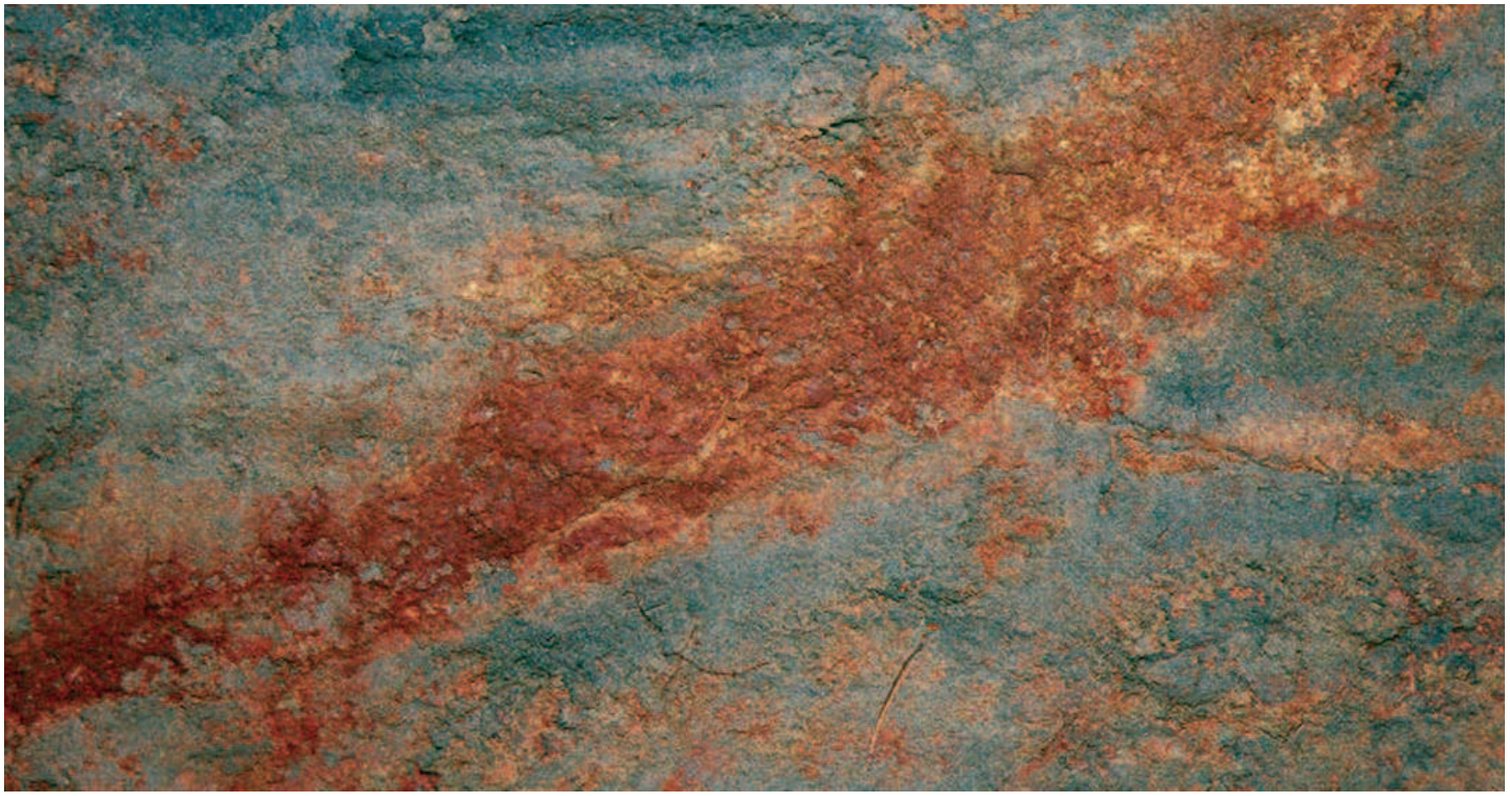
Mynd 5.11. Aflituð grá mold ásamt járnútfellingum og mögulega Mn-útfellingum. Mynd: Brita Berglund.

Reyndar eru örverur og lífræn efni einnig þáttur í litnum og þau hafa áhrif á myndun ferrihýdríts. Jafnframt geta myndast dílar (e. mottles) og hnyðlingar (e. concretions) í moldinni sem hafa mun rauðari eða dekkri lit en jarðvegurinn umhverfis, sem getur jafnvel verið aflitaður (mynd 5.11).

Einnig fellur járn út í grófum, vel loftuðum jarðvegslögum sem liggja á milli fínkorna laga með meiri vatnsheldni. Þetta er afar algengt á Íslandi, m.a. vegna grófra öskulaga í jarðveginum (mynd 5.12). Meira verður fjallað um votlendi á Íslandi í köflunum um íslenska mold.

Oxað mangan er iðulega litur bergs og jarðvegsyfirborðs í eyðimörkum. Þar fellur manganoxíð, sem er dökkt eða svart á litinn, smám saman út á yfirborði bergs. Oftast gerist þetta á löngum tíma. Í eyðimörkum hefur fína efnið í yfirborðinu iðulega fokið eða runnið burt í hitabeltisstormum og eftir situr malarkennt yfirborð sem gæti kallast „auðnaskrápur“ (e. desert pavement), dökk- eða svartlitaður af mangani (mynd 5.13). Mölin hindrar frekara rof. Manganliturinn útskýrir af hverju berg er víða svartlitað á yfirborðinu enda þótt það sé í eðli sínu ljóst, t.d. líparít eða kalksteinn. Oft og tíðum er auðnaskrápurinn gamall, jafnvel allt frá síðustu ísöld (Schaetzl og Thomson 2015).

Afoxunarspenna hefur áhrif á það á hvaða formi mörg helstu næringarefnin eru í jarðvegi og því er hún afar mikilvæg með tilliti til frjósemi og heilnæmi moldarinnar. Þetta á bæði við um algengustu efnin (t.d. nitur og brennistein) sem og snefilefni (t.d. selen og mólýbden). Önnur efni en súrefni taka við rafeindum (elektrónum) í jarðvegi, m.a. ýmis form niturs á borð við fimmgilt N í nítrati (NO_3^-) sem verður þrígilt N í nítríti (NO_2^-) við slík efnahvörf. Afoxunarspennan hefur því sérstaklega mikil áhrif á hringrás niturs í jarðvegi.



Mynd 5.12. Járnútfellingar í sprungu í mold þar sem járnríkt vatn hefur oxast þegar þornaði um.

5.8.4. Afoxunarspenna og mengun

Hér hefur verið lögð áhersla á algengustu jónirnar í jarðveginum, en afoxunarspenna er einnig mikilvæg fyrir oxunarstig margra annarra jóna, þeirra á meðal ýmissa mengunarefna. Sem dæmi má nefna króm (Cr). Cr^{6+} er mjög eitruð jón sem leitar auðveldlega í lausn (leysanleg), en Cr^{3+}- og Cr^{4+}-jónirnar eru ekki skaðlegar mönnum. Unnt er að afoxa Cr^{6+}-mengaðan jarðveg til þess að koma króminu á síður skaðlegt form. Hins vegar er reynt að oxa jarðveg sem er mengaður af arseni (As^{3+}) því oxað As^{5+} er ekki eins leysanlegt og afoxaða formið. Afoxunarspenna hefur einnig áhrif á leysanleika ýmissa lífrænna eiturefna, t.d. skordýraeiturs, illgresiseyðis og lífrænna leysiefna.

Mynd 5.13. Auðnaskrápur (e. desert pavement) í Sonoran-eyðimörkinni í vestanverðu Arizona-fylki (Kofa-náttúruverndarsvæðið). Fjöll úr líparíti og kalksteini í bakgrunninum eru einnig lituð af auðnaskrápi.

5.9. Votlendin

Votlendi jarðarinnar eru æði mismunandi að gerð, sem mótast af þáttum á borð við landslag og loftslag. Mörg flokkunarkerfi fyrir mold hafa sérstakan flokk eða deild fyrir votlendisjarðveg með skertan súrefnisþrýsting, oft kallaður „gleyic“ eða „aquic“ jarðvegur. Bandaríska kerfið, sem hér er notað til grundvallar fyrir jarðvegsflokka, gerir það ekki, heldur er votlendisjarðvegur (e. aquic) flokkaður sem undirflokkur af öðrum jarðvegsgerðum. Þetta er að mörgu leyti galli á kerfinu með hliðsjón af mikilvægi votlendis á jörðinni, en á hinn bóginn endurspeglar þessi aðferð vel hvað votlendismoldin er mismunandi.

Önnur mikilvæg einkenni moldarinnar, eins og þau sem móta *eldfjallajörð*, eru þá látin stýra flokkuninni, frekar en jarðvegsrakinn, sem er eðlilegt. Fjallað er um jarðvegsflokka í 9. kafla. Vísindatímarit á borð við *Wetlands* eru helguð votlendum og um þau eru til margvíslegar bækur, þ. á m. kennslubækur (t.d. Mitsch og Gooselink o.fl. 2015). Nokkuð er misjafnt hvernig votlendi eru skilgreind en þau eru talin þekja um 17 milljónir ferkílómetra, eða 13–14% yfirborðs lands á jörðinni sem ekki er þakið jöklum.

Votlendin telja jafnólík svæði og lífrænar mýrar norðurslóða (með og án sífrera), votlendi við ár og vötn, sem hafa afar mismunandi lífrænt innihald, árósasvæði, sjávarfitjar, graslendismýrar þar sem grunnvatn stendur hátt, sem og hallamýrar í rótum fjalla og fjallgarða o.fl. Votlendi freðmýrasvæðanna eru víðfeðmust (35% votlendanna) (mynd 5.14). Íslensk votlendi eru einnig mjög breytileg (sjá *Íslensk votlendi*, ritstj. Jón S. Ólafsson, 1998; einnig yfirlitsgrein ÓA o.fl. 2016).

Votlendi eru meðal mikilvægustu vistkerfa jarðar. Þau eru frjósöm, m.a. vegna mikils magns af lífrænum efnum, og geyma afar mikinn líffjölbreytileika. Þessi breytileiki er ýktur á Íslandi vegna þess hve mósaíkin í votlendislandslaginu er fjölbreytt þar sem litlar margbreytilegar landeiningar einkenna yfirborðið. Votlendi eru eins konar svampar sem miðla vatni til vatnakerfa í stórum stíl, sem á ekki hvað síst við á meginlöndunum.

Halldór Laxness kallaði votlendin „lungu landsins“ í frægri grein þar sem fyrst var vakin athygli á óhóflegri framræslu á Íslandi. Votlendin gleypa við vatni og miðla því og koma þar með í veg fyrir flóðatoppa og jafna rennsli í ám. Það hefur aftur mikil áhrif á lífið í vatnakerfunum, auk þess sem votlendi ljá næringu og miðla hita. Votlendin meðfram ám eru náttúrlegir flóðagarðar og við árósana vernda þau strandlínurnar.

Votlendin eru risastórir geymar kolefnisforða sem við framræslu losnar úr læðingi: þau losa þá gríðarlegt magn gróðurhúsalofttegunda vegna oxunar kolefnis, eins og fjallað er um í kafla 2.2.

Votlendin miðla vatni þvert á landamæri þjóða og þau eru ennfremur viðkomustaðir fugla á alþjóðleguflakki þeirra: þau hafa alþjóðlega þýðingu. Mörg votlendi á jörðinni njóta alþjóðlegrar verndar samkvæmt Ramsarsamningnum um verndun alþjóðlegra mikilvægra votlenda. Á Íslandi voru sex Ramsarsvæði árið 2021: Andakíll, Grunnafjörður, Guðlaugstungur, Mývatn og Laxá, Snæfells- og Eyjabakkasvæðið og Þjórsárver. Votlendi eru víða vernduð fyrir raski með landslögum, m.a. að hluta til á Íslandi. Lögsóknir gegn þeim sem raska votlendum, m.a. með nýjum íbúðarbyggðum, færast nú í vöxt, t.d. í Bandaríkjunum. Fjallað er um votlendi víðar í þessu riti eftir því sem við á, m.a. í kaflanum um lífræn efni, kaflanum um íslenskan jarðveg og í umfjöllun um kolefni og loftslag.

Mynd 5.14. Orravatnsrústir eru votlendi með vötnum og freðmýrarústum (ískjarnar) á hálendinu norðaustan við Hofsjökul. Þarna eru afar margbreytilegar vistgerðir og dýralíf fjölbreytt. Flest rústasvæði landsins njóta sérstakrar verndar (sjá 16. kafla um frost og kulferli). Rauðlitað vatnið í forgrunni er ferrihýdrít o.fl. efni gerð af oxuðu járni sem er ættað úr moldinni umhverfis.

Heimildir

Í þessari stuttu umfjöllun var stuðst við almennar kennslubækur í jarðvegsefnafræði, svo sem eftir Lindsay (1979), Sposito (1989) og Bohn o.fl. (1979), en einnig nokkra kafla í „Handbook of Soil Science“ (Huang o.fl. 2012), „Encyclopedia of Soil Science“ (Lal, 2007), „Encyclopedia of Soils in the Environment“ (Hillel, 2005), „Encylopedia of Soil Science“ (Chesworth, 2008) og kennslubók Weil og Brady (2017).

Benda má á góða yfirlitskafla um afoxunarspennu eftir Bouma (1983), McDaniel (2002), James (2002) og James og Bartlett (2000) og kennslubækur í jarðvegsefnafræði, svo sem eftir Lindsay (1979), Sposito (1989), Bohn o.fl. (1979) og Tatabani o.fl. (2005).

Bohn, H.L., B.L. McNeal og G.A. O'Connor 1979. Soil Chemistry. John Wiley, New York, USA.

Bouma, J. 1983. Hydrology and soil genesis of soils with Aquic moisture-regimes. Í: L.P. Wilding, N.E. Smeck og G.F. Hall (ritstj.): Pedogenesis and Soil Taxonomy. I. Concepts and Interactions. Developments in Soil Science 11A, Elsevier, Amsterdam, Holland. Bls. 253–281.

Chesworth, W. 2008. Encyclopedia of Soil Science. Springer, Dordrecht, Holland.

Hillel, D. (ritstj.). 2005. Encyclopedia of Soils in the Environment. Elsevier, Amsterdam, Holland.

Huang, P.M., Y. Li og M.E. Sumner (ritstj.) 2012. Handbook of Soil Science. 2. útg. CRC Press, Taylor & Francis, Boca Raton, Florida, USA.

James, B.R. 2002. Redox Phenomena. Í: R. Lal (ritstj.), Encyclopedia of Soil Science, Dekker, New York, USA. Bls. 1098–1100.

James, B.R. og R.J. Bartlett 2000. Redox phenomena. Í: M.E. Sumner (aðalritstj.), Handbook of Soil Science. CRC Press, Boca Raton, USA. Bls. B-169–194.

Jón S. Ólafsson (ritstj.) 1998. Íslensk votlendi. Verndun og nýting. Háskólaútgáfan, Reykjavík.

Lal, R. (ritstj.) 2002. Encyclopedia of Soil Science, Dekker, New York, USA.

Lindsay, W.L. 1979. Chemical Equilibria in Soils. Wiley, New York, USA.

Magnús Á. Sigurgeirsson, Ólafur Arnalds, Sigurður Emil Pálsson, B.H. Howard, Kjartan Guðnason. 2005. Radiocaesium fallout behaviour in volcanic soils in Iceland. Journal of Environmental Radioactivity 79:39–53.

McDaniel, P.A. 2002. Anaerobic processes. Í: R. Lal (ritstj.), Encyclopedia of Soil Science, Dekker, New York, USA. Bls. 60–63.

Mitsch, W.J. og J.G. Gosselink. 2015. Wetlands. John Wiley & Sons, New Jersey.

Ólafur Arnalds, Hlynur Óskarsson, Jón Guðmundsson, Sigmundur Helgi Brink og Fanney Gísladóttir 2016. Icelandic inland wetlands: Characteristics and extent of draining. Wetlands 36:759–769.

Schaetzl, R.J. og M.L. Thompson 2015. Soils. Genesis and Geomorphology. 2. útg. Cambridge University Press, New York, USA.

Sposito, G. 1989. The Chemistry of Soils. Oxford University Press, Oxford, UK.

Tatabani, M.A. og D.L. Sparks (ritstj.). 2005. Chemical processes in soils. Soil Science Society of America SSSA Book Series 8. Madison, Wisconsin, USA.

Veronique Maria og Ólafur Arnalds 2019. Soil Genesis. A Dialogue for Creation. In: Dialogues on Soil and Art in the Anthropocene (A. Toland, J.S. Noller og G. Wessolek ritsth.). CRC Press / Francis Taylor, New York. Bls. 127-135.

Weil, R.R. og N.C. Brady 2017. The Nature and Properties of Soils. 15. útg. Pearson, Boston, USA.

6 Eðlisþættir jarðvegs

Mynd 6.1. Skriða í Seyðisfirði sem féll í desember 2020. Eðliseiginleikar efnisins í upptökum skriðunnar skýra skriðuhættuna. Eðliseiginleikar hafa einnig mikil áhrif á vatnshringrásina og margt annað sem mótar eðli og stöðugleika vistkerfa.

Þegar fjallað er um eðlisþætti jarðvegs fá vatnsþættir alla jafna mest vægi, en rætt er sérstaklega um vatn og mold í 4. kafla. Einnig var kornastærðareiginleikum og fleiri þáttum gerð skil í 2. kafla, sem vitaskuld teljast einnig til eðlisþátta jarðvegs. Í þessum kafla er fjallað um ýmsa aðra eðlisþætti en einnig um útlitseinkenni jarðvegsins. Eðlishegðun moldarefna hafa mikla þýðingu í verkfræði og jarðtækni og verður vikið að nokkrum slíkum atriðum í kaflanum. Þá er rætt um nokkra eðlisþætti sem hafa sérstaka þýðingu fyrir jarðveg eldfjallasvæða, þ.e. *eldfjallajörð* eða *sortujörð* (Andosol). Mun ítarlegri umræða er um *eldfjallajörð* og íslenskan jarðveg í síðari köflum.

6.1. Bygging og samloðun

6.1.1. Bygging

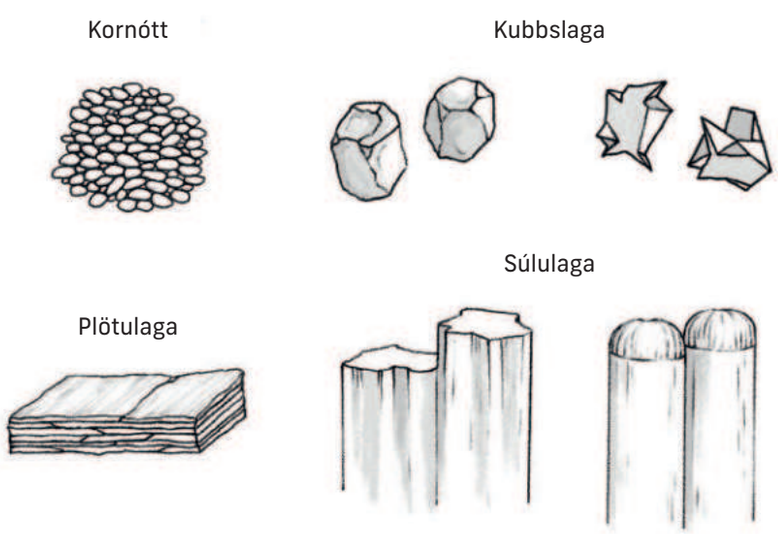
Jarðvegskorn raðast saman með margvíslegum hætti og mynda byggingareiningar, moldin tekur á sig byggingu (e. structure). Þessar einingar eru afar mikilvægar því rýmið á milli þeirra leiðir bæði loft og laust vatn um jarðveginn. Bygging gefur einnig til kynna ýmsa aðra eiginleika moldarinnar, svo sem leirinnihald og jafnvel frjósemi.

Byggingareiningarnar eru af öllum stærðum, allt frá smásæjum einingum til köggla sem eru margir sentimetrar í þvermál (e. peds). Lífverur og lífræn efni eru oft og tíðum meginástæða þess að jarðvegurinn myndar samkorn (e. aggregates). Við sniðlýsingar eru notaðar staðlaðar aðferðir við að lýsa gerð, stærð og styrkleika samkorna (e. aggregates) og köggla. Helstu gerðir byggingar sem eru sýnilegar með berum augum eru kornóttar (kleprar), plötulaga og kubbslaga einingar (mynd 6.2).

Kornótt bygging verður til í yfirborðslögum, ekki síst þar sem ánamaðkar lifa góðu lífi, en þeir auka einmitt frjósemi jarðvegs á ýmsa lund. Í raun eru kornin þá kleprar sem gengið hafa í gegnum meltingarvef ánamaðka (mynd 6.3). Kornótt bygging er mjög algeng í yfirborðslögum á Íslandi, ekki síst þar sem mikið er um ánamaðka, t.d. í ræktunargörðum landsmanna. Frekari umfjöllun um byggingu er að finna í næsta kafla bókarinnar í tengslum við jarðvegslög og sniðlýsingar.

6.1.2. Samloðun

Lagsilíköt og aðrar blaðlaga leirsteindir (sjá 2. kafla) mynda krafta á milli sín fyrir tilverknað skautaðra vatnssameinda sem liggja á milli „blaðanna“, þannig að moldin loðir saman svo úr verður brú á milli einstakra eininga moldarinnar. Lífræn efni hafa sömu áhrif. Að öðrum kosti myndi moldin hripa niður á milli fingra eins og sandur. Sem dæmi má nefna að hægt er að taka mold sem er rík af smektítleir og búa til langa „fána“ með því að velta moldinni milli þumals og vísifingurs. Það er auðveldara að „drullumalla“ skemmtileg form þar sem blaðsilíköt eru í moldinni, eins og hvert leikskólabarn veit svo vel. Í leiriðnaði og ýmiss konar listgreinum eru hlutir



Mynd 6.2. Mismunandi gerðir byggingareininga. Kornótt bygging verður einkum til fyrir tilverknað lífvera á borð við ánamaðka. Kubbslaga bygging einkennir leirríkan og vel þróaðan jarðveg, en þessi bygging er afar veik á Íslandi. Plötulaga bygging er einkennandi á Íslandi vegna áfoks- og gjóskulaga, ekki síst í B- og C-lögum jarðvegs.

mótaðir í leir sem síðan eru formfestir með miklum hita þegar vatnið er brennt burt. Eiginleiki moldar að loða saman er einfaldlega nefnd samloðun (e. consistency). Oft er mikilvægt að leggja mat á samloðunina, sem gefur upplýsingar um leirmagn og leirgerð en einnig ýmsa vinnslumöguleika og verkfræðilega eiginleika moldarinnar.

Samkorn (e. aggregates) eru afar mikilvæg fyrir frjósemi jarðvegs vegna þess að þau hafa áhrif á loftun og vatnsleiðni sem áður sagði. Þetta á ekki síst við á ræktarlandi sem er plægt. Samkorn á yfirborðinu gera það hrjúft og þau hamla gegn rofi af völdum vatns og vinda á plægðu landi. Margs konar aðferðir hafa verið þróaðar til að meta eiginleika samkorna á yfirborði, t.d. styrk þeirra og stærð. Þau eru t.d. lögð á sigti af staðlaðri stærð og hrist í tiltekinn tíma til að kanna hve stór hluti þeirra brotnar niður. Nánari umfjöllun um lýsingu á byggi og samloðun þess er í næsta kafla en einnig í sérstöku kveri um sniðlýsingar sem LbhÍ gaf út (ÓA o.fl. 2005).

6.2. Litur jarðvegs

Moldin tekur á sig ýmis litabrigði. Þar má nefna eldrauða mold hitabeltisins, grámóskulega mold í votlendi, ljósa mold eyðimerkursvæða, dökka lífræna mold, litríka mold barrskóga og eldfjallasvæða o.s.frv.

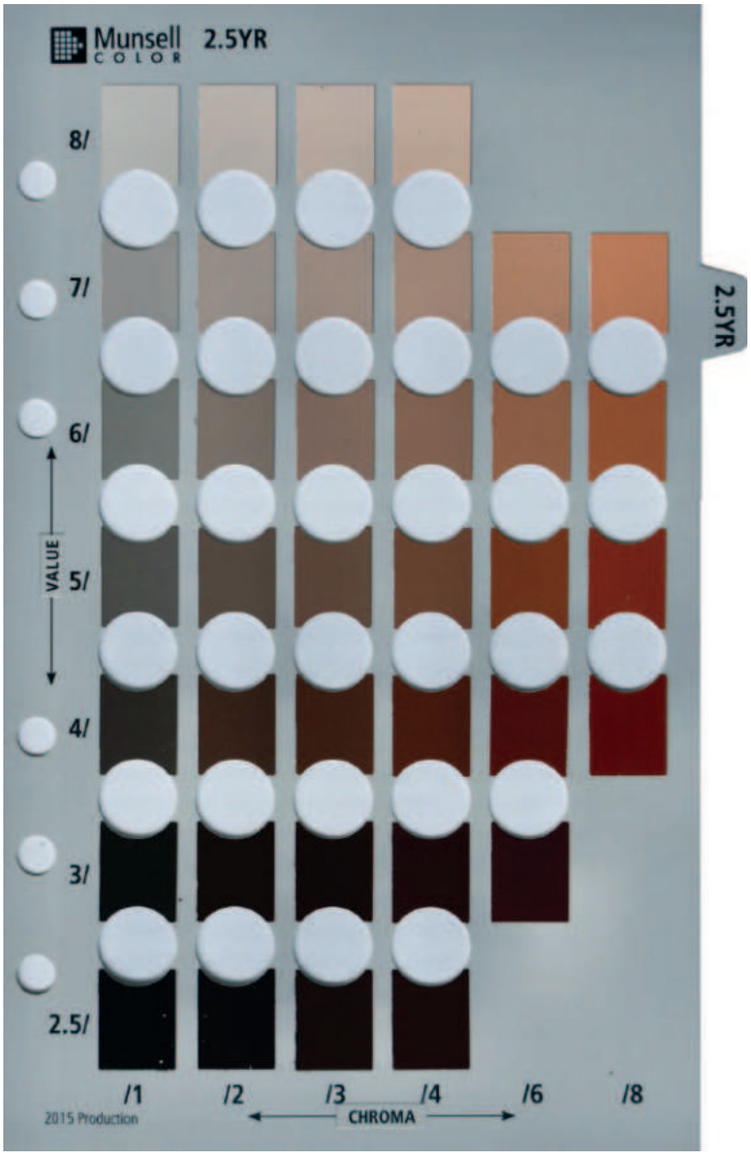
Jarðvegslögin (sjá 7. kafla) taka á sig mismunandi blæ eftir aðstæðum á hverjum stað. Afoxunarspenna hefur afgerandi áhrif á litinn því loftfirrð afoxar járn og mangan sem veldur grámóskulegri mold og jafnvel bláum og gulum litbrigðum. Þar sem jarðvegur þornar á ný geta myndast skærrauðir dílar af oxuðu járni (mynd 6.4). Lífræn efni eru alla jafna dökk og jafnvel alveg svört en kalk og kvars eru ljósleit efni í

Mynd 6.3. Úrgangur ánamaðka mynda klepra á yfirborði og í A-lögum moldarinnar sem gjarnan eru uppistaða í kornóttri byggingu jarðvegsins. Mynd: Jóhann Þórsson.

jarðvegi sem og salt (sjá t.d. bók Bigham og Ciolkosz (1993) um lit í jarðvegi). Járnsteindir verka sem rauð litarefni í jarðvegi og það þarf lítið af mörgum þeirra (t.d. ferrihýdríti og götheíti) til að moldin verði mjög rauðleit (mynd 6.4). Ýmiss konar litabrigði geta komið fyrir innan einstakra laga, svo sem áðurnefndir dílar, en á Íslandi eiga gjóskulög drjúgan þátt í að móta ásýnd jarðvegssniða.

Litur jarðvegs er metinn með aðstoð sérstakra litakorta, svonefndra Munsell-litaspjalda, en þeim svipar til litakorta sem notuð eru við val á innanhússmálningu (mynd 6.5).

Mynd 6.4. Rauðleitt jarðvegslag vegna járnútfellinga. Í botni sniðs sést móta fyrir rauðum dílum. Sniðið er tekið á gamalli tilraunastöð Landbúnaðarháskólans við Korpu.



Mynd 6.5. Mynd af Munsell-litakorti. Síða 25YR.

Mynd 6.6. Rúmþyngd miðar við þyngd þurrar moldar í hverjum rúmmetra (kg eða tonn/m³) eða í hverjum rúmsentimetra (g/cm³). Mynd: Fífa Jónsdóttir.

6.3. Eðlisþyngd og rúmþyngd

Hver eining moldarinnar, t.d. einn rúmmetri, hefur ákveðna þyngd sem er afar breytileg eftir gerð jarðvegsins og ekki síður því hve mikið vatn er í moldinni. Einingin er nefnd rúmþyngd jarðvegs (e. bulk density). Rúmþyngd er oftast gefin upp sem grömm á rúmsentimetra (g/cm³) eða tonn á rúmmetra (t/m³) sem er í raun sama einingin. Miðað er við þurra mold (mynd 6.6).

Einstök bergefni, svo sem kvars eða gjóskugler í moldinni, hafa eðlisþyngd sem gjarnan er á bilinu 2,5–3 g/cm³. Kvars og mörg bergefni erlendis hafa eðlisþyngd á bilinu 2,6–2,7 g/cm³ (t.d. kvars), en basískt gler er þyngra og hefur oft eðlisþyngd nálægt 2,9 g cm³, enda eru þungir málmar á borð við járn í basaltinu. Þó er ýmis gjóska mjög létt í sér, t.d. grófur líparítvikur, sem getur jafnvel flotið í vatni (<1 g/cm³), enda er hann frauðkenndur og fullur af holrými. Holrými í jarðveginum gerir það að verkum að rúmþyngd moldar er mun minni en eðlisþyngd bergefnanna, oft á bilinu 1,1–1,5 g/cm³ í algengum jarðvegstegundum erlendis. Lífræn efni hafa aftur á móti afar litla rúmþyngd og því lækkar hún hratt eftir því sem meira er af lífrænum efnum í moldinni.

Eitt megineinkenni *eldfjallajarðar*, svo sem á Íslandi, er lítil rúmþyngd sem er oft og tíðum á bilinu 0,5–0,8 g/cm³. Af þessum tölum (2,9 g/cm³ eðlisþyngd bergefna og rúmþyngd moldar, t.d. 0,7 g/cm³) sést að holrýmið er meira að umfangi í moldinni en bergefnin, sem útskýrir hvers vegna afar mikið vatn getur bundist í moldinni. Vörubílar sem flytja mold úr húsagrunnum í rigningartíð eru í raun einkum fullir af vatni. Jarðvegur auðna er aftur á móti þyngri og því minna af holrými í slíkum jarðvegi. Mómold er jafnvel ennþá léttari en *eldfjallajörð*.

Rúmþyngd hefur ekki aðeins áhrif á vatnseiginleika eða skiptir máli fyrir jarðverkfræði. Eftir því sem rúmþyngdin eykst verður moldin þéttari og fyrirstaðan meiri og því eiga rætur plantna erfiðara með að komast um moldina. Rótarkerfi plantna er einmitt mjög djúpt og víðfeðmt í hinni léttu *eldfjallajörð* sökum þess að fyrirstaðan er fremur lítil. Þungar vinnuvélar eða mikill ágangur búsmala getur haft veruleg áhrif á jarðveginn og valdið þjöppun (e. compaction) sem hefur skaðleg áhrif á jarðvegseiginleika.

Við þjöppun jarðvegs hægir á ísigi í moldina, sem og vatnsleiðni, auk þess sem vatnsheldni minnkar og þar með frjósemi jarðvegsins almennt. Hér á landi vegur holklaki á vetrum oft og tíðum á móti þjöppunni og losar um jarðveginn.

Tafla 6.1. Dæmigerð rúmþyngd ýmissa jarðvegsgerða (A-lög nema O-lög í *mójörð*).

JARÐVEGSGERÐ	RÚMÞYNGD *g/cm³*
Graslendisjörð	0,8–1,3
Hitabeltisjörð	1,2–1,6
Sandur	1,5–1,9
Sendinn jarðvegur	1,3–1,6
Eldfjallajörð	0,5–0,8
Mójörð, erlend	0,1–0,4
Mójörð, íslensk	0,2–0,6

6.4. Aðrir eðlisþættir

6.4.1. Jarðvegshiti

Jarðvegshiti er grundvallareiginleiki sem hefur áhrif á umhverfi lífveranna í moldinni, umsetningu næringarefna og þar með vistkerfið í heild. Jarðvegshiti er ennfremur mikilvægur áhrifavaldur á jarðvegsmyndun þegar til lengri tíma er litið. Lífverur eru viðkvæmar fyrir of háum hita, t.d. þráðormar, sveppir og ýmsar örverur í moldinni. Vöxtur plantna er mestur við ákveðið hitastig, oft um 20°C, en þó er það misjafnt eftir tegundum, rakastigi og öðrum þáttum. Kuldi hefur einnig áhrif á örverur og umsetningu næringarefna og stundum er miðað við 0° eða 4°C þegar lægri mörk lífrænnar virkni eru skilgreind. Rannsóknir sýna þó að vistkerfi eru virk jafnvel þótt frost sé í jörðu; veturinn er mun mikilvægari í mörgum vistkerfum en mætti halda (Rannveig Guicharnaud o.fl. 2010a).

Margir þættir hafa áhrif á jarðvegshita fyrir utan lofthitann. Þar má nefna yfirborðsþekjuna og þá einangrun sem í henni felst. Mikil sina getur t.d. tafið bæði hlýnun að vorlagi og kólnun að hausti. Þurr jarðvegur er iðulega lengur að hlýna en rakur jarðvegur (þó ekki vatnsmettuð mold eins og í mýrlendi) því holrýmið í þurri mold hefur einangrunargildi en rakinn í moldinni leiðir aftur á móti varmaorku á milli jarðvegslaga. Snjóalög sem safnast fyrir í skógi og kjarrlendi einangra yfirborðið og draga út vetrarkólnun svo um munar. Á Íslandi er þessi þáttur einkar mikilvægur vegna mikilla frostáhrifa. Hins vegar hitnar hið dökka yfirborð íslenskra auðna mikið í sólskini og getur jafnvel orðið >40°C á heitum sólríkum dögum. Slík hitun hefur áhrif á hitastig jarðvegsins langt niður fyrir yfirborðið og raskar vatnsbúskap hans því uppgufun getur orðið ákaflega ör og jarðvegurinn þornað á skömmum tíma.

Hitunin hefur einnig áhrif á starfsemi örvera og næringarhringrás. Það er einmitt einn af kostum þess að skilja gróðurleifar eftir á moldaryfirborðinu við jarðrækt að tempra hitastig og rakastig, sem hefur jákvæð áhrif á marga jarðvegseiginleika fyrir utan að skila orku (C) til baka og næringarefnum í moldina (sjá Horton og Ochner 2012).

Rúmþyngd, heildarmagn kolefnis og endurheimt votlendis

Lífræn efni í mold eru meginþáttur í hringrás gróðurhúsalofttegunda (GHL), eins og rætt var um í 3. kafla. Rúmþyngd er mikilvægur þáttur þegar meta á heildarmagn efna í moldinni. Sem dæmi má nefna magn kolefnis. Magnið er yfirleitt gefið sem hlutfallstala (%) en sú tala getur verið afar villandi ef rúmþyngdin er mjög breytileg. Til að reikna út heildarmagn efnis í hverjum rúmmetra jarðvegs þarf að margfalda hlutfallið með rúmþyngdinni.

Rúmþyngdin kemur mjög við sögu þegar reikna á út mögulega losun CO_2 frá framræstum mýrum og ábatann við að endurheimta votlendisvistkerfi og hnignuð þurrlendiskerfi.

Hér er tilgreint dæmi með tvenns konar votlendisjarðveg, annars vegar *mójörð* með hátt kolefnishlutfall (30%) og hins vegar *votjörð* með tiltölulega lágt kolefnishlutfall (10%). Fjallað er um flokka jarðvegs á Íslandi síðar í bókinni. *Mójörðin* er mjög létt í sér (t.d. 200 kg m^{-3}) en *votjörðin* mun þyngri (t.d. 650 kg m^{-3}, þ.e. hver rúmmetri vegur 650 kg í þessu dæmi). Heildarmagn kolefnis í hverjum rúmmetra moldar er þá í kílóum:

***Mójörð*: 30/100 x 200 = 60 kg m^{-3},**
þ.e. 60 kg C í hverjum rúmmetra

***Votjörð*: 10/100 x 650 = 65 kg m^{-3},**
þ.e. 65 kg C í hverjum rúmmetra

Dæmið sýnir að það getur verið svipað og jafnvel meira kolefni í *votjörðinni* en *mójörðinni* þrátt fyrir mun hærra hlutfall kolefnis í *mójörðinni*. Rúmþyngd og kolefnishlutfall eru vitaskuld breytileg, en tölurnar hér að ofan eru nokkuð dæmigerðar. Reglan er sú að með vaxandi hlutfalli (eða %) kolefnis í moldinni minnkar rúmþyngdin.

Þeir sem hafa andmælt endurheimt votlendis á Íslandi hafa gjarnan bent á lágt kolefnishlutfall víða í votlendisjarðvegi á Íslandi, svo sem á Suðurlandi, til að draga gagnsemina í efa. Slík röksemdafærsla er á miklum misskilningi byggð, eins og dæmið hér að ofan sýnir. Mýrar með hlutfallslega lágt kolefnishlutfall geta haft mikið heildarmagn kolefnis því rúmþyngdin er meiri.

Af þessu sést vel hve rúmþyngd jarðvegs er mikilvæg stærð við magn-útreikninga á mold, ekki síst þegar aðgerðir í loftslagsmálum eru vegnar, en einnig við útreikninga á heildarmagni næringarefna á borð við nitur og fosfór.

Jarðvegsvatn hefur mikil áhrif á hitafar í jarðvegi, bæði hitaleiðni og hitastig. Vatn eykur hitaleiðni til mikillar muna. Uppgufun fylgir gríðarleg kæling, sbr. svita og kælingu mannslíkamans (sjá kaflann um vatn hér á undan). Kælingin minnkar hitaáhrif á hlýjum dögum sé raki í jörðu. Mikil uppgufunarorka útskýrir m.a. kulda í yfirborði mýrlendis á vorin, sem getur verið mun kaldara en yfirborð þurrlendis. Samspil moldar við andrúmsloft er því mjög margbreytilegt, og þessa þætti þarf m.a. að hafa í huga við gerð loftslagslíkana fyrir veðurspár.

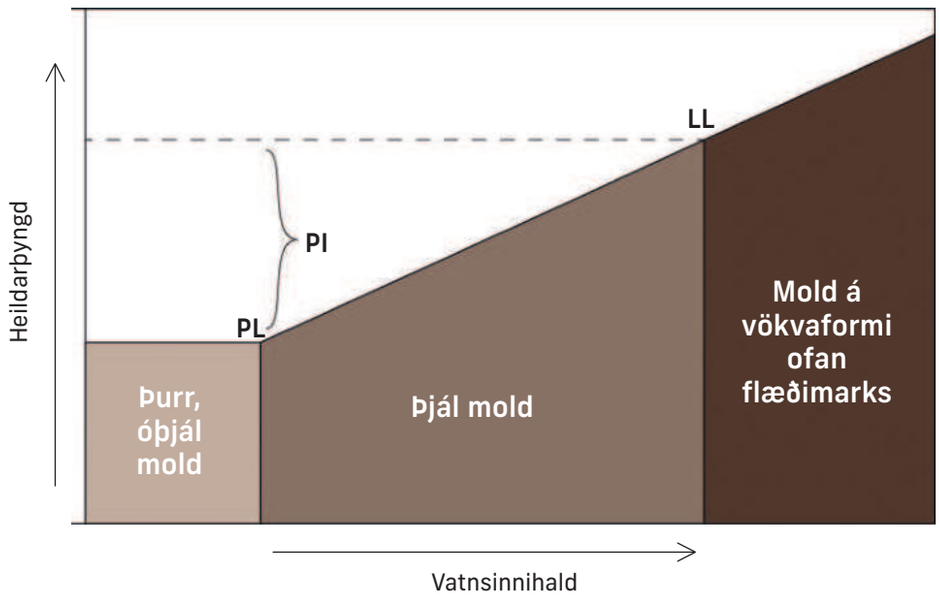
Þannig eru gildi sem lýsa yfirborði, vatnsbindingu og útöndun jarðvegs notuð í líkönum fyrir veðurspár á Íslandi sem annars staðar. Þurr mold hefur hins vegar loftrými sem virkar svipað og einangrun í veggjum húsa. Þetta getur m.a. haft áhrif á hvort unnt sé að leggja rafstrengi í jörð; mikil einangrun getur valdið ofhitnun jarðstrengja, eins og hefur orðið vart við hér á landi (Rannveig Guicharnaud o.fl. 2010b). Hitasveiflur eru vitaskuld mestar við jarðvegsyfirborðið, en þegar komið er á nokkurt dýpi, t.d. 2 m dýpi, er hitastigið farið að endurspegla meðalhita ársins.

Jarðvegshiti er víða notaður sem þáttur í flokkun jarðvegs þar sem ræktunarmöguleikar eru snar þáttur í notkun kortlagningar á jarðvegi, t.d. í Bandaríkjunum. Þetta er jafnframt einn helsti veikleiki bandaríska kerfisins (Soil Taxonomy, sjá 9. kafla um jarðvegsflokka) því ræktunaráherslan er nokkuð yfirþyrmandi á kostnað almennra umhverfissjónarmiða. Og nú, á tímum loftslagsbreytinga, færast sumir jarðvegsflokkar norður á bóginn á jarðvegskortum af norðurhveli jarðar, en þetta eru veikleikar sem ekki voru augljósir þegar kerfið var þróað á árunum milli 1950 og 1960, á þeim tíma sem matvælaöryggi var afar mikilvægt í kjölfar heimsstyrjaldarinnar síðari. Hér á landi eru kulferli (frost-þýðuhringir og ferli tengd frosti) einkar mikilvæg og er fjallað sérstaklega um þau síðar í kafla um kulferli. Einnig má nefna að þar sem sífreri er í jörðu er skilgreindur sérstakur jarðvegsflokkur, *frerajörð*, (Cryosol, Gelisol) en útbreiðsla þessarar jarðvegsgerðar fer nú minnkandi á norðurslóðum vegna loftslagsbreytinga. Loftslagsbreytingar hafa þó ekki aðeins áhrif á sífrerasvæði jarðar. Moldin geymir mikla hitaorku sem hún tekur við úr andrúmsloftinu. Taka þarf tillit til þessa þáttar við gerð spálíkana um þróun loftslags á jörðinni því moldin og efstu lög bergsins hafa í raun temprandi áhrif á loftslagshlýnun (sjá Horton og Ochner 2012).

6.5. Jarðverkfræði

Feykilega miklum fjármunum er varið í að flytja til og fjarlægja jarðvegsefni og undirbúa land undir ýmiss konar framkvæmdir á borð við vegi, stíflur, flugvelli, byggingar, hljóðmanir o.s.frv. Til þessa hefur þróast sérstök grein vísinda og tækni sem kalla mætti jarðverkfræði eða jarðvegsverkfræði, en á ensku er hún oftast nefnd „soil mechanics“ og um þetta viðfangsefni fjalla sérstakar fræðibækur. Umhverfisverkfræði er af svipuðum toga.

Jarðverkfræði tekur ekki aðeins til moldar heldur lausra jarðlaga almennt, jarðgangagerðar o.fl. Jarðverkfræðingar meta einnig hættu á skriðuföllum og vinna að margvíslegum úrlausnarefnum þar sem laus jarðlög á yfirborði jarðar koma við sögu. Á þessum vettvangi er rétt að nefna tvo mælikvarða sem jarðverkfræðin leggur á jarðvegsefni og eru mikilvæg fyrir umhverfi og moldina: svokölluð Atterbergmörk og flokkun verkfræðinga á jarðefnum.



Mynd 6.7. Atterbergmörk. Í byrjun er moldin þurr og óþjál en þegar ákveðnu vatnsinnihaldi er náð telst hún þjál (þjálnimark, PL). Ef meira vatni er bætt í jarðveginn nær hann að lokum flæðimarki (LL) og getur þá komist á vökvaform.

6.5.1. Samloðun og Atterbergmörk

Jarðvegur sem er fullkomlega þurr er óþjáll viðkomu; það er ekki hægt að móta hann með fingrunum. Þegar vatni er bætt í moldina nær hún að lokum því marki að verða þjál og þá er hægt að hnoða moldina án þess að hún molni sem þurrt efni. Þetta mark er nefnt þjálnimark (e. plastic limit), táknað með PL.

Ef haldið er áfram að bæta vatni í moldina nær hún að lokum því marki að verða vatnsmettuð og tekur að renna til sem vökvi. Við þetta vatnsinnihald hefur moldin náð flæðimarki sínu (e. liquid limit), táknað sem LL (mynd 6.7). Flæðimarkið gefur til kynna vatnsinnihald við vatnsmettun, sem eru mikilsverðar upplýsingar.

Þjálnitala (e. plasticity index), táknuð sem PI, er skilgreind sem mismunurinn á þessum tveimur mörkum: LL-PL, eða:

$$PI = LL - PL$$

(Þjálnitala = flæðimark – þjálnimark).

Þjálnitalan er vísbending um hvað mikið vatn moldin getur bundið, en er þó mun ónákvæmari aðferð en þær sem lýst er í kaflanum um vatn. Mjög auðvelt er að framkvæma mælingar sem ákvarða Atterbergmörkin.

Mikil nákvæmni er aukaatriði hér, meiru skiptir að fá hugmynd um eiginleika moldarinnar. Á tímum seinni heimsstyrjaldarinnar þurfti að þróa skjótar og auðframkvæmanlegar aðferðir til að flokka jarðefni, m.a. þegar byggðir voru flugvellir um allan heim á mjög skömmum tíma. Það var m.a. gert með því að gera graf þar sem þjálnitölu (PI) er varpað á y-ásinn og flæðimarki (LL) á x-ásinn (mynd 6.8), svokallað Casagrande-graf.

Í ljós kemur að jarðvegur heimsins raðar sér í námunda við línu á þessu grafi sem nefnd er A-línan. Leirinn hefur mikla vatnsheldni og því lendir leirríkur jarðvegur til hægri á grafinu, og það er breitt bil þar sem hann er þjáll (uppi á y-ásinum, tekur við vatni án þess að ná flæðimarkinu). *Eldfjallajörð* fellur hins vegar ekki að þessari línu (rauður kassi á grafinu), sem í raun sýnir sérstöðu *eldfjallajarðar* á heimsvísu en útskýrir um leið margt í hegðun hennar, eins og vikið verður að síðar í kaflanum um *eldfjallajörð* þar sem fjallað verður aftur um þetta graf (mynd 6.8).

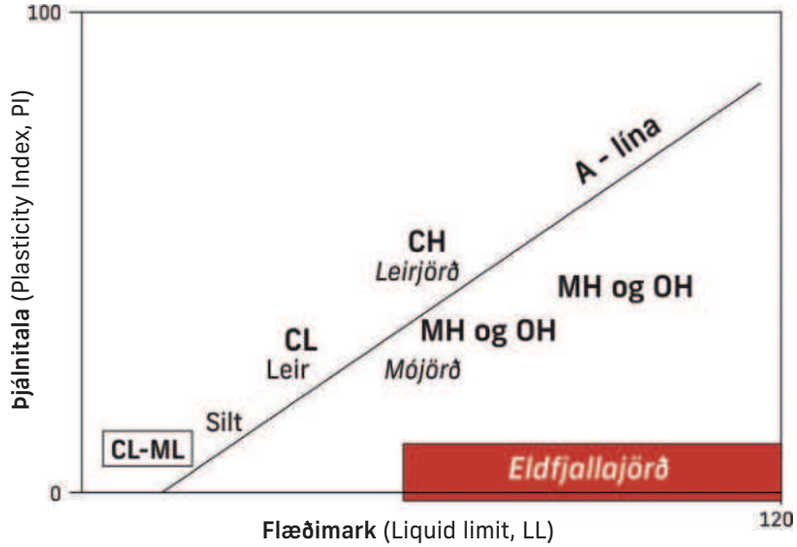
Annað má nefna sem fagfólk, t.d. á sviði byggingarverkfræðiog landlagsmótunar, rekst oft á í sínum störfum, en það er flokkun verkfræðinga á lausum jarðefnum (e. Unified System of Classification). Þar eru Atterbergmörk og kornastærðir notuð til að móta flokka sem hafa gildi við skilgreiningu á eðliseiginleikum (tafla 6.2). Þessi flokkun er mikið notuð út um allan heim. Flokkarnir gefa til kynna notkunarmöguleika efnanna, hvort fjarlægja þarf efnin við vegaframkvæmdir og aðrar byggingarframkvæmdir, hve stöðug þau eru í halla, hve auðvelt er að þjappa þeim

o.m.fl. Nokkrir flokkanna eru færðir inn á meðfylgjandi mynd fyrir Atterbergmörk.

6.5.2. Silt getur verið hættulegt – jarðverkfræði, mannvirki og silt

Silt er kornastærðarflokkur sem liggur á milli 0,02 og 0,002 mm í þvermál (sjá 2. kafla). Eins og áður hefur komið fram eru það fyrst og fremst leirsteindir sem halda moldarögnum saman. Silt hefur ekki slíka samloðun, siltkorn hafa tiltölulega lítið yfirborðsflatarmál sem gæti stuðlað að samloðun. Silt myndast einna helst við núning sem jöklar mynda á milli bergefna undir gríðarlegum þrýstingi.

Mikið af silti í jarðvegi norðurslóða myndaðist á jökultímabilinu og var blásið suður frá jökuljöðrunum þannig að það mynduðust setlög úr silti sem nefnd eru löss. Siltrík setlög er einnig að finna í fornum vatnsbotnum frá jökultímanum og víðar. Mold sem myndast við slíkt áfok



Mynd 6.8. Casagrande-graf. Sérstaða *eldfjallajarðar*.

(löss) er alla jafna frjósöm (sjá 8. kafla um jarðvegsmyndun og 9. kafla um helstu jarðvegsgerðir jarðar). Ísland er ein af virkum uppsprettum silts í heiminum í dag (fok frá helstu uppfoksstöðum, sjá 17. kafla) og jarðvegurinn ákaflega ríkur af silti.

Mikið jarðskrið hefur átt sér stað, t.d. í Noregi, þar sem heilu bæjarhlutarnir

Tafla 6.2. Flokkun verkfræðinga á lausum jarðefnum. Einfölduð tafla. Sjá einnig grafið fyrir Atterbergmörk.

GRÓFKORNA JARÐVEGSEFNI
Völur >50% **Hrein malarefni**
GW – vel aðgreind[1] malar- og sandefni, lítið um fín efni.
GP – illa aðgreind malar- og sandefni, lítið um fín efni.
Völur >50% **Malarefni með fínum efnum**
GM – Siltblandin malarefni, möl, sandur og silt.
GC – leirblandin malarefni, möl, sandur og leir.
Hreinn sandur
SW – Vel aðgreindur malarkenndur sandur, lítið um fín efni.
SP – Illa aðgreindur malarkenndur sandur, lítið um fín efni.
Sandur með fínum efnum
SM – siltblandinn sandur.
SC – leirblandinn sandur.

FÍNKORNA JARÐVEGSEFNI
Silt og leir, LL <50%
ML – ólífrænt siltefni, fínn sandur og leirblandinn sandur.
CL – ólífræn leirefni, óþjáll leir, malarkennd eða sandblandin leirefni.
OL – lífræn siltefni eða leirefni sem eru óþjál.
Silt og leir, LL >50%
MH – þjál siltefni.
CH – þjál leirefni.
OH – lífræn leirefni, þjál.
LÍFRÆN JARÐVEGSEFNI – MÓMOLD
Pt – mór og annar mjög lífrænn jarðvegur.

1. „vel aðgreind efni“ þýðir að kornastærð þeirra er einsleit.

Silt bindur lítið vatn

Enda þótt silt bindi lítið vatn leiðir það vatn ákaflega greiðlega og getur innihaldið umtalsvert vatn við mettun, enda þótt það sé ekki fastbundið. Því er hreint út sagt afleitt að hafa silt í undirlagi fyrir byggingar eða vegi þar sem gætir frosts. Silt er nefnilega svokallað frostnæmt efni.

Skortur á samloðun veldur því að efnið getur auðveldlega runnið til sem væri það vatn. Engin burður er í slíku efni og það getur beinlínis verið hættulegt þar sem burður þarf að vera góður, t.d. í stíflumannvirkjum. Þá er líklegt að siltið í moldinni hér á landi ýti enn frekar undir jarðsil, sem fjallað er um í 16. kafla um kulferli.

Þegar silt þornar og því er pakkað (þrýst saman röku og látið þorna) getur það virkað sem nokkuð hart og stöðugt efni. Það brotnar þó auðveldlega niður og ef vatn kemst að því myndast auðveldlega vatnsrásir (e. piping) sem leiða stöðugt meira vatn í gegnum efnið.

hafa hvílt á siltríkum setlögum. Lössefni voruð notuð í hina frægu Teton-stíflu í Bandaríkjunum sem brast og olli miklu manntjóni árið 1977 (sjá Weil og Brady 2017, bls. 137).

Annað dæmi um afdrifarík mistök í hönnun var hluti flóðgarðanna sem áttu að vernda New Orleans fyrir flóðbylgjum sem fylgja fellibyljum. Þeir voru m.a. byggðir ofan á lagskipt jarðefni þar sem komu fyrir mólög og fleiri jarðvegslög með takmarkaða bindieiginleika (skerstyrk; e. shear strength) og binding efnisins var ekki tryggð nógu djúpt undir garðana. Þegar fellibylurinn Katrína skall á New Orleans með mikilli flóðbylgju tóku þessi mólög og fleiri lög að leka vatni og í framhaldinu gaf undirstaðan sig og þar með flóðgarðarnir með skelfilegum afleiðingum. Að auki höfðu auðrofin jarðvegsefni verið notuð í hluta stíflugarðanna í sparnaðarskyni (sjá Weil og Brady 2017, bls. 184; Anderson o.fl. 2007).

Hér á landi eru aurskriður algengar en því valda margir þættir. Í fyrsta lagi er moldin *eldfjallajörð* sem skortir samloðun en getur haldið gríðarlega miklu vatni (sjá 10. kafla). Víðast hvar er mikið af silti í moldinni, en siltmold er algengasti kornastærðarflokkurinn. Að auki bætist það við að moldin er oft lagskipt, jafnvel með grófum gjóskulögum sem stöðva ómettað vatnsflæði og geta myndað eins konar vatnspolla í moldinni þar sem samloðun er mjög lítil (sjá kafla 4.4.2). Þessi gjóska getur um leið orðið að hálfgerðri rennibraut fyrir aurskriður. Mest hætta er á slíkum skriðum þegar moldin mettast algjörlega af vatni, en þá er hún jafnframt orðin mjög þung og nær auðveldlega flæðimarkinu.

Algengt er að við upprunastaði skriðanna sé skafl sem er að bráðna eða sprungur í siltríkum jarðvegslögum í hlíðum, t.d. ofan Siglufjarðar (myndir 6.9 og 6.10).

6.5.3. Rakaástand jarðvegs (e. drainage)

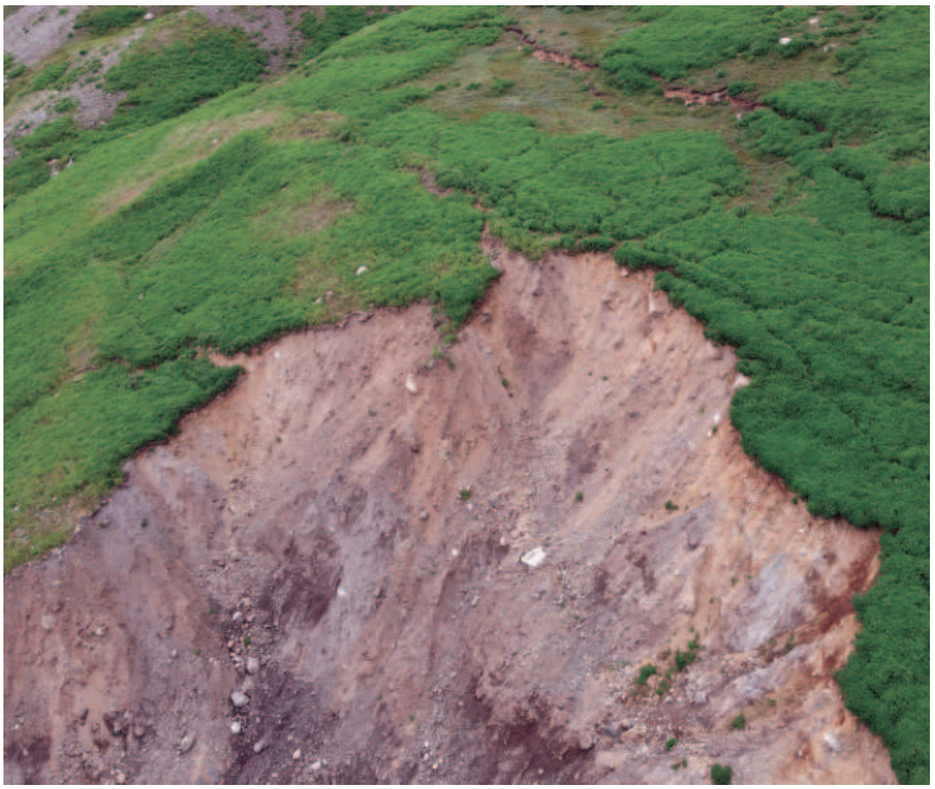
Rakastig jarðvegs hefur áhrif á afoxunarspennu og efnafræði hans, sem og ræktunarskilyrði. Rakastigið mótar einnig eðlisástand moldarinnar, m.a. með tilliti til notkunar við byggingarframkvæmdir og landslagsmótun. Enska hugtakið „drainage“ er notað til að lýsa rakaástandi jarðvegsins, þ.e. hve vel hann er ræstur. Hér er ekki átt við vatnsinnihaldið í sjálfu sér, heldur viðvarandi rakaástand stóran eða mestan hluta ársins – hversu vel

Tafla 6.3. Rakaástand jarðvegs, einfölduð tafla.

RAKAÁSTAND JARÐVEGS	
Mjög vel ræstur (þurr)	Grunnvatn stígur aldrei upp í yfirborðslag. Engin afoxunareinkenni.
Vel ræstur (fremur þurr)	Grunnvatn stígur ekki upp í yfirborðslag, vatnsmettun varir aðeins í skamma stund, t.d. í tengslum við frost. Engin ummerki um díla, gráma eða önnur afoxunareinkenni.
Slælega ræstur	Ummerki um að grunnvatn stígi til yfirborðslaga í skamma hríð eða nái að liggja nálægt yfirborði, m.a. í tengslum við jarðvegsfrost. Dílar, grámi og hnyðlingar, útfellingar við gróf jarðvegslög.
Illa ræstur (blautur)	Grunnvatn liggur í langan tíma við yfirborð, þótt það geti þornað nokkuð ef grunnvatnsborð lækkar í þurrkatíð. Mikil ummerki um gráma, díla o.fl.
Mjög illa ræstur	Mýrar, flóar og önnur viðvarandi votlendi.

Mynd 6.9. Skriða í Út-Kinn við Skjálfandaflóa sem féll haustið 2021. Upptökin eru þar sem siltrík moldin er þykk í miklum halla. Við þær kringumstæður safnast oft mikill snjór sem hripar inn um sprungur þegar hann þiðnar. Ofsafengið regn og þýða auka á skriðuhættu við þessar aðstæður.

moldin er ræst fram af náttúrunnar hendi. Rakaástandi er yfirleitt lýst við sniðlýsingar (sjá næsta kafla). Notuð eru fremur stöðluð hugtök við ákvörðun um „ræsingu“ jarðvegs og eru þau svipuð frá einu landi til annars. Rakaástandinu er lýst sem allt frá mjög vel ræstum (þurrum) jarðvegi til illa ræsts votlendis (tafla 6.3).



Mynd 6.10. Upptakasvæði skriðunnar miklu á Seyðisfirði 2020. Þykk siltlög sem hafa litla sem enga samloðun og verða nánast að vökva þegar þau ná vatnsmettun (flæðimark – liquid limit). Sprungur hafa myndast í hlíðinni þar sem vatn sem fellur í ofsaregni og við snjóbráð á greiða leið niður í moldina. Lúpínuþekja er ekki æskilegt gróðurfar við þessar aðstæður því hún veitir litla vernd að vetri, það myndast þéttur klaki og hætta er á sprungumyndun.

Heimildir

Við ritun þessa kafla var stuðst við almennar heimildir svo sem The Nature and Properties of Soils (Weil og Brady 2017), Environmental Soil Physics (Hillel 1998), Essential Soil Physics (Horton o.fl. 2016) og Soil Mechanics (Craig 1983).

Anderson, C.F., J.A. Battjes, B. Edge, W. Espey Jr., R.B. Gilbert 2007. The New Orleans Hurricane Protection System: What Went Wrong and Why. American Society of Civil Engineers. Reston, Virginia, USA.

Craig, R.F. 1983. Soil Mechanics. 3. útg. Van Nostrand Reinold, Wokingham, UK.

Bigham, J.M. og E.J. Ciolkosz, 1993. Soil Color. SSSA Special Publication no. 31. Soil Science Society of America Inc., Madison, Wisconsin, USA.

Hillel, D. 1998. Environmental Soil Physics. Academic Press, London, UK.

Horton R.T. og T. Ochner 2012. Soil thermal regime. Í: Handbook of Soil Sciences. Properties and Processes. 2. útg. (Ritstj. P.M. Huang, Y Li, M.E. Sumner). CRC Press. Bls. 9.1–9.23.

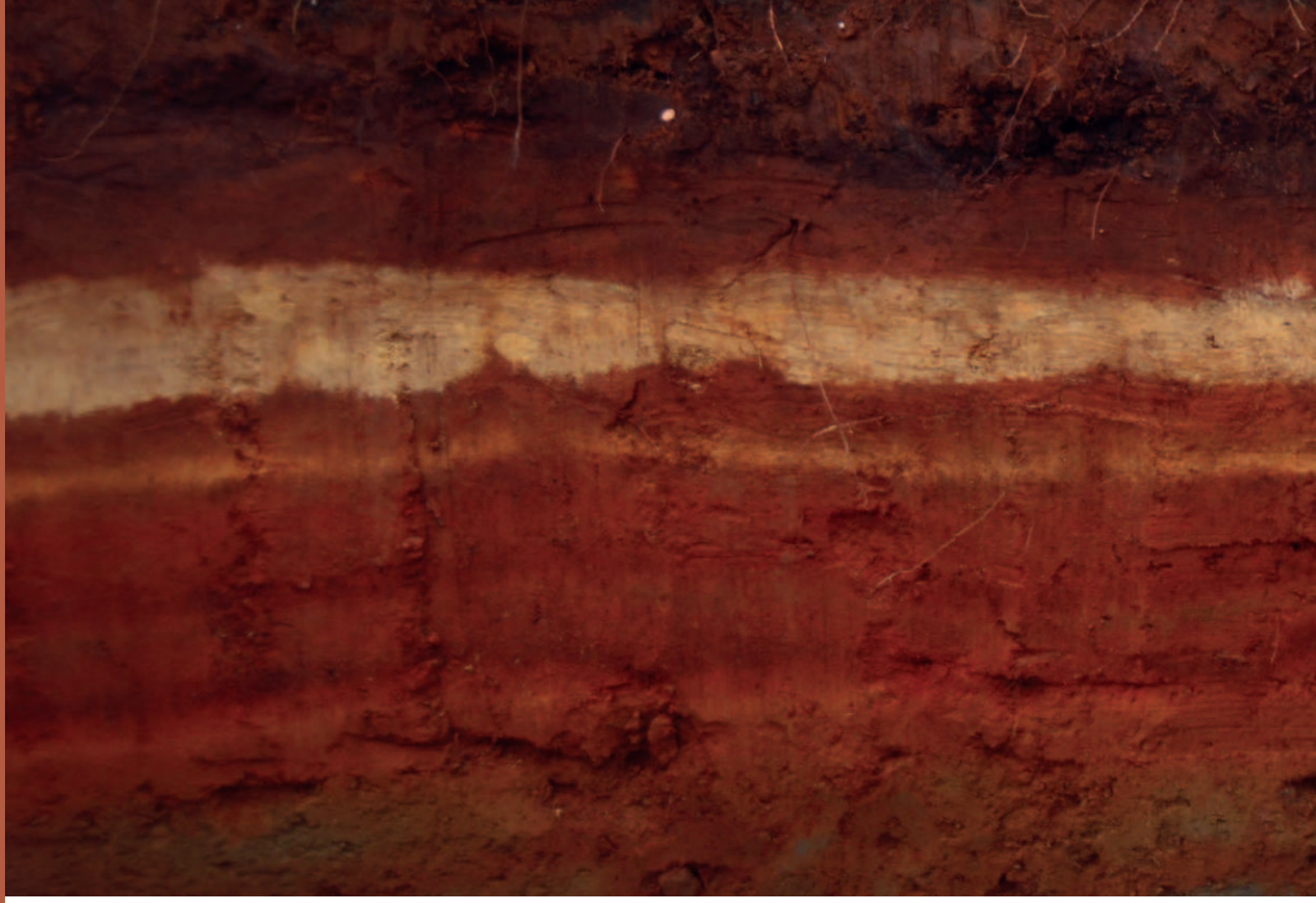
Horton, R., R. Horn, J. Bachmann og S. Peth 2016. Essential Soil Physics. An introduction to soil processes, functions, structure and mechanics. Schweizerbart Science Publishers, Stuttgart, Þýskaland.

Ólafur Arnalds, Bergrún Arna Óladóttir og Rannveig Guicharnaud 2005. Aðferðir við að lýsa jarðvegssniðum. Rit LbhÍ nr. 5. Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.

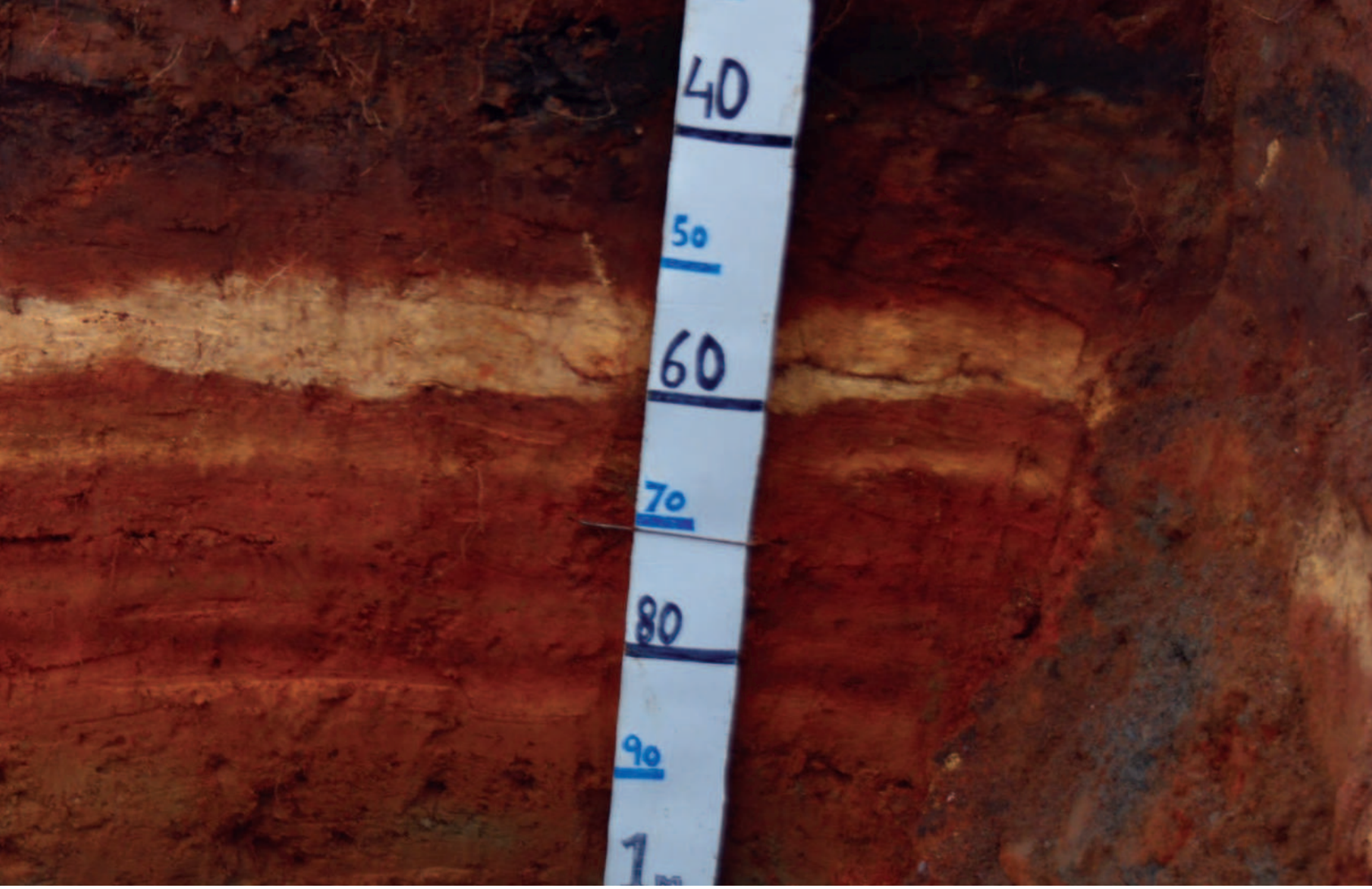
Rannveig Guicharnaud, Ólafur Arnalds og G. Paton 2010a. The effect of season and management practices on soil microbiological activities undergoing nitrogen treatments – interpretation from microcosm to field scale. Icelandic Agricultural Sciences 23:123–134.

Rannveig Guicharnaud, Berglind Orradóttir og Einar Sveinbjörnsson 2010b. Greining jarðvegs og úrkomu á Íslandi með tilliti til lagningar háspennustrengja í jörð. Landsnet nr. 10019, Reykjavík.

Weil, R.R. og N.C. Brady 2017. The Nature and Properties of Soils. 15. útg. Pearson, Boston, USA.

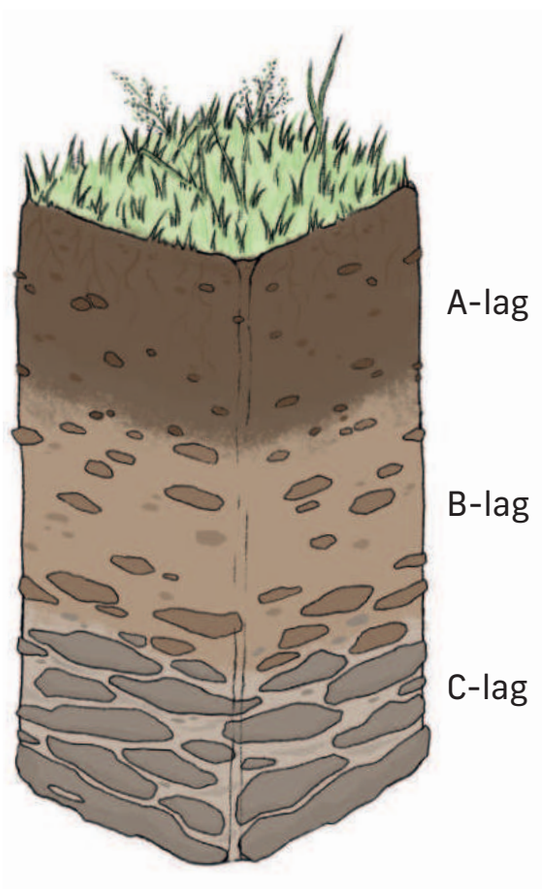


7 Að lesa í moldina – jarðvegslög og jarðvegssnið



Mynd 7.1. Jarðvegssnið. Myndin sýnir íslenskt jarðvegssnið (*eldfjallajörð*). Efst eru A-lög með örri umsetningu næringarefna. Neðar eru B-lög en einnig þykk öskulög (T-lag, sjá texta). Neðst sést í jökulurð sem flokkast sem C-lag.

Jarðvegssnið (e. soil profile) endurspeglar einstakar einingar moldar í landslaginu (stundum nefnt „pedon“ á ensku). Jarðvegslög móta svipmót moldarinnar og hvert þeirra hefur sitt einkenni. Skilningur á jarðvegslögum veitir miklar upplýsingar um þróun moldar og eðli hennar. Grunnur að þessum kafla um jarðvegslög var lagður með útgáfu fjölrits sem nefnist *Aðferðir við að lýsa jarðvegssniðum* og er eftir ÓA, Bergrúnu Örnu Óladóttur og Rannveigu Guicharnaud (Rit LbhÍ nr. 5; 2005). Þar var m.a. lögð vinna í að íslenska mörg þeirra hugtaka sem koma við sögu við lýsingu á sniðum. Nokkur alþjóðleg „meginkerfi“ sem notuð eru við sniðlýsingar, svo sem bandarískar aðferðir og þær sem kenndar eru við FAO, voru kynntar í þessu riti LbhÍ og birtur nokkur fjöldi sniðlýsinga sem dæmi.



Mynd 7.2. Jarðvegssniðum er skipt niður í jarðvegslög. Efst er A-lag þar sem rótarkerfið er áberandi, lag næringarhringrásar. B-lagið er fyrst og fremst afurð jarðvegsmyndunar, oft ríkt af leir. C-lagið er á mótum berggrunns og jarðvegs og ber einkum einkenni berggrunnsins. Stundum eru O-lög á yfirborði og E-lag á milli A- og B-laganna.

7.1 Jarðvegslög

Þegar mold þróast myndast misvel aðgreind jarðvegslög (e. soil horizons) sem eru grunneiningar jarðvegssniða. Við rannsóknir á mold er jarðvegssniðum lýst og sýni tekin úr hverju jarðvegslagi samkvæmt stöðluðum aðferðum. Aðstæður á yfirborði eru einnig metnar og þeim lýst og einnig í samræmi við viðteknar aðferðir og venjur. Síðan eru margvíslegir eiginleikar jarðvegsins mældir á rannsóknastofu þar sem sýni úr hverju jarðvegslagi eru mæld sérstaklega, allt eftir tilgangi hverju sinni.

Nokkur kerfi hafa verið hönnuð til að lýsa jarðvegi á staðnum og til leiðbeiningar við sýnatöku. Flestar þessara aðferða eiga einhverjar rætur að rekja til árdaga jarðvegsfræðinnar í Rússlandi. Bandarískt kerfi (Soil Survey Division Staff 1993) sem auðvelt er að nálgast (t.d. Schoeneberger o.fl. 1998: http://soils.usda.gov/technical/fieldbook/) hefur náð hvað mestri útbreiðslu á Vesturlöndum. Það tengist flokkun jarðvegs samkvæmt Soil Taxonomy, sem er afar ítarlegt flokkunarkerfi, en þó nokkra æfingu þarf til þess að fylgja því út í hörgul (Soil Survey Staff 1999; 2003).

Kerfi FAO (Food and Agriculture Organisation of the United Nations), nú kallað World Reference Base eða WRB (IUSS Working Group WRB 2022) (eða WRB/FAO) hefur einnig hlotið mikla útbreiðslu og er líklega notað víðar um heiminn en það bandaríska. Nánari umfjöllun um þessi kerfi er í 9. kafla. Fyrir utan þessi tvö meginkerfi eru til fjöldi landskerfa sem eru misjafnlega aðgengileg. WRB/FAO er notað víða í Evrópu jafnframt landskerfum, m.a. á vettvangi EU, sem hefur mikla hagræðingu í för með sér vegna samskipta á milli landa.

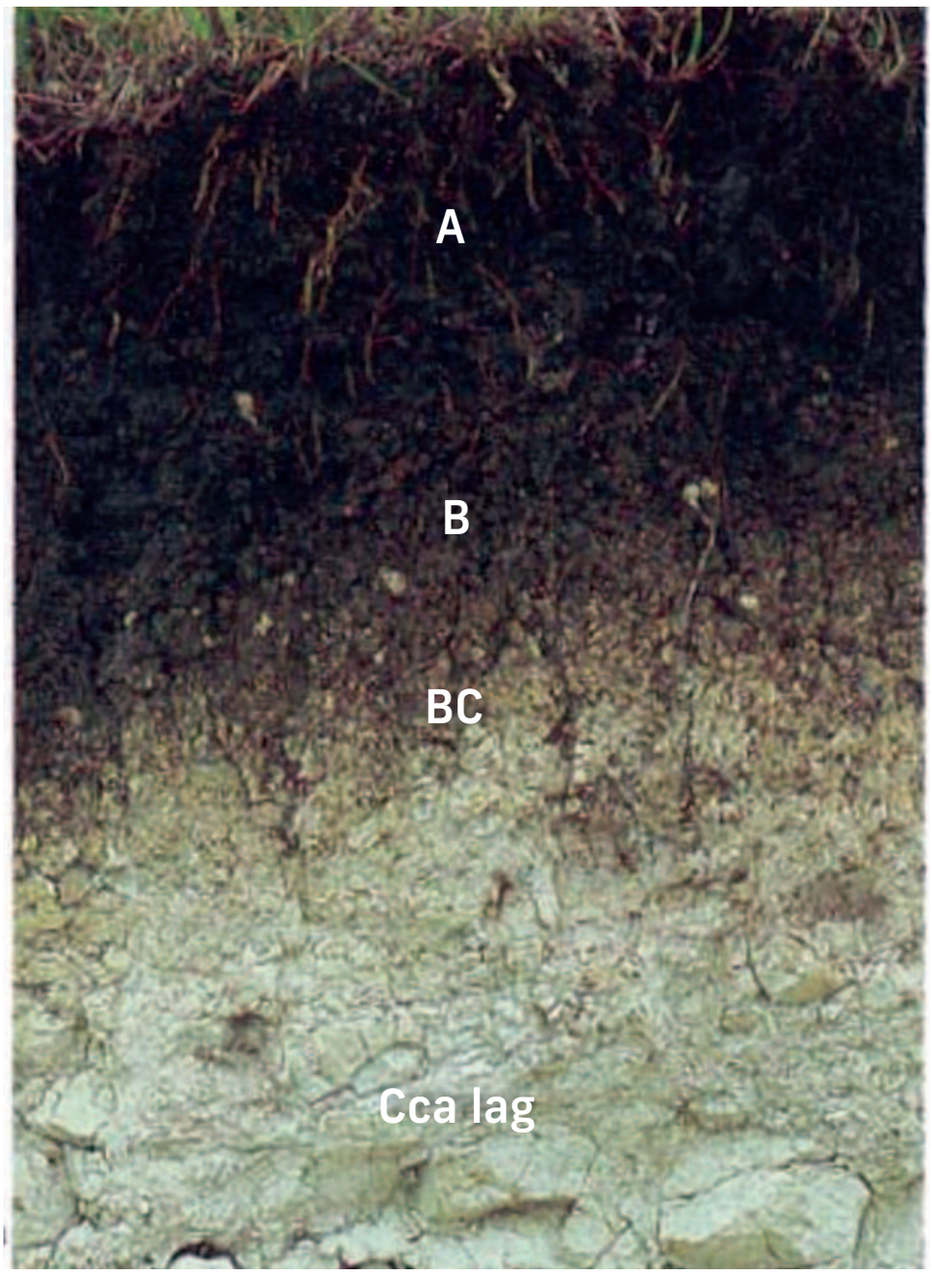
Segja má að sniðlýsingar séu um flest staðlaðar varðandi helstu atriði. Hjá sumum verður hugtakanotkun og framsetning á sniðlýsingum afskaplega þröng – allt að því bókstafstrúar – en það er vafasamt að ganga svo langt þegar lýsing moldarinnar á í hlut, þá hætta kerfin að þjóna tilgangi sínum og notandinn fer að þjóna kerfinu. Hér að neðan er að mestu fylgt FAO-kerfinu en þó að nokkru aðferðum þess bandaríska. Aðeins er lýst megindráttum í aðferðum við sniðlýsingar. Sé um nákvæma vinnu að ræða sem ætlað er að birta á rit-rýndum vettvangi er nauðsynlegt að lýsa jarðvegi einnig á ensku og nota í megindráttum annaðhvort FAO-kerfið eða það bandaríska.

Íslenska nafnakerfið sem hér er lýst er ennþá í mótun, enda hefur reynst torvelt að þýða mörg þeirra hugtaka sem almennt eru notuð um mold. Þegar kerfið er notað koma gjarnan fram betri hugmyndir um íslenskar nafngiftir, ekki síst í samstarfi við nemendur – og þá er um að gera að breyta til.

7.1.1. Meginlög

Jarðvegslög eru flokkuð í tvennt: annars vegar eru lög sem gefa til kynna skiptingu jarðvegs í grófum dráttum, svokölluð meginlög (e. master horizons), og þau eru oft þau sömu fyrir margar jarðvegsgerðir (mynd 7.2). Hins vegar eru það kennilög sem eru eins konar undirlög fyrir meginlögin (e. subordinate horizons, sub-horizons) og notuð til að auðkenna þau og þar með eiginleika moldarinnar ennþá frekar. Meginlögin eru auðkennd með upphafsstöfum, en það byggist á gömlum hefðum. Lögin eru: A, E, B, C, O og/eða H og R, en R-lagið (fyrir „rock“ á ensku) telst þó ekki til moldarefna. Táknið „H“ er einnig notað í stað „O“ í mörgum kerfum eða skilgreint sem sérstakt jarðvegslag. Þá hefur bókstafurinn „T“ stundum verið notaður til að tákna einstök þykk gjóskulög hérlendis (fræðiheitið er tephra) og er full ástæða til að mæla með notkun bókstafsins „T“ hérlendis.

A-lag er yfirborðslag, heimkynni rótar-kerfisins þar sem virkni lífvera er mest. Hringrás næringarefna er langsamlega örust í A-laginu og þar er yfirleitt mest af lífrænum efnum. Þannig er A-lagið mikilvægast fyrir líffræðilega virkni moldarinnar, ásamt O- eða H-lagi á yfirborði séu þau til staðar (sjá síðar). Húmusefni (mismikið rotnuð lífræn efni) eru dökk eða svört að lit og því er A-lagið oft dekkra en þau lög sem neðar eru. Lífverur í jarðveginum hafa áhrif



Mynd 7.3. C-lag sem einkennist af kalkútfellingum utan á mölinni sem þarna er fyrir og fær því Cca (Ck)-merkingu þar sem ca merkir að C-lagið sé kalkríkt (ca-kennilag). A- og B-lagið er einnig merkt.

á byggingareinkenni jarðvegsins, en kornótt bygging er oftast einkennandi fyrir A-lagið (sjá um byggingu jarðvegs síðar). A-lag er skamman tíma að myndast, jafnvel aðeins nokkur ár eða áratugi. Ekki þarf mikið líf eða efnabreytingar til að þeim sjái stað í A-lagi – að mold hafi myndast í móðurefni.

B-lag er skilgreint sem moldarlag neðan yfirborðslaga. Það er jafnframt meginlag sem er mótað af jarðvegsmyndandi ferlum því að öðrum kosti væri það móðurefni eða óvirkt jarðvegslag, þ.e. C-lag eða berg. Þessi ferli geta t.d. verið til komin vegna þess að leir hafi fallið út (kristallast) í laginu úr efnum sem hafa losnað við efnaveðrun í lögunum fyrir ofan. Þetta er nefnt innskolun (ábót; e. illuviation; sjá 8. kafla um jarðvegsmyndun). Einnig geta leirefni borist niður í B-lagið með vatni, að því að talið er. Ummerki um jarðvegsmyndun eru misjafnlega skýr í B-laginu, en þau geta m.a. falið í sér litabreytingu, ýmis byggingareinkenni eða uppsöfnun leirs, eins og áður gat. Veikt B-lag (Bw, sjá síðar) myndast á tiltölulega skömmum tíma, t.d. 100 árum, en það getur tekið árþúsundir að mynda leirrík B-lög (Bt) og tugi þúsunda ára að mynda djúp og mjög þroskuð B-lög.

C-lag er á mótum jarðvegs og berggrunns en ber fyrst og fremst svipmót móðurefnanna eða efna neðan moldarinnar. C er einnig notað til að auðkenna nokkurn veginn óvirkt efni með tilliti til jarðvegsmyndunar, t.d. kalkríkt Ck-lag (oft einnig nefnt Cca).

E-lag er útskolunarlag (e. eluviation – eluvial horizon) – eins konar veðrunarleif. Það er á milli A- og B-lags. E-lagið er yfirleitt ljóst ásýndum vegna þess að efnaveðrun hefur leyst upp nær allt móðurbergið nema kvars. Það er fremur snautt af lífrænum efnum og það sem leystist upp hefur að hluta til fallið aftur út í B-laginu fyrir neðan. Lagið er yfirleitt grófkorna, silt og sandur, en mun minna er af leir í því en í neðri lögunum. E-lag er líklega ekki að finna í íslenskum jarðvegi, en það er mjög algengt á barrskógarsvæðum í nágrannalöndunum og innan heittempraðra svæða jarðarinnar þar sem það getur orðið mjög þykkt, jafnvel farið yfir hálfan metra (mynd 7.4).

O-lag er lífrænt lag með >12% lífrænt kolefni. Bókstafurinn „O“ er dreginn af orðinu „organic“ (lífrænn). Lífrænu efnin eru af margvíslegum toga, t.d. misvel rotnuð sina, barrnálar og plönturætur, lífverur o.fl. Þetta eru m.a. jarðvegslög lífrænu mýranna á norðurslóðum þar sem kuldi og skortur á súrefni hamlar rotnun. O-lög einkenna einnig íslensku votlendin, nema þau sem eru næst áfoksbeltunum þar sem minna er af lífrænum efnum í moldinni. Lurkalög mýranna eru þau jarðvegslög hérlendis sem að jafnaði hafa mest lífrænt innihald. Einnig finnast O-lög í yfirborði á mörgum svæðum, t.d. í skóglendi og

Mynd 7.4. Jarðvegur með þykku E-lagi. *Barrskógajörð* (Podzol). Mynd: Erika Micheli/Joint Research Center, European Comission.

frjósömu og hóflega nýttu graslendi. Sum erlend kerfi taka mið af því að eftir því sem meira er af leir í moldinni, því hærri verða mörkin á milli O-lags annars vegar og A- eða B-laga hins vegar, og geta þau hækkað úr 12% C (lágmark) og orðið allt að 18%, en hér verður fallið frá að nota svo takmarkandi þætti sem auka flækjustig við notkun kerfisins. WRB/FAO miðar við 20% C fyrir bæði O- og H-lög (IUSS Working Group WRB 2022) sem er rétt að hafa í huga fyrir þá sem nota það kerfi.

H-lag. Merking lífrænna jarðvegslaga með bókstafnum „H" er komin úr FAO-kerfinu (stendur fyrir „histic" og húmus). Það er notað fyrir jarðvegslög í votlendi þar sem mikið af lífrænum efnum hafa safnast saman. Nokkuð er á reiki hvort „H" eða „O" sé notað hérlendis, sem breytir svo sem ekki öllu. Einnig sést stafurinn „P" stundum notaður fyrir mó (e. peat).

R-lag er hart berg (e. rock), t.d. hraun, og telst í raun ekki til jarðvegs.

T-lag. Þetta meginlag er ekki notað í alþjóðlegum kerfum en hefur stundum verið notað hérlendis til að tákna gjóskulög sem eru nægjanlega þykk og vel aðgreind frá öðrum hlutum moldarinnar til að unnt sé ná þaðan sýni – t.d. >2 cm þykku. Miðað er við að lögin séu lítt veðruð og hafi skýr einkenni sem slík en sýni ekki mikla uppsöfnun leirs (<2% $(Al+½Fe)_{ox}$) og flokkist undir C-lög í öðrum kerfum. T-lögin eru oft með allt aðra kornastærð, sem hefur áhrif á vatnsbúskapinn þar sem þau koma fyrir. Það er gagnsætt og gagnlegt að sjá strax að verið er að lýsa gjóskulagi með notkun T-lags í jarðvegslýsingum. Oft getur heiti eða uppruni og aldur gjósku fylgt T-merkingunni (t.d. T_{A1875} fyrir öskulagið frá Öskjugosinu 1875).

7.1.2. *Eldfjallajörð* og O-lagið

Jarðvegsefnum er skipt í lífræn jarðvegsefni (e. organic soil materials) sem mynda O-lög og ólífræn jarðvegs-efni (e. mineral soil materials) sem eru gerð úr öðrum jarðvegslögum en O og R. Lífrænn jarðvegur (Histosol eða *mójörð*)

Mynd 7.5. Lífrænn jarðvegur á Asoreyjum sem telst til *eldfjallajarðar* enda þótt %C sé iðulega á bilinu 15–25%. Við þessar aðstæður er réttlætanlegt að skilin á milli *mójarðar* og *eldfjallajarðar* séu við 25% C í yfirborðslögum, en 20% C væri líklega heppilegra þar sem er kaldara og umsetning lífrænna efna hægari eins og á Íslandi, eins og gert er samkvæmt WRB/FAO-kerfinu.

er að mestu gerður úr O-lögum með >12% C, a.m.k. á yfirborði (markið er að nokkru háð leirmagni, eins og áður sagði, en ekki verður fjallað nánar um þann þátt hér). Á þessari reglu er þó ein mjög mikilvæg undantekning sem snertir íslenska náttúru: *Eldfjallajörð* (Andosol) má hafa jarðvegslög sem innihalda allt að 25% C samkvæmt Soil Taxonomy og 20% samkvæmt WRB/FAO en flokkast samt ekki sem *mójörð*. Samkvæmt bandaríska kerfinu eru jarðvegslögin nefnd O-lög séu þau með yfir 12% C, en samt sem áður er um ólífræna *eldfjallajörð* að ræða ef kolefnismagnið er innan við 25%.

Ástæðan er sú að einkenni sem fylgja steindinni allófani og málm-húmus-knippum eru ríkjandi í *eldfjallajörð* þrátt fyrir mikið af lífrænum efnum, auk þess sem þessi einkennisefni *eldfjallajarðar* valda beinlínis uppsöfnun lífrænna efna (sjá 10. kafla um *eldfjallajörð*).

Það má deila um hvort það sé fyllilega réttmætt að nota 25% C markið hérlendis til að greina á milli *mójarðar* (Histosol) og *eldfjallajarðar* (Andosol). Hérlendis er mikið af mýrlendi sem er með 12–20% C en lífræn efni safnast þar fyrir vegna loftfirrðar, kulda og áhrifa *eldfjallajarðar* (sjá kaflana um íslenskan jarðveg). Jarðvegslög hérlendis með 12–20% C hafa langoftast einnig einkenni *eldfjallajarðar* auk einkenna *mójarðar*.

Flokkurinn *svartjörð* (Histic Andosols) er að mörgu leyti ágæt lýsing á þessum tvenns konar eiginleikum jarðvegsins. Þegar kolefnismagnið fer yfir 20% fara einkenni *mójarðar* að verða sterkari en einkenni *eldfjallajarðar* minnka að sama skapi (mælt sem $(Al+½Fe)_{ox}$, sjá kafla um *eldfjallajörð*). Segja má að 25% markið henti illa íslenskum aðstæðum, bæði kerfin taka ekki mið af eldfjallasvæðum þar sem votlendi á köldum svæðum eru útbreidd, heldur af uppsöfnun málm-húmus-knippa, jafnvel í hitabeltinu. Ef 25% C markið væri notað hérlendis, líkt og gert er samkvæmt Soil Taxonomy, myndu svæði sem skilgreind eru sem *mójörð* ennfremur minnka (sjá frekari umfjöllun um þetta atriði í kafla um flokkun íslensks jarðvegs). WRB/FAO notar 20% C markið, eins og áður sagði.

Góð fylgni er á milli bandaríska kerfisins (Soil Taxonomy) og WRB/FAO hvað varðar nafngiftir á meginlögum. Samkvæmt því bandaríska er O-lag lífrænt jarðvegslag sem hefur meira en 12% C, eins og áður sagði (sem er nálægt 20% lífræn efni). Samkvæmt WRB/FAO-lyklinum er hugtakið „H-lag“ notað fyrir jarðvegslög þar sem mikið af lífrænum efnum safnast fyrir í votlendi, en þar segir: „All H horizons are saturated with water for prolonged periods or were once saturated but are now artificially drained.“ Ljóst er að mikið af jarðvegslögum í íslenskum votlendum falla undir þessa skilgreiningu.

Höfundi þessa rits finnst þó nokkuð á reiki hvernig hugtökin „O“ og „H“ eru notuð og heldur sig því við að nota O um öll lífræn lög til einföldunar, en mikilvægt er að þeir sem vinna með íslensk mýrlendi geri sér ljóst að WRB/FAO-kerfið hefur nokkuð annan hátt á nafngjöf. Í framtíðinni verður eflaust farsælt að þróa betur nafngiftir fyrir meginlög í íslenskum votlendum. Rétt er að nefna hér að íslensk *eldfjallajörð* á þurrlendi getur auðveldlega haft >12% C í yfirborðslögum, t.d. í botni birkiskóga.

7.1.3. Frekari aðgreining jarðvegslaga – „kennilög“

Hvert jarðvegslag, t.d. B-lag, getur verið með ýmsu móti eftir umhverfis-aðstæðum og myndunarsögu enda þótt heildareinkenni séu svipuð á milli tveggja jarðvegsgerða. Litlir bókstafir eru notaðir til að tákna mismunandi gerðir hvers meginlags, eins konar undirlög sem mætti kalla „kennilög“. Sem dæmi má nefna að lífræn efni í O-laginu eru misjafnlega mikið rotnuð

og eru þá auðkennd enn frekar með litlum staf á eftir „O“-tákninu eftir rotnunarstigi: Oa (mikið rotnað), Oe (meðal rotnað) eða Oi (lítið rotnað). B-lagið er einnig afar mismunandi eftir aðstæðum, allt frá því að vera veikt þróað (Bw) til þess að vera þróað jarðvegslag með mikið af leir. Stafurinn „t“ í Bt er dreginn af þýska heitinu „ton“ fyrir leir. Þar sem járnoxíð safnast fyrir í B-laginu fær það heitið Bs. Þar sem kalk hefur fallið út neðst í sniðum við útskolun á kalsíum í efri lögum myndast Ck-lög eða Cca-lög (erlendis), svo fleiri dæmi séu tínd til. Þessi auðkenning gefur nánari upplýsingar um hvert jarðvegslag en myndar jafnframt grunninn að svokölluðum vísilögum (e. diagnostic horizons) sem einnig hafa verið nefnd greiningarlög (Þorsteinn Guðmundsson 1994, 2018). Vísilög eru notuð við flokkun jarðvegs í alþjóðlegum flokkunarkerfum.

Hér á landi er mikilvægt að auðkenna lífrænu lögin því rotnunarstigið er afar mismunandi (Oa, Oe, Oi). Flest B-lögin á Íslandi eru talin veik B-lög (Bw) á grundvelli litar og byggingareinkenna. Samantekt á aðgreiningartáknum hér til hliðar er einkum byggð á bandaríska kerfinu, og tekið er tillit til þýðingar og staðfæringar Þorsteins Guðmundssonar frá 1994 (sjá einnig 2018).

Aðstæður hérlendis eru vitaskuld um margt aðrar en á þeim svæðum þar sem alþjóðlegu kerfin voru þróuð. T.d. þyrfti að skoða harðpönnur í íslenskum jarðvegi betur. Þess má geta að Þorsteinn Guðmundsson lýsir veikri harðpönnu (táknuð með x) sem móhellu, en á stórum svæðum á Suðurlandi og víðar er hún grjóthörð og telst þá harðpanna (táknuð með m). Hins vegar er nokkuð um hálfhörðnuð lög í jarðvegi á Suðurlandi og Austfjörðum sem svipar til veikrar harðpönnu erlendis (táknuð með x). Áhrif frosthreyfinga eru víða afgerandi í íslenskum sniðum. Til eru kerfi til að lýsa ummerkjum frostsins sem full ástæða er

Aðgreiningartákn

a Mikið rotnað lífrænt efni.

b Grafið moldarlag (b úr „buried“).

c Hnyðlingar, harðar útfellingar (nodules). Myndast Mn og Fe oxíð í afoxandi/oxandi umhverfi. c-táknið er aðeins notað í FAO, ekki í bandaríska kerfinu.

e Meðal rotnað lífrænt efni.

f Sífreri í jörðu.

g Grámi og önnur ummerki sem eru merki um háa eða breytilega vatnsstöðu. Stafurinn „g“ er dreginn af „gley“ sem merkir for eða aur. Gráir litir oxunar/afoxunarferla, en einnig dílar o.fl. (dílar eða flekkir).

i Lítið rotnað lífrænt efni.

m Samlímt fast efni, föst harðpanna (til orðin vegna jarðvegsmyndunar). Rætur komast ekki í gegn.

r Mikil afoxun, einkum járns. Fúlt, súrefnissnautt vatn sem viðheldur afoxun. Notað í WRB/FAO-kerfi en ekki í því bandaríska. Oft blálitaður jarðvegur.

t Uppsöfnun leirs í B-lagi (Bt) – ekki á Íslandi svo vitað sé.

x Veik harðpanna (e. fragipan). Hart en stökkt jarðvegslag, oft er harðpannan ekki samfelld og illa þróuð.

w Veikt B-lag (lítið þróað, bygging og litareinkenni).

p Plóglag, moldin samanhrærð, oft 15–25 cm þykkt.

γ Meira en 5% gler í laginu (WRB/FAO). Á við um flest jarðvegslög á Íslandi og er því ekki praktískt að nota hérlendis.

β Rúmþyngd (BD) minni en 0,9 g/cm³ (WRB/FAO). Á við um flest jarðvegslög *sortujarðar* á Íslandi og því ekki praktískt í notkun hérlendis.

jj Frosthreyft lag, froströskun (@ í WRB/FAO). Ummerki um frosthreyfingar eru táknaðar með „jj“ í bandaríska kerfinu. Merkingar og lýsingar á frosthreyfingum eru núna í örri þróun, m.a. á vettvangi WRB/FAO. Áhrif frosthreyfinga eru víða afgerandi í íslenskum sniðum.

til að taka mið af við íslenskar aðstæður. Í WRB/FAO-kerfinu (IUSS Working Group WRB 2022) eru mismunandi jarðvegslög, jarðvegsefni og jarðvegseiginleikar skilgreind sem ekki hefur verið getið hér. Sum þeirra koma sannarlega fyrir hér en er of langt mál og sérhæft til að ræða frekar á þessum vettvangi.

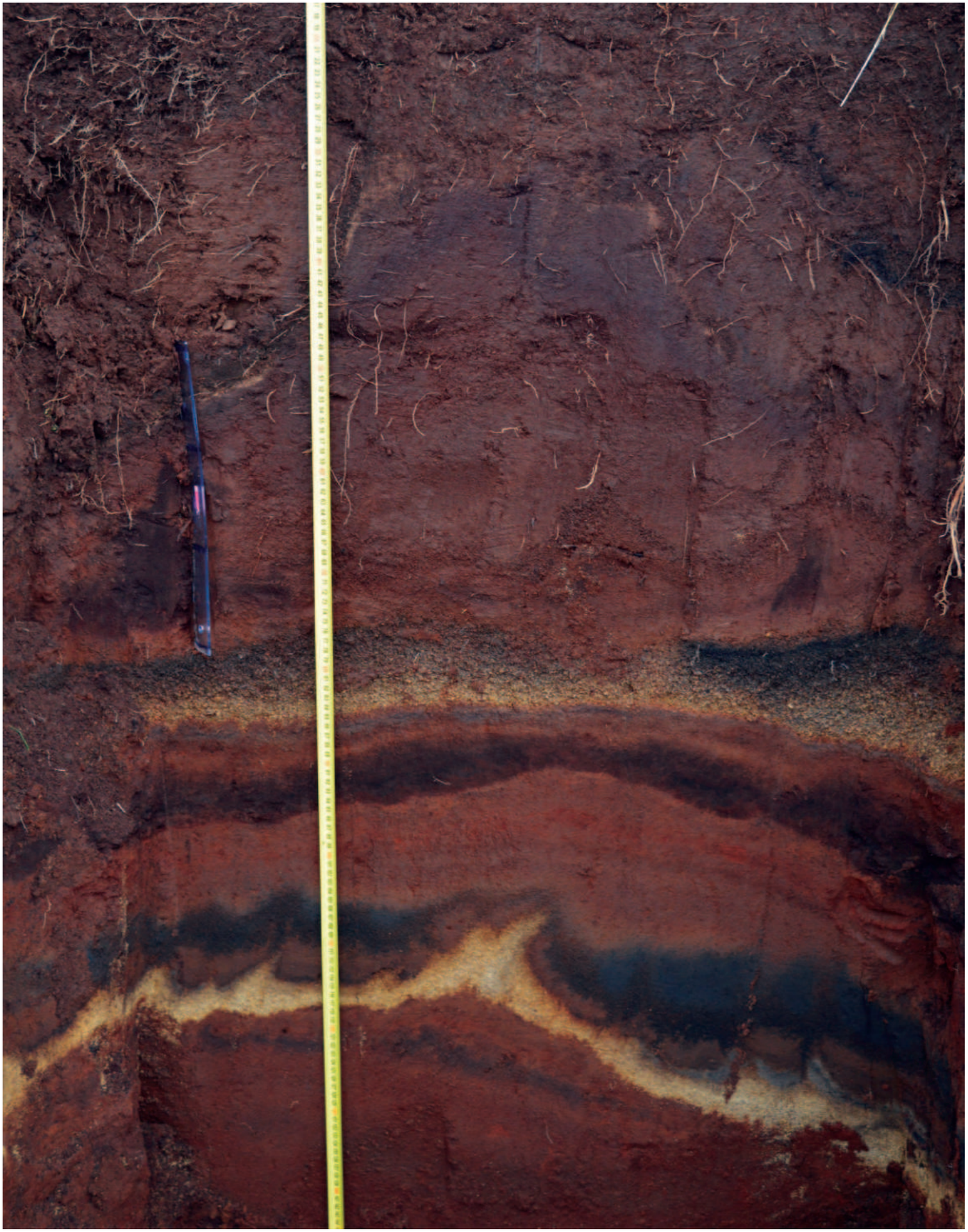
7.1.4. Hvert snið er samsett úr mörgum jarðvegslögum

Hvert snið samanstendur af mörgum jarðvegslögum og því er það einkennt með röð bókstafa frá yfirborði niður að botni sniðsins. Dæmigert lítið þróað jarðvegssnið hefur röðina (talið frá yfirborðinu): A–C; heldur meira þróað snið: A–Bw–C. Meira þróaður jarðvegur erlendis væri t.d. A–Bt–C og A–E–Bt–Ck. Í hverju jarðvegssniði kunna að vera mörg A-, B-, C- eða O-lög. Þannig hefur lífræn mýrarmold mörg O-lög og þau er þá tölusett í röð frá yfirborðinu: O1–O2–O3–O4. Dæmi um vel þróaða mold í tempraða beltinu væri A1–A2–B–Bt1–Bt2–Ck o.s.frv. Eins og sjá má þarf ekki að bæta tölustöfum aftan við heiti meginlagsins (t.d. A eða B) ef aðeins eitt lag er með tiltekinn bókstaf, annars þarf að grípa til tölusetningar til að greina á milli meginlaga.

Um leið og jarðvegslög eru ákvörðuð er reynt að ráða nokkuð í myndunarsögu jarðvegsins. Ef ljóst er að móðurefnin eru ekki einsleit eru þau aðgreind með því að setja tölustafi framan við bókstafi jarðvegslaganna, þ.e. þar sem augljóslega eru skil í gerð eða uppruna móðurefna, t.d.: A1–Bw–2Bw1–2Bw2–3C. Í þessu tilfelli eru móðurefnin ekki þau sömu þegar komið er niður í 2Bw1 og aftur eru skipti í móðurefnum þegar komið er niður í 3C-lagið. Sem dæmi gætu móðurefni efri hluta sniðsins verið úr vindbornu seti en neðri hlutinn vatnsborinn. Síðan hefur jarðvegsmyndun oftast breytt eðli setsins, sem þá er orðið jarðvegur – mold, enda þótt þessi skil séu ennþá glögg í moldinni. Ef jarðvegur er mikið þróaður getur verið erfitt að greina slík skil nema með því að efnagreina samsetningu jarðvegsins.

Hafi mold grafist undir seti og nýr jarðvegur myndast í setinu sem er ofan á eldri moldinni getur þróast snið þar sem eldri syrpa af jarðvegslögum (t.d. bæði A- og Bt-lag) er grafin undir þeirri yngri. Í þessum tilfellum er bókstafurinn „b“ notaður til að tákna grafin jarðvegslög (e. buried soil horizons). Þó hefur þessu iðulega verið sleppt hér á Íslandi, nema þegar greinilegir A-lags eiginleikar eru neðan nýja setsins eða jarðvegsins, t.d. þar sem falla skriður eða jarðsil valda því að jarðvegsefni skríða yfir eldri jarðveg. Vitaskuld er jarðvegur á Íslandi sífellt að grafast undir áfoki og gjósku með tímanum, en við það þróast A-lögin smám saman yfir í B-lög. Ef b-táknið væri notað samkvæmt strönguslu reglum yrðu íslenskar sniðlýsingar æði flóknar og hafa ÓA og samstarfsmenn forðast að nota b-táknið við sniðlýsingar hérlendis nema að A-lags einkennin haldist í hinum grafna jarðvegi. Um þetta má deila en aðalatriðið er að aðferðafræðin sé skýr og sniðunum lýst þannig að sem mestar upplýsingar fáist um moldina.

T-lagið í sniðum. Vegna þess hve gjóskulög eru oft afgerandi í íslenskum jarðvegssniðum (mynd 7.6) hefur stundum verið tekið upp á því að tákna skýr gjóskulög með bókstafnum „T“ (e. tephra, gjóska) á eftir auðkenni fyrir meginjarðvegslag, t.d. A1–A2T–A3–Bw–2BwT o.s.frv. Aðferðinni var lýst í grein í vísindariti af höfundi og fleirum (ÓA 1995). Þá er T einvörðungu notað ef viðkomandi jarðvegslag telst eitt öskulag. Einnig hefur verið stungið upp á því að bæta T við sem meginlagi (var gert hér á undan í kafla um meginlög), sem er róttækara. Þá væri dæmið hér að ofan t.d.: A–T–A2–A3–T2. Við höfum látið númeraröð haldast jafnvel þótt T sé notað til að auðkenna eitt lagið, eins



Mynd 7.6. Íslenskt jarðvegssnið með áberandi gjóskulögum sem hafa mikil áhrif á eiginleika jarðvegsins. Hér er rétt að skilgreina þessi gjóskulög sem T-lög; það eykur upplýsingagildi sniðlýsinga.

og dæmin hér að ofan bera með sér. Þessar aðferðir við nafngiftir eiga sér þó enga stoð í alþjóðlegum kerfum en þær hjálpa til við úrvinnslu sniða, sem er til hagræðis hérlendis. Aðferðirnar sem hagnýta sér T-bókstafinn eru enn sem komið er aðeins tillögur og þeim hefur ekki alltaf verið fylgt í þessu riti.

Höfundurinn er hlynntur ákveðnu frjálsræði við gerð sniðlýsinga, en vitaskuld innan skynsamlegra marka. Sniðlýsingar þurfa að skiljast af öðrum sem nýta sér upplýsingarnar. Því ber vitaskuld að leggja áherslu á að ná fram sem skýrastri mynd af sniðunum. Það er skoðun höfundar þessa rits að kerfin eigi að þjóna notendum en ekki öfugt. Það skal þó ítrekað að frávik frá tilteknu sniðlýsingarkerfi er eitur í beinum margra jarðvegsfræðinga sem leggja áherslu á mjög formfasta aðferðafræði, en það getur þó reynst mjög tímafrekt að læra slíkt kerfi út í hörgul og í raun orðið til þess að færri lýsa sniðum þar sem það á við – margir leggja einfaldlega ekki í það.

Heiti jarðvegslags og dýptarbil, svo sem Bw, Bt eða Oi

Litur jarðvegs samkvæmt Munsell-litastaðli

Kornastærðarflokkur – kornastærðarþríhyrningur

Bygging – gerð, stærð og hversu greinileg

Samloðun – oftast fyrir rakan jarðveg

Rætur – fjöldi/þéttleiki og stærð

Dílar, grámi, járnútfellingar o.fl. tengt oxunar-/afoxunarferlum

Önnur einkenni eða athugasemdir

Lagmót

7.2. Sniðlýsingar

Við lýsingar á sniðum er ákveðnum þáttum eða eiginleikum hvers jarðvegslags lýst og yfirleitt í sömu röð. Þar sem væntanlega munu fáir af lesendum þessa rits lýsa sniðum er hér aðeins greint frá helstu atriðum við framkvæmd sniðlýsinga en vísað til rits LbhÍ nr. 5 (ÓA o.fl. 2005) fyrir þá sem þurfa ítarlegri upplýsingar um þær (sjá kassa til vinstri).

Litur. Lit hvers jarðvegslags er lýst með því að nota sérstakar litabækur, svokallaðar Munsell-litabækur sem eru svipaðar litakortum sem notuð eru í málningarverslunum. Þessar bækur hafa verið notaðar mjög lengi í jarðvegsfræðunum. Hver blaðsíða lýsir rauðgildi í heild (e. hue) sem er hlutfall gula litarins miðað við rauðan (táknað með YR, fyrir yellow-red). Ein blaðsíða er fyrir hvert rauðgildi (YR), t.d. fyrir 10YR, 5YR o.s.frv. Innan hverrar blaðsíðu er svo sýndur mismunandi styrkur litanna, þ.e. styrkleiki eða gildi (e. value) og útgeislun eða ára (e. chroma). Litur gefur vitaskuld miklar upplýsingar um moldina, m.a. oxunarstig, lífrænt innihald og margt fleira.

Kornastærð. Notaðir eru kornastærðarflokkarnir sem lýst var í 2. kafla t.d. flokkarnir leirmold, siltmold o.s.frv.

Bygging. Hér eru notaðar byggingareiningar sem sagði frá í 5. kafla. Á Íslandi er kornótt bygging (e. granular structure) og kubbslaga bygging (e. blocky structure) algengustu byggingarformin. Reyndar kemur plötulaga bygging líka fyrir, sem og hugtakið „án byggingar“ (e. structureless), enda hafa t.d. sendin moldarlög yfirleitt mjög litla eða enga byggingu; þau eru þá án byggingar. Jafnframt er lýst stærð byggingareininganna og hversu fast þær loða saman, t.d. gæti kubbslaga bygging í Bw hérlendis verið „veik,

meðalstór, kubbslaga bygging“ eða „A-lag með meðalsterka, meðalstóra, kornótta byggingu“.

Samloðun getur verið mismunandi eftir því hvort moldin er þurr, rök eða blaut. Oftast er samloðuninni lýst fyrir rakan jarðveg þar sem moldin getur t.d. verið laus (e. loose), stökk (e. friable) eða hörð (e. firm).

Rætur. Þéttleika róta og stærð þeirra er lýst við sniðlýsingar. Þeim fækkar vitaskuld eftir því sem neðar dregur. Þá veitir moldin mismikið viðnám gegn rótarvexti – hér á landi ná rætur t.d. óvenjulega langt niður því moldin er svo laus í sér.

Dílar, grámi og járnútfellingar. Hér er lýst einkennum sem m.a. einkenna oxunarstig sem mótast m.a. af grunnvatnsstöðu en einnig af sýrustigi o.fl. þáttum.

Frosthreyfingar. Greinileg ummerki um frosthreyfingar (jj í bandaríska kerfinu) eru merkt sérstaklega og þeim lýst.

Lagmót, þ.e. mótin við næsta lag fyrir neðan er síðasti hluti lýsingar hvers jarðvegslags. Lýst er gerð (t.d. bylgjótt, slétt eða brotið) sem og skarpleika lagmótanna, t.d. skörp, skýr eða óljós (mynd 7.7).

Vitaskuld fylgir hverju lagi heiti þess og dýptarbil. Ef eitthvað sérstakt er að finna í jarðvegslagi sem vert er að gefa nánari gaum er þess getið á undan upplýsingum um lagmótin. Hér á landi er t.d. getið um ef þunn gjóskulög koma fyrir, aldur gjóskulaga sé hann þekktur, ef lagið ber merki áfoks eða ársets, ef kísilþörunga er að finna í laginu (algengt í votlendum) og svo mætti lengi telja.

Mynd 7.7. Lagmót eru síðasti hluti lýsingar á hverju jarðvegslagi í sniðlýsingum. Lagmót á Íslandi eru gjarnan mjög skörp þar sem mikið er af öskulögum í moldinni, en þau geta einnig verið mjög frosthreyfð í efstu lögum sniðlýsinga.

Heimildir

IUSS Working Group WRB 2022. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4. útg. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vínarborg, Austurríki.

Ólafur Arnalds, C.T. Hallmark og L.P. Wilding 1995. Andisols from four different regions of Iceland. Soil Science Society of America Journal 59:161–169.

Ólafur Arnalds, Bergrún Arna Óladóttir og Rannveig Guicharnaud 2005. Aðferðir við að lýsa jarðvegssniðum. Rit LbhÍ nr. 5. Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.

Scoenberger P.J., D.A. Wysocki, E.C. Benham og W.D. Broderson 1998. Field Book for Describing and Sampling Soils. National Soil Survey Center, USDA-NRCS, Lincoln, Nebraska, USA.

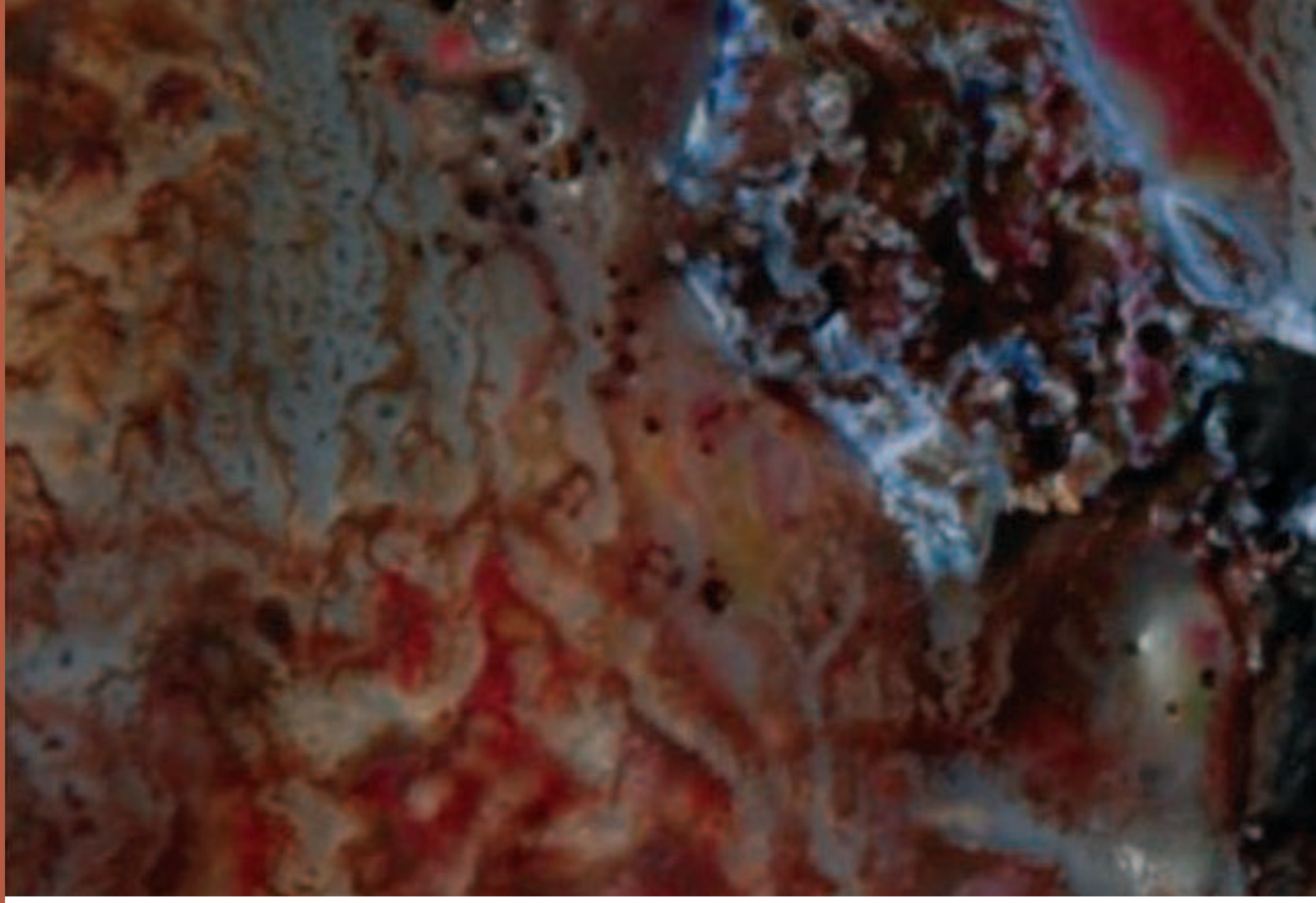
Soil Survey Staff 1999. Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. 2. útg. Agriculture Handbook No. 436, USDA-NRCS, U.S. Government Printing Office, Washington DC, USA.

Soil Survey Staff 2003. Keys to Soil Taxonomy. 9. útg. USDA-NRCS, Lincoln Nebraska, USA.

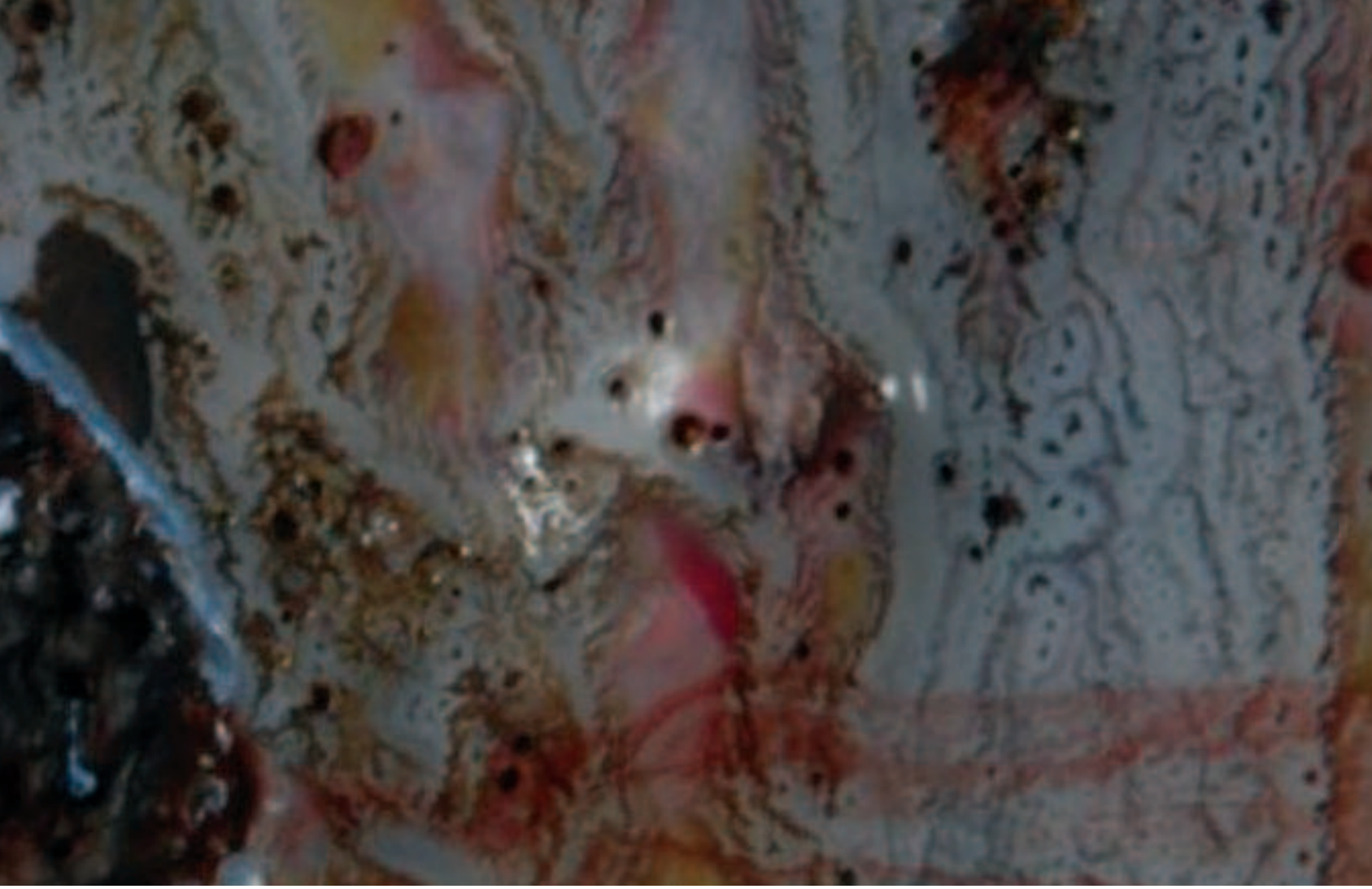
Soil Survey Staff 2003. Keys to Soil Taxonomy. 9.útg. USDA-NRCS, Lincoln, Nebraska, USA.

Þorsteinn Guðmundsson 1994. Jarðvegsflokkun FAO með hliðsjón af íslenskum aðstæðum. Fjölrit RALA nr. 167. Reykjavík.

Þorsteinn Guðmundsson 2018. Jarðvegsfræði. Myndun, vist og nýting. Háskólaútgáfan, Reykjavík.



8 Jarðvegsmyndun – tíminn og vatnið og ýmislegt fleira



Mynd 8.1. Jarðvegsmyndun. Hluti úr myndverki eftir Veronique Maria. Veronique Maria og ÓA (2019).

Umhverfið mótar einstaklinginn

Þessi orð eiga vel við um moldina sem þróast í tímans rás. Sá „einstaklingur“ sem blasir við í jarðvegssniði hefur tekið breytingum allt frá „frumbernsku“ sem ómótað bergefni.

Jarðvegurinn getur verið ungur að árum, kannski aðeins nokkurra áratuga eða árhundruða gamall; miðaldra mold væri mörg þúsund ára gömul, t.d. síðan jökull hörfaði af yfirborðinu eða þegar stórflóð skilaði bergefnum af sér endur fyrir löngu.

Moldin getur líka verið fjörgömul – hún getur hafa verið að mótast af umhverfinu í tugþúsundir, hundruð þúsunda ára – jafnvel milljónir ára. Jarðvegurinn varðveitir sögu umhverfisins um þúsundir ára: jarðvegsmyndun er sérlega áhugaverð grein vísinda.

Yfirborð jarðar er afskaplega mismunandi að gerð eins og vænta má og það skapar fjölbreytilegt umhverfi fyrir þróun jarðvegs. Hlýtt og rakt umhverfi stuðlar að örari efnahvörfum og þar með þróun moldar miðað við þau svæði þar sem þurrkur og kuldi hamla veðrun. Bergefnin sem jarðvegurinn myndast í eru nefnd „móðurefni“ (e. parent materials) sem er mikilvægt hugtak fyrir skilning á mold. Móðurefnin eru afar mismunandi líkt og loftslagið, t.d. er mikill munur á graníti, gjósku, kvarssandi, sandsteini og leirríkum setlögum, sem leiðir til myndunar fjölbreytilegrar moldar.

Allt berg breytist og þróast við það að komast í snertingu við andrúmsloft jarðar. Yfirborð bergefna veðrast, súrefni og koltvísýringur ganga í samband við efni í berginu. Vatn myndar filmu utan um bergefnin, ný efni taka að myndast og nýjar steindir „falla út“ (myndast – kristallast). Lífríkið sækir á, lífræn efni safnast fyrir og mynda lífrænar sýrur sem auka á upplausn bergefna – það myndast mold. Þetta ferli, frá ómótuðum bergefnum til myndunar jarðvegs, er yfirleitt nefnt **jarðvegsmyndun**.

Enskt hugtak sem oft er notað um sama ferli vísar til sköpunar („genesis“), en einnig tíðkast að tala um **þróun jarðvegs** (e. soil development) auk jarðvegsmyndunar (e. soil formation).

Jarðvegsmyndun er ein undirgreina jarðvegsfræðinnar, sem er einnig oft tengd við flokkunarfræði jarðvegs og þá kölluð „pedology“. Þetta undirfag er vinsælt viðfangsefni því það byggist á þverfaglegum grunni sem gerir kröfu um þekkingu á mörgum fagsviðum, svo sem jarðfræði, landmótunarfræði, líffræði, vistfræði, jarðefnafræði, bergfræði, veðurfræði og jafnvel sögu því maðurinn hefur mótað moldina í tímans rás. Jarðvegsmyndun er fræðigrein fyrir fjölfræðinga.

8.1. Jarðvegsmyndandi þættir

Í árdaga jarðvegsfræðinnar í Rússlandi voru heimamenn teknir að ferðast með járnbrautarlestum um nokkur loftslagsbelti á til þess að gera stuttum tíma. Fyrir aldamótin 1900 veittu þeir því athygli að hverju gróðurbelti hins víðfeðma ríkis, sem taldi m.a. Síberíu innan landamæra sinna, virtist fylgja ákveðin jarðvegsgerð. Þar með var í fyrsta skipti skjalfest að loftslag hefði afgerandi áhrif á myndun jarðvegs – einkum úrkoma og hitastig. Síðar tóku fleiri „jarðvegsmyndandi þættir“ að bætast í sarpinn, til að mynda landslagið sem hefur augljóslega mikil áhrif, t.d. halli og hallaátt.

Snemma varð ljóst að móðurbergið er mikilvægur þáttur – annar jarðvegur myndast í graníti en kalkríku leirseti við sömu aðstæður að öðru leyti. Lífríkið bættist síðan fljótt í hóp þessara þátta því gróðurfarið og lífið í jarðveginum mótar augljóslega jarðvegsgerðina. Síðastur þessara þátta til að koma til sögunnar var tíminn: jarðvegur þróast í tíma, ungur jarðvegur er annar en sá gamli. Saman mynda þessir þættir hina fimm klassísku „jarðvegsmyndandi þætti“. Þeim voru fyrst gerð skil sem slíkum í frægri bók Hans Jenny frá árinu 1941.

Jarðvegsmyndandi þættir hafa iðulega verið kjarni umfjöllunar um þróun jarðvegs. Þess ber þó að gæta að margir þáttanna tengjast, þeir eru ekki óháðir þættir sem unnt er að nota sem slíka við gerð stærðfræðilegra líkana. Umfjöllun um jarðvegsmyndandi þætti er ekki eins áberandi í kennslubókum nú og áður var. Þessir þættir eru þó eigi að síður gagnlegir til að átta sig á samspili moldar og umhverfis við kennslu jarðvegsfræði. Aðrar kennslubækur leggja þó meiri áherslu á þau ferli sem eiga sér stað í jarðveginum, óháð hinum

jarðvegsmyndandi þáttum, t.d. bók Nico van Breemen og Peter Buurman (2002). Nefna má þriðju nálgunina til umfjöllunar um jarðvegsmyndun sem byggist á flokkunarfræði og umfjöllun um myndun einstakra jarðvegsflokka, t.d. bækur Larry Wilding o.fl. (1983) og umfjöllun Arnold (1983) þar, sem og klassíska bók Frakkans Duchaufour (1977). Peter W. Birkeland (1999) skrifaði vinsæla bók sem tengir saman jarðveg og landmótunarfræði (*Soils and Geomorphology*), enda eru mikilvæg tengsl á milli þessara þátta.

Nú á dögum má segja að landnýting, þ.e. áhrif mannsins, séu hvað mest afgerandi þátturinn sem hefur áhrif á moldina, við lifum á „mannöld“ (e. anthropocene). Meðfylgjandi mynd er tilraun til að sýna þætti og þróun jarðvegs skematískt (mynd 8.2) á þann hátt að það endurspegli efnistök þessarar bókar, þar sem íslenskir meginþættir á borð við áfok og frost, sem og landnýting, eru áberandi við þróun moldarinnar.

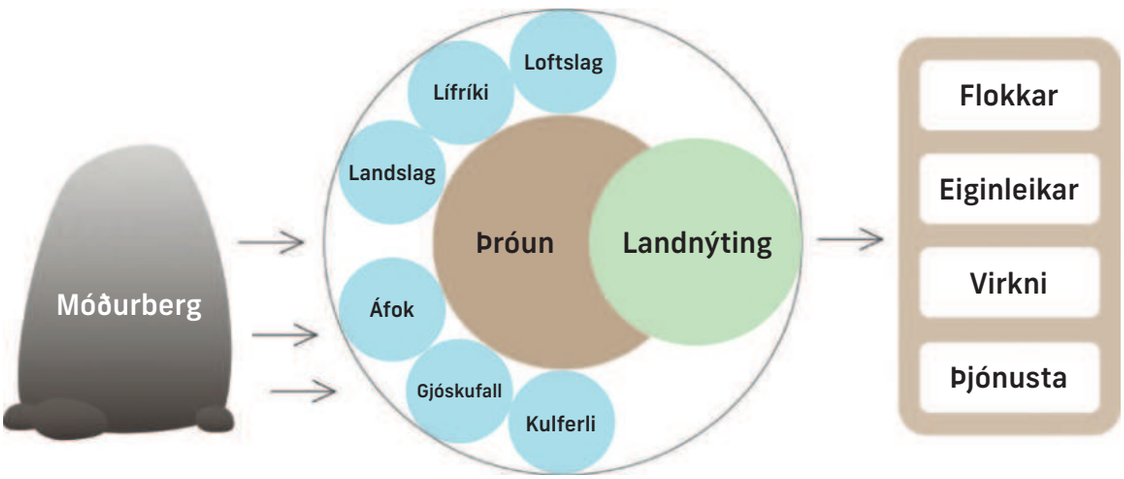
8.1.1. Móðurefni

Bergefni í yfirborðinu eru móðurefni jarðvegs (e. parent materials). Þau eru ákaflega misjöfn að gerð, sem áður sagði. Gjóska, hraunlög, jökulurð og sandar eru dæmi um bergefni sem mynda móðurefni á Íslandi ásamt áfoki, yfirleitt af basískri gerð.

Erlendis er fjölbreytnin víða mun meiri, ekki síst á fellingafjallasvæðum þar sem margvíslegt móðurberg getur verið neðan yfirborðs á tiltölulega litlu svæði, hulið jarðvegi. Granít og gneiss (mynd 8.3), sem og ýmiss konar setberg (t.d. kalksteinn og löss, sjá síðar), eru algeng bergefni sem mynda móðurberg jarðvegs. Vesturhluti Bandaríkjanna er dæmi um svæði með afar fjölbreytt móðurberg en víðáttumikil hraunlög eða setlög á meginlöndunum eru dæmi um einsleitari svæði.

Gerð móðurbergs getur t.d. verið mismunandi hvað varðar tegundir steinda og efnasamsetningu þeirra, yfirborðsflatarmál sem ræðst af kornastærð og hversu gropið eða holótt móðurbergið er.

Berg með mikið holrými þar sem vatn á greiða leið um veðrast yfirleitt hraðar en mjög þétt berg. Þannig myndast einnig þykkari mold í lausum setlögum en í hörðu bergi ef miðað er við jafnlangan tíma. Basískt gosberg veðrast almennt mjög hratt, ekki síst berg með mikið af steindinni ólivín sem er mjög óstöðug í



Mynd 8.2. Jarðvegsmyndun, íslenskar aðstæður. Moldin þróast í tíma þar sem lífríki, landslag og loftslag mótar hana, eins og gert er ráð fyrir í hinu klassíska módeli fyrir jarðvegsmyndun. Basískt gjóskuríkt móðurberg er ríkjandi, það leggst einnig til sem áfok eða með gjóskufalli. Kulferli (áhrif frosts og þýðu) eru áberandi á Íslandi (sjá sérstaka kafla um þessa þætti síðar). Landnýting er ráðandi þáttur fyrir þróun moldarinnar hérlendis sem og víðast annars staðar. Úr verður mold með mismunandi eiginleika, virkni og vistkerfisþjónustu sem fellur í marga flokka.

Mynd 8.3. Sierra Nevada-fjallgarðurinn á mótum Kaliforníu og Nevada. Risavaxinn graníthleifur sem veðrast afar hægt.

jarðvegsumhverfi. Gjóska (eða gosgler) er ekki eins vel kristölluð og annað berg og hefur iðulega mikið yfirborðsflatarmál (þ.e. er gropin) og veðrast því oft hraðar en annað móðurberg, sérstaklega ef hún er basísk, sem einmitt er einkenni íslenskrar gosösku.

Jökulurð er ein gerð móðurbergs, en samsetning hennar er mismunandi og ræðst af gerð bergsins sem jökullinn gekk yfir og rauf niður yfirborðið. Á Íslandi er gjóska (gler) og basískur bergsalli oft meginuppistaða bergefnanna í urðinni og því myndast jarðvegur auðveldlega í henni. Hins vegar hefur vindborið set, áfok, víðast hvar lagst yfir urðina og elsta jarðveginn en moldin haldið áfram að þróast í hin nýju efni sem sífellt bætast ofan á. Þessar aðstæður eru fremur óalgengar í heiminum, sérstaklega þar sem gosgler er uppistaðan í áfokinu.

Löss. Á síðjökultíma mynduðust víðfeðm sandsvæði framan við stóru meginlandsjöklana og þaðan bárust firnin öll af áfoksefnum með vindi yfir svæðin sunnan jökulsins. Jöklarnir héldu velli á þessum svæðum í langan tíma enda þótt jökuljaðarinn væri breytilegur og því var heildarmagn fokefna á víðáttumiklum svæðum framan við jökuljaðrana orðið ákaflega mikið þegar jöklarnir tóku loks að hörfa endanlega.

Setlögin sem mynduðust við þetta áfok eru nefnd löss (e. loess) og eru mjög mikilvæg móðurefni jarðvegs á þessum svæðum (myndir 8.4 og 8.5). Hafa verður í huga að nágrenni jöklanna er vatnsósa og óstöðugt. Mikið af seti berst með jökulám til jökuljaðranna, það myndast jökullón sem seinna þorna við breytingar á jökulröndinni og gríðarleg flóð berast stundum undan jöklunum sem nefnd eru jökulhlaup. Allt stuðlar þetta að myndun óstöðugs sandyfirborðs þaðan sem efnin fjúka, gjarnan fyrir tilverknað fallvinda sem falla niður af jöklinum á nærsvæði þeirra (e. catabatic winds) yfir gríðarlega stór svæði. Svona aðstæður ríkja m.a. norðan Vatnajökuls á okkar dögum.

Framan við jöklana ægir öllu saman í sandinum. Við þessar aðstæður táknar hugtakið „sandur“ yfirborðsgerð sem inniheldur mikið af öllum kornastærðum, sandi, silti og leir, enda þótt samheitið „sandur“ sé notað um þau. Þau eru oftast í eðli sínu jökulárset (e. glaciofluvial sediments).

Efnin eru yfirleitt kalkrík (erlendis) og víða hefur myndast frjór jarðvegur í þessum löss-lögum sem hafa hagstætt pH-gildi, mold sem er leirrík með mikla vatnsheldni og jónrýmd – svæði sem nú eru undirstaða kornræktar í mörgum löndum. Stærstu svæðin eru í Bandaríkjunum, norðanverðri Evrópu og Kína (sjá myndir 8.4 og 8.5).

Ryk sem berst frá eyðimerkursöndum meginlandanna er annars eðlis en basískt ryk á Íslandi því þar er einkum um hreinan kvarssand að ræða. Að vísu eru til mjög kalkríkar uppsprettur uppfoks sunnan Sahara í svokallaðri Bodélé-lægð í Chad þar sem áður var risavaxið stöðuvatn sem nú er uppþornað. Þar er m.a. mikið af lífrænu vatnaseti sem fýkur. Bodélé-lægðin er talin virkasta uppfokssvæði veraldar.

Ryk frá eyðimörkum Afríku berst langar leiðir, t.d. til Kanaríeyja, yfir Evrópu og alla leið til Suður-Ameríku. Frá Góbí-eyðimörkinni og fleiri eyðimörkum á meginlandi Asíu berst ryk til Japan og víðar. Rykið er talið hafa mikil áhrif á frjósemi hafsvæðanna þar sem það fellur með því að bæta við steinefnum sem auka frumframleiðni. Það eykur sannarlega frjósemi í gömlum jarðvegi að hlaða ferskum móðurefnum ofan á kerfið.

Á undanförnum árum hefur komið í ljós að magn rykefna sem fellur á vistkerfi jarðar er mun meira en áður var ætlað, m.a. í Bandaríkjunum, Ástralíu og Asíu. Myndun ryks (e. dust production) í heiminum er talin fara vaxandi vegna ofnýtingar vistkerfa, eyðimerkurmyndunar og nú síðast vegna loftslagsbreytinga. Benda má á umfjöllun um ryk á íslensku í *Náttúrufræðingnum* (ÓA o.fl. 2019a,b) og í 18. kafla.

Setlög. Jarðvegur sem þróast í kalksteinslög er oftast með hærra pH-gildi en annar jarðvegur, sérstaklega ef loftslagið er ekki mjög rakt eða heitt, en nægt framboð Ca^{++} og fremur hátt sýrustig (oft nálægt 8) ýtir m.a. undir nýmyndun smektít-leirssteinda. Leirríkur jarðvegur myndast gjarnan í setlögum á ósasvæðum stórfljótanna, enda er setburður þeirra iðulega mjög fínkorna því grófari hluti efnanna sem berast í árnar sest frekar til botns ofar á vatnasviðinu. Fínkorna set berst aftur á móti sem grugg langt niður eftir vatnasviðinu og jafnvel til sjávar.

8.1.2. Loftslag

Loftslag hefur bæði áhrif á efnahvörfin og lífríkið sem móta moldina. Segja má að loftslagsþátturinn sé tvískiptur: meginatriðin eru hitastig og raki. Það er síðan fjöldi annarra þátta í umhverfinu sem mótar hitastigið og rakann, t.d. útgeislun, skýjafar, vindar, snjór, landslag, dreifing úrkomu, sumarhiti o.fl. Mestu skiptir þó loftslagið ofan í mold-

Mynd 8.4. Þykk áfokslög – löss – í norðurhluta Idaho (USA) sem söfnuðust fyrir á jökultímanum við fok frá jöðrum meginlandsjökulsins á ísöldinni. Mynd: University of Idaho.

RAKAFLOKKAR
Aridic, eyðimörk
Ustic, frekar þurrt, þornar alveg
Udic, frekar blautt, a.m.k. hluta úr ári
Aquic, blautt, mýri
Xeric, Miðjarðarhafsloftslag, vetrarúrkoma, þurr sumur

HITAFLOKKAR
Pergelic, sífreri í jörðu
Cryic, meðalárshiti (m.á.h.) <8°C
Frigid, sama og Cryic en hærri sumarhiti
Mesic (m.á.h.) 8–15°C
Thermic (m.á.h.) 15–22°C
Hyperthermic (m.á.h.) >22°C

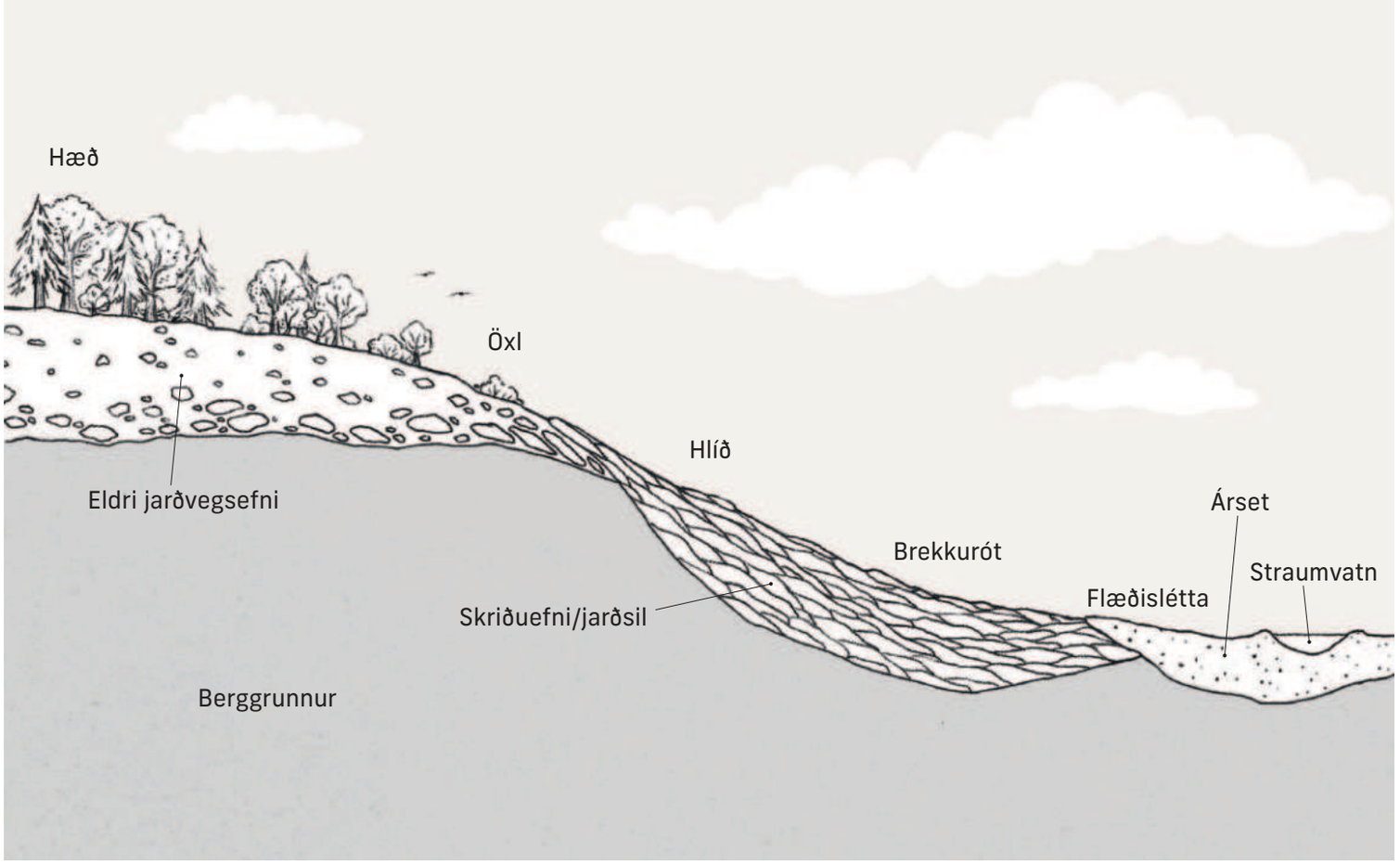
inni sjálfri, rakastig og hitastig en ekki endilega lofthiti og úrkoma.

Notaðir eru staðlaðir flokkar í jarðvegsfræði til að lýsa „jarðvegsloftslagi". Þessir flokkar eru mikið notaðir, m.a. við flokkun jarðvegs eða til að gefa til kynna umhverfisaðstæður. Í megindráttum má segja að því heitara sem loftslagið er og moldin rakari, þeim mun örari er veðrun og myndun jarðvegs. En hafa verður í huga að jarðvegur í heitum og rökum löndum er oft mjög gamall og fullþroskaður og veðrunin hefur hægt verulega á sér, ekki síst í yfirborðslögunum. Dæmi um slíkan jarðveg er rauður hitabeltisjarðvegur sem er fyrst og fremst gerður úr járn- og álsteindum (leir) en flest önnur efni hafa veðrast burt. Hann þróast ekki mikið umfram það sem hann er orðinn, nema hann verði fyrir áfoki, gjóskufalli eða setmyndun með vatni.

Ungur jarðvegur í heitu og röku landslagi veðrast hins vegar ört. Það á ekki síst við eftir skriðuföll, stórflóð eða eldgos í hitabeltinu. Veðrunin skilar lausum katjónum í jarðvegsvatnið sem eykur frjósemi jarðvegsins: ungur jarðvegur er oft og tíðum frjósöm mold. Ársléttur stórfljótanna með árvissum vorflóðum voru enda fæðuforðabúr hinna fornu menningarríkja víðs vegar um heiminn og eru það sums staðar enn þann dag í dag.

Segja má að jarðvegurinn skrái sögu umhverfis síns og þar með loftslagsins, enda þótt sú saga geti verið nokkuð torræðin. Sem dæmi má nefna að leirríkt Bt-lag getur ekki myndast í jarðvegi í eyðimerkurloftslagi, en þó er slíkt lag algengt í jarðvegi núverandi eyðimarka. Lagið hefur þá myndast þegar loftslag var mun rakara á þessum slóðum en nú er, t.d. á ísaldartímanum.

Mynd 8.5. Frjósöm ræktarlönd á áfokslögum (löss) í nágrenni Moscow í Idaho (USA). Jarðvegurinn flokkast sem *graslendisjörð* (Mollisol) en þessum siltríka jarðvegi er ákaflega hætt við rofi af völdum vatns og vinda.



Mynd 8.6. Landslagskeðjan (e. catena). Landslag hefur mikil áhrif á hvers konar mold myndast á hverjum stað. Elsta jarðveginn er að finna á hæðinni efst í „keðjunni“ en stutt er síðan honum var raskað af flóðum á botninum. Rof getur verið mikið á öxlinni og í brekkunni, en moldin safnast fyrir í brekkurótinni (e. toeslope) og er gjarnan ung þar. Á Íslandi stuðla skriðuföll og jarðsil að söfnun jarðvegsefna í brekkurótum.

8.1.3. Landslag

Landslag hefur einkum tvenns konar áhrif sem einn hinna fimm jarðvegsmyndandi þátta. Í fyrsta lagi mótar landslagið aldur jarðvegsins en í öðru lagi mótar það veðurfarsþætti, bæði á stórum skala sem og nærveður.

Í fyrstu héldu menn að jarðvegurinn væri fyrst og fremst afsprengi móðurbergs og loftslags, sem áður sagði, en veittu því síðan athygli að moldin innan sama svæðis gat verið harla breytileg. Fór það eftir því hvar í landslaginu hvert jarðvegssnið var staðsett hvernig jarðvegurinn hafði þróast. Hugtakið „catena“ hefur verið notað til að tákna eins konar þversnið í gegnum landslagsheild, frá toppi fjalls niður að vatnsfalli í dalbotni. Orðið „catena“ er fengið úr latínu og þýðir keðja. Með þessu hugtaki var verið að leggja áherslu á að jarðvegurinn væri samfella en þó breytilegur eftir því hvar hann væri í landslagsheildinni – hvert jarðvegssnið væri hlekkur í keðjunni sem myndaði „landslagskeðjuna“. Þegar sniðum er lýst er stöðu þeirra í landslaginu yfirleitt getið, mjög gjarnan með hugtökum sem notuð eru í „landslagskeðjum“.

Landslag meginlandanna er mun eldra og þróaðra en hin unga eldfjallaásýnd Íslands. Vert er að hafa tvö meginatriði í huga þegar horft er til landslags meginlandanna með hliðsjón af jarðvegi og landmótun. Annars vegar stöðu jarðvegs í landslagskeðjunni (e. catena) en hins vegar staðsetningu hans miðað við röð hjalla frá botni dalsins eða meginvatnsfalls á svæðinu. Jarðvegur sem staðsettur er í miðju hlíðar (e. midslope eða backslope) í landslagskeðjunni verður fyrir mestu raski því þar er hlíðin bröttust. Efni úr

hlíðinni safnast fyrir í brekkurótum. Einnig geta flóð í ánni í dalbotninum valdið raski. Á þessum stöðum, í hlíðinni og á flóðasléttunni, er sífellt að myndast nýtt yfirborð (mynd 8.6).

Elstan jarðveg er að finna uppi á hæðinni (e. summit) í hverri landslagskeðju, en þar sem hver hjallinn rís upp af öðrum eftir því sem fjær dregur frá ánni (margar landslagskeðjur) verður yfirborð hvers hjalla eldra. Yfir svæðið næst henni hefur hún flætt hlutfallslega nýlega, en því lengra sem dregur frá ánni, þeim mun lengra er síðan yfirborðinu hefur verið raskað með flóðum. Á hverjum hjalla er moldin jafngömul og iðulega nokkuð svipuð. Þessa staðreynd er hægt að nota við kortlagningu á jarðveginum og er það gert í miklum mæli. Þetta á þó ekki við í hinu unga landslagi á Íslandi.

Samspil loftslags og landslags er mjög mikilvægt fyrir mótun jarðvegs. Þannig geta votlendi verið í dalbotnum eða lægðum en aftur á móti þurrari jarðvegur ofar í landinu. Bergtegundir hafa einnig mikil áhrif á gegndræpni (e. porosity) fyrir vatn, sem aftur hefur áhrif á jarðvatnsstöðu. Gjörólík dæmi um það eru vel þekkt á Íslandi, eins og síðar verður vikið að, t.d. gegndræpir sandar og jökulberg á gosbeltinu þar sem lítið vatn er í yfirborði eða hinn gamli ógegndræpi Tertíer-hraunlaga-stafli landsins þar sem votlendi eru iðulega ríkjandi. Þá skiptir það líka miklu máli hve moldin sjálf getur haldið miklum raka, sem einnig ræðst af gróðri á yfirborði, snjósöfnun og fleiri þáttum (mynd 8.7).

8.1.4. Lífríkið og þróun jarðvegs

Lífríkið hefur margháttuð áhrif á myndun jarðvegs. Í fyrsta lagi er lífið í moldinni mikilvægur hvati efnaveðrunar og hringrásar næringarefna. Lífríkið beinlínis keyrir áfram efnahvörf moldarinnar. Í öðru lagi safnast lífræn efni fyrir í jarðveginum og gefa honum mikilvæga eiginleika – þróun sem er ráðandi þáttur við myndun *mójarðar* en einnig *eldfjallajarðar* að hluta.

Gróður á yfirborði hefur margvísleg áhrif á moldina og jarðvegsmyndun. Sem dæmi má nefna að barrnálar sýra jarðveginn með tímanum. Graslendi myndar iðulega mjög þéttan rótarmassa sem eykur á lífrænt innihald moldarinnar. Þar sem gróðurþekja er takmörkuð safnast vitaskuld lítið fyrir af lífrænum efnum í moldinni, eins og

Mynd 8.7. Staða gagnvart sólu (e. aspect) hefur mikil áhrif á veðurfar á hverjum stað. Hér er þurrt á svæðum sem snúa mót suðri og þar er kyrkingslegt graslendi ríkjandi (t.h. í hlíðunum). Rakara er í brekkum sem snúa frá sólu og þar er skógur ríkjandi. Þar eiga sér stað önnur jarðvegsmyndandi ferli og mold. Myndin er frá Klettafjöllunum í suðurhluta Colorado, USA.

þekkt er á íslenskum auðnum. Við þær aðstæður er hringrás orkunnar skert eða rofin. Gróðurinn hefur einnig áhrif á nærveður. Á auðnum er vindasamt við yfirborðið sem stuðlar að örri uppgufun o.fl. Úrkoman nýtist ekki á vetrum heldur fýkur hún burt í formi skafrennings. Auk þess hefur gróðurleysið áhrif á myndun holklaka í moldinni (sjá kafla um kulferli). Kjarr og skógur mynda skjól sem hefur áhrif bæði á hita- og rakastig en einnig á dreifingu úrkomu og snjóalög. Jarðvegur í skógarbotni er líklegri til að haldast rakur um lengri tíma, sem bætir skilyrði fyrir lífríkið og mörg efnahvörf sem móta jarðveginn. Allir þessir þættir hafa áhrif á þróun jarðvegsins.

Stór jarðvegsdýr gegna lykilhlutverki við að hræra upp í moldinni, blanda henni sífellt saman og líma moldarkorn í samkorn. Það eru t.d. ánamaðkar sem mynda kornóttu bygginguna sem eykur mjög frjósemi jarðvegs. Þar sem termítar eru í jörð fara fram miklir flutningar á jarðvegsefnum og maurar eru ennfremur mikilvirkir í jarðvegsraski. Smærri lífverur, svo sem sveppaþræðir o.fl., eru einnig mikilvægar við myndun byggingareininga moldarinnar.

Maðurinn telst til lífríkisins og hann hefur vitaskuld haft afgerandi áhrif á þróun jarðvegs á stórum svæðum jarðarinnar með nýtingu sinni á auðlindum (mynd 8.8). Nú er risin öld mannsins „mannöld“ (e. anthropocene). Jarðvegsrof sem maðurinn stuðlar að fjarlægir efsta og frjósamasta lag jarðvegsins þar sem mest er af lífrænum efnum. Við það lenda ófrjósamari neðri lög eða jafnvel berg á yfirborðinu. Maðurinn hefur einnig víðtæk áhrif á jarðvegsmyndun með því að ráða því hvers kyns gróður er á yfirborðinu með ræktun, beit, skógrækt o.s.frv. Þá hylja mannvirki gríðarleg flæmi sem annars væru hulin jarðvegi, sem hefur margháttuð áhrif á vistkerfi og vatnshag á stórum skala, eins og rætt var um í 4. kafla.

Mynd 8.8. Risafura í Sierra Nevada-fjöllunum í Kaliforníu. Þessi tré eru á meðal elstu lífvera jarðar og þau mestu að rúmmáli, þyngd og hæð. Þau eru táknmynd fyrir samspil gróðurfars, loftslags, tímans og moldarinnar. Hér hefur moldin séð þessari lífveru fyrir vatni og næringu í þúsundir ára. Risafurur eru nú í hættu vegna loftslagsbreytinga.

8.1.5. Tíminn

Moldin er lengi að öðlast flest þau einkenni sem notuð eru til að greina á milli jarðvegsgerða. Að vísu geta sumir eiginleikar þróast á fáum áratugum, t.d. söfnun lífrænna efna í A-lag, en flest önnur einkenni eins og leirrík Bt-lög þurfa árþúsundir og jafnvel hundruð þúsunda ára til að mótast að fullu (mynd 8.9).

Það er mikilvægt að hafa í huga að leir tekur ekki að falla út í B-lögum fyrr en öllu kalki hefur verið skolað niður úr B-laginu, en sá ferill getur tekið hundruð ára þar sem kalk er til staðar í móðurefnum. Við það að kalsíumrík jarðvegslausn skolast niður myndast svokölluð Ck-lög (eða Cca, þ.e. Ca^{++} fellur út í C-laginu).

Öldungana í hópi jarðvegsflokka er að finna á gömlum meginlandsskjöldum hitabeltisins, ekki síst í Afríku, Ástralíu og Suður-Ameríku. Þar eru ál- og járnsteindir orðnar ríkjandi þáttur moldarinnar, eins konar endastöð efnaveðrunar. Fjallað er um jarðvegsgerðir í kaflanum hér á eftir.

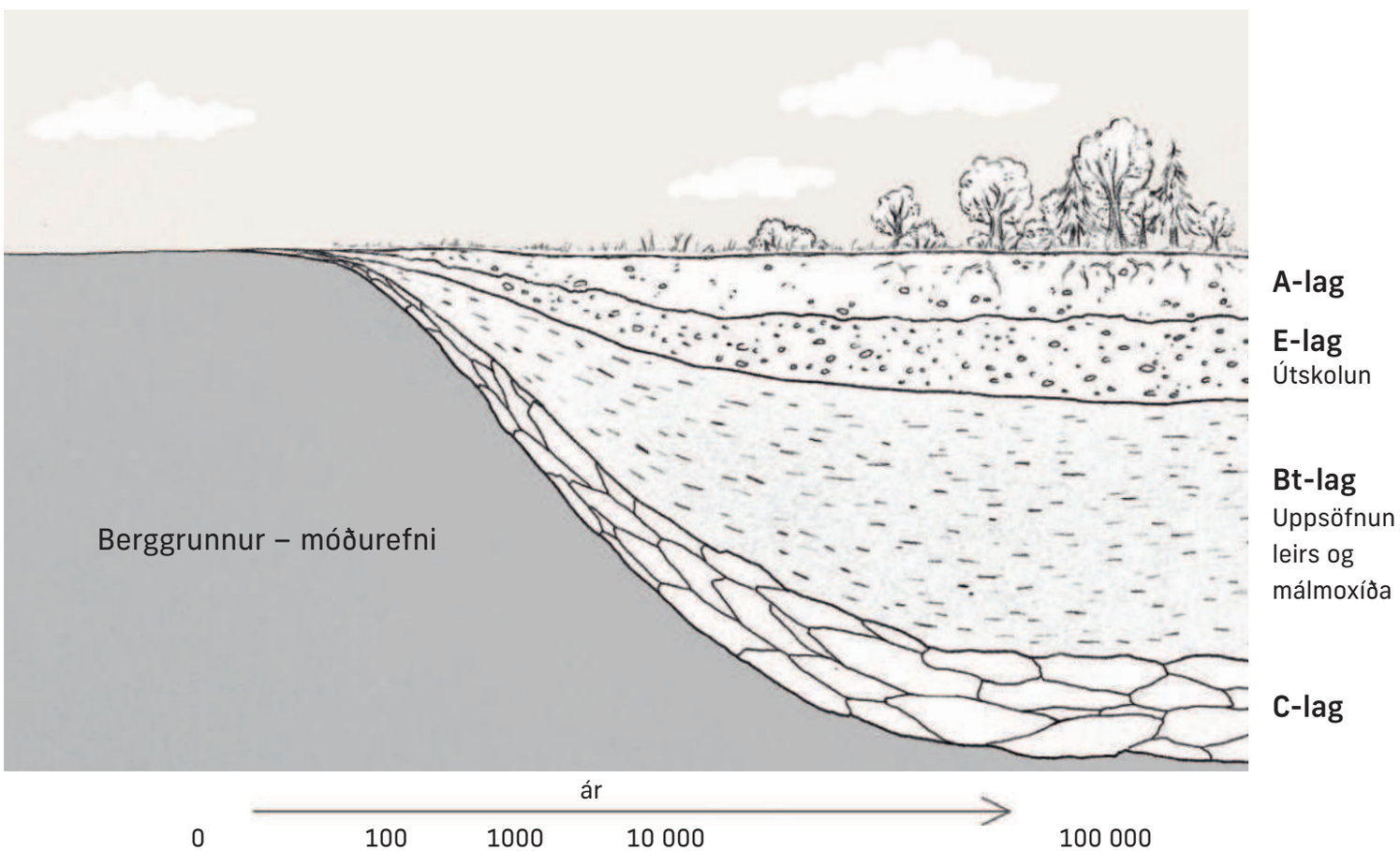
Þar sem jökull gengur yfir land hrærir hann saman yfirborðsefnunum í einn allsherjar graut (sjá umfjöllun um löss hér að ofan) en þegar hann hörfar hefst jarðvegsmyndun á ný í jökulurðinni. Því eru unglingarnir í hópi jarðvegs mjög útbreiddir á öllum þeim svæðum sem ísaldarjökullinn gekk yfir eða þar sem þykk áfokslög lögðust yfir yfirborðið frá jaðri meginlandsjöklanna. Þessar aðstæður eru megineinkenni norðurhluta Evrópu, Bandaríkjanna og alls Kanada.

Jarðvegur er einnig alla jafna ungur í bröttum hlíðum (fjalllendi) og á flóðasléttum, sem og á virkum eldfjallasvæðum. Því hefur ungur jarðvegur mjög mikla útbreiðslu. Á þessum svæðum getur jarðvegsmyndun verið allör og moldin frjósöm, jafnframt því að vera laus í sér á flóðasléttum líkt og á lösssvæðunum. Enda urðu slík svæði fyrst til þess að vera brotin til ræktunar – þar reis menningin.

8.2. Helstu ferli

Hér á undan var rætt um umhverfisþætti sem móta þróun jarðvegs. Hvaða breytingar eiga sér stað ofan í moldinni við jarðvegsmyndun? Segja má að það séu fimm meginferli sem eigi sér stað:

1. **Bergefni leysast upp vegna efnaveðrunar.**
2. **Ný efni myndast í jarðveginum (leirsteindir).**
3. **Efni bætast við jarðveginn, einkum lífræn efni.**
4. **Efni færast til í jarðveginum, bæði í upplausn (jónir, örefni) og fyrir tilverknað lífvera.**
5. **Rask: áfok, flóð og önnur setmyndun geta hlaðið nýjum bergefnum við jarðveginn en rof veldur tapi á moldarefnum.**



Mynd 8.9. Tíminn er meginþáttur fyrir skilning á þróun jarðvegs. A- og O-lög myndast á fáum árum eða áratugum. Þúsundir ára tekur að mynda þykk E- og Bt-lög.

8.2.1. Veðrun bergefna og útskolun

Bergefni veðrast mjög misjafnlega hratt. Frumsteindir sem einkenna basískar bergtegundir veðrast mun hraðar en þær sem eru í kísilríku bergi (t.d. í líparíti og graníti). Ólivín veðrast langhraðast af þeim frumsteindum sem teljast algengar. Ólivín er einmitt ein helsta steindin í íslensku basísku storkubergi. Veðrunarsteindir, þær steindir sem verða til síðar við veðrun á bergi og við jarðvegsmyndun – steindir á borð við leirsteindir í jarðvegi, eru mun stöðugri. Leirsteindir eru þó mjög misjafnlega stöðugar og eru ál- og járn-leirsteindir þær sem eru stöðugastar (mynd 8.10).

Kísill (Si), ál (Al), járn (Fe) og kalsíum (Ca) eru algengustu frumefnin í flestu móðurbergi (ásamt O og H). Í vel þroskuðum jarðvegi hefur stór hluti þeirra efna sem mynduðu móðurefnin, þ.e. voru fyrir í jarðveginum við „upphaf jarðvegsmyndunar“ horfið vegna efnaveðrunar. T.d. geta >80% af hinu upprunalega kalsíum og mörgum öðrum efnum verið horfin úr moldinni, enkalsíum, natríum og kalí hverfa hvað hraðast úr jarðveginum. Kísill minnkar hlutfallslega mun hægar og það er yfirleitt mikið af honum í flestum tegundum móðurbergs. Sé verulega tekið að ganga á kísilinn er jarðvegurinn orðinn mjög veðraður: ál- og járn-leirsteindir taka þá við.

Veðrunarhraðinn er m.a. háður yfirborðsflatarmáli, efnasamsetningu og kristalbyggingu steindanna. Á mynd 8.10 hér að ofan sést að leirsteindir veðrast hægast en kalk og basísk gjóska hvað hraðast, eins og áður hefur komið fram. Veðrunin étur sig smám saman inn í frumsteindirnar, það losna úr þeim efni, sum hverfa burt úr moldinni með vatni en önnur mynda ný efnasambönd, kristallast og mynda þannig ný efni í moldinni: leirsteindir.

Mynd 8.10. Kalsít og gjóska veðrast hraðast – ekki síst basísk gjóska hérlendis. Leirsteindir eru hinsvegar stöðugar gagnvart veðrun.

Hraða og eðli efnaveðrunar er að mestu leyti stýrt af sýrustigi, lífrænum efnum og Eh en hitastig og raki eru einnig mikilvægir áhrifaþættir. Efnaveðrun er örari við lágt pH-gildi vegna tæringareiginleika H^+ og lág afoxunarspenna hefur sömu áhrif; efni sem eru stöðug við hærri pH-gildi og afoxunarspennu geta orðið óstöðug og leysast upp við lægra pH-gildi.

Lífræn efni örva einnig veðrunina þar sem lífrænar sýrur tæra bergið. Og vitaskuld þarf ekki að fara í grafgötur með það að mikið af þeim efnaferlum sem hér er um rætt fara fram í vatni: rakaástandið er afar mikilvægt. Þannig getur tugþúsunda ára gamalt yfirborð basalthrauns verið lítið veðrað en tiltölulega ung hraun verið með djúpan jarðveg þar sem er bæði rakt og hlýtt, t.d. á Havaíeyjum og í Brasilíu. Veðrun er yfirleitt áköfust rétt neðan yfirborðs

þar sem áhrifa lífríkis og andrúmslofts gætir hvað mest. Þar leysast bergefnin smám saman upp og sumum jónunum sem áður voru í steindunum skolar neðar í moldina og jafnvel niður úr henni. Kvars veðrast hvað hægast af frumsteindunum og getur því safnast fyrir í efri hluta jarðvegsins og myndað kvarsríkt jarðvegslag (E-lag, sjá umfjöllun um jarðvegslög í 7. kafla) (mynd 8.11). Þetta ferli er kallað **útskolun** (e. eluviation). Jarðvegur með útskolunarlagi (E-lagi) er oft litríkur, með dökku lífrænu yfirborðslagi, en síðan tekur við ljósleitt E-lag en rauðleit leirrík Bt-lög þar fyrir neðan.

8.2.2. Innskolun

Þau efni sem leysast upp í A- og E-lögunum berast niður í B-lagið og enn neðar eftir aðstæðum. Stór hluti álsins og járnsins fellur út með súrefni (O) og hýdroxíði (OH^-) í B-laginu sem leirsteindir. Þar sem kísill er ennþá í kerfinu fellur hann einnig út (kristallast) með álinu sem álsilíköt á borð við smektít og kaólínít. Þetta er oft ráðandi ferli í myndun jarðvegs og því er leirríkt B-lag notað sem helsta greiningareinkenni margra jarðvegsgerða. Ferlið er nefnt **innskolun** (e. illuviation). Leirrík moldarlög neðan A- og E-laga eru oft nefnd „argillic horizon“, sem er jarðvegslag sem hefur auðgast af leir. Slíkt lag er einkennt sem Bt (t fyrir „ton“ sem er leir á þýsku, sjá mynd 8.12).

Rétt er að hafa í huga að önnur ferli en útskolun efna í lausn sem falla út eða kristallast sem leirsteindir geta útskýrt leir í Bt-lögum. Leirinn getur að hluta

Mynd 8.11. E-lög í jarðvegi myndast við útskolun efna svo eftir situr ljóslitað lag sem einkum er litað af kvarsi – sem hefur ekki ennþá orðið veðrun að bráð. E-lög geta verið afar þykk þar sem jarðvegur er gamall, einkum í lauf- og barrskógum.
Mynd: USDA/NRCS.

Mynd 8.12. Innskolun og myndun Bt-lags. Efni í efri lögum moldarinnar leysast upp við efnaveðrun og kristallast síðan sem leirsteindir í neðri lögum. Oft myndast þá kubbslaga bygging – jafnvel eins konar stöplar, ekki síst þar sem mikið er af smektítleir.
Mynd: USDA/NRCS.

til verið myndaður á staðnum en svo eru margir jarðvegsfræðingar sem telja að hluti hans hafi skolast niður úr efri lögum (e. lessivage, clay translocation), sjá Birkeland (1999 bls. 112–113) og Bartoli o.fl. (1995), en hlutdeild þessa ferlis í myndun Bt-laga er umdeild. Bandarískir moldarfræðingar gera yfirleitt ráð fyrir að leirinn myndist í Bt-laginu við innskolun á efnum sem mynda leirinn, en niðurskolun á leir er oftar talin til ferla í Evrópu.

Í *eldfjallajörð* eru það allófan, ímógólít, ferrihýdrít og halloysít sem eru aðalsteindirnar sem myndast. Það leiðir þó yfirleitt ekki til þróunar Bt-lags á sama hátt og þar sem blaðsilíköt kristallast, heldur falla þær út í sama lagi og þar sem gjóskan var áður, að því er talið er, m.a. vegna mikils styrks áls og kísils sem rekja má til örrar veðrunar. Ekki er ljóst hvort þeim skoli að einhverju marki niður í neðri lög eftir að leirinn myndast (e. clay translocation), sem er áhugavert rannsóknarefni hér á landi, en hafa verður í huga að allófan-leirinn er yfirleitt bundinn í siltklasa sem eru líklega ekki mjög hreyfanlegir. Einnig væri fróðlegt að vita hvort binding allófans og ferrihýdríts við lífræn efni tefji fyrir niðurskolun leirsins.

8.2.3. Mikið veðraður jarðvegur

Smektít er iðulega einkennissteind í frekar ungum jarðvegi, ásamt illíti og vermikúlíti, (2:1 steindir, kísill í tveimur tetrahedra-kristaleiningum, sjá 2. kafla um bergefni) en kaólínít er að finna í eldri jarðvegi þar sem verulega er farið að ganga á kísilinn vegna veðrunar (1:1, Al í oktahedra og Si í tetrahedra). En við frekari efnaveðrun á löngum tíma hverfur kísillinn einnig að mestu og eftir sitja hreinar járn- og/eða álsteindir í jarðveginum (oktahedra-grindur og járnsteindir í ýmsu formi). Þessar steindir hafa sömuleiðis orðið til við það að móðurefni hafa leyst upp og nýjar steindir myndast. Í mikið veðruðum jarðvegi er lítið eftir af upprunalegum efnum móðurbergsins. Títon (Ti) og zirkon (Zr) veðrast þó að mjög litlu leyti úr jarðveginum og eykst þá hlutfall þeirra miðað við önnur efni sem gengur á forðann hjá. Því má nota þessi efni til viðmiðunar til að reikna út hve mikið af öðrum efnum hefur tapast úr kerfinu. Ef Ti var t.d. 0,2% í upprunalega berginu en er komið upp í 1% í moldinni, sem er fimmföld aukning, er ljóst að stór hluti móðurefnanna hefur veðrast burt sem þessu nemur og stærð heildarmengisins ennfremur minnkað að sama skapi eða fimmfalt. Semsagt: önnur efni hafa tapast úr moldinni.

Það báxít sem notað er við vinnslu áls í álverksmiðjum hér á landi sem annars staðar er myndað við uppsöfnun á áli í moldinni á meðan önnur bergefni veðrast í burtu. Einnig geta myndast mjög járnrík lög í jarðvegi sem hafa mjög sérstaka eiginleika (t.d. „laterít“ og harðpönnur úr járni, svonefnt „plinthít“), eins og síðar verður vikið að þegar fjallað er um jarðvegsflokka.

8.2.4. „Podzolization“, myndun *barrskógajarðar*

Fljótlega eftir að skipulegar rannsóknir hófust á jarðvegi tóku menn eftir sérstæðri lagskiptingu í jarðvegi undir barrskógum (mynd 8.13). Efst var gjarnan mjög lífrænt lag með rotnandi barrnálum en skammt neðan yfirborðs vel aðgreint ljóst E-lag. Fyrir neðan E-lagið tók við húmus-ríkt B-lag (Bh) áður en eiginlegt Bt-lag tók við. Þar sem barrnálar sýra jarðveginn er veðrun nokkuð áköf. Jafnframt er móðurefnið iðulega kísilsýruríkt (granít) og því mikið af kvarsi í kerfinu. Mikil veðrun stuðlar að því að flest efni nema kvars leysast upp í A-laginu, þannig að til verður E-lag en leirsteindir falla út í Bt-laginu. Örsmáar lífrænar sameindir berast í gegnum sendið E-lagið og

Mynd 8.13. *Barrskógajörð* með þykku E-lagi. Mynd: Erica Micheli / European Soil Bureau – Joint Research Center.

falla út rétt neðan þess (Bh-lag). Þetta leiðir til þess að jarðvegurinn er oft litríkur. Myndun *barrskógajarðar* er vinsælt rannsóknarefni.

8.2.5. Harðpönnur og móhellur

Einstök jarðvegslög geta límst saman í jarðveginum og myndað eins konar harðpönnur eða hellur sem hafa mikil áhrif á eiginleika jarðvegsins. Slíkar pönnur hamla flæði vatns um moldina og geta lokað á rótarvöxt. Það eru einkum járn, kísill og málm-húmus-knippi sem líma jarðveginn saman en einnig smektít og aðrar leirsteindir.

Stökk móhella (e. fragipan) er tiltölulega þykk (>15 cm) harðpanna sem er stökk þegar jarðvegurinn er þurr, en það losnar um hana þegar jarðvegurinn er bleyttur upp. Stökkar móhellur eru gjarnan límdar saman með járni. Móhellunni á Íslandi hefur verið lýst sem „fragipan“, en þó er ekki víst að hún falli undir þessa skilgreiningu, enda komast þær ekki við hjá því að blotna. Rannsóknir benda til þess að grjóthörð móhella á Suðurlandi sé einkum límd saman af smektíti. Mjög svipuð lög finnast í gjóskulögum í jarðvegi á Asoreyjum (sjá 10. kafla um *eldfjallajörð*).

„Placic-jarðvegslag“ er þunnt og límt saman með járni og lífrænum efnum.

Mynd 8.14. Harðpanna (móhella) í jarðvegi á Suðurlandi til vinstri en brot úr harðpönnu úr jarðvegi í Mýrdal til hægri.

Slík lög eru trúlega algeng í íslenskum jarðvegi þar sem járn fellur út á lagmótum og annað lagið er mun sendnara en hitt (t.d. gjóskulag).

„Duripan“ er samlíming úr kísli. Hér á landi má finna hana í ljósum gjóskulögum úr Heklu þar sem hún er e.t.v. að verða til. Slíkar harðpönnur eru algengar á eldfjallasvæðum erlendis þar sem kísilrík gjóska fellur til jarðar.

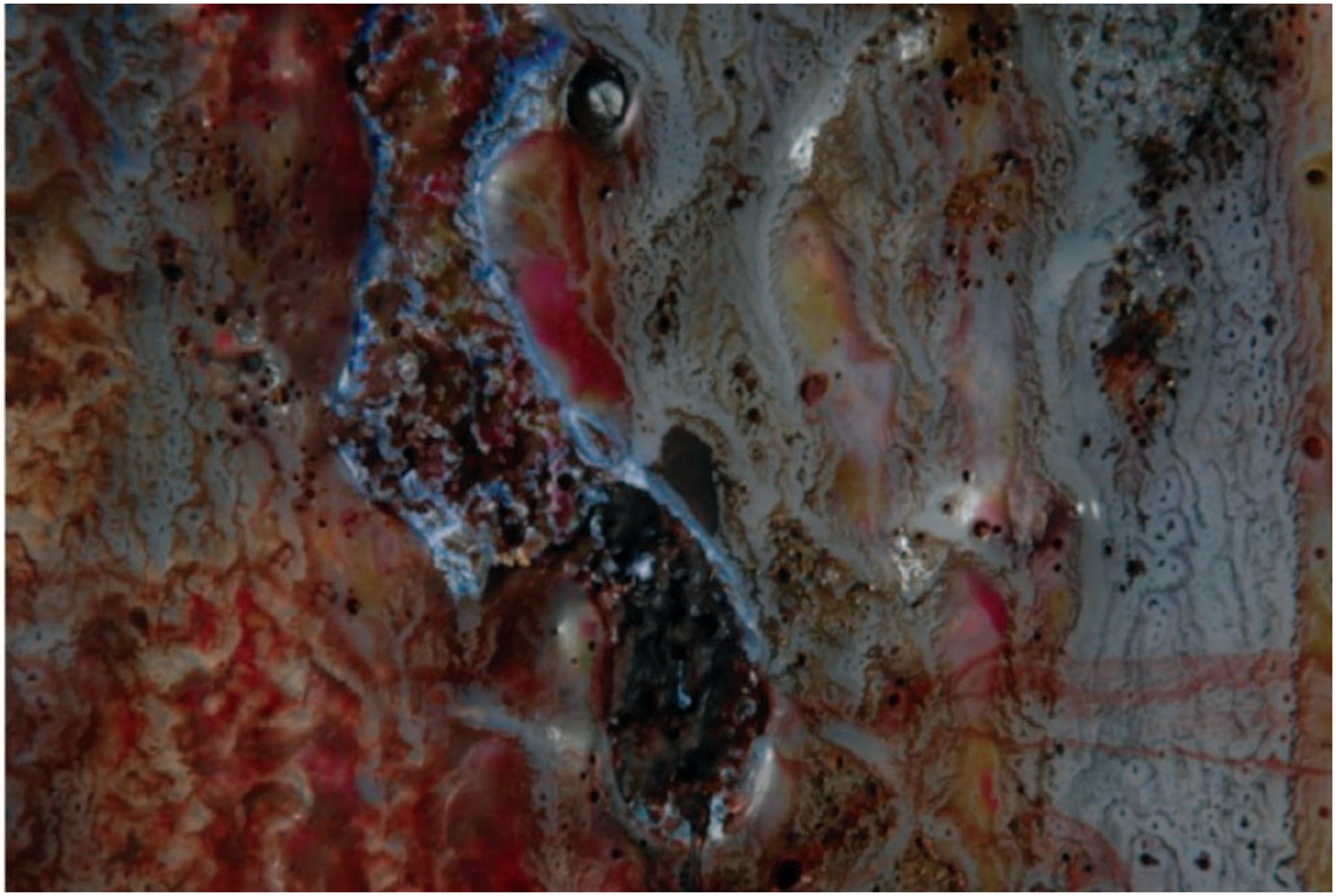
8.2.6. Uppsöfnun lífrænna efna

Moldin er undirstaða lífs á landi og þangað safnast lífræn efni – hún er grafreitur lífvera og miðstöð hringrásar lífsins. Um þetta er fjallað í kaflanum um lífræn efni. En rétt er að hafa það í huga að uppsöfnun lífrænna efna getur verið eitt meginferli jarðvegsmyndunar, ekki síst í upphafi, t.d. við frumframvindu vistkerfa. Einnig eru ákveðnar jarðvegsgerðir sem einkennast af uppsöfnun lífrænna efna, ekki síst *mójörð* og *eldfjallajörð*.

Ákveðnar raka- og loftslagsaðstæður stuðla að uppsöfnun lífrænna efna – aðstæður sem hamla rotnun. Það á við þar sem súrefnisþrýstingur er lágur í votlendum og þar sem kuldi hamlar rotnun, enda eru mómýrar heimskautasvæðanna einstaklega ríkar af lífrænu efni. Við þessar aðstæður getur myndast margra metra þykk mómold (mynd 8.15) þar sem safnast hefur geypilegt magn lífrænna efna (jafnvel >200 kg/m^3).

Stöðugt áfok viðheldur þessu ferli í íslenskri *eldfjallajörð,* sem veldur því að lífræn efni grafast smám saman í moldinni og hún getur orðið ansi þykk. Ofnýting í landbúnaði, bæði af völdum akuryrkju og beitarnota, minnka hins vegar lífræn efni í jarðveginum.

Mynd 8.15. Uppsöfnun lífrænna efna getur myndað afar þykkan lífrænan jarðveg á þúsundum ára. Ferlið hefur í för með sér myndun sérstakrar jarðvegsgerðar: *mójarðar*, en á eldfjallasvæðum eins og hér á landi myndast einnig þykk lífræn *eldfjallajörð* eins og *svartjörðin* sem hér er sýnd.



Mynd 8.16. Jarðvegsmyndun. Myndverk eftir Veronique Maria. „Jarðvegsfræðiprósi“ (fyrir neðan) þar sem mörg þeirra ferla og fræðiheita sem hér hefur verið fjallað um koma fyrir. Veronique Maria og ÓA (2019).

OLD AGE

Ancient civilisation
with eons of
experience
red and rich in clay
lacking youthfulness
leached and
consumed
tired

DEVELOPMENT

Parent material
making of a soil development
by energy and life time

Dissolution of solids
ions floating in water
leaching
elements making bonds
precipitation of creation
tetrahedra houses of silica
octahedra buildings of aluminium
the endless vistas of the
phyllosilicate
clay – the produce of soil
Argillic horizon – the world of clay

A quest for energy
treaty with the Kingdom of Plants
provision of green fuel
for its untold numbers of workers
soil biota
in exchange for water and nutrients

Prosperity is founded on
cooperation
and trade
everyone benefits
equality
society – culture.

Home.

Heimildir

Arnold, R.W. 1983. Concepts of soils and pedology. Í: L.P. Wilding, N.E. Smeck og G.F. Hall (ritstj.), Pedogenesis and Soil Taxonomy I. Concepts and Interactions. Elsevier, Amsterdam, Holland. Bls. 1–21.

Bartoli, F., G. Burtin, J.J. Royer, M. Gury, V. Gomendy, R. Philippy, Th. Leviandier og R. Gafrej 1995. Spatial variability of topsoil characteristics within one silty soil type. Effects on clay migration. Geoderma 68:279–300.

Birkeland, P.W. 1999. Soils and Geomorphology. 3. útg. Oxford University Press, New York, USA.

Ducafour, P. 1977. Pedology. Pedogenesis and Classification. George Allen and Unwin, London, UK.

Jenny, H. 1941. Factors of Soil Formation. McGraw-Hill, New York, USA.

Ólafur Arnalds, Elín Fjóla Þórarinsdóttir og Fanney Ósk Gísladóttir 2019a. Sandauðnir, sandfok og ryk á Íslandi – I. Sandar og fok. Náttúrufræðingurinn 89:35–47.

Ólafur Arnalds, Pavla Dagsson-Waldhauserová og Sigmundur Helgi Brink 2019b. Sandauðnir, sandfok og ryk á Íslandi – II. Áfok og ryk. Náttúrufræðingurinn 89:132–145.

van Breemen, N. og P. Buurman 2002. Soil Formation. Kluwer, Dordrecht, Holland.

Veronique Maria og Ólafur Arnalds 2019. Soil Genesis. A Dialogue for Creation. Í: A. Toland, J.S. Noller og G. Wessolek (ritstj.), Dialogues on Soil and Art in the Anthropocene. CRC Press/Francis Taylor, New York. Bls. 127–135.

Wilding, L.P., N.E. Smeck og G.F. Hall (ritstj.) 1983. Pedogenesis and Soil Taxonomy. Elsevier, Amsterdam, Holland.

Eftirmáli

Innblástur eftirfarandi kvæðis var teikning Tish Herrish fyrir meistaraverkefni Ólafs Arnalds. Myndina má sjá í 5. kafla (mynd 5.2).

PARTY IN THE B HORIZON

There is a party goin' on here
And all we need is you
All pedogenic friends who care
And little calcans too.
It's a party in the B horizon
Sometimes known by another name
Party in the B horizon
Anything but plain.

Once a homogenous mass,
Just like the other dirt.
Time and weathering came along.
No, it doesn't hurt.
It's a party in the B horizon
Sometimes known by another name
Diagnostic as life itself
Never stays the same

Come to our fete, but don't expect
Old friends to understand.
We've got language all our own
It's part of the plan
It's a party in the B horizon
Come on down and dance with clay.
It won't be here for long.
Before she goes away.

Ann Pfordresher-Stanton / Ólafur Arnalds

9 Moldin er misjöfn – helstu jarðvegsflokkar heimsins

Mynd 9.1. Jarðvegssúlur (e. soil monoliths) af fjölbreytilegum jarðvegsgerðum í safni University of Idaho í Bandaríkjunum – en aðeins lítill hluti safnsins sést á myndinni. Þessi kennslustofa er afar vinsæl fyrir kennslu í listtengdum fögum auk moldarfræða. Mynd: Ása L. Aradóttir.

9.1. Flokkun jarðvegs

Moldin er flókin veröld lífs og efnasambanda – heimur sem er afar breytilegur frá einum stað til annars.

Það er mjög mikilvægt að skipuleggja þekkingu mannsins á jarðvegsauðlindinni, greiða fyrir samskiptum á milli vísindamanna, menningarheima og landsvæða og ekki síst að auðvelda flutning á þekkingu á mold á milli svæða. Til þess er nauðsynlegt að flokka jarðveginn. Flokkun jarðvegs er þrepaskipt, efsta þrepið safnar saman jarðvegi sem hefur svipaða eiginleika en á neðri þrepunum er ýmsum einkennum sem skilgreina hverja jarðvegsgerð lýst ítarlegar.

Í þessum kafla er fjallað um flokkun jarðvegs og helstu jarðvegsflokka heims. Af því tilefni eru kynnt ýmis hugtök sem þeim tengjast og vikið að sögu jarðvegsflokkunar, sem er t.a.m. gott veganesti til að öðlast skilning á þeim mismun sem er á milli jarðvegsflokkunarkerfa og margra þeirra hugtaka sem notuð eru við flokkun á jarðvegi. Fyrri hluti þessa kafla er að nokkru leyti hliðstæður texta sem var birtur í grein í *Náttúrufræðingnum* um flokkun íslensks jarðvegs (ÓA og Hlynur Óskarsson, 2009).

Jarðvegsheiti voru lengst af óalgeng í skrifum um íslenska náttúru. Að baki hverju hugtaki er ákveðin skilgreining sem lýsir eiginleikum moldarinnar. Víðast hvar erlendis eru þessi heiti jarðvegsflokka rituð með upphafsstaf til að leggja áherslu á sérstöðu þeirra (t.d. Andosol) en almenn lýsandi heiti, t.d. mýrajarðvegur, eru þá rituð með litlum staf. Hér verður notuð sú hefð að skrifa heiti jarðvegsflokka með skáletri í samræmi við það sem sett var fram í áðurnefndri grein ÓA og Hlyns Óskarssonar (2009).

Notaður er upphafsstafur þegar um er að ræða alþjóðaheitin (t.d. Podzol) en lítill stafur fyrir íslenska jarðvegsflokka (t.d. *eldfjallajörð*) í samræmi við íslenska stafsetningarhefð.

9.2. Þróun flokkunarkerfa

Flokkun moldar má telja sem eina undirgrein jarðvegsfræðinnar sem leitast við að koma skipulagi á þekkingu manna á jarðvegsauðlindinni. Uppruna flokkunarinnar má rekja til frumkvöðlastarfs Rússa á seinni hluta 19. aldar þar sem áhersla var lögð á tengsl loftslags og jarðvegsgerða.

Sú flokkunarfræði þróaðist áfram í Bandaríkjunum og endaði með svokallaðri Zonal-flokkun jarðvegs árið 1938 (Baldwin o.fl. 1938). Mörg hugtök sem notuð eru í dag um jarðveg má rekja til þessa kerfis. Flokkunarfræðin stóðu síðan með miklum blóma langt fram eftir síðustu öld, ekki síst samhliða þróun á nýju viðamiklu flokkunarkerfi í Bandaríkjunum (US Soil Survey Staff, 1999; Wilding o.fl., 1983a,b).

Þetta kerfi nefnist „Soil Taxonomy“ og er notað víða um lönd og hefur auk þess lagt drjúgan skerf til undirstöðu annarra flokkunarkerfa, m.a. flokkunarkerfis FAO – WRB (IUSS, 2006, 2014), ýmist ritað hér sem WRB/FAO eða WRB. Fjallað verður um flokkun á íslenskum jarðvegi síðar.

Við flokkun jarðvegs nú á tímum er almennt leitast við að styðjast við mælanlega eða auðþekkjanlega þætti moldarinnar. Það hefur verið ríkjandi skoðun að farsælt sé að flokka jarðveg með því að nota vísilög (e. diagnostic horizons), sem eru jarðvegslög með ákveðin greiningareinkenni sem unnt er að skilgreina á grunni mælanlegra eiginleika. Ennfremur er æskilegt að

vísilögin endurspegli myndunarsögu jarðvegsins (e. soil genesis), sbr. klassískar greinar Cline (1949) og Arnold (1983) sem mikið er vitnað til.

Dæmi um slík greiningareinkenni og vísilög er „spodic horizon“ (Soil Taxonomy og WRB/FAO-kerfin) sem eru oft einkennandi fyrir jarðveg barrskóga og notuð til að skilgreina sérstakan flokk jarðvegs (Podzols eða Spodosols – *barrskógajörð* hjá okkur). „Andic“ jarðvegs- eða sortueiginleikar (Soil Taxonomy, WRB) eru notaðir til að skilgreina „Andosol“-jarðveg (*eldfjallajörð*), einkennismold Íslands.

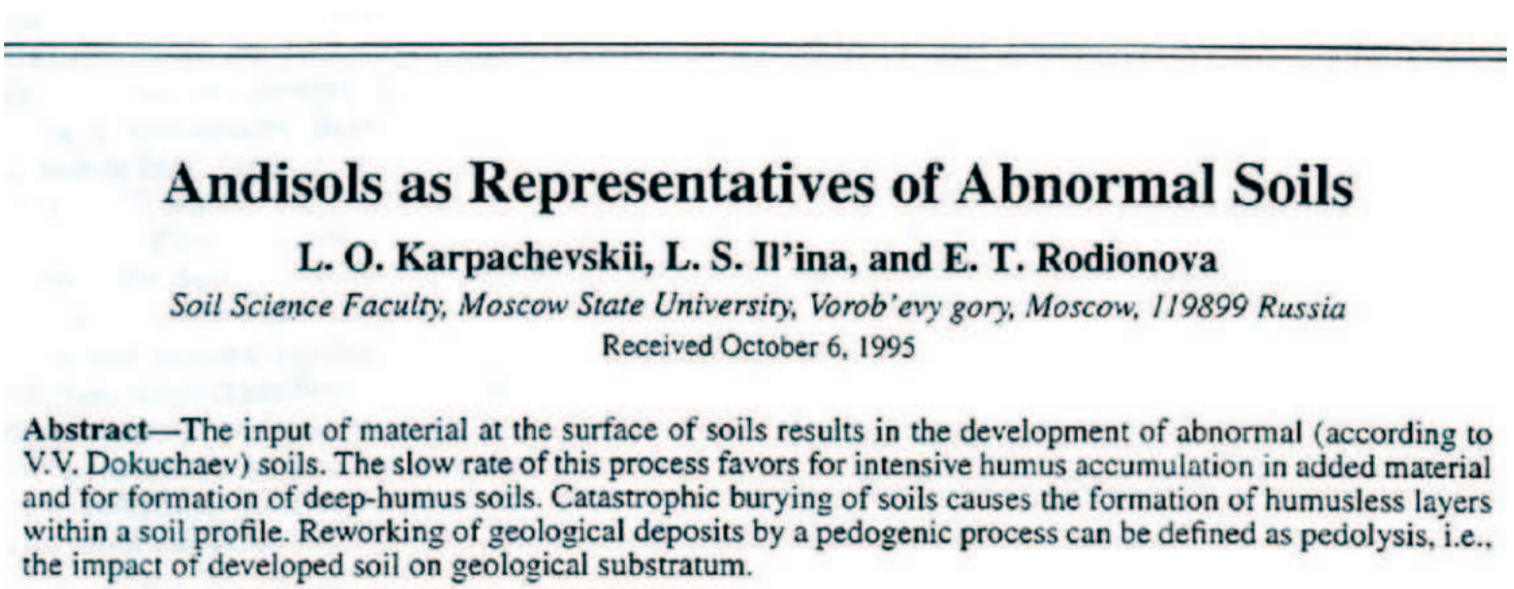
Í upphafi þróunar á flokkunarkerfum fyrir meira en 100 árum var reynt að fylgja sem mest þeirri kennisetningu að loftslag og gróðurfar væru helstu þættirnir sem mótuðu þróun jarðvegs (svokallaðir Zonal-flokkar jarðvegs, jarðvegsgerðir fylgja beltaskiptingu í náttúrufari jarðar) en aðrir þættir á borð við landslag, móðurefni (bergefni) og tímann (aldur jarðvegs) valdi síðan breytileika innan kerfisins (Intrazonal-flokkar; fylgja ekki beltaskiptingu jarðvegs).

Þetta reyndist ekki nóg og til varð þriðja „fylkingin“, jarðvegur án skýrra jarðvegslaga (Azonal). Íslenskur jarðvegur passaði einna best þar inn, þ.e. sem Azonal-jarðvegur. Orðfæri í tengslum við þessar jarðvegsflokkanir varð nokkuð sérstakt og þess sér enn stað í rússneskum vísindaskrifum, t.d. um *eldfjallajörð*, sbr. mynd 9.2.

Með þróun á nýju bandarísku kerfi var alfarið horfið frá þessum hugmyndum, en ummerki þeirra sjást ennþá víða í mörgum flokkunarkerfum, ekki síst í nafngiftum. Nöfn sem Rússar gáfu jarðvegi eru ennþá mjög áberandi – nöfn á borð við Podzol (WRB, jarðvegur einkennandi fyrir barrskógasvæði, sjá hér á eftir) og Chernozem (jarðvegur einkennandi fyrir gresjur Sovétríkjanna). Bandaríkjamenn (Soil Taxonomy) endurbættu nafnakerfin til muna og margt sem þeir þróuðu hefur síðan verið tekið upp eftir þeim af öðrum, m.a. í WRB/FAO-kerfinu. Almennt má segja að við mótun nafngifta sé reynt að nota hugtök sem lýsa tilteknum eiginleikum jarðvegs en ekki ytri aðstæðum á borð við jarðfræði, loftslag eða gróðurfar, en jarðvegurinn mótast þó vitaskuld af þeim.

Jarðvegssnið – einstaklingurinn

Jarðvegssnið eru yfirleitt undirstaða flokkunar, eins konar grunneining jarðvegs. Við flokkun á jarðvegi er kappkostað að taka mið af ráðandi eiginleikum, þeim sem hafa áhrif eða tengjast sem flestum öðrum þáttum (e. accessory properties).



Andisols as Representatives of Abnormal Soils

L. O. Karpachevskii, L. S. Il'ina, and E. T. Rodionova

Soil Science Faculty, Moscow State University, Vorob'evy gory, Moscow, 119899 Russia

Received October 6, 1995

Abstract—The input of material at the surface of soils results in the development of abnormal (according to V.V. Dokuchaev) soils. The slow rate of this process favors for intensive humus accumulation in added material and for formation of deep-humus soils. Catastrophic burying of soils causes the formation of humusless layers within a soil profile. Reworking of geological deposits by a pedogenic process can be defined as pedolysis, i.e., the impact of developed soil on geological substratum.

Mynd 9.2. Dæmi um skrif um *eldfjallajörð* (Andisol) í rússnesku vísindatímariti. Hér er *eldfjallajörðin* dæmi um afbrigðilegan (abnormal) jarðveg, þ.e. hann fellur ekki að beltaskiptingu gróðurs og loftslags. Fengið úr Eurasian Soil Science 29, bls. 309.

9.3. Helstu flokkunarkerfi heims

Tvö alþjóðleg flokkunarkerfi hafa hlotið langmesta útbreiðslu. Það er annars vegar Soil Taxonomy (US Soil Survey Staff, 1999), sem er tiltölulega einfalt og lýsandi á efstu stigum kerfisins en verður ítarlegt og flókið eftir því sem moldinni er lýst nánar.

Hugmyndafræði Soil Taxonomy hefur haft mikil áhrif á þróun flestra annarra flokkunarkerfa, sem fyrr sagði. Hins vegar er um að ræða flokkunarkerfi FAO, alþjóðasamtaka jarðvegsfræðinga (IUSS), og fleiri alþjóðlegra stofnana sem er skammstafað WRB (stendur fyrir „World Reference Base"). Fyrsta útgáfa þess er frá 1998 (FAO-UNESCO, 1998) en ný útgáfa leit dagsins ljós 2014 (IUSS, 2014) þar sem m.a. er tekið tillit til íslensks jarðvegs við flokkun *eldfjallajarðar*.

Gallinn við bandaríska kerfið frá íslenskum sjónarhóli er sá að stærsti hluti íslensks jarðvegs flokkast sem sami jarðvegurinn langt niður flokkunarkerfið (Vitricryands). Af öðrum flokkunarkerfum má t.d. nefna það nýsjálenska, kanadíska, rússneska og franska.

Við skrif á þessum kafla um helstu jarðvegsflokka heims stóð valið um að nota WRB- eða Soil Taxonomy-kerfið. Það varð úr að styðjast við hið bandaríska Soil Taxonomy því að það hefur færri flokka á efsta stiginu sem hentar fyrir stutta umfjöllun á borð við þá sem hér fer á eftir. Jafnframt eru þessum flokkum gefin íslensk heiti.

WRB hefur mun fleiri flokka á efsta þrepi kerfisins, sem flækir umfjöllun af þessu tagi til muna, og reyndar er umtalsvert flækjustig á kerfinu þegar jarðvegur er flokkaður meira niður. Hartemink (2015) gerði könnun á notkun flokkunarkerfa sem sýndi vel að Soil Taxonomy og WRB væru útbreiddustu kerfin. Þekking á einu kerfi hefur þó í för með sér að auðvelt er að kynna sér önnur hliðstæð kerfi – hér er lögð áhersla á að lesandinn fái yfirsýn yfir mismunandi jarðveg jarðar með fremur einföldum hætti.

Það færist þó í vöxt að nota hugtök sem tengjast eiginleikum við skrif um mold en ekki eiginleg jarðvegsfræðileg hugtök, ekki síst á sviði lífvísinda – hugtök á borð við „landbúnaðarjarðveg",

Mynd 9.3. Forsíður að lyklum fyrir helstu flokkunarkerfi heimsins. Ný útgáfa WRB til vinstri en eldri útgáfan fyrir miðju, Soil Taxonomy til hægri. Á kápu WRB er m.a. mynd af íslenskum jarðvegi fyrir miðju.

„votlendisjarðveg“, „dalamold“ o.s.frv. Þetta getur verið til baga því slík hugtök eru oft og tíðum harla merkingarlaus, en að sumu leyti er þetta því að kenna að mörg flokkunarkerfi fyrir mold og hugtök sem þeim fylgja eru of flókin.

9.4. Soil Taxonomy

Fyrsta útgáfan af Soil Taxonomy leit dagsins ljós 1961 og var hún kölluð „the 7th Approximation“. Fyrsta heildarútgáfan kom út 1975 (Soil Survey Staff 1975) en síðan hefur kerfið verið í stöðugri endurskoðun, sem m.a. hefur leitt til þess að tveir nýir jarðvegsflokkar hafa bæst við kerfið: *eldfjallajörð* (Andisol) og *frerajörð* (Gelisol). Í töflu 9.1 er listi yfir nöfnin í Soil Taxonomy en einnig íslensku heitin sem notuð eru hér að neðan.

Á neðri stigum kerfisins erfist hluti heitisins á efsta stigi, t.d. -and fyrir Andisol *eldfjallajörð*, -ox fyrir Oxisols, -id fyrir Aridisols, -oll fyrir Mollisols o.s.frv., eins og dæmin hér fyrir neðan gefa til kynna. Vísilög eru notuð til að flokka jarðveginn á þessu efsta stigi flokkunarinnar. Á næsta þrepi ræður loftslag miklu (loftslagsflokkar, t.d. kalt loftslag: e. cryic).

Tafla 9.1. Efsta stig Soil Taxonomy-kerfisins og sú þýðing á jarðvegsflokkum sem er notuð hér.

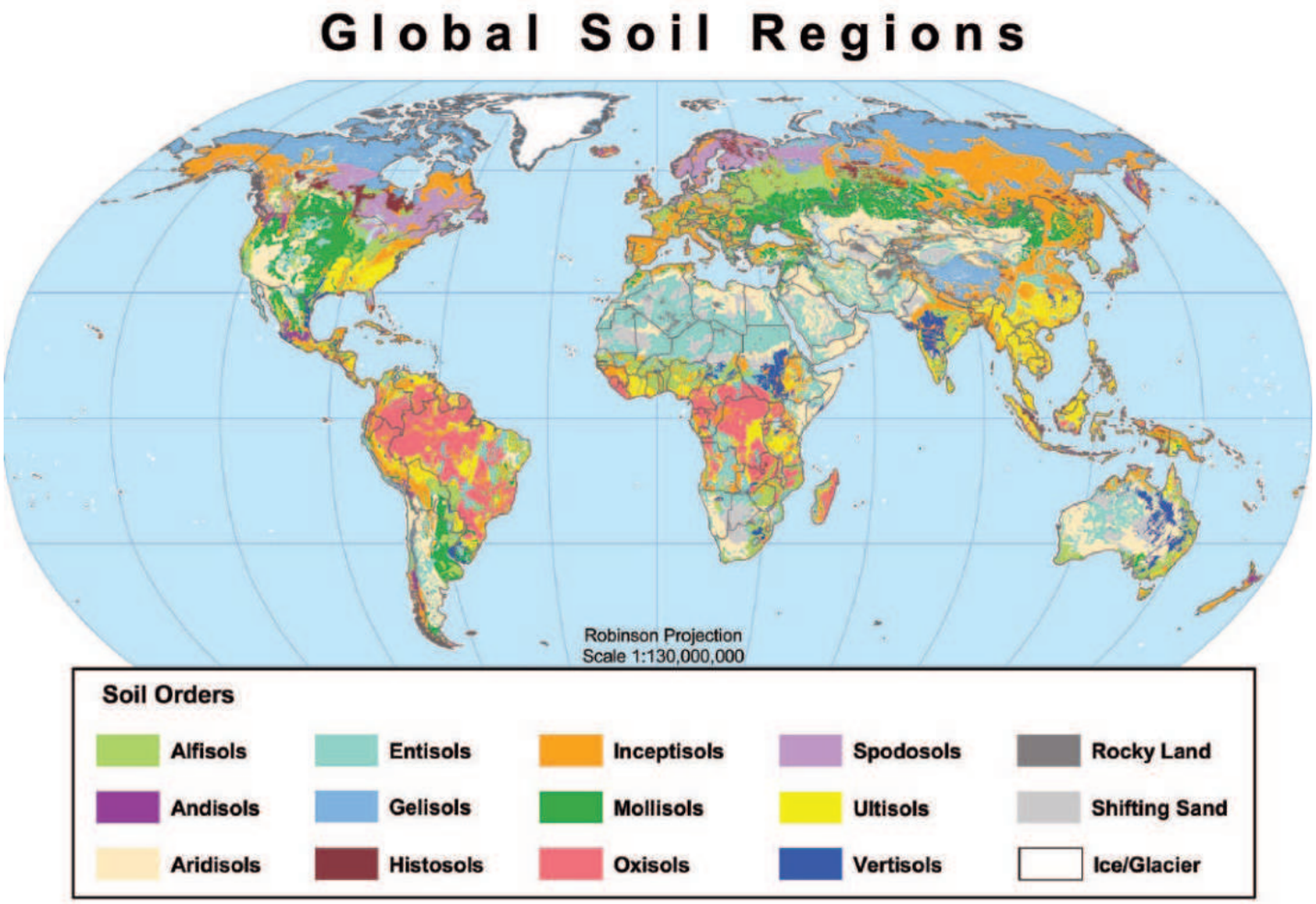
ENSK HEITI	ÍSLENSK HEITI
Gelisols	Frerajörð
Histosols	Mójörð
Spodosols	Barrskógajörð
Andisols	Eldfjallajörð
Oxisols	Hitabeltisjörð
Vertisols	Leirjörð
Aridisols	Eyðimerkurjörð
Ultisols	Heittempruð jörð
Mollisols	Graslendisjörð
Alfisols	Laufskógajörð
Inceptisols	Ungjörð
Entisols	Frumjörð

Stærsti hluti Íslands fellur undir„cryic“-loftslag; hér er jarðvegurinn Andisol svo að íslenskur jarðvegur fellur að stórum hluta undir Cryand, þ.e. kalda *eldfjallajörð*. Áherslan á loftslag endurspeglar áherslu á landbúnað og ræktun, en möguleikar til ræktunar á hinum ýmsu tegundum er einkum háð loftslagsþáttum (sé nóg af vatni og næringu í jarðveginum). Síðan er rakastig jarðvegsins tekið til skoðunar, en takmarkist jarðvegurinn ekki af kulda (Cryand) ræður rakastigið (frá blautri til þurrar *eldfjallajarðar*: Aquand, Udand, Ustand, Xerand). Þar á eftir koma ýmsir aðrir jarðvegsþættir, t.d. fyrir *graslendisjörð* og *eyðimerkurjörð*: Argiustoll (fremur þurr *graslendisjörð* með Bt-lagi (e. argillic horizon) og Arigid (*eyðimerkurjörð* með Bt-lagi).

Engin ástæða er til að velta sér upp úr öllum þessum smámunum nema að nauðsyn beri til í vísindalegum samskiptum eða ef einlægur áhugi skyldi kvikna (höfundi finnast þetta t.d. býsna skemmtileg fræði). Aðalatriðið er að jarðvegsflokkunin er afar skipuleg og eftir því sem neðar dregur í þrepaskipt kerfið fást æ meiri upplýsingar um moldina sem auðvelt er að ráða í, sé til staðar grunnþekking á kerfinu.

9.4.1. *Frumjörð* (Entisol)

Í upphafi jarðvegsmyndunar er aðeins óveðrað bergefnið (móðurefnið) til staðar. Slíkt efni myndar þó eigi að síður jarðvegsyfirborð – lítið þróaður jarðvegur sem fær heitið *frumjörð*. Aðstæður geta ennfremur verið með þeim hætti að jarðvegsmyndun sé afar hæg, jarðvegurinn er því óþroskaður í langan tíma og ber fyrst og fremst svipmót bergefnanna.



Mynd 9.4. Gróft jarðvegskort af heiminum samkvæmt Soil Taxonomy. Forsíðumynd bókarinnar „Keys to Soil Taxonomy".

Jarðvegssnið í *frumjörð* einkennist af A-C-jarðvegslögum og oft er lítið um lífræn efni í A-laginu. Fjörusandar og sandeyðimerkur Sahara teljast til *frumjarðar* að stórum hluta (en ekki íslensku sandauðnirnar, eins og síðar er fjallað um). Þessi jarðvegur hefur oftast mjög takmarkaða hringrás næringarefna og vatns, lífrænu efnin skortir og ef jarðvegurinn er sendinn skortir vatnsheldni og nýtanlegt jarðvegsvatn. En með vatnsmiðlun á borð við áveitur og með áburðargjöf er iðulega auðvelt að fá góða uppskeru úr slíkum jarðvegi, sem er raunin víða um heim.

Frumjörð þekur ansi stóran hluta jarðaryfirborðsins (16% lands), m.a. vegna þess hve sandyfirborð eyðimarkanna er víðáttumikið. *Frumjörð* er einnig algeng á flóðasvæðum og í bröttum hlíðum, hraunum og fjalllendi sem stendur hátt (hæg jarðvegsmyndum og mikið rof). Súr gjóska (hátt SiO_2-innihald, oft mjög stór eldgos) veðrast ennfremur hægt í þurru eða köldu loftslagi og telst *frumjörð* í langan tíma (oft þúsundir ára) eftir gjóskufallið samkvæmt erlendum flokkunarkerfum.

9.4.2. *Ungjörð* (Inceptisol)

Það sem einkennir þennan jarðveg er tilvist Bw-lags (e. cambic horizon; gelgjulag). Hér er jarðvegsmyndun komin vel af stað en skýrt afmörkuð jarðvegslög þroskaðrar moldar eru ekki til staðar.

Flokkurinn er afar fjölbreytilegur og er að því leyti hálfgerð ruslakista fyrir jarðvegstegundir sem passa ekki annars staðar. *Ungjörð* er jarðvegur fjalllendis og flóðaslétta þar sem rask er algengt og því verður moldaryfirborðið ekki mjög gamalt. *Ungjörð* er einnig jarðvegur

á köldum svæðum þar sem hægir á jarðvegsmyndun vegna kuldans. Þessi jarðvegsflokkur er talinn þekja um 10% þurrlendis. Í upphafi var *eldfjallajörð* talin sem undirflokkur *ungjarðar* og flokkaðist sem Andept.

9.4.3. *Eyðimerkurjörð* (Aridisol)

Eyðimerkurjörð er jarðvegur eyðimerkursvæða, eins og nafnið ber með sér. Eyðimerkur eru ákaflega útbreiddar á jörðinni og þessi jarðvegsgerð er talin þekja um 13% þurrlendis. Það er mikilvægt að hafa í huga að gróður er umtalsverður í yfirborði flestra eyðimarka nema þeirra allra þurrustu eða þar sem sandur verður ríkjandi yfirborðsgerð (m.a. sandöldur), sem þá teljast reyndar frekar til *frumjarðar*. Það sem einkennir þennan jarðveg fyrst og fremst er skortur á úrkomu. Uppgufun veldur því að katjónir á borð við Ca^{++} eru við yfirborðið og sýrustig er hátt (>7, oft nálægt 8).

Takmarkað er af lífrænum efnum í yfirborðinu miðað við t.d. *graslendisjörð* vegna örrar rotnunar og skertrar ljóstillífunar og A-lagið er því mun ljósara en í öðrum jarðvegsgerðum. Sökum þess hve sölt eru ofarlega í jarðveginum og uppgufun mikil eru ekki skilyrði fyrir myndun leirlags (Bt). Því er athyglisvert að víða hefur *eyðimerkurjörðin* Bt-lag (Argids) sem hefur þá myndast við önnur loftslagsskilyrði en nú ríkja, t.d. á ísaldartímanum. Ef gróðurhulan er takmörkuð fjarlægir vindrof oft fínefnin svo að eftir situr malaryfirborð sem nefnist „desert pavement“ (eyðimerkurmöl; auðnaskrápur). Það er oft grábláleitt vegna þess að örverur hafa unnið járn og mangan úr moldinni og litað yfirborð steinanna („desert varnish“ – „auðnalakk“).

9.4.4. *Graslendisjörð* (Mollisols)

Graslendisjörðin er hin dökka mold gresjunnar og einn mikilvægasti jarð-

Viðkvæm vistkerfi

Eyðimerkurvistkerfi eru aðlöguð að þurrkum og að nýta vel þá litlu úrkomu sem til fellur. Hins vegar er áveitur víða að finna þar sem *eyðimerkurjörð* er ríkjandi, sem er þá frjó mold ef rétt er staðið að vatnsveitunni og vatnsgæði eru góð. Annars er hætta á uppsöfnun salta (m.a. NaCl) í yfirborðinu, sem getur í því tilfelli eyðilagt vistkerfið algjörlega.

Stór hluti vistkerfa með *eyðimerkurjörð* er notaður til beitar, en þessi kerfi hafa víða þróast með hóflegri beit villtra dýra um þúsundir ára þar sem hún er hluti vistkerfanna. En vegna takmarkaðrar næringar og vatns eru kerfin vandmeðfarin og stór landflæmi af þessum toga hafa beðið óbætanlegan skaða vegna ofbeitar eftir að búfé var flutt inn á þau og einnig með stjórnlausri útbreiðslu ágengra tegunda, t.d. í Bandaríkjunum, Ástralíu, Austur-Asíu og Afríku.

Framleiðslugetan er takmörkuð, t.d. skortir nitur sem þarf að framleiða með jarðvegsskán og jarðvegsörverum. Því er framleiðnin iðulega háð heilbrigðri jarðvegsskán sem er mjög viðkvæm fyrir traðki beitardýra (sjá Belnap, 2003). Með hnignandi gróðurhulu hafa þessi svæði orðið æ meiri uppsprettur rykmengunar í heiminum.

Mynd 9.5. Sendinn jarðvegur. Mynd: NRCS/USDA.

Mynd 9.6. Eyðimörk og „auðnaskrápur" (e. desert varnish). Kofa-fjöll í suðvesturhluta Arizona í Bandaríkjunum. Líparít og kalksteinn eru dökklituð af manganhúð en ljósari mold er undir.

vegsflokkurinn á jörðinni með tilliti til fæðuframleiðslu. Hana er að finna á fremur þurrum svæðum þar sem úrkoma er þó nóg til að viðhalda graslendinu en þurrt loftslagið stuðlar að góðu næringarástandi (katjónir) og sýrustigi (yfirleitt >6). Gnótt lífrænna efna safnast fyrir í yfirborðslögunum, basamettun er >50%, jarðvegurinn hefur góða samkornabyggingu o.s.frv. Einnig skiptir það máli að mikið af *graslendisjörðinni* hefur þróast í útbreidd áfokslög (lösslög) kaldtempraða beltisins, bæði á norðurhveli (Bandaríkin og Mið-Evrópa til Asíu um Kasakstan, Úkraínu og Rússland) og á suðurhveli (t.d. sléttur Argentínu). Segja má að *graslendisjörðin* liggi á belti milli *eyðimerkurjarðar* og *laufskógajarðar* (Alfisols).

Graslendisjörð má kalla kornforðabúr jarðar, en þó fyrst og fremst í Evrópu og Norður-Ameríku. *Graslendisjörðin* er talin þekja um 6% þurrlendis jarðar. Hún tekur yfir allmarga flokka WRB, svo sem Chernozems sem er algengt heiti á hinni frjóu jörð gresjunnar. Vegna þess hve frjósöm hún er hefur nánast hver fermetri hennar verið brotinn til ræktunar. Í fyrstu þurfti engan áburð á meðan gengið var á mikinn næringarforða sem var til staðar í moldinni. Í BNA er nú reynt að vernda þau fáu óröskuðu vistkerfi gresjunnar sem eftir eru, en sem áður voru ákaflega útbreidd.

9.4.5. *Laufskógajörð* (Alfisols – meðalþróuð jörð)

Mynd 9.7. Aquolls og Udolls (*graslendisjörð*). Dökk, rök, lífræn og frjósöm *graslendisjörð*. Þessi akur er í Norður-Dakóta (BNA) rétt vestan við hin rakari laufskógabelti (sunnar) og barrskógabelti (norðar) sem ríkja síðan allt austur til strandar Atlantshafsins. Löss-bergefni eru undir. Mynd: Ása L. Aradóttir.

Laufskógajörð (Alfisols) er meðalveðraður jarðvegur, basamettun er lægri en í *graslendisjörð* og A-lagið er ljósara og inniheldur minna af lífrænum efnum. *Laufskógajörð* er einkennandi fyrir kaldtemprað loftslag. Leirkennt Bt-lag hefur myndast með tímanum. Gott íslenskt orð vantar fyrir þennan jarðveg. Alfisols kemur fyrir í mörgum loftslagsbeltum, allt frá norðurhveli til hitabeltisins þar sem leirinn einkennist að hluta af ál- og járnsteindum („alf" í Alfisol er dregið af Al og Fe), en veðrunin er eigi að síður mun skemmra á veg komin en í *hitabeltisjörð* (Oxisol) og *heittempraðri jörð* (Ultisol). Þessi jarðvegur hefur mikla útbreiðslu fyrir sunnan barrskógabeltið í Evrópu og Bandaríkjunum. *Laufskógajörð* þekur um 10% alls lands og er almennt ágætur ræktunarjarðvegur enda þótt upphafleg frjósemi hennar sé allmiklu minni en *graslendisjarðarinnar*. Alfisols getur verið sendin jörð (jafnvel með E-lagi) og er þá hætt við jarðvegsrofi þegar hún er brotin til ræktunar.

9.4.6. *Heittempruð jörð* (Ultisols)

Frá *laufskógajörð* færist umfjöllunin um jarðveg heimsins að meira veðruðum eða þróuðum jarðvegi þar sem basamettun er orðin lág og oftast fremur lítið af lífrænum efnum í A-laginu. „Ulti" í heitinu Ultisol er dregið af „ultimate" (endastöð) sem gefur til kynna að moldin hafi þróast á enda og fái ekki viðbætur vegna jöklunar, foks eða af öðru raski. E-lagið er stundum þykkt en Bt-lagið einkennist gjarnan af kaólíníti. Ál- og járnsteindir eru einnig áberandi og jarðvegurinn er rauðlitaður. Þó eru ennþá til staðar steindir sem viðhalda meiri jónrýmd en finnst í *hitabeltisjörð*. Þessi jarðvegstegund er ákaflega útbreidd beggja vegna miðbaugs, ekki síst í suðausturhluta Bandaríkjanna og Suðaustur-Asíu, en útbreiðsla á jörðinni er um 8,5% þurrlendis.

Heittempruð jörð (Ultisol) þróast yfirleitt í fremur röku loftslagi (sbr. útbreiðsluna) og finnst á gömlu yfirborði sem ekki hefur orðið fyrir afgerandi raski. Hún er gjarnan hulin laufskógi sem iðulega er grænn árið um kring þar sem yfirborðinu hefur ekki verið raskað (mynd 9.8). Þessi jarðvegsgerð er notuð til ræktunar á mörgum mikilvægum ræktartegundum, t.d. soja- og pálmolíum, en gæta þarf þess að bæta við lífrænum efnum í jarðveginn og áburðarþörf getur verið mikil.

9.4.7. *Hitabeltisjörð* (Oxisols)

Hér er átt við mikið veðraða mold hitabeltisins utan eyðimerkursvæðanna. Jarðvegur hitabeltisins, þar sem rask á borð við eldgos eða fellingafjallamyndun er ekki til staðar, einkennist af járn-

Mynd 9.8. Hinir stórfenglegu Iguazu-fossar á landamærum Brasilíu og Argentínu falla fram af þykkum basalthraunstafla (t.v.). Yfirborðið er hulið regnskógi (e. Atlantic rainforest). Moldin á svæðinu hefur verið að þróast á þessu undirlagi mjög lengi, jafnvel í milljónir ára. Myndast hefur djúp *heittempruð jörð* og *hitabeltisjörð* (Ultisol og Oxisol) með hinum dæmigerða rauða lit (t.h). Skógurinn hefur verið fjarlægður af stórum svæðum í þágu landbúnaðar (t.h.) en víða er unnið að endurheimt þeirra og endurheimt líffjölbreytileika (skógur í bakgrunni).

Næring í *hitabeltisjörð*

Hitabeltiskerfin einkennast oft af því að nær öll lífrænu efnin í kerfinu eru í ofanjarðarhlutanum, þ.e. gróðrinum. Þau lífrænu efni sem falla til, t.d. við það að lauf, greinar og tré falla til jarðar, eru brotin hratt niður og berast aftur inn í lífkerfið.

Lítil næring er geymd að staðaldri í moldinni þar sem jónrýmdin er lítil. Slíkur jarðvegur er vitaskuld afar viðkvæmur fyrir raski á borð við akuryrkju því fljótt gengur á lífræna forðann.

Að ekki sé talað um ef regnskógurinn er brenndur til að skapa ræktarland – þá tapast stór hluti þeirra næringarefna sem safnað hefur verið í kerfið á löngum tíma nánast í einni svipan. Þess vegna er algengt að nota ýmiss konar skiptirækt á slíkum svæðum og láta kerfið jafna sig á milli.

og álsteindum. Kaólínít kemur einnig fyrir, en steindir með mikla jónrýmd (t.d. smektít) hafa veðrast og brotnað niður; kísill (Si) hefur veðrast að stórum hluta út úr kerfinu. Leirhlutfallið er oftast hátt, jónrýmdin afar lítil en jarðvegurinn djúpur (hefur verið lengi að þróast). Náttúrulegt vistkerfið er oftast regnskógur en inn á milli er *heittempruð jörð* (Ultisols) og fleiri jarðvegsflokkar. *Hitabeltisjörðin* hylur aðeins hluta hitabeltisins.

Hitabeltisjörð er fremur stöðug og auðvelt að rækta hana með áburðargjöf. Sums staðar hagar því þannig til að járnríkur jarðvegurinn, sem helst rakur meira og minna árið um kring í röku hitabeltisloftslaginu, harðnar ef hann nær að þorna og blotna á víxl þegar skógurinn er felldur. Gerist það er jarðvegurinn nánast ónýtilegur á eftir.

Dæmi um slíkar harðpönnur er víða að finna sunnan Sahara-eyðimerkurinnar þar sem loftslag hefur verið rakara á öldum áður, t.d. á ísöld. Þessi járnríku lög í jarðveginum (bæði í *heittempraðri-* og *hitabeltisjörð*) eru jafnframt notuð til þess að móta í múrsteina, eitt algengasta byggingarefnið í heiminum. Þar sem álsteindin gibbsít safnast fyrir myndast vinnanleg jarðlög sem notuð eru í áliðnaði (báxít).

9.4.8. *Barrskógajörð* (Spodosols)

Í kaflanum um jarðvegsmyndun var fjallað um ferlið „podzolization“ sem einkennir myndun *barrskógajarðar*. Sá jarðvegur er iðulega nokkuð sendinn með sendnu E-lagi undir yfirborðinu, Bh-lagi þar fyrir neðan og síðan Bt-lagi. Jarðvegssnið í *barrskógajörð* er því alla jafna litríkt með skýrum andstæðum, dökku yfirborðslagi, ljósu E-lagi, dökku Bh-lagi og rauðbrúnleitu Bt-lagi (sjá mynd 9.10).

Jarðvegurinn er yfirleitt súr, sem stafar m.a. af því að *barrskógajörð* myndast iðulega í kísilríku móðurbergi (hátt í SiO_2, lágt í bösum sem viðhalda hærra sýrustigi) en barrnálarnar virka ennfremur sýrandi á jarðveginn. Þó er rétt að halda því til haga að *barrskógajörð* myndast einnig í lösslögum þar sem ákefð veðrunar í barrskóginum er mikil. Hið sendna E-lag verður til vegna mikillar veðrunar í yfirborðslögum, m.a. vegna lágs sýrustigs, sem leysir upp bergefni í þeim. Loftslagið er fremur kalt og rakt.

Dreifing *barrskógajarðar* er einkar athyglisverð en langsamlega stærstu svæðin er að finna í norðvestanverðri Evrópu (Noregur, Svíþjóð, Finnland

Mynd 9.9. Djúp *hitabeltisjörð* í Úganda. Í raun er moldin á þessum stað mun dýpri en hér sést. Mikið er af járn- og álsteindum í moldinni. Á þessu svæði er víða verið að þurrka mold til að búa til múrsteina.

og inn í Rússland vestan Úralfjalla og einnig í austanverðu Rússlandi) og norðaustanverðri Norður-Ameríku (Kanada og Bandaríkin) en einnig í Mið-Kanada og syðst í Suður-Ameríku. Heildarútbreiðslan telst ekki mikil (um 2,5% landsvæða jarðar).

9.4.9. *Leirjörð* (Vertisols)

Á mörgum stöðum á jörðinni hagar svo til að leirefni, sem að mestu er smektítleir, hafa safnast fyrir vegna setmyndunar þar sem stórfljót runnu til sjávar á einhverju skeiði í jarðsögunni. Við það hafa bergefnin, móðurefni jarðvegsins, orðið afar leirrík og þar myndast sérstæður jarðvegur: *leirjörð*. Í kaflanum um bergefni var rætt nokkuð um eiginleika smektítleirs.

Hann er afar smágerður og með gríðarlega mikið og virkt jarðvegsyfirborð (allt að 800 m²/g). Þessi leir getur tekið til sín feykilega mikið vatn en um leið bólgnar smektít-jarðvegurinn út, ekki ósvipað því sem gerist þegar jarðvegur frýs. Samloðun smektíts er afar mikil og þegar hann er vatnsmettaður er hann t.d. nánast ófær yfirferðar vanti gróðurhuluna (t.d. á ökrum), enda festist hann við allt yfirborð sem hann kemst í tæri við, svo sem skóbúnað eða hjólbarða. Þegar smektítleir þornar skreppur bilið á milli grunneininga leirsins saman og moldin harðnar og verður að lokum nánast eins og hart grjót. *Leirjörð* er af þessum sökum afar erfið í vinnslu, en er að öðru leyti frjósamur jarðvegur.

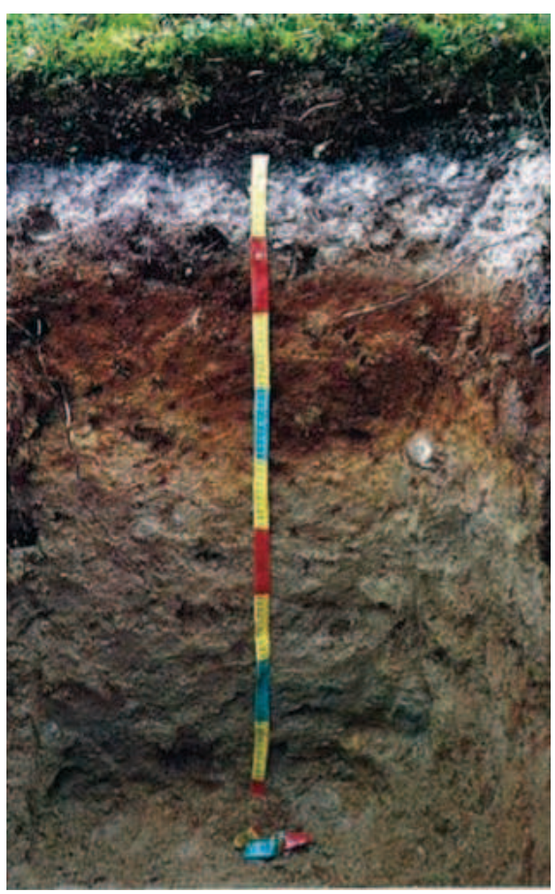
Í Bandaríkjunum er slíkur jarðvegur oft unninn með jarðýtum af stærstu gerð, en í þróunarlöndum hefur þróast tækni við ræktun sem lágmarkar jarðvinnsluna. Þegar jörðin verður vatnsmettuð og leirinn þenst út lokast fyrir ísig sem getur valdið yfirborðsrennsli, en þegar hann er þurr myndast sprungur í yfirborðið sem hleypa yfirborðsvatni mjög greiðlega inn.

Sökum útþenslu smektíts er slík jörð afar óhentugt burðarlag fyrir byggingar og vegi. Fjarlægja þarf yfirborðsmoldina og kalka jarðveginn vel til þess að smektítið þenjist síður út. Við náttúrulegar aðstæður myndast öldótt landslag, eins konar þúfur sem nefnast „gilgai“ (orðið kemur frá frumbyggjum Ástralíu og stendur fyrir polla sem myndast á milli „þúfnanna“ á slíku landi, samkvæmt færslu um gilgai á wikipedia). Vegir sem liggja um þessi svæði eru oft öldóttir og iðulega myndast holur í malbikið, líkt og þar sem óheppilegt burðarefni lendir undir samgöngumannvirkjum hérlendis.

Leirjörð er talin þekja um 2,5% landyfirborðs jarðar. Útbreiddustu svæðin eru á Indlandi, í Súdan, Ástralíu, Úrúgvæ, Chile og Texas í Bandaríkjunum.

9.4.10. *Frerajörð* (Gelisols)

Frerajörð (eða frostjörð) er jarðvegur sífrerasvæða á pólsvæðunum og hátt til fjalla þar sem frost fer aldrei úr jörðu.



Mynd 9.10. *Barrskógajörð* á norðurslóðum.
Mynd: Otto Spaargaren.

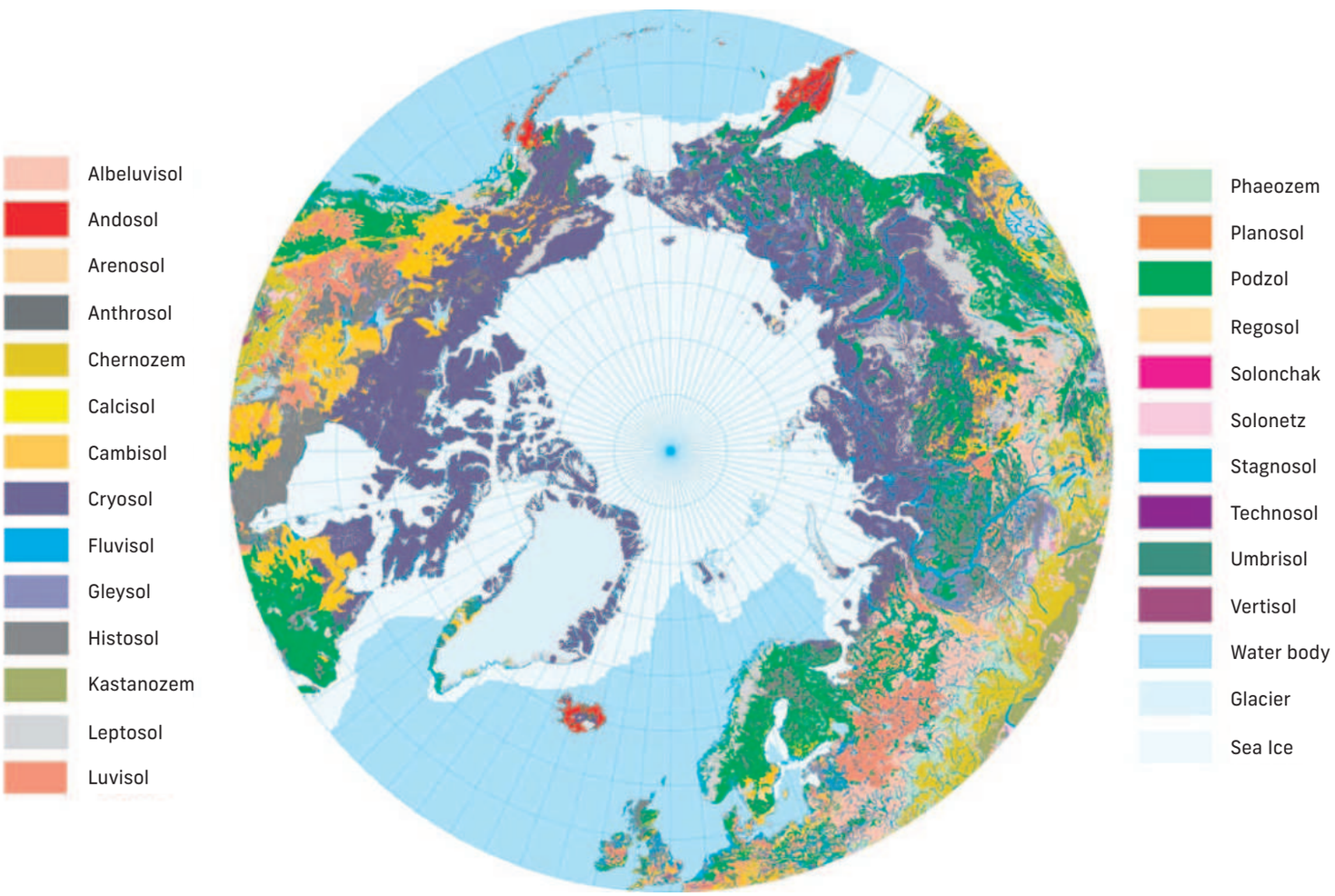
Sífreri er afar útbreiddur og talinn þekja um 9% lands á jörðinni (mynd 9.11). Hluti yfirborðsins þiðnar á hverju sumri, misþykkt lag eftir loftslagsaðstæðum. Lagið sem þiðnar er kallað „virka lagið“ (e. active layer). Gróður þrífst á yfirborðinu og hefur aðgang að næringarefnum og vatni í virka laginu sé hitastig sumarsins nægilega hátt til að gróður fái þrifist.

Mörg sífrerasvæði eru ákaflega þurr, t.d. í Kanada og Síberíu, en uppgufun er lítil og vatnsnýting góð. Þar sem sífrerinn hleypir takmörkuðu vatni niður fyrir holklakann myndast gjarnan afoxað ástand í moldinni og þar getur safnast fyrir mikið af lífrænum efnum. Þessi vistkerfi eru nýtt af stofnum dýra á borð við hreindýr sem halda norður á bóginn í alsnægtir á sumrin. Margir fuglastofnar eru ennfremur sérhæfðir í nýtingu heimskautasvæðanna og hlutar þeirra hafa viðkomu á Íslandi á leið sinni til og frá slíkum svæðum, m.a. gæsir.

Frerajörðin er vitaskuld mótuð af áhrifum kulferla (áhrif frosts og þýðu) sem mynda alls kyns fyrirbrigði í landslaginu og jarðvegssniðinu. Kulferli eru ennfremur afar mótandi í íslensku landslagi og því er fjallað um þau sérstaklega í öðrum kafla síðar.

Þar sem gróðurhula er til staðar á sífrerasvæðum hefur hún áhrif á hitastig í moldinni með því að einangra og jafna

Helstu flokkar jarðvegs á norðurhjaranum samkvæmt WRB



Mynd 9.11. Jarðvegur heimskautasvæðanna samkvæmt flokkun WRB. Útbreiðsla *frerajarðar* (Cryosols samkvæmt WRB) sést vel á korti með póllægri kortavörpun (blár litur), en takið einnig eftir *mójörð* (grár litur) og *barrskógajörð* (Podzols samkvæmt WRB, grænn litur). *Eldfjallajörðin* er rauð. Heimild: Circumpolar Soil Atlas, Jones o.fl. 2010.

þar með hitasveiflur. Þar sem gróðurhulan er rofin, t.d. með raski af völdum umferðar ökutækja, getur ísinn undir tekið að bráðna, sem veldur miklum spjöllum á vistkerfinu. Um leið getur jarðvegurinn tekið að þorna og þá fara lífrænu efnin að rotna (oxast), sem losar um mikið magn CO_2 og stundum metangas sem er mjög öflug gróðurhúsalofttegund.

Þetta ferli getur undið upp á sig þar sem sífellt meiri spjöll verða vegna tiltölulega lítils rasks í upphafi. Norðurslóðir hafa orðið fyrir hvað mestum áhrifum af völdum hlýnunar vegna loftslagsbreytinga á jörðinni og um leið losnar gríðarlegt magn gróðurhúsalofttegunda úr jarðvegi sem hraðar hlýnuninni. Því má segja að sífrerasvæði séu meðal viðkvæmustu vistkerfa jarðar. Vitaskuld eru einnig til víðfeðm pólsvæði þar sem gróðurhula er takmörkuð og sífreri í jörðu. Svo er trúlega einnig á hálendinu norðanlands, ofan u.þ.b. 1000 m hæðar.

9.4.11. *Mójörð* (Histosols)

Mójörðin er hluti af votlendisvistkerfum jarðar sem sannarlega teljast meðal mikilvægustu vistkerfa hnattarins. Samkvæmt almennri skilgreiningu er *mójörðin* jarðvegur með yfir 12% lífræns kolefnis (O-lög). Þó vex gildið fyrir % C sem þarf til að moldin teljist *mójörð* með leirinnihaldi og verður 18% C þar sem mikið er af leir, sbr. skilgreiningu á O-lögum. Einnig er undantekning hvað varðar *eldfjallajörð* sem getur innhaldið >20–25% C án þess að teljast *mójörð*. Sem fyrr sagði (sjá 7. kafla um jarðvegssnið) eru hin lífrænu efni ákaflega mismikið rotnuð, en víða á köldustu hlutum útbreiðslusvæðis *mójarðar* rotna þau afar hægt. Mómold er vinsæl söluvara fyrir pottaræktun. Rúmþyngd jarðvegsins er mjög lítil (vegna lífrænu efnanna, oft aðeins 0,1–0,3 g/cm³, sem þýðir að rými fyrir vatn er gríðarlega mikið (jafnvel >200% vatnsinnihald) og

Mynd 9.12. Orkuframleiðsla með mó í Finnlandi. Orkan er notuð til húshitunar og rafmagnsframleiðslu. Heildaraflið sem fengið er með móbrennslu í Finnlandi nemur nokkur hundruð MW. Framleiðslunni fylgir mikið rask á vistkerfum og gríðarleg losun gróðurhúsalofttegunda – hún er því mjög umdeild. Mynd: Wikipedia – opinn aðgangur (public domain).

jónrýmdin er ennfremur mikil. Jafnframt er efnið létt í flutningi sé það þurrt.

Dreifing þessarar jarðvegsgerðar er afar slitrótt en einna samfelldustu svæðin eru á heimskautasvæðunum sunnan sífrerasvæða, t.d. í Alaska, Kanada, Skandinavíu, Rússlandi og Suður-Ameríku, en heildarþekja er þó talin <1% af landyfirborði. Finnar búa yfir stórum svæðum sem teljast *mójörð*. Mór er unninn úr jörðu víða um heim og notaður sem orku- og hitagjafi, og svo hefur verið lengi, m.a. á Íslandi fyrr á öldum. Á krepputímum eða þegar tekur fyrir skipaflutning á olíu og kolum, t.d. þegar heimsstyrjaldir geisuðu í Evrópu, varð mórinn afar mikilvægur hitagjafi víða um lönd. Yfirleitt fylgir brennslu hans gríðarleg loftmengun. Vikið er að landbúnaðarnotkun votlendissvæða hér á eftir.

9.4.12. *Eldfjallajörð* (Andisols)

Jarðvegur sem myndast á eldfjallasvæðum öðlast afar sérstæða eiginleika, svokallaða „sortueiginleika“ (e. andic soil properties), sem veldur því að slíkur jarðvegur er flokkaður sérstaklega. Íslenskur jarðvegur er að

Ósjálfbær nýting votlenda

Með framræslunni er um leið raskað afar viðkvæmum vistkerfum sem hafa gildi langt út fyrir útbreiðslusvæði votlendisins, m.a. vegna áhrifa á dýralíf, vatnsmiðlun, hitamiðlun og næringarframboð í vatnakerfum o.s.frv.

Sjónir manna hafa því mjög beinst að afleiðingum röskunar á votlendisvistkerfum, ekki síst losun gróðurhúsa-lofttegunda. Setning í bók Weil og Brady 2017 er eftirtektarverð en þar er getið um að yfirborð *mójarðar* í kringum hús á Flórída hafi lækkað um 1,2 m á 60 árum, og þar segir „... but artificial drainage that lowers the water table and continually dries out the upper horizons is an unsustainable practice on any Histosol".

Með öðrum orðum, það er sama hver nýtingin er, hún getur aldrei talist sjálfbær á meðan gengið er á lífrænan forða votlendisins. Hugað verður að framræslu votlendis á Íslandi síðar í þessu riti (22. kafli).

meginhluta *eldfjallajörð* og er henni því gefið rúm í sérstökum kafla, jafnframt því sem fjallað er um íslenskan jarðveg síðar í ritinu.

9.5. Votlendisvistkerfi (*mójörð* og önnur votlendiskerfi)

Votlendi með minna en 12% C í yfirborðslögum eru skilgreind sem undirflokkar annarra jarðvegsgerða samkvæmt Soil Taxonomy að *frera-jörð* undanskilinni. Sem dæmi má nefna Aquolls (votlend *graslendisjörð*) og Aqualfs (votlend *laufskógajörð*). WRB skilgreinir votlendisjarðveg sem sérstaka jarðvegsgerð, Gleysols, sem að sumu leyti er eðlileg skipting, og þar með er unnt að halda utan um votlendi jarðar á efsta stigi flokkunarinnar.

Flest votlendi eru rík af lífrænum efnum, einnig þau sem ekki ná 12% C lágmarkinu fyrir *mójörð*. Mikil ástæða er til að gefa votlendisjarðvegi jarðar sérstakan gaum vegna mikilvægis hans á heimsvísu.

Víða um heim hefur votlendum verið raskað með framræslu. Við þekkjum þessa sögu vel á Íslandi, eins og síðar verður vikið að, en sem dæmi má nefna að um helmingur votlendis í Bandaríkjunum hefur verið ræstur fram (Weil og Brady, 2017). Við framræsluna kemst súrefni að hinum lífrænu efnum og þau taka að rotna – þau oxast og til verður CO_2. Þá verða nitur og önnur næringarefni sem bundin eru í jarðveginum aðgengileg og jörðin því mjög frjó. Það er því skiljanlegt að bændur allra tíma hafi seilst til þess ráðs að ræsa fram votlendi sér til viðurværis. En um leið og jarðvegurinn tekur að oxast gengur á auðlindina og yfirborðið getur hreinlega tekið að lækka. Lækkunin getur numið allt að 5 cm á ári í hlýju loftslagi og lækkun getur einnig átt sér stað hérlendis, samanber mynd 9.13.

Þessi rotnun á lífrænum efnum í moldinni losar gríðarlegt magn gróður-húsalofttegunda og er enn þann dag í dag meðal afkastamestu uppsprettna þeirra á jörðinni. Dæmi er um að land með margra metra þykkri *mójörð* sem ræst var fram fyrir einni öld eða svo sé orðið að þunnri skán á yfirborðinu, t.d. á Bretlandseyjum.

Mótekja í fjölbreyttum tilgangi (t.d. gróðurhúsamold) er stór atvinnuvegur sem stuðlar einnig að geigvænlegri

Mynd 9.13. Sig jarðvegs í kringum hús í Norðurmýri í Reykjavík vegna losunar kolefnis við framræslu jarðvegsins.

losun gróðurhúsalofttegunda. Mór er notaður til brennslu víða um heim, eins og áður sagði, og svo hefur verið lengi (mynd 9.14). Mótekja í þessu skyni er ennþá mjög mikil í Rússlandi, Finnlandi og víða í Kanada. Mótekja og brennsla mós er mjög hliðstæð notkun annars jarðefnaeldsneytis á borð við olíu en umhverfisáhrifin eru iðulega margfalt meiri vegna rasks á yfirborði og reykmengunar því mórinn er mun óhreinna brennsluefni en olía, gas og jafnvel kol.

Víða um heim er lögð vaxandi áhersla á verndun votlendiskerfa og t.d. er í gildi bann við frekari röskun votlendisjarðvegs í sumum ríkjum Bandaríkjanna. Þess vegna þarf að kenna nemendum á tæknisviðum að þekkja einkenni votlendisjarðvegs, m.a. afoxunareinkenni á borð við gráma, díla o.fl.

9.6. WRB – FAO-kerfið

Soil Taxonomy-flokkunin þykir nokkuð flókin í notkun þegar moldin er flokkuð ítarlega niður eftir kerfinu og hefur því hlotið margvíslega gagnrýni, enda þótt flestir séu sammála um að hinir fáu flokkar á efsta þrepi kerfisins séu mjög lýsandi og gagnlegir. Og það skal ítrekað að önnur kerfi byggjast mikið á þeirri grunnvinnu sem lögð var í Soil Taxonomy. Raunar eru tvö og jafnvel þrjú efstu þrep Soil Taxonomy yfirleitt auðveld í notkun. Það eru einkum neðri þrepin sem þykja erfið, eins og áður segir, og flokkunin krefst þá oft viðamikilla efnagreininga.

Alþjóðlegur hópur sem tengist Sameinuðu þjóðunum (Food and Agriculture Organization, FAO) og ýmsum alþjóðlegum samtökum jarðvegsfræðinga hefur smám saman verið að byggja upp annað kerfi sem er hugsað til notkunar hvar sem er í heiminum og á almennt að vera auðveldara í notkun. Það nefnist WRB-kerfið (sem stendur fyrir „World Reference Base“) og var minnst lítillega á það hér í upphafi þessa kafla. Alþjóðasamtök jarðvegsfræðinga (International Union for Soil Science) standa nú að baki kerfinu. WRB-kerfið hefur reynst vel á alþjóðavísu og heimskort og Evrópukort styðjast orðið að stórum hluta við þetta kerfi. Flokkar kerfisins á efsta þrepi eru mun fleiri en í Soil Taxonomy, sem gerir það erfiðara til að gefa einfalt yfirlit, t.d. við kennslu. Flokkunin byggist á um 40 vísilögum og getur hver flokkur haft mörg vísilög. Þar eru votlendi flokkuð sérstaklega sem „Gleysols“ (*votjörð*), sem er mikilvægt frávik frá Soil Taxonomy (*eldfjallajörð* þó undanskilin). Raunar er það svo að vinna er hafin við að búa til sérstakan flokk fyrir „Gleysols“ í bandaríska kerfinu.

Margir flokkar eru sameiginlegir með WRB og Soil Taxonomy, svo sem *leirjörð* (Vertisols), *frerajörð* (ST: Gelisols, WRB: Cryosols), *eldfjallajörð* (ST: Andisols, WRB: Andosols) og *ungjörð* (ST: Inceptisols, WRB: Cambisols). Reynt er að hafa samræmi á milli kerfanna, t.d. við flokkun *eldfjallajarðar*, þ.e. hvernig flokkarnir eru skilgreindir. Þó telur höfundur þessa rits að nú sé svo komið að WRB sé orðið flóknara í notkun en Soil Taxonomy, sbr. umfjöllun um flokkun íslensks jarðvegs.

Mynd 9.14. Mótekja í Laugarnesi í Reykjavík árið 1924. Mónum er hreykt á barmi mógrafarinnar þar sem hann þornar. © Peter J. Sörå /Ljósmyndasafn Reykjavíkur.

Heimildir

Umfjöllunin um jarðvegsflokka er að hluta til byggð á kennsluriti Weil og Brady (2017), Handbook of Soil Science (Huang o.fl., 2012) og Encyclopedia of Soil Science (Chesworth, 2008) en ítarlega umfjöllun um jarðvegsflokkana má finna i bókum Wilding o.fl. (1983a,b) um jarðvegsmyndun og Soil Taxonomy. Wilding var raunar annar aðalleiðbeinandi ÓA í doktorsnámi við Texas A&M University. Þá eru afar fróðlegir kaflar í The Soils of the USA (West o.fl. 2016) sem hér eru einnig hafðir til hliðsjónar.

Arnold, R.W. 1983. Concepts of soils and pedology. Í: L.P. Wilding, N.E. Smeck og G.F. Hall (ritstj.), Pedogenesis and Soil Taxonomy I. Concepts and Interactions. Elsevier, Amsterdam, Holland. Bls. 1–21.

Baldvin, M., C.E. Kellogg og J. Thorp 1938. Soil Classification. Í: Knight o.fl. (ritstj.), Soils and Men. Yearbook on Agriculture 1938. USDA, Washington, USA. Bls. 979–1001.

Belnap, J. 2003. The world at your feet: desert biological soil crusts. Frontiers in Ecology and the Environment 1:181–189.

Chesworth, W. 2008. Encyclopedia of Soil Science. Springer, Dordrecht, Holland.

Cline, M.G. 1949. Basic principles of soil classification. Soil Science 67:81–92.

FAO-UNESCO 1998. World Reference Base for Soil Resources. World Soil Resources Reports No. 84. FAO, Róm, Ítalía.

Hartemink, A.E. 2015. The use of soil classification in journal papers between 1975 and 2014. Geoderma Regional 5:127–139.

Huang, P.M., Y. Li og M.E. Sumner (ritstj.) 2012. Handbook of Soil Science 2. útg. CRC Press, Taylor & Francis, Boca Raton, Florida, USA.

IUSS Working Group WRB 2006. World Reference Base for Soil Resources 2014. World Soil Resources Reports No. 103, FAO, Róm, Ítalía.

IUSS Working Group WRB 2014. World Reference Base for Soil Resources 2014. World Soil Resources Reports No. 106, FAO, Róm, Ítalía.

Jenny, H. 1941. Factors of Soil Formation. McGraw-Hill, New York, USA.

Jones, A., V. Stolbovoy, C. Tarnocai, G. Broll, O. Spaargaren og L. Montanarella (ritstj.) 2010. Soil Atlas of the Northern Circumpolar Region. European Commission, Publications Office of the EU, Luxemburg.

Ólafur Arnalds og Hlynur Óskarsson 2009. Íslenskt jarðvegskort. Náttúrufræðingurinn 78:141–153.

Soil Survey Staff 1975. Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. Agriculture Handbook No. 436. SCS-USDA, U.S. Government Printing Office, Washington DC, USA.

Soil Survey Staff 1999. Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. 2. útg. Agriculture Handbook No. 436. USDA-NRCS, U.S. Government Printing Office, Washington DC, USA.

Soil Survey Staff 2003. Keys to Soil Taxonomy. 9. útg. USDA-NRCS, Lincoln, Nebraska, USA.

Weil, R.R. og N.C. Brady 2017. The Nature and Properties of Soils. 15. útg. Pearson, Boston, USA.

West, L., M.J. Singer og A.E. Hartemink (ritstj.) 2016. The Soils of the USA. World Soils Book Series. Springer, USA.

Wilding, L.P., N.E. Smeck og G.F. Hall (ritstj.) 1983. Pedogenesis and Soil Taxonomy I. Concepts and Interactions. Developments in Soil Science 11A. Elsevier, Amsterdam, Holland.

Wilding, L.P., N.E. Smeck og G.F. Hall (ritstj.) 1983. Pedogenesis and Soil Taxonomy II. The Soil Orders. Developments in Soil Science 11B. Elsevier, Amsterdam, Holland.

10 Eldfjallajörð og glerjörð – jarðvegur eldvirkra svæða

Mynd 10.1. Eldfjallið Pico á Asoreyjum. *Eldfjallajörð* einkennir vistkerfi eyjanna eins og önnur virk eldfjallasvæði jarðar.

Heimkynni *eldfjallajarðar*

Eldfjallajörð myndast fyrst og fremst þar sem gjóska er meðal móðurefna.

Eldfjallajörð þróast einnig í basísk hraunlög og jafnvel í önnur móðurefni við sérstök umhverfisskilyrði. En víðfeðmustu svæðin þar sem *eldfjallajörð* er í yfirborði eru gjóskufallssvæði.

10.1. Inngangur – orð, örefni og uppruni

Nú má segja að umfjöllun þessa rits færist til Íslands – allt sem hér er fjallað um skiptir miklu máli fyrir íslenska mold. Mold sem þróast á eldfjallasvæðum er um margt afar frábrugðin öðrum gerðum jarðvegs. Hún er nefnd Andosol í flokkun WRB á jarðvegi heimsins en Andisol í bandaríska kerfinu (Soil Taxonomy). „Ando“ er japanska og merkir dökk (an) jörð eða mold (do). Á íslensku hefur þessi jarðvegur verið kallaður *eldfjallajörð* – sem er hugtak sem náð hefur fótfestu í málinu.

Þýðing orðsins „Andosol“ ætti helst að hafa tilvísun í eldvirkni eða gjósku, t.d. „öskujörð“, „brunajörð“ eða jafnvel „gjóskujörð“. Hugtakið „sortujörð“ er að mörgu leyti heppilegt hugtak fyrir „Andosol“ því það grípur upphaflega merkingu „Ando“ vel. Það vísar þó ekki til eldvirkninnar, sem að margra mati er mikilvægt, og því hefur heitið *eldfjallajörð* náð meiri útbreiðslu. Hugtakið „móajörð“ hefur einnig verið notað (sjá Þorstein Guðmundsson, 1994, 2018). Það vísar þó til ákveðins gróðurfars og þess að jarðvegurinn sé þurr en hvorugt er einhlítt þegar litið er til *eldfjallajarðar* (Andosol) hérlendis. Hugtakið „mói“ í forskeyti nafnsins skortir alþjóðlega skírskotun og orðið er of líkt *mójörð,* sem er hugtakið fyrir lífrænan jarðveg.

Hugtakið „*gjóskujörð*“ hefur verið notað sem þýðing á „Vitrisols“, sem er tiltölulega ómótaður jarðvegur sem myndast í gjósku – mold sem fyrst og fremst ber einkenni gjóskunnar. „*Glerjörð*“ er einnig hugtak sem hefur verið notað um „Vitrisols“ og nær merkingunni aðeins betur (vitr = gler). Sem fyrr segir eru heiti íslenskra jarðvegsflokka skáletruð í þessu riti til að leggja áherslu á þessi hugtök sem tegundaheiti og festa þau í minni lesandans.

Gjóska veðrast yfirleitt hratt ef nægur raki er til staðar, sem veldur því að jarðvegslausnin öðlast háan styrk ýmissa jóna sem losna við veðrunina, svo sem Ca^{2+}, Mg^{2+}, Al^{3+}, Fe^{2+} og Si^{4+}. Ál (Al) og kísill (Si) falla út (kristallast) sem föst efnasambönd með súrefni og hýdroxíði og mynda sérstakar steindir sem eru einkennisteindir *eldfjallajarðar*: allófan, imógólít og halloysít. Járnið

Mynd 10.2. Crater Lake í Oregon í Bandaríkjunum. Gígurinn myndaðist í gríðarlegu sprengigosi fyrir um 7 700 árum, magn gosefna var um 50 km³. Askan lagðist víða yfir vesturhluta Bandaríkjanna og hafði áhrif á jarðvegsmyndun. *Eldfjallajörð* er algeng í nágrenni eldfjallanna á vesturströnd landsins. Mynd ÓA 2019.

fellur út sem hýdroxíð sem nefnt er ferrihýdrít. Hinar katjónirnar, svo sem Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+} og Na^{+}, skolast að mestu úr yfirborðslögum og jafnvel niður úr moldinni eða falla út í neðri lögum, m.a. sem kalk ($CaCO_3$) en hafa þó áfram mikil áhrif á sýrustig moldarinnar. Allófan, ímógólít og ferrihýdrít eru ekki blaðsilíköt eins og annar leir sem myndast í jarðvegi (t.d. smektít og kaólínít). Þetta eru oft illa kristölluð efni, en það hefur vafist fyrir vísindamönnum að skilgreina þau til hlítar og er fjallað nánar um þessar steindir hér á eftir.

Annað aðaleinkenni *eldfjallajarðar* er myndun sérstakra efnasambanda, málm-húmus-knippa eða fjölliða (e. metal-humus complexes, MHC). Auk þess myndast efnatengi á milli allófans og húmusefna. Það einkenni *eldfjallajarðar* að binda lífræn efni veldur því að meira er af þeim og þar með af kolefni í *eldfjallajörð* en í öðrum jarðvegi, að *mójörð* (Histosol) undanskilinni.

Það ferli sem leiðir til þess að knippi og leirsteindir á borð við allófan og ímógólít myndast er stundum nefnt „andosolization“, sérstaklega í evrópskum heimildum (t.d. Duchaufour, 1977).

Þróun *eldfjallajarðar* svipar að hluta til þess hvernig *barrskógajörð* myndast, en í henni safnast einnig fyrir málm-húmus-knippi (Bh-lag neðan E-lags). Þó munar því að í *eldfjallajörð* er Al, Si, Fe og lífrænum sameindum ekki skolað niður í sérstakt lag þar sem steindirnar og lífræn safnast fyrir (Bt-lag og Bh-lag í *barrskógajörð*), heldur kristallast allófan og ímógólít að mestu í því lagi þar sem efnin losna þegar þau veðrast úr gjósku og frumsteindum. Það sama á við um myndun málm-húmus-fjölliðanna, þær flytjast líklega ekki til í jarðveginum.

Eldfjallajörð er yfirleitt ungur jarðvegur á eldvirkum svæðum. Endurtekin gos skila ferskum bergefnum á yfirborðið sem taka að veðrast og ummyndast. Þannig heldur nýmyndun jarðvegs stöðugt áfram við yfirborðið eftir því sem ný gjóska fellur til. Þessu er yfirleitt algjörlega öfugt farið í öðrum jarðvegi, jarðvegurinn þróast oftar niður á við og þá er veðrun lengst komin við yfirborðið en yngsti jarðvegurinn er á nokkru dýpi (C-lag). Eftir því sem *eldfjallajörð* verður eldri (þúsundir ára eða > 10 000 ár) verður hún yfirleitt óstöðugri. Aðrar steindir á borð við halloysít, smektít, kaólínít, götheít og gibbsít taka að myndast og þar með aðrar jarðvegsgerðir.

Mótun hugmynda um *eldfjallajörð* sem jarðvegsgerð byggist mjög á þróun sem átti sér stað í tengslum við bandaríska kerfið „Soil Taxonomy“. Stofnaður var sérstakur samstarfshópur til að móta skilgreiningar fyrir þennan flokk (ICOMAND, sjá Parfitt og Clayden, 1991) sem ferðaðist um heiminn um og eftir 1980, tók jarðvegssýni og greindi þau á nokkrum rannsóknastofum, og á þeim grunni voru lögð drög að nýjum jarðvegsflokki. Þróun WRB-kerfisins (FAO, IUSS) tók mið af þeirri vinnu. Því miður náði íslenskur jarðvegur ekki athygli þessa hóps, sem annars hefði örugglega haft áhrif á hvernig *eldfjallajörð* var flokkuð.

10.2. Móðurbergið – gjóska

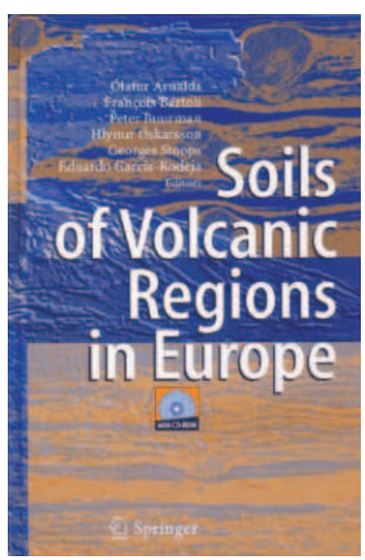
Gjóska er helsta móðurefni *eldfjallajarðar* (mynd 10.4). Hún er skilgreind sem öll loftborin gosefni en einnig gjóskuflóð (e. lahar o.fl.) og gjóska sem berst með jökulhlaupum. Gott dæmi um gjóskuflóð er að finna í hlíðum Mount St. Helens í Washington-ríki í Bandaríkjunum sem myndaðist í gríðarlegri sprengingu árið 1980 (mynd 10.5; sjá t.d. Dale o.fl. 2005).

Gjóska hefur breytilega efnasamsetningu og byggingu sem hefur síðan mikil áhrif á veðrunareinkenni.

Sortueiginleikar

Leirsteindir, lífræn efni, knippi og gjóska gefa jarðveginum sína sérstöku eiginleika sem eru notaðir til að auðkenna *eldfjallajörð* – svokallaða sortueiginleika (e. andic soil properties).

Þessir eiginleikar eru m.a. einkennandi fyrir íslenskan jarðveg.



Mynd 10.3. Yfirlitsrit um *eldfjallajörð* í Evrópu en þar er víða fjallað um íslenskan jarðveg.

Basísk gjóska veðrast hratt

Þeim mun basískari sem gjóska er, þeim mun örar veðrast hún. Raunar er efnaveðrun hraðari í basískri gjósku en í öllum öðrum móðurefnum, að undanskildum auðleystum söltum og kalki.

Kísilrík gjóska (líparít) veðrast aftur á móti mun hægar.

Hún er flokkuð á margvíslega vegu, svo sem eftir efnasamsetningu (basísk gjóska, andesít og líparít) en einnig eftir áferð gjóskunnar (t.d. gler og vikur), kornastærð og örbyggingu (sjá einnig De Paepe og Stoops, 2007). Segja má að yfirborðsflatarmál gjóskunnar skipti meira máli en eiginleg kornastærð því hvert korn kann að vera mjög holótt og með innra flatarmál sem eykur efnavirkni mikið.

Fíngerð gosaska er yfirleitt glerkennd, en glerið er í raun mjög smáar og illa kristallaðar steindir, t.d. ólivín, feldspöt og pýroxen í basískri gjósku. Áferð gjóskunnar má yfirleitt rekja til einkenna eldgossins, t.d. hversu kröftugt það var. Mikið af gleri verður til við gos undir jökli, við snögga kælingu kvikunnar þegar hún kemst í snertingu við vatn, og því er jökulsandur víða mjög glerkenndur á Íslandi (mynd 10.4).

Basísk gjóska inniheldur umtalsvert magn af Ca og Mg sem hjálpar til að viðhalda tiltölulega háu sýrustigi í jarðveginum þegar hún veðrast, sem einnig stuðlar að myndun allófans. Jarðvegur verður oft súrari (lágt pH-gildi) þegar móðurefnin eru kísilrík gjóska, sem ýtir undir myndun málm-húmus-fjölliða, eins og síðar er vikið að. Mikið yfirborð gjóskunnar og góð vatnsleiðni örva veðrun hennar. Veðrunarhraðinn er vitaskuld einnig háður öðrum þáttum og þá sérstaklega hita, raka, lífrænum efnum, sýrustigi o.fl.

Mynd 10.4. Eldgos í Eyjafjallajökli. Gjóskan leggst yfir landið og í henni þróast *eldfjallajörð*. Fremst er hin frjósama *eldfjallajörð* undir Eyjafjöllum, að stórum hluta *votjörð* samkvæmt íslenska kerfinu. Hér hafa stór svæði verið framræst.

10.3. Allófan, ímógólít, ferrihýdrít og halloysít

Ör veðrun gjóskunnar veldur tiltölulega háum styrk áls og kísils (Al og Si) í jarðvegslausninni, eins og áður sagði. Þessi efni falla út eða kristallast sem allófan og ímógólít, sem eru helstu jarðvegssteindirnar í *eldfjallajörð*. Yfirleitt er mun meira af allófani en ímógólíti, m.a. í íslenskum jarðvegi. Auk þess falla halloysít og ferrihýdrít út í *eldfjallajörð* sem og blaðsilíköt á seinni stigum þróunar jarðvegsins.

10.3.1. Bygging allófans – hvenær er steind steind?

Allófan er kúlulaga steind, 40–50 Å í þvermál (4–5 nm), sem er hol að innan (Dahlgren, 1994; ÓA, 1993). Veggir kúlunnar eru um 0,7–1 nm (7–10 Å) á þykkt (mynd 10.7).

Efnasamsetning og bygging er lík samsetningu kaólíníts, en í stað þess að mynda síendurtekin lög (blaðsilíkat) skreppur grunneiningin saman í eins konar kúlu (sjá McDaniel o.fl., 2012). Ástæða þessarar byggingar er ekki ljós, en er líklega tengd því hve hratt steindin fellur út við ofgnótt af Al og Si. Hlutfall Al og Si í grindinni (Al/Si) er oft nálægt 2, en það er þó afar breytilegt og í íslenskri mold er hlutfallið oftast á bilinu 1 til 1,5.

Bygging allófans er ekki þrívíð í sama skilningi og á við um aðrar bergsteindir í náttúrunni sem geta haldið áfram að vaxa og fylla sífellt stærra rúmmál við það að kristallinn stækkar, eða þá „tvívíð“ eins og leirsteindir (blaðsilíköt),

þar sem hvert lagið leggst þó við hlið annars. Því vefst fyrir mörgum „hreintrúa steindafræðingum“ að skilgreina þessar einingar sem eiginlegar kristallaðar steindir. Þær hafa verið kallaðar bæði „amorf“ (myndlausar eða ógagnsæjar steindir) og „short-range-order“ (stuttar byggingareiningar).

Röntgengeislar[1] eru mest notaðir til þess að greina leirsteindir og byggist greiningin á því að ákvarða þykkt laga blaðsilíkata. Allófan og ímógólít sjást ekki með röntgengeislum. Allófan og imógólít sjást hins vegar ágætlega í rafeindasmásjám með gegnumfallandi ljósi (TEM) (mynd 10.7). Einnig er stundum hægt að greina allófan í þunnsneiðum með bergfræðismásjám.

Steindafræðileg uppbygging og skilgreining allófans skiptir ekki meginmáli, heldur virkni steindarinnar í moldinni – en hún er afar virk vegna smæðar sinnar, holrýmis, hleðslu og annarra eiginleika. Algengasta skilgreiningin á allófani er eftirfarandi (á ensku):

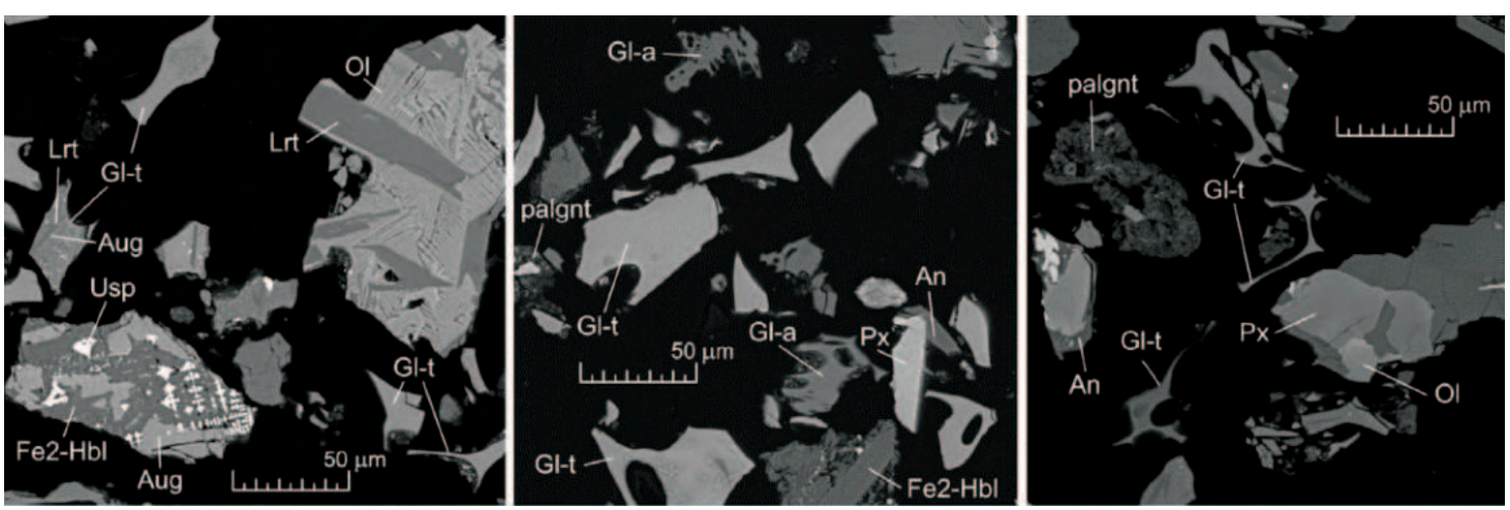
„Allophane: A group of clay-sized aluminosilicate minerals with primarily short-range structural order that contain silica, alumina, and water in chemical combination. It occurs as small spherical particles especially in soils formed from volcanic ash“ (Parfitt, 1990).

Mynd 10.5. Mount St. Helens árið 2019. Fjallið sprakk og ruddi gríðarlegu efni til vinstri og í átt að þeim stað þar sem myndin var tekin árið 1980. Gróðurframvinda er ör í gjóskuefnum. Eldský af því tagi sem þarna mynduðust geta borist tugi og jafnvel >100 km frá upprunastað, en slík gos eru fágæt á Íslandi.

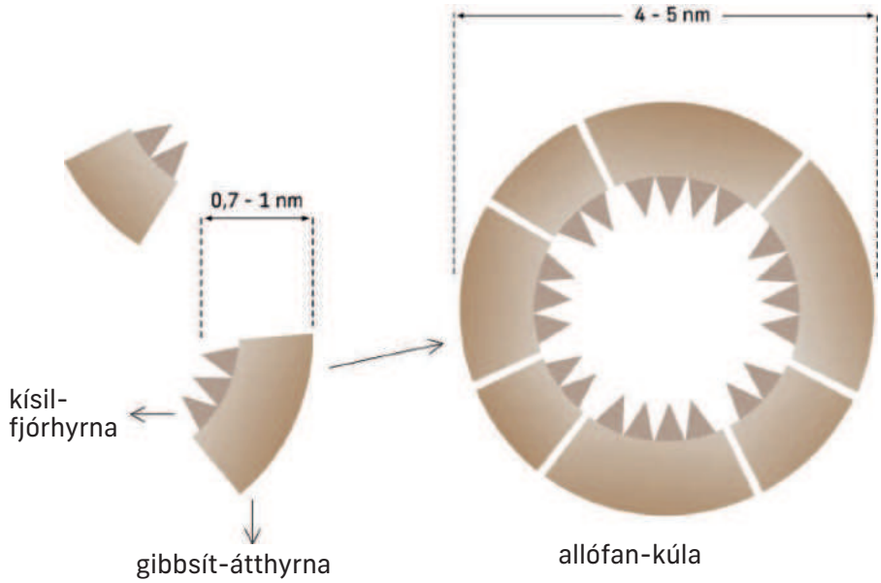
10.3.2. Myndun allófans

Sýrustig og framboð lífrænna efna ráða því hvort myndun allófans eða málm-húmus-knippa verða ráðandi ferlar við þróun *eldfjallajarðar*. Allófan myndast fyrst og fremst ef sýrustigið er hærra en 5. Ef sýrustigið er lágt kemur myndun málm-húmus-fjölliða í veg fyrir að allófan kristallist vegna þess að álið binst lífrænum efnum (mynd 10.8). Mögulega spila aðrir þættir er varða efnafræði áls og kísils þar inn í.

1. X-ray diffraction, skammstafað „XRD“. „Amorf“ (myndlaust) er óheppilegt hugtak fyrir lýsingu á leir því það er fyrst og fremst háð því hvaða tæki er notað hverju sinni hvort efnið er gagnsætt eða myndlaust.

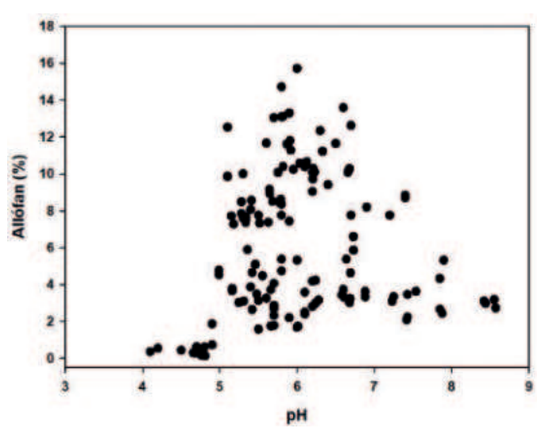


Mynd 10.6. Smásjármyndir af „öskuryki“ sem borist hefur frá söndum á Íslandi. Þessi korn eiga uppruna sinn undir jöklum sunnan við Mælifellssand (Kötlukerfið). Mismikið kristallað efni er í kornunum. Athygli vekur hve óreglulega löguð kornin eru og með hvössum hornum. Tekið úr grein Pövlu Dagsson-Waldhauserova o.fl. (2015).



Mynd 10.7. Allófan-kúlan er mynduð úr kísil-fjórhyrnum (tetrahedra) og gibbsít-líkum átthyrnum (oktahedra) sem raðast saman og mynda knött svipaðan fótbolta sem er saumaður saman úr mörgum einingum. Allófan-kúlan er með „margsprungið" yfirborð og er hol að innan og þar bætist við holrými. Þess vegna verður yfirborðsflatarmálið gríðarlega mikið (100–800 m^2/g). Ímógólít er myndað af þráðum í stað kúlu með sömu byggingu að öðru leyti. Myndin er byggð á teikningu í McDaniel o.fl. 2012.

Allófan er „illa kristölluð" steind, eins og fyrr sagði, og efnasamsetning hennar og þar með hlutfall áls og kísils (Al/Si hlutfall) er nokkuð breytilegt. Hlutfallið er oft nálægt 2 í Japan og á Nýja-Sjálandi, en gagnagrunnar sýna þó afar breytilegt hlutfall, allt frá <1 til >3. Mismunandi Al/Si-hlutfall hefur ekki verið skýrt almennilega en hér eru tínd til nokkur atriði sem nefnd hafa verið:
Þar sem mikið er af Si í jarðvegslausninni



Mynd 10.8. Tengsl myndunar allófans og sýrstigs. Lítið allófan myndast ef sýrustigið fellur niður fyrir pH 5. Gögnin sem hér eru notuð eru fengin úr yfirborðssýnum á Íslandi en svipuð gröf hafa fengist fyrir sams konar mælingar á öðrum eldfjallasvæðum – en sjaldan eins skýrt og hér sést. Gögnin eru fengin úr rannsókn á ^{137}Cs-geislavirkni í íslenskri mold (Sigurgeirsson o.fl. 2005).

getur það skolast ofan í neðri lög og fallið út sem „duripan", þ.e. kísil-harðpanna.

- **Al tekur sæti Si í grindinni með „isomorphic substitution" (Harsh o.fl. 2002).**
- **Al/Si-hlutfall lækkar oft sem neðar dregur innan sniðs þegar pH hækkar og styrkur Si eykst miðað við styrk Al.**
- **Þegar sýrustig jarðvegs er 5–6 er Si hreyfanlegra í jarðvegi en ál eða járn og skolast frekar úr jarðveginum. Því verður hlutfallslega meira af áli og járni en ella. Við hærra sýrustig minnkar hreyfanleikinn sem gæti leitt til lægra Al/Si-hlutfalls.**
- **Þurrkur tefur útskolun á Si og ætti að leiða til lægra Al/Si-hlutfalls.**
- **Þar sem er mikið af lífrænum efnum er Al tekið út og þar verður hlutfallslega mikið af Si í lausninni miðað við Al.**

Hún getur síðan haldist í jarðveginum, enda þótt *eldfjallajörðin* þróist áfram og verði að annarri jarðvegsgerð með myndun blaðsilíkata, en dæmi um slíkt eru algeng í hitabeltinu, t.d. í Indónesíu.

10.3.3. Ímógólít

Bygging ímógólíts er mjög sambærileg við byggingu allófans en í stað kúlu myndar ímógólít þræði (mynd 10.9). Þræðirnir eru um 2 nm í þvermál. Al/Si-hlutfallið er mjög nálægt 2.

10.3.4. Ferrihýdrít

Ferrihýdrít er járnsteind sem fellur út í *eldfjallajörð* þar sem umtalsvert magn af járni er í móðurberginu. Járnið afoxast í loftfirrð, sérstaklega þegar sýrustig er frekar lágt, og verður að Fe^{2+}, og er þá

í jarðvegslausn en fellur út aftur sem ferrihýdrít þegar súrefnisstyrkurinn vex (sjá 5. kafla um oxun-afoxun).

Ferrihýdrít er skærrautt að lit og hefur mikil áhrif á heildarlit jarðvegsins. Steindin nefnist „ferrihydrite“ á ensku en nafnið er nokkuð á reiki á íslensku því hún hefur bæði verið nefnd „ferrihýtrat“ og „ferrihýdrít“. Hér er farin sú leið að nota seinna heitið, ferrihýdrít, sem er nær upphaflega heitinu. Þar sem ferrihýdrít fellur mjög hratt út myndar það illa kristallaða steind, eins konar gelkennda ferrihýdrít-klasa. Ferrihýdrít getur síðan ummyndast í aðrar járnsteindir með tímanum, svo sem götheít. Talið er að örverur í vatninu hafi ráðandi áhrif á myndun ferrihýdríts. Sá sem var frumkvöðull við rannsóknir á þessari steind, Þjóðverjinn Udo Schwertmann, tjáði höfundi bókarinnar að fyrstu og bestu sýnin af ferrihýdríti hafi hann safnað á Íslandi, líklega á Suðurlandi. Hann skilgreindi steindina sem járnhýdroxíð með stutt efnatengi (e. short-range order) og efnasamsetningu sem væri nærri $5Fe_2O_3$ $9H_2O$ (Schwertmann og Taylor, 1989).

10.3.5. Halloysít

Halloysít er algengur leir á eldfjallasvæðum. Hann myndast einkum í Si-ríku umhverfi en þá er jarðvegurinn oft nokkuð súr. Halloysít er ál-blaðsilíkat með 1:1 byggingu (sjá kafla um leir í jarðvegi) en form þess er mjög breytilegt. M.a. eru þekkt bæði blaðlaga og kúlulaga halloysít.

Halloysít virðist bæði geta myndast við veðrun á allófani eða fallið út úr jarðvegslausninni við veðrun á gjósku, en styrkur Si í lausninni verður að vera nokkuð mikill. Svo virðist sem tímabundnir þurrkar í heitari löndum hvetji til myndunar halloysíts því þá eykst styrkur Si í jarðvegslausn tímabundið, t.d. í við Miðjarðarhaf.

10.3.6. Greining leirs í *eldfjallajörð*

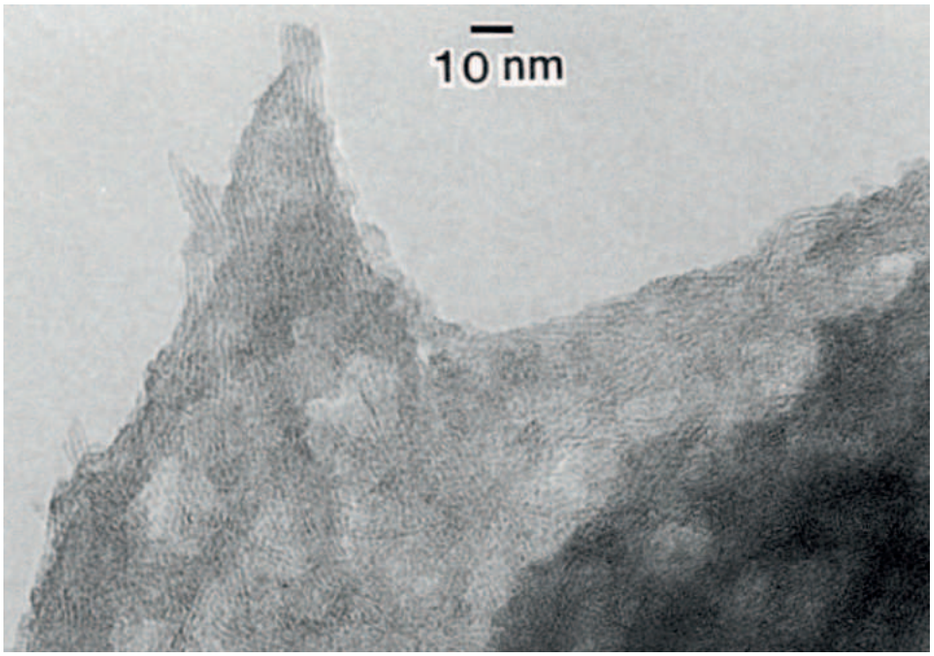
Þær aðferðir sem mest eru notaðar við greiningu á leir í jarðvegi eru kornastærðarmæling með pípettu-aðferð (sjá kafla um kornastærð) og tegundagreining með röntgengeislum. Hvorug þessara hefðbundnu aðferða er nothæf fyrir *eldfjallajörð*. Í fyrsta lagi bindast allófanagnir í stöðuga klasa af stærðargráðunni silt, og þessum silt-klösum er ekki unnt að sundra með hefðbundnum aðferðum. Þess vegna greinist allófanleir sem silt samkvæmt hefðbundnum kornastærðarmælingum. Dæmi um samanburð á mælingum á íslenskum jarðvegi með hefðbundnum mælingum og oxalat-skoli eru sýnd í 11. kafla.

Ál, kísill og járn sem leysast upp í ammoníum oxalati eru venjulega auð-kennd sem Al_{ox}, Si_{ox} og Fe_{ox}, eða Al_o, Si_o og Fe_o í prósentum, þ.e. hve mörg prósent jarðvegsins reynast vera Al, Si eða Fe sem leysast upp í ammoníum oxalati. Þessi gildi eru síðan marg-földuð með hliðsjón af efnasamsetningu steindanna sem hér greinir: Hlutfall $(Al/Si)_{ox}$ er notað til að áætla samsetningu allófansins, en síðan er Si_{ox} margfaldað

Að greina leir í *eldfjallajörð*

Langmikilvægasta aðferðin til að greina leir í *eldfjallajörð* er að leysa hann upp með ammoníum oxalati og mæla síðan magn Si, Al og Fe sem leysist upp (Si_{ox}, Al_{ox} og Fe_{ox}).

Ammoníum oxalat leysir ekki upp blaðsilíköt og önnur vel kristölluð efni en leysir upp illa kristölluð efni og þau sem teljast hafa kristalbyggingu sem er stutt í allar áttir (e. „short-range order“). Efnið leysir m.a. upp allófan, ímógólít og ferrihýdrít, en einnig losnar Al og Fe úr málm-húmus-fjölliðum. Þessi aðferð er notuð við jarðvegsgreiningar á *eldfjallajörð* víða um heim.



Mynd 10.9. Leirsteindin ímógólít í íslenskum jarðvegi. Myndin er tekin með rafeindasmásjá í Japan. Ímógólít eru þræðir sem hafa svipaða byggingu og allófan.

með stuðli sem yfirleitt er á bilinu 5–8. Landbúnaðarháskólinn hefur notað stuðulinn 6, þ.e. Si_{ox} x 6, sem tekur mið af $(Al/Si)_{ox}$-hlutfallinu 1,5 (sjá Parfitt 1990).

Aðrar aðferðir eru einnig notaðar við rannsóknir á steindum sem einkenna ***eldfjallajörð***. Innrauðir geislar eru notaðir til þess að ákvarða hvaða efnatengi eru ráðandi í efnunum, sem gefur vísbendingu um hvaða steindir eru til staðar, en þessi aðferð gefur m.a. sterka vísbendingu um tilvist allófans í jarðvegssýnum.

Elektrónusmásjár hafa einnig reynst gagnleg hjálpartæki við ákvörðun á leir í *eldfjallajörð* (sjá myndir 10.7 og 10.9). Þar sem *eldfjallajörð* hefur þróast það mikið að blaðsilíköt eru til staðar eru notaðar hefðbundnar aðferðir við tegundagreiningu þeirra, ekki síst með röntgengeislum (XRD), og stundum má greina halloysít á þann hátt.

10.4. Lífræn efni

Eldfjallajörð safnar meira af lífrænum efnum í moldina en aðrar jarðvegsgerðir, að *mójörð* (Histosol) undanskilinni. Sum hinna lífrænu efna eru afar stöðug, þau rotna lítið og hafa þar af leiðandi langan taftíma í *eldfjallajörð*, jafnvel í hundruð þúsunda ára (Dahlgren o.fl. 2004). Því er óhætt að segja að þau séu fastbundin í moldinni.

Lífrænu efnin hafa mjög mikilvæga eiginleika fyrir frjósemi og hringrás vatns; þau virka í raun svipað og lífkol (e. biochar) sem víða eru notuð til að auka frjósemi jarðvegs. Það eru einkum tvö meginferli sem binda lífrænu efnin:

- Lífrænar sameindir festast við yfirborð allófans með „útskiptingu tengihópa“ þar sem hluti lífrænu keðjunnar tekur sæti jónar í tengihópi við yfirborðið (lífræna efnið skiptir út öðrum tengihópum á allófaninu – e. „ligand exchange“).
- Ál og járn tengjast OH^--hópum á lífrænum sameindum þannig að það myndast málm-húmus-fjölliður (e. metal-humus complexes, MHC). Það er oftar ál en járn sem myndar málm-húmus-fjölliðurnar (knippin).

Hafa ber í huga að hvoru tveggja getur myndast í jarðveginum en sýrustigið ræður hvort formið verður ráðandi (sjá mynd 10.8 hér á undan). Það þarf að falla töluvert til af áli við hraða veðrun gjósku til að fjölliðurnar (knippin) myndist, en einnig þarf sýrustigið að vera frekar lágt til að tryggja að styrkur áls sé nógu mikill í jarðvegslausninni (Al^{3+}; sjá texta um pH í jarðvegi). Við hærra sýrustig er það fyrst og fremst allófan sem kristallast í *eldfjallajörð*.

Jarðvegurinn getur bundið mjög mikið af lífrænum efnum á þennan hátt. Tekið er tillit til þess þegar skilið er á milli *eldfjallajarðar* og *mójarðar*, en *eldfjallajörð* má innihalda allt að 25% C samkvæmt Soil Taxonomy en 20% í flokkun FAO-WRB. Ástæða þess að jarðvegur með svo mikið af lífrænum efnum (12–25% C) er skilgreindur sem *eldfjallajörð* en ekki *mójörð* er sú að innan þessara marka eru það allófan og málm-húmus-knippin sem ráða eiginleikum jarðvegsins (sortueiginleikar – e. andic soil properties). Að öðru leyti liggja skilin á milli *mójarðar* og annars jarðvegs við 12–18% C, en það fer eftir því hve mikill leir er í moldinni. Þau liggja hærra eftir því sem meira er af leir í moldinni því hann hefur því sterkari áhrif á eiginleika

moldarinnar sem meira er af honum. Nokkrar ástæður hafa verið nefndar fyrir því af hverju ál-húmus-fjölliðurnar rotna svo hægt í jarðvegi. Þeirra á meðal er áleitrun sem hamlar starfsemi örvera (flestar lífverur eru mjög viðkvæmar fyrir áleitrun), fosfórskortur því fosfórinn binst einkar fast og er ekki aðgengilegur örverum, og að lífrænu efnin gagnist ekki örverum af einhverjum öðrum ástæðum.

Nokkrar aðferðir eru notaðar til þess að ákvarða magn málm-húmus-knippa. Leysa má upp ál og járn sem bundið er í knippunum með pýrófosfatlausn. Magn áls og járns sem losna á þann hátt (Al_{pyr} og Fe_{pyr} eða Al_p og Fe_p) gefur til kynna magn þessara knippa.

Pýrófosfat hefur þann eiginleika að leysa ekki upp leirsteindirnar, en oxalat leysir upp ál bundið í lífrænum efnum, allófani og ferrihýdríti. Þegar búið er að mæla bæði Al_{pyr} og Al_{ox} má reikna út hve stór hluti álsins er bundinn lífrænum efnum (Al_{pyr}/Al_{ox}). Ef hlutfallið er yfir 0,5 (þ.e. meira en helmingur) má segja að ál-húmus-knippi séu ráðandi í jarðveginum en allófan, ímógólít og ferrihýdrít ef hlutfallið er <0,5. Einnig eru til mun flóknari aðferðir til að leggja mat á gerð lífrænna sameinda í jarðveginum, m.a. með því að nota sterkar sýru- og basalausnir (sem leysa upp mismunandi hluta lífrænna efna), en ekki verður farið út í þá sálma hér, enda er í raun mjög óljóst hvers konar niðurstöður þessar aðferðir gefa.

10.5. Hugtök tengd *eldfjallajörð*

Sortueiginleikar (e. andic soil properties)

Sortueiginleikar eru lykilhugtak fyrir skilgreiningu og greiningu á *eldfjallajörð*. Hér er fyrst og fremst átt við eiginleika sem skapast vegna allófans, ferrihýdríts og ímógólíts annars vegar og hins vegar málm-húmus-knippa í jarðveginum. Sem fyrr sagði vísar „andic“ til hins dökka litar sem *eldfjallajörð* tekur oft á sig. Því er hugtakið „sortueiginleikar“ dæmi um þýðingu á þessu hugtaki. *Eldfjallajörð* þarf ekki að vera svört á lit, en sortueiginleiki vísar til þess hlutar jarðvegsins sem yfirleitt er dökkur og ljær honum helstu eiginleika *eldfjallajarðar*.

Sortueiginleikar (e. andic properties) eru notaðir við greiningu jarðvegs sem *eldfjallajarðar* og eru þessir helstir:

- **$(Al + ½Fe)_{ox}$.** Magn áls og járns sem leysist úr jarðveginum í ammoníum oxalat-lausn. Gefur til kynna magn steinda og lífrænna fjölliða.
- **Lítil rúmþyngd.**
- **Fosfórbinding** (jarðvegurinn bindur fosfór í stöðug efnasambönd).
- **Gjóska og/eða gler** (skilgreinir glereiginleika).

Svartlag (e. melanic epipedon)

Svartlag er dökkt húmusríkt yfirborðslag sem er dæmigert fyrir fremur lífrænt lag í *eldfjallajörð*. Húmusinn er mikið rotnaður og trúlega að stórum hluta á formi málm-húmus-knippa eða fastbundinn allófani. Yfirleitt er miðað við að svartlagið hafi >6% C og bæði gildi og ára (e. chroma) séu dekkri en 2 (Soil Taxonomy og WRB) samkvæmt Munsell-litakerfi. Orðið „epipedon“ í heitinu vísar til yfirborðslaga. Einnig er miðað við svokallað „melanic index“ sem krefst nokkuð mikilla efnagreininga

á jarðvegi. Japanir tengja svartlagið gjarnan við graslendi þar sem mikið fellur til af lífrænum efnum. Dökk lífræn mold í birkiskógum hérlendis gæti fallið undir svartlag – en þörf er á frekari rannsóknum á því.

Fölvalag (e. fulvic horizon)

„Fulvic"-jarðvegslag (fölvalag) er sama eðlis og svartlagið en ljósara (fölara). Það er þó yfirleitt dökklitað, t.d. dökkbrúnt, nema þegar ljós gjóska hefur áhrif á litinn eða ferrihýdrít litar jarðveginn mjög rauðan, sem er algengt hér á landi. Litamunurinn er yfirleitt frekar tengdur mismunandi gróðurfari erlendis og þá oftast skóglendi, t.d. beyki í Japan. Shoji, sem er einn frumkvöðla rannsókna á eldfjallajarðvegi og flokkunar hans, lagði mikla áherslu á þennan mun sem síðan endurspeglaðist í mismunandi gerðum lífrænna sameinda í jarðveginum. Við skilgreiningu á fölvalagi eru gerðar sömu kröfur fyrir lífræn efni (>6% C) en jarðvegurinn er ekki eins dökkur og í svartlaginu (e. melanic).

Þessi aðgreining á milli sortulags og fölvalags í *eldfjallajörð* endurspeglar japanskar áherslur og er e.t.v. vafasöm með hliðsjón af íslenskum aðstæðum. Ástæðan er sú að ferrihýdrít, ljós gjóska, afoxun í votlendi og áhrif jarðvegsfrosts á rakastigið móta jarðvegslitinn mjög mikið án þess að eiginlegur munur á lífrænum sameindum þurfi að vera til staðar.

„Vatnsósa" eiginleikar (e. hydric)

„Vatnsósa" eiginleikar vísa til jarðvegs sem getur bundið gríðarlega mikið vatn. Miðað er við að jarðvegur sem telst „vatnsósa" innihaldi >100% vatn við visnunarmark (15 bara togspenna) eða sem samsvarar því að jafnmikið vatn sé í moldinni og nemur þurrvigt jarðvegsins. Það er semsagt gríðarlega mikið vatn í jarðvegi sem telst þurr! Jarðvegur sem telst hafa vatnsósa eiginleika inniheldur yfirleitt mikið af allófani eða ferrihýdríti, eða af málm-húmus-fjölliðum. Þessum eiginleika fylgir oft kvikuhegðun („thixotropic") jarðvegsins (kviksyndi). Vatnsósa *eldfjallajörð* kemur einkum fyrir þar sem lífrænar fjölliður einkenna moldina (aluandic), t.d. á Asoreyjum, Havaí, Ekvador og Mexíkó, en þessi einkenni þekkjast einnig hérlendis. Ástæða þótti til að draga þessi einkenni fram í sérstökum jarðvegsflokki, m.a. vegna verkfræðilegra eiginleika (Parfitt og Clayden, 1991), enda geta traktorar sokkið djúpt og jafnvel horfið í svona mold, sem dæmi eru t.d. um á Havaí.

Kvikuhegðun (e. thixotropy) – skriðuföll og önnur vandræði

Eldfjallajörð getur haldið gífurlega miklu magni af vatni, jafnvel við frekar þurrar aðstæður eins og áður sagði. Jafnframt skortir oftast blaðlaga leirinn sem er mikilvægur fyrir samloðun jarðvegsins. Ef jarðvegur sem er mjög ríkur af allófani og/eða málm-húmus-knippum er tiltölulega vatnsmettaður inniheldur hann mjög mikið vatn (iðulega 200–300% miðað við þurrvigt jarðvegsins, mynd 10.10). Við þær aðstæður er hann

Mynd 10.10. Vatnsósa („hydric") jarðvegur á Asoreyjum sem einkennist af miklu magni af málm-húmus-knippum. Hann inniheldur um 150% vatn við visnunarmark gróðurs (þ.e. þegar hann er „þurr") og þessi mold sýnir sterk einkenni kvikuhegðunar. Yfirborðið dúar þegar gengið er á þessu landi.

afar viðkvæmur fyrir raski. Hann kann að virðast hafa sæmilega samloðun en við minnsta rask getur hann náð flæðimarki (sjá kafla um samloðun og Atterberg-mörk hér á eftir) og hegðar sér þá sem vökvi. Slíkur jarðvegur er sagður hafa kvikuhegðun (e. thixotropic).

Glerkennd gjóskuefni (e. vitric materials)

Hugtakið „vitric" er ættað úr latínu þar sem það þýðir gler eða eitthvað sem er glerkennt. Ekki er ljóst af hverju þetta orð var valið en ekki „tephra" sem hefur breiðari merkingu (gjóska) og er því að mörgu leyti heppilegra, en trúlega hafði það ekki náð almennri viðurkenningu áður en „vitric"-hugtakið kom til. „Vitric" eða glerkennt moldarlag einkennist af gjósku (þar með gleri) eða frumsteindum í gjósku.

Mold með glerkenndu jarðvegslagi í yfirborði er því yfirleitt ung (nýleg gjóska) og getur síðar þróast það mikið að leirsteindir og málm-húmus-knippi ráði jarðvegseiginleikunum. Rétt er að hafa í huga að gjóska sem móðurefni hefur allt aðra eiginleika en aðrar frumsteindir og bergtegundir, m.a. vegna þess að hún hefur oft mikið holrými og yfirborðsflatarmál (jafnvel upp í 10 m^2/g), öfugt við t.d. kvars sem er uppistaðan í jarðvegi á flestum sandsvæðum jarðar. Gjóskan getur því haft moldareiginleika sem eru sambærilegir eiginleikum í mun þroskaðri jarðvegi af annarri gerð.

10.6. Þrjár megingerðir *eldfjallajarðar*

Skipta má *eldfjallajörð* í þrjár megingerðir: allófanríka *eldfjallajörð*, málm-húmusríka *eldfjallajörð* og gjóskuríka *eldfjallajörð*. Þessar megingerðir eru grunnurinn að frekari flokkun *eldfjallajarðar* sem mikilvægt er að hafa í huga og verða m.a. notaðar við frekari skiptingu í flokkunarkerfi fyrir íslenskan jarðveg.

Allófanríkur jarðvegur („silandic"-jarðvegur) myndast þar sem pH helst sæmilega hátt (>5) og allófanið myndast í jarðveginum við það að ál og kísill falla út með súrefni og hýdroxíði. Ef sýrustigið er lægra teppist álið í húmusknippum og fellur ekki út sem allófan. Aðstæður sem stuðla að pH 5–7 mynda hagstæð skilyrði fyrir þessa gerð *eldfjallajarðar*. Þar má nefna basísk móðurefni sem losa Ca^{++} og Mg^{++} tiltölulega hratt og

Mynd 10.11. Jarðvegssýni frá Asoreyjum sem sýnir kvikuhegðun. Kögglinum (til vinstri) var velt nokkrum sinnum í lófanum (rask) sem olli því að moldin náði flæðimarki (til hægri). Dæmigerð kvikuhegðun *eldfjallajarðar* sem m.a. útskýrir hættu á skriðum í hlíðum.

Skriður og mold á eldfjallasvæðum

Skriðuföll verða ansi mörgum jarðarbúum að aldurtila. Skriðuföll eru því miður tíð á eldfjallasvæðum og orsakast iðulega af þeim sérstöku eiginleikum *eldfjallajarðar* sem hér hefur verið lýst, þ.e. sérstæðum Atterberg-mörkum (gríðarlega hátt flæðimark en skortur á samloðun), háu vatnsinnihaldi, vatnsósa (e. hydric) eiginleikum og kvikuhegðun. Hlíðar eldfjalla eru því iðulega viðkvæmar og hætt er við skriðuföllum.

Með vaxandi fjölgun fólks á eldfjallasvæðum í Afríku, Mið-Ameríku og Asíu hefur álag á land aukist mjög. Þetta hefur aukið hættuna á skriðum sem hafa valdið miklu manntjóni á þessum landsvæðum. Hættast er við skriðuföllum þar sem gengið hefur verið á landsins gæði, þannig að þegar miklir úrkomuatburðir verða, t.d. þegar fellibyljir ganga yfir, er geta vistkerfisins til að halda kerfinu saman skert. Mikil úrkoma fyllir síðan moldina umfram flæðimark og þyngd kerfisins miðað við samloðun þess verður of mikil í hlíðunum sem leiðir til skriðufalla. Í sumum tilfellum getur rask á borð við jarðskjálfta eða umferð komið skriðu af stað. Aurskriður eru algengar á Íslandi og þar gilda sömu lögmál og á öðrum eldfjallasvæðum.

Mynd 10.12. Til vinstri: Aurskriða sem féll í Colonia Las Colinas í El Salvador árið 2001. Yfir 700 manns fórust í skriðunni. Jarðskjálfti kom skriðunni af stað. Mynd: Jarðfræðistofnun Bandaríkjanna (USGS).

Til hægri: Aurskriða í Kinnarfjalli í Suður-Þingeyjarsýslu. Upptökin eru við snjóbráð í vorleysingum sem hefur mettað moldina sem gaf síðan undan vegna þunga, en auk þess mynda ljós öskulög úr Heklu eins konar skriðplan sem eykur á hættuna. Mynd: Halldór G. Pétursson.

jarðveg með nægjanlega mikið af ferskri gjósku.

Jarðvegur þar sem málm-húmus-knippi (fjölliður) eru ráðandi („aluandic"-jarðvegur) er einkennandi þar sem sýrustig er frekar lágt og bæði ál og járn bindast lífrænum sameindum, eins og minnst var á í kafla um lífræn efni. Þessi jarðvegsgerð virðist einnig einkennandi fyrir mjög þróaða eða „eldri" *eldfjallajörð*, enda lækkar sýrustig jarðvegsins eftir því sem innihald hans af basískum katjónum (t.d. Ca^{++} og Mg^{++}) minnkar með tímanum.

Með gjóskuríkum jarðveg (Vitric Andosol) er átt við tiltölulega lítið veðraðan jarðveg sem þó hefur öðlast nægjanleg einkenni til að geta kallast *eldfjallajörð*. Er þá fyrst og fremst miðað við greiningu á Al_{ox} og Fe_{ox} (>0,4%, og gnægð glers).

Við þróun FAO-WRB-flokkunarkerfisins var jarðvegi og jarðvegslögum skipt í þrjár megingerðir: „aluandic" og „silandic" auk „vitric" (Shoji o.fl. 1996). „Aluandic"-jarðvegur einkennist af

málm-húmus-knippum og er oftast súrari en „silandic"-jarðvegur og inniheldur lítið af allófani. „Silandic" *eldfjallajörð* einkennist fyrst og fremst af allófani og/eða ímógólíti (sjá mynd 10.13). Víst er að þessi tvö meginferli sem mynda leir annars vegar og knippi hins vegar eru mikilvæg fyrir þá eiginleika sem *eldfjallajörð* öðlast.

Hins vegar má efast um réttmæti þess að nota þessi tvö meginferli sem grundvöll flokkunar því langalgengast er að jarðvegur hafi einkenni beggja, og raunar hefur gjóska einnig áhrif á margar gerðir *eldfjallajarðar*. Þetta á sérstaklega við hér á Íslandi þar sem jarðvegur inniheldur mikið af öllum þessum þáttum, þ.e. gjósku og gleri, allófani og ferrihýdríti og málm-húmus-knippum.

10.7. Jónrýmd (CEC)

Leir og lífræn efni í *eldfjallajörð* hafa jónrýmd. Hvorutveggja einkennir *eldfjallajörð* og því er jónrýmd hennar yfirleitt mikil, oft 20–50 meq/100g. Það sem er sérstakt við *eldfjallajörð* er að jónrýmdin er háð sýrustigi moldarinnar. Þessi eiginleiki er fyrst og fremst bundinn við *eldfjallajörð* og jarðveg hitabeltisins (ál- og járnleirsteindir). Jónrýmd blaðsilíkata stafar alla jafna af því að jónir með minni hleðslu taka sæti jóna með meiri hleðslu í kristalbyggingu leirsteindanna, t.d. Al^{3+} í stað Si^{4+}. Við þetta verður til neikvæð hleðsla og þar með skapast katjónrýmd (CEC). Þessi hleðsla er stöðug og breytist ekki þótt pH jarðvegsins breytist.

Katjónrýmd leirefna og lífrænna efna í *eldfjallajörð* er mikil, sem fyrr sagði, en eykst hratt með pH og getur auðveldlega tvöfaldast úr pH 5,5 í pH 8,2 (mynd 10.14). Fyrrnefnda sýrustigið (5,5) gæti táknað náttúrulegt sýrustig jarðvegsins en aftur á móti er algengt að mæla jónrýmd við pH 8,2. Sú aðferð er vitaskuld ekki heppileg fyrir *eldfjallajörð*, og er þá oftar reynt að mæla jónrýmd við pH jarðvegsins eða í stuðpúðalausn (böffer) sem ekki er fjarri sýrustigi jarðvegsins, en betra er að nota stuðpúðalausn, m.a. til að sýrustigið breytist ekki meðan á jónaskiptum stendur við mælinguna. Landbúnaðarháskólinn mælir jónrýmd iðulega við pH 7.

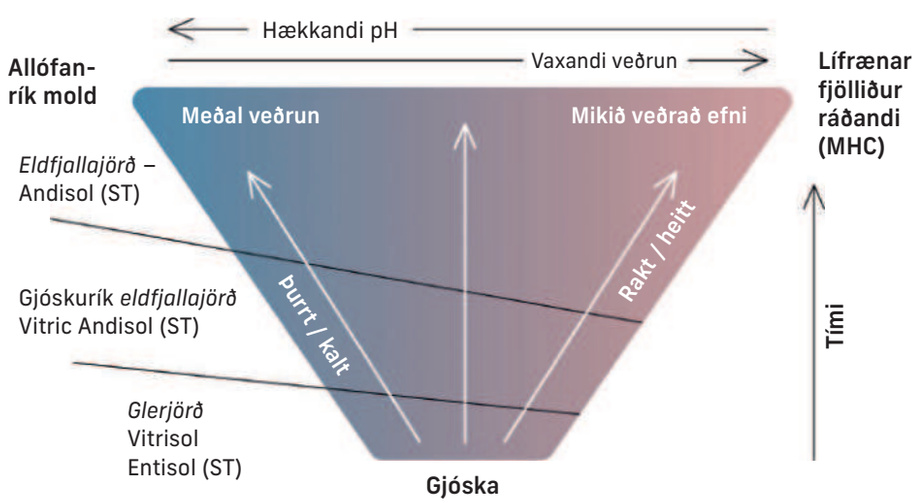
Sá eiginleiki *eldfjallajarðar* að halda í anjónir vegna anjónrýmdar er mikilvægur því að á meðal þeirra jóna sem jarðvegurinn getur haldið í er NO_3^-, en á því formi taka plöntur mest upp af nitri. Það skolast auðveldlega úr jarðvegi, og rétt er að geta þess að þrátt fyrir anjónrýmd er þessi jón mjög laust bundin í *eldfjallajörð*, en anjónrýmdin tefur eigi að síður úr útskolun á nitri.

10.8. Fosfórbinding og aðrir efnaeiginleikar

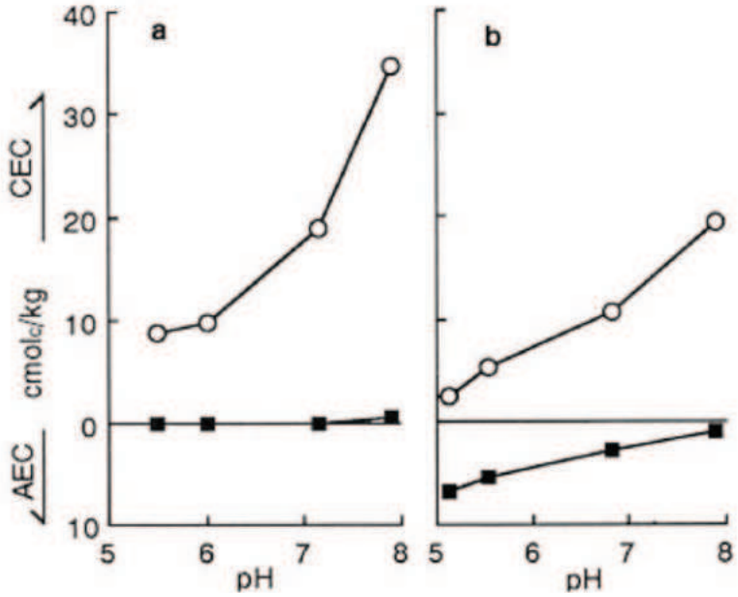
Eitt megineinkenni *eldfjallajarðar* er að fosfór binst við öragnir moldarinnar. Þetta telst eitt af greiningareinkennum *eldfjallajarðar*, þ.e. fosfórbinding er notuð til að skilgreina sortueiginleika

pH-háð jónrýmd

Jónrýmd allófans, ímógólíts, ferrihýdríts og málm-húmus-knippanna er með nokkuð öðrum hætti en annarra blaðsilíkata. Hún breytist við það að OH^--sameindir bætast við sem jónrýmdarsæti á ögnunum eftir því sem sýrustigið hækkar (mjög einfölduð framsetning!). Þar að auki geta þessar agnir einnig haldið anjónum (anjónrýmd, AEC) sem blaðsilíköt gera yfirleitt ekki.



Mynd 10.13. Þrír ásar *eldfjallajarðar*. Gjóskan (neðst á myndinni) veðrast eftir því sem umhverfið mótar efnið, fyrst verður til gjóskurík *eldfjallajörð* (Vitric Andisol, ST; raunar oftast sem Vitrand en einnig sem Vitricryand hér á landi), en mikið af *brúnjörð* á Íslandi fellur í þann flokk. Með meiri veðrun verður til allófan-rík mold þar sem sýrustig helst sæmilega hátt, t.d. þar sem er hlutfallslega þurrt eða ekki mjög heitt loftslag (uppi til vinstri), en með meiri veðrun, t.d. í röku og heitu loftslagi eða þar sem gjóskan er fremur súr (kísilrík), verða málm-húmus-knippi (fjölliður) ráðandi (uppi til hægri). Byggt á ÓA, 2013.



Mynd 10.14. Bæði anjónrýmd og katjónrýmd (CEC) er háð sýrustigi í *eldfjallajörð*. Anjónrýmdin lækkar með hækkandi sýrustigi en katjónrýmdin hækkar ört með hækkandi pH.

(e. andic properties). Fosfórsambönd komast mjög nálægt yfirborði agnanna og festast þar við lífræna og ólífræna efnahópa. Þetta veldur því að mikið af fosfóráburði er notaður við ræktun í *eldfjallajörð*, t.d. í Japan og víðar. Það á einnig við hérlendis. Fosfórinn safnast smám saman fyrir í jarðveginum í miklum mæli við endurtekna áburðargjöf. Með þessari uppsöfnun aukast þó líkur á að eitthvað af fosfór sé á lausu fyrir viðgang plantna. Þó að ókostir fylgi fosfórbindingu *eldfjallajarðar* í ræktun og landgræðslu hefur þessi eiginleiki þann kost að minni hætta er á að fosfórmengun berist í grunnvatn, ár og læki þar sem fosfór er notaður til áburðar.

Eitt sérkenni *eldfjallajarðar* er að sé veikri NaF-lausn bætt í moldina skýst sýrustigið upp úr öllu valdi. F^--jónin sest utan á öragnir moldarinnar, bæði leir og lífrænar fjölliður, og tekur sæti OH^- sem fer þá í moldarlausnina og þar með hækkar pH. Þessi eiginleiki er oft notaður til að ákvarða hvort moldin hafi sortueiginleika á vettvangi og var stundum notaður við skilgreiningu á *eldfjallajörð*.

Mikil jónrýmd gerir það að verkum að moldin bindur auðveldlega eitraðar málmjónir í jarðveginum og getur því mengast til frambúðar. Á móti kemur að moldin getur varið grunnvatn fyrir mengun.

Eitt þeirra meginefna sem berast sem úrfelli (e. fallout) við notkun kjarnorkuvopna, eða frá kjarnorkuslysum á borð við það sem varð í Chernobyl, er lítil jón sem nefnist sesín ($^{137}Cs^+$). Hún binst afar fast í efstu lögum jarðvegs til framtíðar. Geislavirkt sesín hefur 30 ára helmingunartíma og finnst ennþá í umtalsverðum mæli í mold, m.a. á Íslandi, eftir kjarnorkutilraunir Bandaríkjanna og Sovétríkjanna í andrúmsloftinu, og hefur þá einkum borist frá svokallaðri Tsar-vetnissprengju Sovétmanna 1961 (sjá Magnús Sigurgeirsson o.fl. 2005).

10.9. Eðliseiginleikar

10.9.1. Rúmþyngd

Það er eðli *eldfjallajarðar* að vera létt í sér, sem er notað sem mikilvægt greiningareinkenni fyrir *eldfjallajörð* (einn hluti sortueiginleika). Rúmþyngd *eldfjallajarðar* þarf að vera minni en 0,9 g/cm³ samkvæmt skilgreiningu til að jarðvegurinn flokkist sem slíkur. Aðrar jarðvegsgerðir eru gjarnan með rúmþyngd 1-1,3 g/cm³. Rúmþyngd *eldfjallajarðar* er yfirleitt mun minni en 0,9 g/cm³, t.d. hefur íslenskur jarðvegur iðulega rúmþyngd 0,6–0,7 g/cm³ og sjá má tölur allt niður í 0,15 g/cm³ í gögnum um íslenska og erlenda *eldfjallajörð*. Eðlisþyngd allófans er aftur á móti nálægt 2,9 g/cm³, sem og basísks móðurbergs og glers (ösku). Því er ljóst að stór hluti jarðvegsins er holrými og í því rúmast mikið vatn.

10.9.2. Vatnsrýmd

Mikil vatnsrýmd er einn af megineiginleikum *eldfjallajarðar*. Þetta holrými

er af mörgum stærðarflokkum þar sem vatnið er í mismikilli snertingu við agnir jarðvegsins. Því nær ögninni sem vatnið er, þeim mun fastar er það bundið. Yfirborðsflatarmál örefna í *eldfjallajörð* er mjög mikið og því er mikið vatn í henni sem er tiltölulega fastbundið. Þetta kemur skýrt fram þegar vatnsinnihald við visnunarmörk jarðvegsins (15 bör) er kannað.

Algengt er að vatnsinnihald við visnunarmark sé >40% en í sumum tilfellum jafnvel meira en 100% (miðað við þurrvigt jarðvegsins). Þetta er eitt af sérkennum *eldfjallajarðar*. Svokölluð vatnsósa-einkenni (e. hydric) eru miðuð við að jarðvegurinn innihaldi >100% vatn við visnunarmörk, sbr. umræðuna hér á undan.

10.9.3. Ísig og vatnsleiðni

Vegna þess að *eldfjallajörð* hefur mikið holrými streymir vatn greiðlega inn í jarðveginn. Sumar þær tölur sem fást við mælingar á *eldfjallajörð* eru stærðargráðu hærri en gengur og gerist um annan jarðveg á þurrlendi (ef *sandjörð* er undanskilin). Því verður oft minna vatnsrof í *eldfjallajörð* en öðrum jarðvegi, jafnvel þótt jarðveginum sjálfum sé hætt við vatnsrofi vegna skorts á samloðun.

Sá jarðvegur sem leiðir best vatn er moldarjarðvegur (e. loam), einkum sá sem inniheldur mikið af silti. Þar sem allófan-klasar eru af siltstærð virka þeir svipað og ef um siltkorn væri að ræða þegar kemur að vatnsleiðni. *Eldfjallajörð* leiðir því vatn mjög vel og betur en annar jarðvegur. Þessi eiginleiki skiptir einnig máli þegar kemur að frosti, sökum þess hve vatn leiðir vel að frostbylgjunni. Því er *eldfjallajörð* flokkuð sem frostnæm (e. frost susceptible), þ.e. mikil hætta er á myndun holklaka, rúmmálsbreytingu við yfirborðið og frostskemmdum, sem jafnframt geta losað um jarðveginn í bröttum hlíðum.

10.9.4. Samloðun *eldfjallajarðar*

Fjallað var um samloðun jarðvegs og svokölluð Atterberg-mörk í kaflanum um eðlisþætti (6. kafli). Samloðun getur verið fjarskalega lítil í *eldfjallajörð*, og að þessu leyti er hún afar frábrugðin öðrum jarðvegsgerðum, en þessi skortur á samloðun skýrir um margt óstöðugleika og aðra hegðan hennar. Á næstu blaðsíðu er birt að nýju graf úr 6. kafla ásamt stuttri útskýringu á Atterberg-mörkum (mynd 10.15).

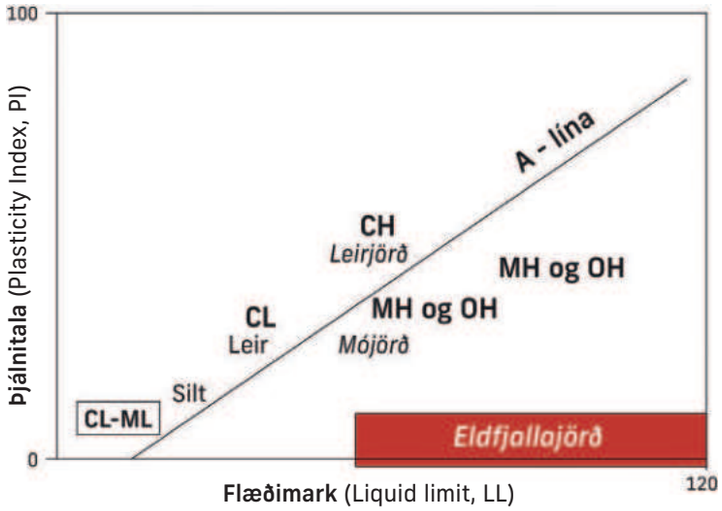
Ef tekinn er fullkomlega þurr moldarjarðvegur er hann óþjáll: það er ekki hægt að móta hann með fingrunum. Þegar vatni er bætt í verður moldin að lokum þjál og þá er hægt að hnoða hana til án þess að hún molni sem þurrt efni. Þetta mark er nefnt þjálnimark (e. plastic limit) táknað með PL. Ef haldið er áfram að bæta vatni í moldina nær hún að lokum því marki að verða vatnsmettuð og tekur að renna til sem vökvi. Við þetta vatnsinnihald hefur moldin náð flæðimarki sínu (e. liquid limit), táknað sem LL. Þjálnitala (e. plasticity index), táknuð sem PI, er skilgreind sem mismunurinn á þessum tveimur mörkum: LL-PL, eða:

$$PI = LL - PL$$

(Þjálnitala = flæðimark – þjálnimark)

Flæðimarkið gefur um leið til kynna vatnsinnihald við vatnsmettun, sem eru mikilsverðar upplýsingar. Þjálnitalan er vísbending um hve mikið vatn moldin getur bundið, en er þó mun ónákvæmari aðferð en þær sem lýst er í 4. kafla um vatn. Þegar gildum fyrir þjálnitölu (PI) er varpað á y-ásinn og flæðimarki á x-ásinn virðast hinar ýmsu jarðvegsgerðir heimsins raðast á línu sem nefnd er A-lína (mynd 10.15).

Eldfjallajörð sker sig þó heldur betur frá öðrum jarðvegsgerðum að þessu leyti. Flæðimarkið er alla jafna mjög hátt



Mynd 10.15. Graf sem sýnir tengsl þjálnitölu og flæðimarks, svokallað Casagrande-graf. *Eldfjallajörðin* sker sig heldur betur frá öðrum jarðvegsgerðum, með mjög hátt flæðimark en afar lága eða neikvæða þjálnitölu. Moldin getur auðveldlega orðið að fljótandi drullumassa og runnið niður hlíðar í skriðuföllum.

(mikil vatnsheldni) en jarðvegurinn hefur ákaflega takmarkað bil þar sem hann getur talist þjáll og því er þjálnitalan mjög lág – getur jafnvel orðið neikvæð samkvæmt þeim aðferðum sem notaðar eru. Því lendir rauði kassinn á myndinni að hluta til niður fyrir gildið núll fyrir þjálnitölu. Í öðrum jarðvegsgerðum eru það vitaskuld blaðsilíköt sem ljá moldinni þjálni þegar hún er rök, sbr. leirefni sem hægt er að hnoða og móta. Það á ekki við um leir í *eldfjallajörð*.

Þessi sérstaki eiginleiki *eldfjallajarðar* sem lýst er á mynd 10.15 getur haft mikil áhrif á stöðugleika moldarinnar. Þegar flæðimarkinu er loksins náð inniheldur moldin gríðarlega mikið vatn. Hún er þá mjög þung í sér og skortir samloðun. Verði hún fyrir raski getur hún öðlast vökvaeiginleika og þá geta fallið mjög hættulegar aurskriður. Kvikuhegðun *eldfjallajarðar* sem áður var lýst tengist einmitt þessum eiginleika. Þar sem mikil hætta er á skriðuföllum vegna þess að saman fara brattar hlíðar og *eldfjallajörð* er mikilsvert að traust gróðurhula sé á yfirborðinu, helst með djúpstæðu rótarkerfi sem heldur moldinni stöðugri allt árið um kring.

Þá er einnig mikilvægt að veita vatni frá slíkum svæðum þar sem verja þarf mannvirki, þ.e. minnka líkur á að moldin nái flæðimarki. Rask við þessar aðstæður getur verið hættulegt, s.s. beit þungra dýra (hross og nautgripir) og ofsaveður, jafnvel með snjóbráð. Á mynd 10.16. er dæmi um rándýrar verkfræðiaðgerðir til að minnka hættu á skriðuföllum samfara vegagerð á Hokkaídó-eyju í Japan.

10.9.5. Harðpönnur

Gjóskan getur límst saman af ýmsum orsökum og orðið að svokölluðum harðpönnum (e. hard-pans, indurated soil horizons), en slíkt er algengast í hitabeltinu (sjá kafla um *hitabeltisjörð*). Gosefnin geta bæði hafa borist með lofti eða í eðjuflóðum. Límingin getur stafað af eins konar móbergsmyndun eða

Mynd 10.16. Verkfræðilegar aðgerðir til að hamla skriðuföllum á nýgerðan veg um hálendi Hokkaídó-eyju í Japan. Japanir reyna einnig að halda í öfluga skógarhulu í fjallshlíðum til að minnka hættu á skriðum.

að steindir á borð við allófan-ímógólít og smektít tengja kornin saman, sem og kísill og járn. Harðpönnur finnast víða á eldfjallasvæðum og geta haft afar neikvæð áhrif á vatnsbúskap og ræktunarskilyrði. Meðfylgjandi mynd (mynd 10.17 til hægri) sýnir harðpönnu í basískri gjósku á Asoreyjum, en hún minnir um margt á víðfeðmar harðpönnur sem liggja undir yfirborði á Rangárvöllum (mynd 10.17 til vinstri) og víðar. Rof sem fjarlægir mold ofan af harðpönnum veldur miklu tjóni í ræktun í Mexíkó (e. tepetates – Servenay og Pratt 2003) og víðar.

10.10. Flokkun *eldfjallajarðar*

10.10.1. Megineinkenni (e. central concept)

Áður var vikið að sortueiginleikum (e. andic properties) sem notaðir eru til að skilgreina *eldfjallajörð*. Það er oxalatskolun og mæling á Al_{ox}, Fe_{ox} og Si_{ox} sem er mælikvarði á einkennisleir og málmhúmus-knippi í *eldfjallajörð*.[2] Það eru einmitt þessi agnarsmáu efni – örefnin – sem gefa jarðveginum flesta þá eiginleika sem við köllum sortueiginleika. Þessi mæling er því sú sem skiptir mestu máli við greiningu á *eldfjallajörð*. Ál er meginefnið í allófani og ímógólíti (leirnum) og er að finna í málm-húmus-knippunum. Því er það notað, ásamt Fe_{ox} sem er í ferrihýdríti og járn málm-húmus-knippum, séu þau til staðar.

Jarðvegur þarf að hafa >2% $(Al+½Fe)_{ox}$ til að teljast til *eldfjallajarðar*.[2] Undantekning er þó ef jarðvegurinn inniheldur gler (gjósku), eins og síðar verður vikið að, en þá minnka kröfurnar um innihald $(Al+½Fe)_{ox}$. Það á einmitt við um nær alla mold á Íslandi.

Það megineinkenni *eldfjallajarðar* að hún bindur fosfór er einnig notað við flokkun hennar og verður fosfórbindingin að vera >70–90% samkvæmt staðlaðri aðferð (70% samkvæmt FAO-WRB og 90% samkvæmt Soil Taxonomy).

Eldfjallajörð er létt í sér og með mikið holrými, en það er leirinn og lífrænu knippin sem gefa jarðveginum þennan eiginleika. Afleiðing þess er að hann getur bundið mjög mikið af vatni. Þessi eiginleiki er einkennandi fyrir alla *eldfjallajörð* og mjög mikilvægur. Því er síðasta greiningareinkennið að rúmþyngd jarðvegsins verður að vera minni en 0,90 g/cm³.

Ef þessum þremur skilyrðum hefur verið fullnægt telst jarðvegurinn vera *eldfjallajörð*. Sömu einkenni eru notuð

2. Algengt er að vísa til nýsjálensks heftis eftir Blakemore o.fl. (1987) um aðferðir til að ákvarða helstu eiginleika *eldfjallajarðar*.

Mynd 10.17. Harðpönnur á Geitasandi á Rangárvöllum (til vinstri) og á Asoreyjum (til hægri). Pönnurnar koma í veg fyrir að vatn berist ofan í moldina og geta valdið miklu vatnsrofi í úrfelli og við snjóbráð á vetrum á Íslandi.

í Soil Taxonomy og WRB. Rétt er að hafa í huga þau skil sem eru á milli *eldfjallajarðar* og mójarðar, sem áður var vikið að. *Eldfjallajörð* getur haft allt að 25% af kolefni (Soil Taxonomy) en samt sem áður flokkast sem *eldfjallajörð*. Blaut *eldfjallajörð* á Íslandi getur fallið undir Gleysol samkvæmt WRB.

10.10.2. *Glerjörð* (Vitrisol)

Það er meginkennisetning við flokkun á mold að leggja beri til grundvallar eiginleika jarðvegs sem hafa mótast við jarðvegsmyndun. Þannig eiga þættir eins og loftslag, gróður eða móðurefni ekki að ráða flokkuninni einir og sér, jafnvel þótt þeir hafi áhrif á hvernig jarðvegur myndast. Þetta er þó ekki einhlítt þegar á hólminn er komið. Bandaríska kerfið notar til dæmis loftslag sem meginþátt við skiptingu í flokka eftir jarðvegsgerðum. En sú ætlan að binda jarðvegsflokka við ferli jarðvegsmyndunar er ein helsta ástæða þess að skilgreining á lítið veðruðum gjóskuríkum jarðvegi fór í umdeildan farveg í stóru flokkunarkerfunum, að mati höfundar.

Í fyrstu var gerður skýr greinarmunur á gjóskuefnum (e. vitric) og sortuefnum (e. andic materials) þar sem gjóskuefnin taka eiginleikana frá gjóskunni en jarðvegsmyndun hefur aftur á móti myndað sortueiginleikana (e. andic properties). Svo er ekki lengur, heldur er slakað á kröfunni um >2% $(Al+½Fe)_{ox}$ sé gler til staðar þegar rétt hefði verið að aðgreina þessar tvær tegundir *eldfjallajarðar* betur. Þetta atriði skiptir höfuðmáli fyrir flokkun á íslenskri mold – því stór hluti jarðvegs landsins (>40%) telst vera glerkenndur (e. vitric), þ.e. jarðvegur auðna. Niðurstaðan er sú að jarðvegur auðna og mólendis er hafður í sama flokki á efstu stigum bæði Soil Taxonomy og að hluta í WRB.

Við skilgreiningu á flokknum *eldfjallajörð*[3] í Soil Taxonomy (síðar tekið upp af WRB) var ákveðið að taka með hluta þess jarðvegs sem telst vera *gjóskujörð* eða *glerjörð* (e. vitric) af því að menn höfðu það á tilfinningunni („it was felt" ... orðrétt úr texta ICOMAND) að slíkur jarðvegur ætti heima með *eldfjallajörð* ef hann hefði ummerki sortueiginleika. Því var bætt við þeirri skilgreiningu að glerjörð sem hefði >0,4% $(Al+½Fe)_{ox}$ þ.e. mælanlega sortueiginlega í gjóskuefnunum, teldist til *eldfjallajarðar* en *glerjörð* sem næði ekki þessu marki teldist til *frumjarðar* (Entisol í Soil Taxonomy, Leptosol í WRB).

Eftir því sem glerinnihald minnkar aukast síðan kröfur um $(Al+½Fe)_{ox}$ – innihald línulega, eins og sjá má í meðfylgjandi grafi (mynd 10.18). Þess ber að geta að íslenskur jarðvegur auðna hefur oftast >$(Al+½Fe)_{ox}$ og telst því til *eldfjallajarðar* (Andisol/Andosol) samkvæmt stóru kerfunum.

Eftir að byrjað var að flokka glerkennda mold (e. vitric) með þeirri aðferð sem hér var lýst var farið að flokka *glerjörð* á grundvelli sortueiginleika, sem verður að teljast umdeilanlegt. Benda má á að samkvæmt meginhugmyndum WRB geta móðurefni ráðið flokkun jarðvegs ef það er mikilvægasta einkenni hans.[4]

Soil Taxonomy notar vatnsinnihald þurrs jarðvegs (15 bara togspenna) til að skilgreina Vitrands (Vitric Andosols) (15% vatnsinnihald mælt í sýnum sem hafa verið þurrkuð en 30% í sýnum sem hafa ekki verið þurrkuð) (Soil Survey Staff 1999) en hafa að öðru leyti sortueiginleika (>0,4% $(Al+½Fe)_{ox}$) ef mikið er af gleri/gjósku, eins og lýst er hér að ofan. Soil Taxonomy skilgreinir Cryand á undan Vitrands, sem þýðir að á öðru stigi fellur megnið af íslenskri mold undir Cryand en síðan sem Vitricryand á þriðja stigi. Það verður að teljast afskaplega bagalegt að svo ólíkar jarðvegstegundir og þær sem þekja auðnir landsins og gróna jörð skuli ekki vera aðskildar á efsta

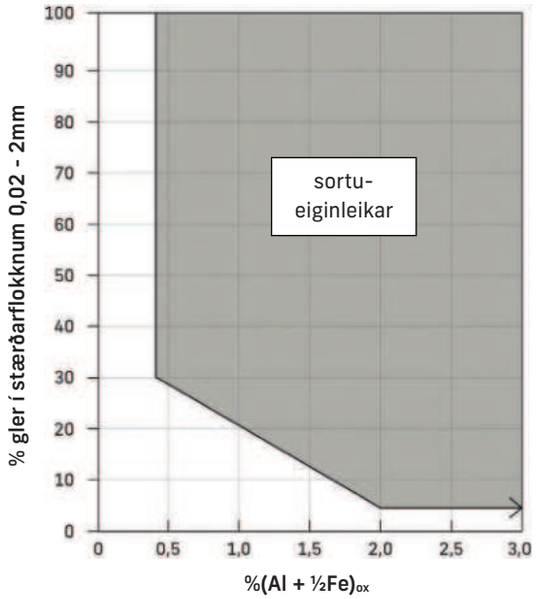
3. Settur var á fót sérstakur alþjóðlegur starfshópur til að móta flokkun *eldfjallajarðar* (Andisol) fyrir Soil Taxonomy undir forsæti Nýsjálendings. Starfshópurinn skilaði inn 10 framvinduskýrslum (ICOMAND) sem eru mjög fróðlegar heimildir um hvernig hugmyndir um flokkun jarðvegs þróuðust og um þróun þekkingar á *eldfjallajörð*. Grein Shoji o.fl. 1996 gefur til kynna hvernig flokkun *eldfjallajarðar* (Andosol) þróaðist í FAO-WRB kerfinu, en mjög er byggt á vinnu ICOMAND.

4. „... at the higher categoric level classes are differentiated mainly according to the primary pedogenetic process that has produced the characteristic soil features, except where 'special' soil parent materials are of overriding importance". FAO-WRB, 1998.

þrepinu. WRB fer hins vegar þá leið að skilgreina „vitric vísieiginleika“ (e. vitric diagnostic properties) en auk þess að efnið skuli standast þær skilgreiningar sem settar voru fram hér á undan, svipað og Soil Taxonomy – sem er eiginlega sérkennileg hringekja. Betra er að skilgreina *glerjörðina* sérstaklega – Vitrisols á grundvelli „glereiginleika“ (e. vitric properties).

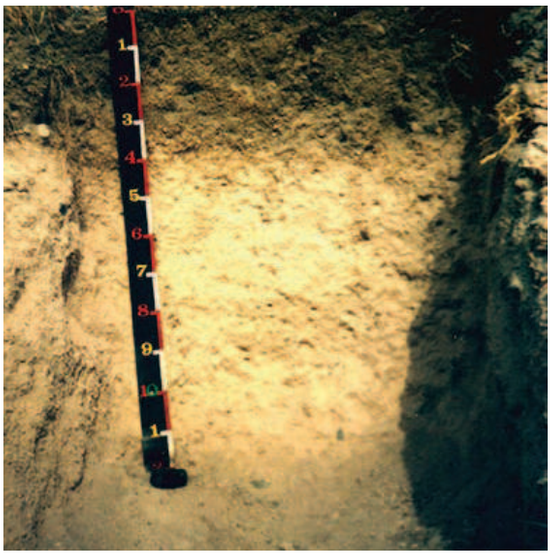
Af þessu má ráða að aðferðir WRB og Soil Taxonomy hafa ýmsa galla þegar kemur að íslenskum jarðvegi. Þær treysta um of á ammoníum oxalat-aðferðina, en ÓA og Sigurður Gíslason (2002) hafa bent á að við mælingar á jarðvegi í basískri gjósku kunni oxalatið einnig að leysa upp illa kristallað gler þannig að aðferðin mæli ekki einvörðungu allófan og húmusknippi. Kísilrík gjóska veðrast hægt, sérstaklega í þurru loftslagi, og er því ekki sérstaklega rík af allófani. En við núvarandi flokkun tapast upplýsingar um jarðveg á heimsvísu, *glerjörðin* er flokkuð sem eitthvað annað (*frumjörð*), sérstaklega ef gjóska er kísilrík í þurru loftslagi. *Glerjörð* væri hægt að skilgreina á grunni „vitric“ jarðvegseiginleika (vísieiginleika) og væri þá skilgreind á eigin forsendum en ekki þeim sem byggja á sortueiginleikum. Það er að hluta til gert í íslenska kerfinu sem kynnt er í næsta kafla.

Gjóskuefnin mynda mjög sérstæðan jarðveg með sérstaka eiginleika hvar sem er, jafnvel þótt ekki hafi myndast mikið af allófani í jarðveginum sem réttlætir sérstaka flokkun, ekki síst á Íslandi, eins og vikið er að í kafla um flokkun jarðvegs á Íslandi. Þessir eiginleikar eru mikilvægir með tilliti til landnýtingar, hættu á skriðuföllum o.fl. er leiðir af skorti á samloðun. Einnig er slíkur jarðvegur mjög mikið nýttur til hvers kyns ræktunar, t.d. á vínvið, eins og á eyjunni Santorini í gríska Eyjahafinu (mynd 10.19). Ekki hefur þessi leið verið farin í öllum flokkunarkerfum að sameina hluta



Mynd 10.18. Minnkandi kröfur um sortueiginleika mældir sem $(Al+½Fe)_{ox}$ sýndar á x-ás eftir því sem gler/gjóskuinnihald jarðvegsins vex (y-ás).

gjóskujarðar við *eldfjallajörð* en setja ómótaða gjósku í aðra jarðvegsflokka. Flokkun Nýsjálendinga, sem Alan Hewitt er aðalhöfundur að, gerir ráð fyrir lítið veðruðum gjóskujarðvegi (e. Pumice Soils) og einnig flokkunarkerfi FitzPatricks (Vitrons). Hjá LbhÍ (áður Rala) hefur þessi sama leið verið farin varðandi flokkun, enda er þessi flokkur jarðvegs sá útbreiddasti á Íslandi (sjá kafla um íslenskan jarðveg).



Mynd 10.19. *Glerjörð* á eyjunni Santorini í gríska Eyjahafinu sem þróast hefur í nokkur þúsund ára gjóskulag. Í þessari mold fer fram margvísleg ræktun, m.a. vínrækt. Moldin telst ekki til Andosol (WRB) eða Andisol (ST) þrátt fyrir sérstök einkenni sín sem rekja má til gjóskunnar.

10.11. Útbreiðsla *eldfjallajarðar*

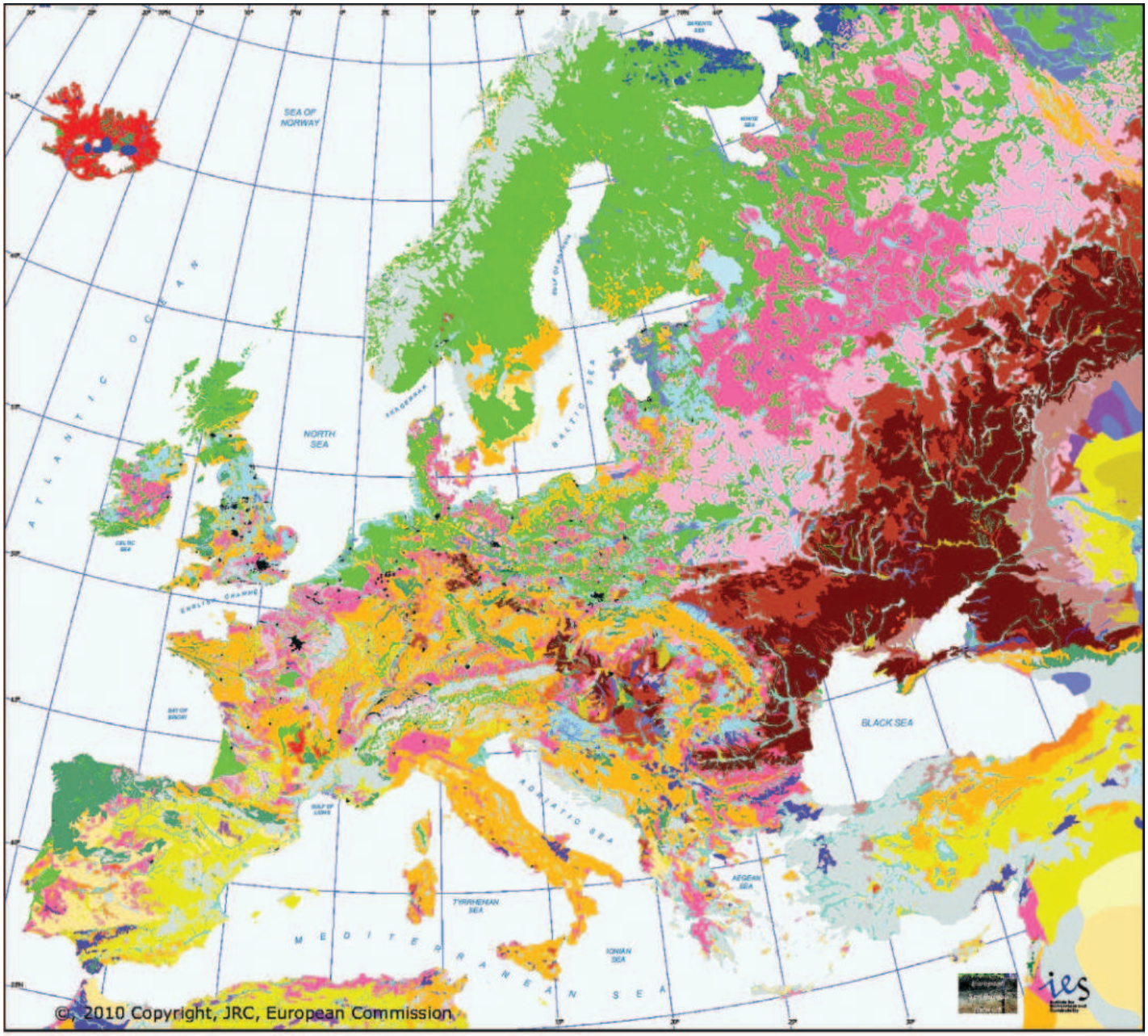
Það hefur verið áætlað að *eldfjallajörð* þeki um 1,2 milljón ferkílómetra jarðar (sjá Kimble o.fl., 2000). Miðað við þessa tölu má ætla að 5–7% *eldfjallajarðar* séu á Íslandi. Útbreiðslan er þó í raun illa þekkt því jarðvegur hefur ekki verið kortlagður á mörgum þeirra svæða þar sem mikið er af *eldfjallajörð* og dreifingin er víða slitrótt.

Helstu svæðin eru á eldvirka beltinu umhverfis Kyrrahaf og á eyjaklösum í Indónesíu. Stór svæði eru í fjallakeðjunni á Kyrrhafsströnd Alaska og Bandaríkjanna en einnig í Ekvador og Chile, í Japan og á Nýja-Sjálandi. Stærsta svæðið í Evrópu utan Íslands er líklega í Frakklandi (Massif Central – Quantin 2004). Þar gekk ísaldarjökull yfir gömul (tertíer) eldvirk svæði og myndaði nýtt yfirborð með gjóskuríkum bergefnum þar sem *eldfjallajörð* hefur síðan þróast. Þar hefur einnig orðið eldvirkni á nútíma eftir að ísöld lauk. Víða í Evrópu er að finna afmörkuð eldvirk svæði, m.a. á fyrrnefndu svæði í Frakklandi, á Ítalíu, í Grikklandi, á Kanaríeyjum, Asoreyjum, Madeira og á slitróttu belti norðan Alpafjalla, m.a. í Þýskalandi, Ungverjalandi, Slóveníu og Rúmeníu.

Eldfjallajörð kemur fyrir í öllum loftslagsbeltum. Þó hefur þurrkur í eyðimerkurloftslagi komið í veg fyrir að veðrun sé nóg til að jarðvegurinn taki eiginleika sína af allófani eða málm-húmus-knippum. Er þá ekki talað um Andosols (WRB) eða Andisols (Soil Taxonomy), heldur ómótaðan jarðveg (Leptosols, Cambisols o.fl., FAO-WRB; Entisols, Inceptisols, Soil Taxonomy). Sönnu nær væri að kalla þann jarðveg *glerjörð*, Vitrisols, Pumice soils eða Tephra soils, eins og gert er á Nýja-Sjálandi og í því flokkunarkerfi fyrir íslenskan jarðveg sem hér er notað, sbr. umfjöllun hér að ofan um flokkun *eldfjallajarðar*.

Eldfjallajörð er oft og tíðum frjósamur jarðvegur. Víða er þéttbýlt á þessum svæðum. Það skýrist af frjósemi jarðvegsins og þeirri staðreynd að *eldfjallajörð* myndast einkum þar sem loftslag er frekar rakt og því unnt að stunda jarðrækt. Mörg eldfjallasvæði eru mjög þéttbýl, og talið er að um 10% jarðarbúa búi á slíkum svæðum þrátt fyrir takmarkaða útbreiðslu þessa jarðvegsflokks.

Mynd 10.20. Um hálfrar aldar gömul *glerjörð* á Asoreyjum. Gróður hefur ekki náð fótfestu vegna óstöðugleika yfirborðsins og örrar uppgufunar (vatnsskortur) auk þess sem fræregn kann að vera takmarkað.



- **Albeluvisols:** Súr mold, tungur af E-lagi niður í moldina þar undir.
- **Arenosols:** *Sandjörð*. Jarðvegur sem þróast í sand, m.a. fjörur og eyðimerkursandar.
- **Cambisols:** *Ungjörð*, aðeins þróuð með Bw-lag.
- **Cryosols:** *Frerajörð*. Jarðvegur með sífrera.
- **Gleysols:** *Votjörð*. Grunnvatn stendur iðulega mjög hátt.
- **Histosols:** *Mójörð*. Jarðvegur með mikið af lífrænum efnum.
- **Andosols:** *Eldfjallajörð*.
- **Calcisols:** *Kalkjörð*.
- **Chernozems:** Dökk og frjó *graslendisjörð*.
- **Fluvisols:** Jarðvegur sem myndast í árset og flóðaset.
- **Gypsisols:** Mikið af gifsi ($CaSO_4$) í jarðveginum.
- **Kastanozems:** *Graslendisjörð* með mikið af lífrænum efnum í yfirborðslögum.
- **Leptosols:** Grunn mold á hörðu bergi eða grófri möl.
- **Luvisols:** Jarðvegur með leirríkt Bt-lag. Oft jarðvegur laufskóga á norðurhveli.
- **Phaeozems:** Dökk en nokkuð veðruð mold með lífrænu yfirborðslagi.
- **Vertisols:** *Leirjörð*. Mikið af smektítleir.
- **Podzols:** *Barrskógajörð* – súr mold með E- og Bh-lagi.
- **Regosols:** Ungur jarðvegur án skýrra jarðvegslaga.
- **Solonchaks:** Sölt mold vegna söfnunar við uppgufun.
- **Solonetz:** Mold með hátt pH og leirrík undirlög með Na.
- **Stagnosols:** Jarðvegur með kyrrstæðu (fúlu) jarðvegsvatni.
- **Technosols:** Manngerð mold – leifar búsetu mannsins.
- **Umbrisols:** Ung og súr mold með dökku lífrænu yfirborðslagi.
- **Planosols:** Mold þar sem vatn helst af og til í moldinni vegna grófra laga sem hamla vatnsflæði.

Mynd 10.21. Jarðvegskort af Evrópu (WRB-kerfið). *Eldfjallajörð* er rauð á kortinu. Ísland á langsamlega mesta hlutdeild í slíkum jarðvegi. *Barrskógajörðin* er ljósgræn og einkennir barrskóga Fenno-Skandinavíu, hluta Skotlands og Norður-Evrópu. Heimild: Soil Atlas of Europe, Soil Bureau Network 2005.

Mynd 10.22. Þéttbýlt svæði í fjöllum Eþíópíu sem byggist á frjósemi *eldfjallajarðar*. Hver fjölskylda býr á fremur litlum jarðskika, álagið á landið er gríðarlegt en ekki enn yfir þolmörkum.

Mynd 10.23. ÓA skiptist á skoðunum við FitzPatrick, prófessor við háskólann í Aberdeen, um *eldfjallajörð* á Kanaríeyjum. FitzPatrick var meginleiðbeinandi margra evrópskra jarðvegsvísindamanna sem hafa rannsakað *eldfjallajörð*, m.a. Þorsteins Guðmundssonar sem starfaði lengi við Landbúnaðarháskólann og hefur gefið út kennslubók um jarðvegsfræði. Mynd: Hlynur Óskarsson.

Heimildir

Ritað efni um *eldfjallajörð* er af ýmsum toga og skal hér getið nokkurra heimilda sem notaðar voru við samningu þessa kafla. Bók Shoji og félaga (1993, Volcanic Ash Soils, Genesis Properties and Utilization) er ítarleg samantekt, en nokkuð torlesin og komin til ára sinna. Tvö sérhefti vísindatímarita, tileinkuð *eldfjallajörð* (Geoderma, Bartoli o.fl. 2003; Catena, ÓA og Stahr 2004), sem og ítarleg ritgerð Dahlgren o.fl. (2004) eru mikilvægar heimildir um *eldfjallajörð*. Kaflar í Handbook of Soil Science (Kimble o.fl. 2000; McDaniel o.fl. 2012) og Encyclopedia of Soil Science (ÓA 2008) eru helgaðir *eldfjallajörð*. ÓA (2013) ritaði einnig yfirlitsgrein um áhrif gjósku á vistkerfi sem stuðst er við hér að nokkru leyti. Að síðustu má nefna þykka bók með fjölda greina um *eldfjallajörð* sem gefin var út á vegum evrópsks samstarfshóps um jarðveg á eldfjallasvæðum Evrópu: Soils of Volcanic Regions in Europe (ÓA o.fl. 2007) (mynd 10.3). Svipað efni og birtist í þessum kafla er jafnframt að finna í bókinni The Soils of Iceland (ÓA 2015).

Bartoli, F., P. Buurman, B. Delvaux og M. Madeira 2003. Volcanic Soils: Properties and Processes as a Function of Soil Genesis and Land use. Geoderma 117, Special issue. Elsevier, Amsterdam, Holland.

Blakemore, L.C., P.L. Searle og B.K. Daly 1987. Methods for chemical analysis of soils. New Zealand Soil Bureau Science Report 80, Lower Hutt, New Zealand.

Dahlgren, R.A. 1994. Quantification of allophane and imogolite. Í: J.E. Amonette og L.W. Zelazny (ritstj.), Quantitative Methods in Soil Mineralogy. Soil Science Society of America Miscellaneous Publication, Madison, Wisconsin, USA.

Dahlgren, R.A., M. Saigusa og F.C. Ugolini 2004. The nature, properties and management of volcanic soils. Advances in Agronomy 82:113–182.

Dale, V.H., F.J. Swanson og C.M. Crisafulli (ritstj.) 2005. Ecological Responses to the 1980 Eruption of Mount St. Helens. Springer, USA.

De Paepe, P. og G. Stoops 2007. A classification of tephra in volcanic soils. A tool for soil scientists. Í: Ólafur Arnalds, F. Bartoli, P. Buurman, Hlynur Óskarsson, G. Stoops og E. García-Rodeja (ritstj.), Soils of Volcanic Regions of Europe. Springer, New York, USA. Bls. 119–125.

Duchaufour, P. 1977. Pedology. Þýdd af T.R. Paton. George Allen & Unwin, London, UK.

FAO-UNESCO 1998. World Reference Base for Soil Resources. World Soil Resources Reports 84, FAO, Róm, Ítalía.

Harsh, J., J. Chorover og E. Nizeyimana 2002. Allophane and imogolite. Í: J.B. Dixon og D.G. Schulze (ritstj.), Soil Mineralogy with Environmental Applications. Soil Science Society of America Book Series, Madison, Wisconsin, USA. Bls. 291–322.

Kimble, J.M., C-L. Ping, M.E. Sumner og L.P. Wilding 2000. Andisols. Í: M.E. Sumner (ritstj.), Handbook of Soil Science. CRC Press, Boca Raton, USA. Bls. E209–224.

Magnús Á. Sigurgeirsson, Ólafur Arnalds, Sigurður E. Pálsson, B.H. Howard og Kjartan Guðnason 2005. Radiocaesium fallout behaviour in volcanic soils in Iceland. Journal of Environmental Radioactivity 79:39–53.

McDaniel, P., D.J. Lowe, Ólafur Arnalds og C-L. Ping. 2012. Andisols. Í: Huang, P.M., Y. Li, M.E. Sumner (ritstj.), Handbook of Soil Science 2. útg. CRC Press, Taylor & Francis, Boca Raton, Florida, USA. Bls. 33.29–33.48

Ólafur Arnalds 1993. Leir í íslenskum jarðvegi. Náttúrufræðingurinn 63:73–85.

Ólafur Arnalds 2008. Andosols. Í: W. Chesworth (ritstj.), Encyclopedia of Soil Science. Springer, Dordrecht, Holland. Bls. 39–46.

Ólafur Arnalds 2013. The influence of volcanic tephra (ash) on ecosystems. Advances in Agronomy 121:331–380.

Ólafur Arnalds 2015. The Soils of Iceland. World Soils Book Series. Springer, Dordrecht, Holland.

Ólafur Arnalds og K. Stahr 2004. Volcanic Soil Resources: Occurrence, Development and Properties. Catena 56, Special issue, Amsterdam, Holland.

Ólafur Arnalds og Sigurður R. Gíslason 2002. Validity of oxalate extraction for characterization and Al/Si calculations for vitric Andosols. Mainzer Naturwissenschaft Archiv 40:13–14.

Ólafur Arnalds, F. Bartoli, P. Buurman, Hlynur Óskarsson, G. Stoops og E. García-Rodeja (ritstj.) 2007. Soils of Volcanic Regions of Europe. Springer, New York, USA.

Parfitt, R.L. 1990. Allophane in New Zealand – a review. Australian Journal of Soil Research 28:343–360.

Parfitt, R.L. og B. Clayden 1991. Andisols – the development of a new order in Soil Taxonomy. Geoderma 49:181–198.

Parfitt, R.L. og J.M. Kimble 1989. Conditions for formation of allophane in soils. Soil Science Society of America Journal 53:971–977.

Pavla Dagsson-Waldhauserová, Ólafur Arnalds, Haraldur Ólafsson, J. Hladil, R. Skala, L. Chadimova og O. Meinander 2015. Snow-Dust Storm: Unique case study from Iceland, March 6–7, 2013. Aeolian Research 16:69–74.

Quantin, P. 2004. Volcanic soils of France. Catena 56:95–109.

Schwertmann, U. og R.M. Taylor 1989. Iron oxides. Í: J.B. Dixon og S.B. Weed (ritstj.), Minerals in Soil Environments. 2. útg. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA. Bls. 379–438.

Servenay, A. og C. Pratt 2003. Erosion extension of indurated volcanic soil of Mexico by aerial photographs and remote sensing analysis. Geoderma 177:367–375.

Shoji, S., M. Nanzyo og R.A. Dahlgren 1993. Volcanic Ash Soils. Genesis, Properties and Utilization. Developments in Soil Science 21, Elsevier, Holland.

Shoji, S., M. Nanzyo, R.A. Dahlgren og P. Quantin 1996. Evaluation and proposed revisions of criteria for Andosols in the World Reference Base for Soil Resources. Soil Science 161:604–615.

Soil Bureau Network 2005. Soil Atlas of Europe. European Commission, Office for Official Publications of the European Communties, Luxemburg.

Þorsteinn Guðmundsson 1994. Jarðvegsflokkun FAO með hliðsjón af íslenskum aðstæðum. Fjölrit RALA nr. 167. Reykjavík.

Þorsteinn Guðmundsson 2018. Jarðvegsfræði. Myndun, vist og nýting. Háskólaútgáfan, Reykjavík.

11 Meginflokkar jarðvegs á Íslandi

Mynd 11.1. Skorradalur. Birkiskógurinn tórir fjær og er mjög ríkur af lífrænum efnum (*brúnjörð*). Nær eru jarðvegsflokkar sem hafa háa jarðvatnsstöðu en mismikið af lífrænum efnum og spanna *votjörð*, *svartjörð* og *mójörð* (í mýri næst vatninu). Einnig eru þarna rýrir þurrlendismóar. Margir jarðvegsflokkar koma fyrir á fremur litlu svæði – sem er einkennandi fyrir íslenska náttúru. Unnt er að greina þessa yfirflokka í undirflokka, byggt á magni og gerð lífrænna efna, leirinnihaldi, dýpt og fleiri þáttum.

Heimkynni *eldfjallajarðar*

Eldfjallajörð myndast fyrst og fremst þar sem gjóska er meðal móðurefna.

Eldfjallajörð þróast einnig í basísk hraunlög og jafnvel í önnur móðurefni við sérstök umhverfisskilyrði. En víðfeðmustu svæðin þar sem *eldfjallajörð* er í yfirborði eru gjóskufallssvæði.

Í kaflanum um jarðvegsflokka heimsins var farið nokkrum orðum um mikilvægi þess að flokka jarðveg almennt og helstu atriði sem lögð eru því til grundvallar. Það er vitaskuld einnig nauðsynlegt að flokka íslenskan jarðveg, bæði til brúks innanlands og til að setja moldina okkar í alþjóðlegt samhengi.

Íslendingar orðlengja það gjarnan hversu margt sé sérstakt og jafnvel einstakt í íslenskri náttúru eða menningu miðað við aðstæður erlendis. Það er örugglega óhætt að bæta íslenskri mold á þann lista – miðað við náttúrufar og mold í nágrannalöndunum og jafnvel á heimsvísu. Hún er að stærstum hluta *eldfjallajörð*, sem er hinn sérstæði jarðvegur sem myndast í gjóskurík móðurefni. En aðstæður á Íslandi eru um margt aðrar en á öðrum eldvirkum svæðum. Þar má nefna mikla útbreiðslu votlendis, víðfeðmar auðnir, mikið áfok gjóskuefna og mikil áhrif kulferla (16. kafli) auk þess sem basísk gjóska er ekki mjög útbreidd annars staðar á jörðinni. Því teljast margir flokkar jarðvegs á Íslandi afar sérstakir miðað við aðra *eldfjallajörð* í heiminum. Vikið var að eiginleikum *eldfjallajarðar* í 10. kafla og flest sem þar er rakið á vitaskuld við um íslenska mold.

Það er tiltölulega stutt síðan náttúrufræðingar tóku að flokka íslenska mold sem *eldfjallajörð* en um leið urðu margir eiginleikar jarðvegsins skiljanlegri. Það er eftirtektarvert að í samantekt Shoji o.fl. (1993)[1] um útbreiðslu *eldfjallajarðar* á jörðinni er Íslands ekki getið, enda þótt hún kunni að nema allt að 5% af heildarflatarmáli þessarar jarðvegsgerðar í heiminum. Þetta hefur þó breyst á undanförnum árum því gögn um íslenskan jarðveg eru nú hluti af alþjóðlegum kortagrunnum og gögnum, m.a. hinum evrópska jarðvegsatlas og atlas fyrir jarðveg á norðurhjara.

Björn Jóhannesson telst helsti frumkvöðull jarðvegsfræði á Íslandi, en hann lauk Ph.D.-prófi í jarðvegsfræði frá Cornell-háskóla í Bandaríkjunum 1945. Bók Björns, *Soils of Iceland* (1960), sem byggist á doktorsverkefni hans, er þrekvirki þar sem lagður var grunnur að flokkun íslensks jarðvegs. Hún hefur komið út á íslensku (*Íslenskur jarðvegur*, 1960, endurprentuð 1988). Björn vann jarðvegskort í mælikvarðanum 1:750 000 ásamt Nygard (Nygard og Jóhannesson, 1959). Björn hvarf því miður fljótlega til starfa erlendis en á þeim tíma benti ýmislegt til þess að íslenskur jarðvegur hefði eiginleika á borð við aðra mold á eldvirkum svæðum, svo sem í Japan, enda er minnst á þann möguleika í eins konar eftirmála í riti hans (Tu 1960).

Af öðrum eldri tilraunum til að kortleggja jarðveg má m.a. telja vinnu Bjarna Helgasonar og Grétars Guðbergssonar (1977) og Grétars og Sigfúsar Ólafssonar (1978), sem að stórum hluta byggðist á flokkun Björns Jóhannessonar. Einnig er til mun eldra jarðvegskort frá 1912 í bók sem nefnist *Die Bodenkultur Islands*, en það byggist á kortlagningu danska herforingjaráðsins á Íslandi (Gruner 1912). Bókin ber þess merki með ýmsu móti að hafa komið út í árdaga jarðvegsfræðinnar.

Þorsteinn Guðmundsson (1994) þýddi og staðfærði eldri flokkun FAO (frá 1988; fyrirrennari WRB-kerfisins) og birti í fjölriti RALA. Meginflokkar Þorsteins voru eyrarjörð (Fluvisol), gljáajörð (Gleysol), frumjörð (Regosol), klapparjörð (Leptosol), sandjörð (Arenosol), móajörð (Andosol) og mýrajörð (Histosol).

Samkvæmt þessari staðfærslu Þorsteins er jarðvegur auðna ekki flokkaður sem Andosol og jarðvegur votlendis flokkaður sem gljáajörð ef lífrænt kolefni er innan við <12% (þó háð öðrum þáttum á borð við leirinnihald) og mýrajörð ef % C er hærra en 12% (sjá

1. ÓA hitti Shoji í Japan árið 1990 og samið var um komu hans til landsins. En Flóabardagi kom í veg fyrir að japönskum vísindamönnum væri leyft að ferðast til útlanda – svo ekki varð af komunni og fyrirhugaðri samvinnu.

einnig bók Þorsteins Guðmundssonar, 2018). WRB/FAO-kerfið flokkar votlendi með sortueiginleika (e. andic diagnostic properties) sem Gleysol en Soil Taxonomy sem *eldfjallajörð* (Andisol) því það er metið sem svo í bandaríska kerfinu að sortueiginleikarnir séu meira ráðandi en jarðvegsvæta fyrir þessa jarðvegsgerð.

Votlendi með sortueiginleika eru sérstakir jarðvegsflokkar í kerfinu sem hér er kynnt en þessir flokkar eru jafnframt taldir til *eldfjallajarðar* – þ.e. farið er að dæmi Soil Taxonomy. Jarðvegur auðna fellur sömuleiðis undir skilgreiningar á *eldfjallajörð* samkvæmt Soil Taxonomy og stór hluti eða stærsti hlutinn samkvæmt WRB. Flokkunin sem hér er kynnt til sögunnar ber nokkurn keim af flokkunum Björns Jóhannessonar og Þorsteins Guðmundssonar en víkur þó frá þeim í nokkrum veigamiklum atriðum sem eru kynnt jafnharðan.

11.1. Íslenskir jarðvegsflokkar

Samkvæmt útbreiddustu flokkunarkerfum heims, hinu bandaríska Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999) og WRB-flokkun IUSS-FAO (IUSS Working Group WRB, 2022), telst stærsti hluti íslensks jarðvegs til *eldfjallajarðar* – Andisol (bandaríska kerfið) eða Andosol (WRB). Hlutdeild jarðvegs sem telst Andosol samkvæmt WRB er þó minni en samkvæmt Soil Taxonomy, eins og vikið er að í meðfylgjandi textaboxi.

Íslensk mold er eigi að síður afar margvísleg að gerð og er flokkuð í nokkrar megingerðir. Nánar er fjallað um þróun kerfisins og tengsl við önnur flokkunarkerfi í grein í *Náttúrufræðingnum* (ÓA og Hlynur Óskarsson, 2009). Eftirfarandi umfjöllun um íslenska jarðvegsflokka er hliðstæð efnistökum í þeirri grein.

Votlendi og flokkun WRB

Eins og áður hefur komið fram flokkast stór hluti *votjarðar* og *svartjarðar* á Íslandi sem **Gleysol** („grámajörð“) samkvæmt WRB.

Það er vegna þess að Gleysol er dregin út á undan Andosol samkvæmt greiningarlykli WRB. Til stóð að kanna hvort ástæða væri til að breyta þessu í WRB og þá til samræmis við Soil Taxonomy, sem síðan varð ekki af. Votlendisjarðvegur er ekki flokkaður sérstaklega á efsta þrepi Soil Taxonomy og því flokkast *votjörð* og *svartjörð* sem *eldfjallajörð* (Andisol) í því kerfi. Þegar jarðvegur er flokkaður sem Gleysol samkvæmt WRB er það gert ef ummerki sjást („grámaeinkenni“) um að grunnvatn standi „hátt“ (alltaf eða á tímabili) í jarðveginum – en jafnvel þótt það stjórni ekki eiginleikum efsta lagsins (votlendiseinkenni fyrir neðan t.d. efstu 30 cm moldarinnar).

Þetta er í raun bagalegt fyrir notkun kerfisins hérlendis, því út frá vistfræðilegu sjónarmiði ættu eiginleikar efsta hluta moldarinnar að ráða. Það er sú leið sem við höfum farið. Þá þarf iðulega að moka ansi djúpar holur til að ákvarða flokkunina á efsta stigi samkvæmt WRB. Að auki eru sortueiginleikarnir það ráðandi að mikilvægara er að draga þá fram á efsta stiginu (eins og gert er í Soil Taxonomy) en votlendiseinkenni. *Votjörð* og *svartjörð* flokkast sem Aquand (blaut Andisol) í Soil Taxonomy – sem er glögg lýsing á jarðvegi votlendis á Íslandi en einnig Cryands utan láglendissvæðis (sjá síðar).

Vera má að Soil Taxonomy bæti votlendisjarðvegi í sína flokkun á efsta stigi (sambærilegt við Gleysol) í framtíðinni og þá verður fróðlegt að fylgjast með hvort *votjörðin* á Íslandi verði talin áfram til *eldfjallajarðar* eða teljist undirflokkur votlendisjarðvegs.

Við mótun kerfisins er horft til þeirra tveggja umhverfisþátta sem eru hvað mest ráðandi við myndun jarðvegs á Íslandi – áfoks og vatnsstöðu. Þessir þættir hafa áhrif á myndun leirs og lífrænna efna í moldinni, sem aftur á móti ráða jarðvegseiginleikum á borð við kornastærð, vatnseiginleika, sýrustig, jónrýmd o.fl. (mynd 11.2).

Við nafngiftir er leitast við að nota orð sem lýsa eiginleikum moldarinnar. Endingin -jörð er notuð í heitum

Mynd 11.2. Umhverfisþættir á borð við áfok og vatnsstöðu móta innihald leirs og lífrænna efna, sem aftur á móti ráða mikilvægum jarðvegseiginleikum. Áfok og vatnsstaða eru því meginþemu við flokkun moldar í meginflokka. Myndin birtist einnig í Náttúrufræðingnum, ÓA og Hlynur Óskarsson 2009.

jarðvegsflokka, eins og áður fyrir alþjóðlegu kerfin, sbr. *mójörð* og *brúnjörð*. Hugtökin „mýrajarðvegur“ eða „mýrajörð“ eru ekki notuð, heldur *mójörð* sem er samheiti við Histosol, jarðveg sem samanstendur einkum af lífrænum efnum, og hér er því fylgt alþjóðlegum skilgreiningum hvað það varðar. Þó er notað lægra kolefnishlutfall (20%) en í Soil Taxonomy (sem notar 25% C), sem er það sama og í WRB.

Jarðvegur með minna en 25% C flokkast sem *eldfjallajörð* samkvæmt Soil Taxonomy ef sortueiginleikar (e. andic properties) eru fyrir hendi. Bent hefur verið á að stundum hafa íslenskar jarðvegsgerðir verið flokkaðar í WRB-flokka á borð við Regosols, Arenosols, Gleysols og Histosols, jafnvel þótt þær falli undir *eldfjallajörð* bæði í Soil Taxonomy og að hluta til í WRB (sjá t.d. Gennadiev o.fl. 2007).

Litur er látinn ráða heiti *eldfjallajarðar* á þurrlendi, sem nefnd er *brúnjörð*. Það var gert eftir talsverða yfirlegu og samráð við erlenda kollega (m.a. Allan Hewitt á Nýja-Sjálandi). Móa-hugtakið sem stundum hefur verið notað vísar til gróðurfars sem er langt frá því að vera lýsandi fyrir öll gróðurlendi *brúnjarðar* (móajarðar) og er mjög keimlíkt hugtakinu mó í *mójörð* og því ekki talið góður kostur fyrir nafn á jarðvegsgerð.

Íslenskum jarðvegi er skipt í meginflokka eins og sýnt er á mynd 11.3.

Glerjörð er jarðvegur auðna þar sem gætir fremur lítillar veðrunar gjósku og nýmyndunar steinda og lítið er af lífrænum efnum. *Glerjörð* er skipt í fjóra undirflokka.

Sortujörð er mold undir gróðurhulu, jarðvegur þar sem efnaveðrun hefur mótað bergefnin, myndað nýjar steindir og lífræn efni hafa safnast fyrir, m.a. samkvæmt þeim leiðum sem einkenna sortuefni (e. andic properties). *Sortujörð* er skipt í fleiri flokka þar sem hraði eða magn áfoks og vatnsstaða skipta mestu (sjá neðar).

Mójörð er lífrænn jarðvegur þar sem áfok er lítið og/eða vatnsstaða há, sem hamlar rotnun lífrænna efna. Sú getur einnig verið raunin hátt til fjalla vegna kulda.

Annar jarðvegur telur ýmsar aðrar jarðvegsgerðir, m.a. þar sem fínefni vantar í jarðveginn (*bergjörð*), jarðveg sífrerasvæða (*frerajörð*) og kalksvæði.

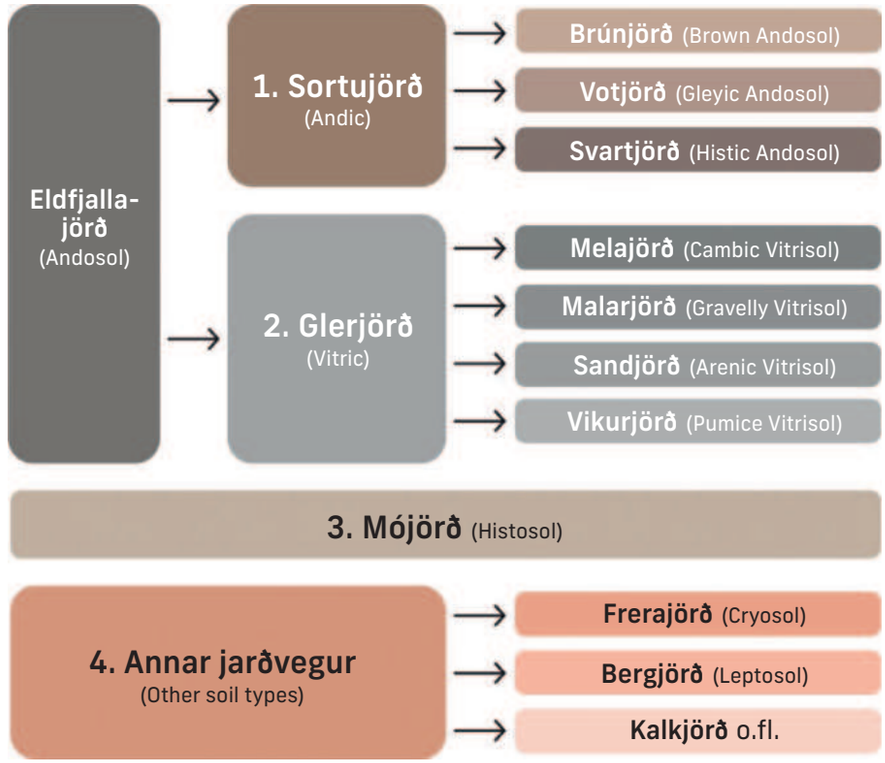
Greiningareinkenni helstu jarðvegsflokka og samsvörun við Soil Taxonomy og WRB er sýnd í töflu 11.1. Miðað er við meðaltal efstu 30 cm jarðvegs eða moldar sem situr ofan á lítt mótuðu bergi eða klöpp. Þannig eru ekki sett skilyrði um lágmarksdýpt fyrir einstaka flokka – þar er fylgt dæmi Soil Taxonomy – jarðvegurinn getur þess vegna aðeins verið 5 cm djúpur ofan á klöpp eða jökulurð.

11.2. *Sortujörð* (*eldfjallajörð* undir gróðri)

11.2.1 Meginásar flokkunar á *sortujörð*

Rétt er að skoða mynd 11.3. til að átta sig á flokkuninni áður en lengra er haldið. *Sortujörð* er *eldfjallajörð* sem er þróuð, gagnstætt við *glerjörð* sem er lítið mótuð gjóska en flokkast eigi að síður nú sem *eldfjallajörð* samkvæmt Soil Taxonomy (og að stórum hluta samkvæmt WRB). *Sortujörð* finnst á grónu landi en *glerjörð* einkennir aftur á móti auðnir. *Sortujörð* er skipt í þrjá meginflokka: *brúnjörð*, *votjörð* og *svartjörð*.

Megininntak þeirrar flokkunar á *sortujörð* sem hér er kynnt byggist á ráðandi áhrifum áfoks og jarðvatnsstöðu á jarðveg gróðurlendis. Segja má að þessir



Mynd 11.3. Flokkun jarðvegs í hnotskurn. *Eldfjallajörð* er skipt í (1) *sortujörð* (*eldfjallajörð* á grónu landi, „andic"-jarðvegur) og (2) *glerjörð* (jarðveg auðna). Báðum þessum flokkum er síðan skipt í nokkra undirflokka. *Mójörð* (3) er ekki skipt frekar niður (í bili). Þá eru sýndir þrír undirflokkar annars jarðvegs (4).

Tafla 11.1. Jarðvegsflokkar á Íslandi ásamt ensku heiti, skammstöfun og megingreiningareinkennum. Til hægri eru algengustu flokkar samkvæmt Soil Taxonomy og WRB.

HEITI	ALÞJÓÐAHEITI	TÁKN	GREINING	S.T.	WRB 2016
Mójörð	Histosol	H	>20% C	Histosol	Histosol
Svartjörð	Histic Andosol	HA	12–20% C	Aquand Cryand	Histic Gleysol Histic Andosol
Votjörð	Gleyic Andosol	GA	<12% C; grámi og/eða dílar	Aquand	Gleysol Gleyic Andosol
Brúnjörð	Brown Andosol	BA	<12% C, þurrt; >6% leir/MHK	Cryand Udand Vitrand	Mollic Silandic Andosol
Melajörð og Malarjörð	Cambic Vitrisol	MV /GV	<1,5% C <6% leir/MHK	Cryand Vitrand	Vitric Andosol / Regosol / Leptosol / Fluvisol / Cambisol
Sandjörð	Sandy Vitrisol	SV	Sandur <1,5% C	Cryand Vitrand	Vitric Andosol Arenosol Leptosol
Vikurjörð	Pumice Vitrisol	PV	Vikur >2 mm	Cryand Entisol	Arenosol Regosol
Bergjörð	Leptosol	L	Klöpp/urð	Entisol	Leptosol Regosol
Frerajörð	Cryosol	C	Sífreri	Gelisol	Cryosol

tveir þættir myndi þrjá ása í flokkun á *sortujörð* – jarðvegs undir gróðurlendi – en þeir falla einmitt vel að því megininntaki (e. central concept) sem ræður flokkun *eldfjallajarðar* samkvæmt Soil Taxonomy og WRB.

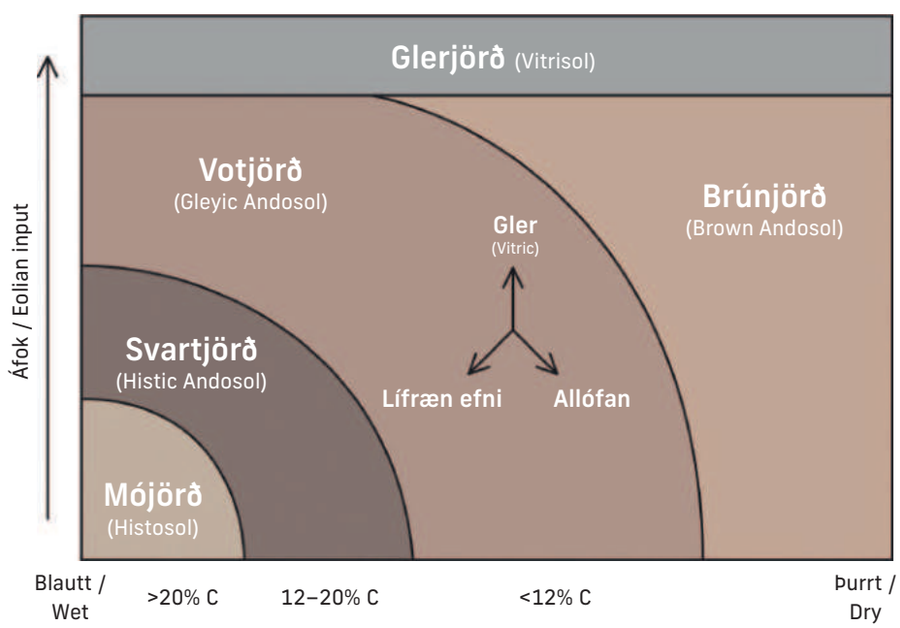
Þessir þrír ásar eru **1.** glerás (vitric), **2.** lífrænn ás, lífræn efni og/eða málm-húmus-knippi ráðandi (e. metal-humus complexes; alu-andic) og **3.** leirás, allófan og ímógólít ráðandi (e. sil-andic) (sjá 10. kafla um *eldfjallajörð*). Þættirnir áfok og jarðvatnsstaða eru notaðir til að skýra inntakið í flokkun jarðvegsins á mynd 11.4, en einnig eru sýndir ofantaldir ásar *sortujarðar*.

Áfok á Íslandi er afar mikið, eins og víða er vikið að í síðari hluta þessa rits (sjá umfjöllun á næstu bls. og 17. kafla um auðnir og fok). Það má segja að íslenskur jarðvegur þróist að stórum hluta í eins konar teppi sem áfok og gjóskugos hafa lagt yfir allt landið. Áfokið er mest næst gosbeltunum og þar er það oft grófast og blandað gjóskulögum.

Gróf glerefni og gjóska veðrast hægar en fíngerð aska, en einnig getur mikið áfok grafið moldina það hratt að veðrun gengur ekki eins langt í hverju lagi fyrir sig en ef meiri „friður" ríkti í umhverfinu, þ.e. minna áfok. Þar sem áfok er mikið og gróft í þurrlendi eða gjóskufall tíður atburður lendir moldin ofarlega á mynd 11.4. (glerásinn). Þar sem lítil gjóska fellur til á þurrlendi eru betri skilyrði fyrir myndun allófans og þar gildir því allófan-ás þríhyrningsins, niður til hægri á myndinni.

Lítið áfok og gjóskufall á svæði með hárri jarðvegsstöðu leiðir hins vegar til uppsöfnunar lífrænna efna í moldinni, sem myndar ásinn fyrir málm-húmus-knippi og lífræn efni almennt á þríhyrningnum á mynd 11.4 (niður til vinstri). Neðst til vinstri er síðan *mójörð* (Histosol) sem telst ekki til *eldfjalla-jarðar* – þar sem áhrif lífrænna efna eru orðin sterkari en sortueiginleikarnir (e. andic soil properties). Segja má að kuldi hátt yfir sjávarmáli hafi tilhneigingu til að ýta moldinni ofar á grafinu (minni veðrun) nema þar sem áfok er mjög lítið.

Til þess að skilja á milli meginflokkanna eru notaðir þættir til viðmiðunar sem hafa ráðandi áhrif á eiginleika moldarinnar: lífrænt innihald og leir. Aðrir þættir eru notaðir þegar brjóta á meginflokkana niður í fleiri undirflokka.



Mynd 11.4. Flokkun jarðvegs á grónu landi – megininntak. Magn áfoks eykst upp grafið (y-ás) en x-ásinn sýnir jarðvegsraka. Moldin er því blautari sem lengra er farið til vinstri, en þurrlendi (*brúnjörð*) stendur til hægri á myndinni. *Mójörðin* verður til þar sem moldin er blaut og áfok er lítið.

Votjörð er þar sem er heldur þurrara og/eða áfokið það mikið að lífræn efni safnast ekki fyrir. Grafið er í góðu samræmi við hugmyndir um þrjá ása *eldfjallajarðar* sem sýndir eru á miðri mynd. Þegar áfokið er mjög mikið verður moldin glerkennd: *glerjörð* (einkum þar sem gróðurhulu vantar á yfirborðið).

11.2.2. *Brúnjörð* (Brown Andosol)

Brúnjörð er mold þurrlendis undir gróðri. Þetta er afar algengur jarðvegur en hann er nokkuð breytilegur að gerð. Fjarri gosbeltum er lítið af gjóskulögum í jarðveginum en oft mikið af leir – allófani og ferrihýdríti – hann er jafnvel meira en 25% af leirefnunum. Næst gosbeltunum og innan þeirra er jarðvegurinn þykkari vegna áfoks, oft yfir 1 m þykkur og þar

eru gjóskulög iðulega áberandi (mynd 11.7). Fjær gosbeltunum verður moldin grynnri og áfoksefnin fínkornóttari, sem verður til þess að leirefni myndast í hverju jarðvegslagi fyrir sig. Heildarmagn þeirra getur þó verið svipað eða meira í þykkum jarðvegi þar sem minna af leir (5) deilist á þykkari jarðveg – sjá 8. kafla um jarðvegsmyndun. Kolefnishlutfallið er einnig afar breytilegt og mun meira er af lífrænum efnum eftir því sem áfokið minnkar í hverju jarðvegslagi.

Gróðurhula og landnýting hafa vitaskuld einnig áhrif á lífræna innihaldið, en við kjöraðstæður er kolefnishlutfallið gjarnan >8% í yfirborðslögum og jafnvel ennþá hærra í óröskuðum birkiskógum, en oftast 1,5–3% á gosbeltunum og við þau. Gjóskulög geta gefið moldinni afar litskrúðugt svipmót, sérstaklega ljósu gjóskulögin úr Heklu, í bland við svört basísk gjóskulög og misrauð moldarlög. Þar sem eru gróf gjóskulög hafa þau mikil áhrif á vatnsleiðni, bæði niður í gegnum lögin og aftur upp til róta. Þau geta hins vegar leitt vatn við mettun en þornað síðan á ný og leitt súrefni í þurrkatíð. Því er oft mikið af rauðu oxuðu járni í grófum gjóskulögum og umhverfis þau.

11.2.3. *Votjörð* (Gleyic Andosol)

Votjörð er votlendismold á eldvirka belti landsins og í jaðri þess þar sem mikið áfok eða gjóskufall mótar jarðveg með háa jarðvatnsstöðu. Hún hefur minna en 12% C í efstu 30 cm moldarinnar (meðaltal). Þetta mark (12% C) er ekki haft breytilegt eftir leirinnihaldi til að einfalda flokkunina, sem annars kallaði á mælingu á leirinnihaldi sem er fremur tímafrek og kostnaðarsöm. Áfok kemur í veg fyrir að mikið af lífrænum efnum safnist fyrir í *votjörð* í hverju jarðvegslagi fyrir sig, enda þykknar hún nokkuð ört við það að ný móðurefni bætast í sífellu ofan á yfirborðið. Algengt kolefnisinnihald er 2–6% þar sem áfok er mikið en leirinnihald er afar breytilegt og m.a. háð áfokshraðanum: því meira

Áfok mótar íslenska náttúru

Áfok frá auðnum og rofsvæðum hefur lagt eins konar teppi yfir mestallt landið á síðastliðnum 9 þúsund árum frá því að ísa leysti. Gríðarlegt mistur getur borist af söndum landsins, t.d. Mýrdalssandi, Landeyjasandi, Skeiðarársandi og Dyngjusandi.

Mynd 11.5. Rykmistur í Eyjafjarðardölum, upprunnið á Dyngjusandi í meira en 100 km fjarlægð. Rykið leggur til móðurefni moldarinnar á svæðinu.

Það er þetta mistur sem leggur til hvað drýgstan hluta áfoksins. Áður fyrr, en þó eftir landnám, var vindrof á jarðvegsleifum (jarðvegseyðing – uppblástur) einnig drjúgur hluti áfoks, en það hefur minnkað mikið á síðustu árum miðað við aukið fok frá ofurvirkum uppfoksreitum (e. dust hotspots). Áfokið sem leggst á jörðina er mest nærri auðnum og söndum gosbeltanna en minnst fjærst gosbeltunum og meginjöklum, t.d. á vestanverðu landinu og Vestfjörðum.

Áfokið hefur afgerandi áhrif á myndun íslensks jarðvegs því það færir að þau móðurefni sem moldin myndast í. Hraði eða magn áfoksins ræður miklu um jarðvegsgerðina. Þar sem er lítið áfok (<0,01 mm/ári) myndast mikið af leirsteindum á þurrlendi en lífrænum efnum í votlendi í hverju jarðvegslagi. Þar sem áfokið er meira verða áhrif gjóskunnar ráðandi. Fjallað er nánar um uppfok og áfok í 17. kafla. Áfok jókst að meðaltali 4–10 sinnum við þær umhverfisbreytingar sem urðu við landnámið (Sigurður Þórarinsson 1961). Áfokshraði hefur oft verið túlkaður til að gefa mynd af umhverfisaðstæðum og þá sérstaklega jarðvegsrofi og eyðingu íslenskra vistkerfa.

Áfok hefur merkileg áhrif á moldina utan þess að vera móðurefni jarðvegsins. Stöðugt áfok hleður upp nýjum efnum sem taka að veðrast og við það losna basískar katjónir (Ca^{++}, Mg^{++} o.s.frv.). Þær hjálpa til að viðhalda sæmilega háu sýrustigi og frjósemi jarðvegsins. Hæfilegt áfok frá meginuppsprettum ryks í landinu hjálpar því til við að gera íslensk vistkerfi frjósöm.

Mynd 11.6. Ryk á þaki bíls í Mosfellsbæ eftir rykveður í einn dag. Meginhluti þess kom frá uppsprettum við suðurströndina. Margir tugir slíkra atburða verða ár hvert. Á þúsund árum verður efnismagnið ansi mikið.

Mynd 11.7. Djúp *brúnjörð* í nágrenni Blöndulóns á Auðkúluheiði. Ljós gjóskulög úr Heklu eru áberandi, m.a. H1 (gos árið 1104) ofarlega í sniðinu. Moldin ofan við H1 er mun grófari í sér en moldin sem þróaðist á forsögulegum tíma, enda var áfok þá mun minna en síðar á sögulegum tíma.

áfok, þeim mun lægra leirinnihald í hverju lagi eða dýptarbili.

Votjörð ber einkennandi litbrigði votlendismoldar, svo sem sterka rauða liti ferrihýdríts, sérstaklega þar sem eru skörp skil í kornastærð jarðvegsins, m.a. við gróf gjóskulög. Grámi (e. gleying) getur einnig verið einkennandi og bláir litir afoxaðs járns (mynd 11.7).

Votjörðin finnst einnig í jaðri votlenda þar sem *mójörð* og *svartjörð* er fyrir en *votjörðin* myndar eins konar jaðarbelti við hlið *brúnjarðar* á þurrlendinu. *Votjörð* hefur oft greinileg gjóskulög í sniðinu sem gera hana enn litríkari en ella. Flokkun á *votjörð* miðast við yfirborðslagið (efstu 30 cm). Eins og áður sagði jókst áfok mjög eftir landnám Íslands og því er moldin yfirleitt mun lífrænni neðan yfirborðslagsins. Hún hefur iðulega talist til *svartjarðar* eða *mójarðar* fyrr á öldum áður en áfokið tók að aukast á fyrstu öldum byggðar í landinu. Þetta á einnig við um *svartjörð* og *mójörð*; íslenskur jarðvegur var almennt lífrænni fyrir landnám en síðar meir. Undir yfirborðinu finnast jafnvel mólög sem hafa myndast við aðrar aðstæður (sjá umfjöllun um votlendi hér á eftir).

11.2.4. *Svartjörð* (Histic Andosol)

Svartjörð er lífræn *sortujörð* með 12–20% C í yfirborðslögum. Hún er um margt sérstök jarðvegsgerð sem ber bæði einkenni *mójarðar* (Hisosol) og *sortujarðar/eldfjallajarðar*, en sortueiginleikarnir (e. andic soil properties) eru þó taldir ráðandi. Lífræn efni hafa mjög mótandi jarðvegseiginleika, svo sem vatnsheldni og jónrýmd. Enn er vakin athygli á því hve sérstakir og sterkir sortueiginleikarnir eru, sem sést best á því að skil við *mójörð* eru dregin við 20% C hér en við 12% C þegar um annan jarðveg en *eldfjallajörð* er að ræða. Soil Taxonomy miðar nú við 25%

fyrir samsvarandi skil, en ef það gildi væri notað hér á landi myndi útbreiðsla *mójarðar* minnka verulega, sem er ein af ástæðum þess að hér hefur verið tekið mið af 20% markinu.

Svartjörð er víða ráðandi í votlendi á Íslandi, fjarri eldvirka belti landsins, t.d. á vestanverðu Suðurlandi og í dölum á Norðurlandi. *Svartjörð* kemur einnig fyrir fjarri áfoksbeltinu þar sem þornar aðeins um, t.d. í hlíðum fjalla og hæða, og líklega er hún algengur jarðvegur gamalla birkiskóga.

Eldfjallajörð, rík af lífrænum efnum, er algeng utan Íslands, t.d. á Kanaríeyjum, Asoreyjum og í Suður-Ameríku, en aðstæður við myndun hennar eru um margt aðrar. Þar safnast lífræn efni fyrir í moldinni að mestu sem málm-húmus-knippi (e. metal-humus complexes) og utan á leirefni, en hérlendis er það einnig kuldinn í súrefnissnauðu umhverfi sem stuðlar að uppsöfnun efnanna og því er *svartjörð* á Íslandi nokkuð sérstök í samanburði við *eldfjallajörð* annars staðar í heiminum.

Svartjörð einkennist af O-lögum (H-lögum) sem hafa >12% C. Samspil mikils magns lífrænna efna og áfoks, sem oft er nægjanlegt til að stuðla að sæmilega háu sýrustigi (>5), gerir það að verkum að *svartjörðin* er yfirleitt frjósöm mold. Gróf eða þykk gjóskulög sem hafa neikvæð áhrif á vatnsbúskap eru sjaldnar í *svartjörð* en í *votjörð*.

11.3. *Mójörð* (Histosol)

Mójörð telst ekki til *eldfjallajarðar* heldur til sérstaks flokks lífræns jarðvegs. *Mójörð* er gerð af hverju O-laginu ofan á öðru sem hvert um sig hefur mismunandi eiginleika eftir myndunar-aðstæðum. *Mójörð* finnst í votlendi fjærst gosbeltunum þar sem áfok er hvað minnst á landinu, einkum á þéttum tertíer-bergrunni þar sem vatnsstaða

Mynd 11.8. Litabrigði í mýrlendi. Blái liturinn stafar af afoxuðu járni en rauðu litirnir eru ferrihýdrít og fleiri járnsambönd.

Mynd 11.9. *Svartjörð* á Möðruvöllum í Hörgárdal. Flokkunin byggist á yfirborðslögum en undir er *mójörð*, sem er algengt. Lægra kolefnishlutfall í yfirborðinu stafar bæði af áfoki og framræslu mýrarinnar.

er há. Stærstu svæðin eru á Mýrum á Vesturlandi og allt út á Snæfellsnes, en *mójörð* er einnig algeng á Vestfjörðum, norðarlega á Norðvesturlandi og Norðurlandi. Þar sem áfok er minna á þessum svæðum er sýrustigið lægra en í öðrum jarðvegi, getur jafnvel farið niður fyrir 4 á einstaka stað, sem telst afar súr mold.

Víðfeðm svæði á norðurhjara eru þakin *mójörð*, svo sem í Finnlandi, Rússlandi, Kanada og Alaska. Þar safnast lífræn efni fyrir vegna kulda og súrefnisskorts.

Mynd 11.10. Fremur grunn *mójörð* á Vesturlandi með mikið rotnuðum lífrænum efnum.

Þetta eru hinar eiginlegu mómýrar heimsins. Á Íslandi hafa mómýrar mótast af eldfjallaáhrifum vegna áfoks og gjóskufalls, jafnvel fjarri gosbeltunum. Lífrænt innihald hennar hérlendis er því mun minna en gengur og gerist í *mójörð*, t.d. í Finnlandi.

Mójörð var áður nýtt til brennslu hérlendis eins og annars staðar í heiminum, en gæðin voru oft lítil – óhreinn bruni vegna öskuinnihalds olli mikilli mengun. Leifar af mógröfum má ennþá sjá víða um landið, eins og vikið er að síðar í þessum kafla.

Þar sem *mójörðin* myndast að stórum hluta af lífrænum efnum er rúmþyngd hennar lítil (0,15–0,4 g/cm^3), en mikið holrými veldur því að vatn á greiða leið og vatnsmiðlun er auðveld. Einstök gróf set- eða gjóskulög geta þó skaðað þessa vatnsmiðlun, eins og fjallað er um í kaflanum um vatnseiginleika. Lífrænu efnin skila næringu aftur til plantna; þau hafa mjög mikla jónrýmd, en lágt sýrustig getur haft hamlandi áhrif á frjósemi þessa jarðvegs.

11.4. *Glerjörð* (Vitrisol)

11.4.1. Hugtök og inntak

Auðnirnar á Íslandi eru mjög útbreiddar – þær þekja 30–40 000 km^2, sem er æði stór hluti landsins. Því er afar mikilvægt að greina jarðveg auðna frá öðrum jarðvegi á efsta stigi flokkunar og skipa honum í sérstakan flokk, og það er gert hér með skilgreiningu á *glerjörð* (Vitrisol). Eftirfarandi er stutt umfjöllun um flokkunarfræði er lýtur að *glerjörð* til að útskýra hugmyndafræðina á bak við þennan flokk og tengsl hans við stóru alþjóðlegu flokkunarkerfin. Hugtakið „*glerjörð*“ er notað af því að eðli ösku og glerkorna ræður oftast mestu um eiginleika hennar og um leið er fylgt alþjóðlegri hefð þar sem „vitr“ í Vitrisol

Mynd 11.11. Auðnir eru afar útbreiddar á Íslandi. Mold þeirra telst til sérstaks flokks jarðvegs, *glerjarðar*, sem hefur sérstæða eiginleika. Þessi íslenski jarðvegsflokkur hefur sérstöðu á heimsvísu. *Glerjörð* er skipt í nokkra undirflokka. Myndin er af Kjalvegi.

merkir gler, en það er ættað úr latínu og notað í flokkunarfræðum um jarðveg.

Hugtakið „gler" er látið ná til yfirborðseinkenna hvers kyns gjóskukorna, en orðið „gjóska" (tephra) er samheiti yfir loftborin gosefni. Með því að draga fram *glerjörð* með þessum hætti er vikið nokkuð frá Soil Taxonomy og WRB. Aðferðafræði Soil Taxonomy, sem notuð var til að móta hugmyndir um *eldfjallajörð*, tók einnig til *glerjarðar* á grundvelli sortueiginleika. Bæði *glerjörð* og *brúnjörð* flokkast iðulega sem Vitricryand samkvæmt Soil Taxonomy, þ.e. til sama jarðvegsflokksins. ÓA og Kimble (2001) bentu hins vegar á að í ljósi þess hve stór svæðin eru með tilliti til heildarútbreiðslu *eldfjallajarðar* væri rétt að endurskoða flokkun þessarar jarðvegsgerðar þannig að meira tillit yrði tekið til jarðvegs á auðnum Íslands. Ekki vannst tími til að fylgja þessu eftir þrátt fyrir að aðstandendur Soil Taxonomy hafi hvatt til þess.

WRB fylgdi Soil Taxonomy að mestu að málum hvað varðar skilgreiningu á *eldfjallajörð* – en aðstandendur kerfisins (Otto Spaargaren o.fl.) höfðu sömuleiðis hvatt ÓA til að gera tillögu um sérstakan jarðvegsflokk fyrir *glerjörð* – Vitrisol, en ekki gafst tími til að fylgja því eftir frekar en samskiptum við aðstandendur Soil Taxonomy, sem áður voru nefnd. Það bíður betri tíma. Sú flokkun sem hér er kynnt fyrir íslenskan jarðveg tekur mið af eiginleikum *glerjarðar*, þ.e. „vitric" eiginleikum, sem er eðlilegt að gera á Íslandi. Benda má á að samkvæmt meginhugmyndum WRB geta móðurefni ráðið flokkun jarðvegs ef þau eru mikilvægasta einkenni hans,[2] og það er einmitt gert hér.

Í Soil Taxonomy markast skilin sem notuð eru til að skilgreina Vitrands (Vitric Andosols) frá annarri *eldfjallajörð* af mun minna vatnsinnihaldi við visnunarmark en er einkennandi fyrir *sortujörð* (við 15 bara togspennu; 15% vatn mælt í sýnum sem hafa verið

2. „... at the higher categoric level classes are differentiated mainly according to the primary pedogenetic process that has produced the characteristic soil features, except where 'special' soil parent materials are of overriding importance" (FAO-UNESCO 1998).

***Glerjörðin* er Andisol samkvæmt Soil Taxonomy.**

Rétt er að leggja áherslu á að jarðvegur í íslenskum auðnum, nema kannski að undanskildum vikri, stenst sannarlega þær skilgreiningar á *sortujörð* (e. andic soil properties) sem gengið er út frá í Soil Taxonomy og WRB, því $(Al+½Fe)_{ox}$ er yfirleitt > 0,4%.

WRB krefst þó lágmarksþykktar fyrir moldina eins og vikið er að hér á eftir.

3. Skilin á milli „cryic" og „frigid" loftslagsbelta samkvæmt Soil Taxonomy liggja líklega oftast um láglendissvæði landsins. Það er afar bagalegt að Soil Taxonomy-kerfið sé notað á Íslandi því þessi skil ráða flokkun á næstefsta stigi, sbr. skilin á milli Vitriands og Cryands á auðnum (en enginn munur á jarðveginum), Cryand og Aquand á blautum láglendissvæðum og Cryand og Udand á þurrlendi þar sem skilin geta legið um girðingar (því gróður mótar jarðvegshita, skilgreiningin breytist eftir því hvort O-lag er til staðar og hvort moldin er blaut eða ekki).

Ómögulegt kann að reynast að skera úr um hvort á við þegar á hólminn er komið. Raunar liggja ekki nægar upplýsingar um jarðvegshita á Íslandi fyrir til að gera þessa aðgreiningu mögulega almennt. Þetta vandamál hefur komið upp víðar en á Íslandi, m.a. í Finnlandi.

þurrkuð en 30% í sýnum sem ekki hafa verið þurrkuð) (Soil Survey Staff 2003), en hafa að öðru leyti sortueiginleika (>0,4 $(Al+½Fe)_{ox}$) ef mikið er af gleri/gjósku, eins og lýst er hér að ofan. Þessi aðferð miðast því við að mold sem hefur litla en þó einhverja sortueiginleika teljist til *sortujarðar* sem Vitrands (Vitricryands á köldum svæðum).

Í þessu sambandi er rétt að geta þess að í flokkunarkerfi WRB eru „vitric soil properties", þ.e. glereiginleikar, skilgreindir sérstaklega, en það eru efni sem hafa sortueiginleika (e. andic properties) en eru með á milli 0,4 og 2% $(Al+½Fe)_{ox}$ og mikið af gleri eða ösku (sama og í Soil Taxonomy). Fosfórbinding o.fl. þættir eru jafnframt teknir til álita, en þar er einnig slakað á flokkunarkröfum með tilliti til *sortujarðar*. Í WRB eru „Tephric materials" (gjóskuefni) einnig skilgreind, en notkun hugtakanna „vitric" og „tephric" í WRB er að mörgu leyti órökrétt; „tephra" (gjóska) í jarðfræðilegum skilningi er í raun samnefnari sem innifelur „vitric"-efni og þannig er farið með þessi hugtök í þessari íslensku flokkun, a.m.k. í bili. Það skal ítrekað að eðlilegra er að flokka jarðveg auðna á Íslandi út frá eiginleikum bergefnanna sem ráða eiginleikum hans, þ.e. glerinu (e. vitric soil properties), en ekki skilgreiningum fyrir *sortujörð* (e. andic soil properties).

11.4.2. *Glerjörð* á Íslandi

Jarðvegur auðna á Íslandi verður að teljast afar sérstakur á heimsvísu. Hann samanstendur að stórum hluta af gjóskuefnum af ýmsu tagi, sem teljast einkum til basalts og andesíts að efnasamsetningu (lágt SiO_2-innihald). Gjóska með hærra SiO_2-innihald er algengari á öðrum eldfjallasvæðum. Nær allur jarðvegur auðna á Íslandi er gerður af gjóskuefnum og telst því „vitric", að undanskildum kalksteinssandi í fjörum og mold. Jarðvegur auðna á Íslandi hefur oftast nær >0,4% $(Al+½Fe)_{ox}$, eins og fyrr sagði, og mikið af gjóskugleri, sem er forsenda þess að moldin teljist til *eldfjallajarðar* samkvæmt þessum flokkunarkerfum. Jarðvegur auðna flokkast því sem Andisol/Andosol samkvæmt Soil Taxonomy og WRB en þykktartakmörk hamla því að sumir sandar á mishæðóttu undirlagi flokkist sem *sortujörð* samkvæmt WRB (miðað er við >30 cm þykkan jarðveg).

Þykktartakmarkanir eru ekki til staðar í Soil Taxonomy og þær eru ekki viðhafðar í þessu kerfi. Jarðvegur auðna er ýmist Vitricryands (á kaldari svæðum landsins) og Vitrands á láglendi samkvæmt Soil Taxonomy[3] en Vitric Andosol samkvæmt WRB. *Glerjörð* hefur fjóra undirflokka sem stendur, en það gæti breyst eftir því sem flokkunin þróast. Flokkarnir draga dám af jarðfræði yfirborðsins, sem er eðlilegt því þetta er mold sem er lítið mótuð.

Rétt er að vekja athygli á því að þessar mismunandi tegundir auðna eiga margt sameiginlegt er varðar eiginleika, gjóskan hefur t.a.m. fremur virkt yfirborð (jafnvel >10 m^2/g; Andri Stefánsson og Sigurður Gíslason 2001, Sigurður Gíslason 2008), sem ljær jarðveginum ákveðna frjósemi í formi vatnsheldni og jónrýmdar. En aðrir þættir hamla þó því að auðnin teljist góð með tilliti til vaxtarskilyrða, einkum skortur á lífrænum efnum og næringarefnum á borð við nitur, óstöðugleiki yfirborðsins, myndun ísnála og ör uppgufun.

Það er eftirtektarvert að efnaveðrun er ekki aðeins hröð í *sortujörð* þar sem gróður er á yfirborðinu, heldur getur hún einnig verið mjög ör í *glerjörð* á auðnum, eins og fjallað er um í kaflanum um jarðvegsmyndun.

Nokkuð hefur verið skrifað um jarðveg auðna á Íslandi, m.a. í *American Journal of Soil Science* (ÓA og John Kimble 2001), en auk þess hafa margvíslegar greinar um einstaka þætti birst í

ráðstefnuritinu *Fræðaþing landbúnaðarins* og greinum sem tengjast landgræðslu, kolefnisbindingu og vistheimt. Fjallað er sérstaklega um landnýtingu, uppgræðslu, kolefnis-uppsöfnun o.fl. í 18.–23. kafla.

11.4.3. *Melajörð* (Cambic Vitrisol)

Melajörð er ólífrænn jarðvegur auðna með grýttu yfirborði en fínkornóttara jarðvegslagi undir yfirborðinu (mynd 11.12). Þetta er veikt þróað B-lag, svokallað Bw-lag (e. cambic horizon), og inniheldur nokkur prósent leirs sem hafa veruleg áhrif á efnavirkni jarðvegsins. *Melajörð* er jarðvegur sem myndast í hinni dæmigerðu jökulurð sem þekur stór svæði á hálendi landsins, en hefur einnig komið í ljós þar sem jarðvegsrof hefur flett gróðurhulunni af yfirborðinu.

Rætur gróðurs standa gjarnan í fínkornótta laginu sem hefur að geyma meira vatn og fleiri næringarefni en önnur jarðvegslög. Þetta er oft sérhæfður melagróður með djúpstætt rótarkerfi, t.d. lambagras. Malarlaginu á yfirborði er viðhaldið með frostlyftingu á vetrum sem ýtir völum upp á yfirborðið.

Ástæður fyrir tilvist Bw-lagsins geta verið margvíslegar: þetta fíngerða efni gæti hafa fokið í moldina, verið leifar fyrri jarðvegs eða hafa myndast á staðnum. *Melajörð* verður fyrir áfoki eins og annar jarðvegur landsins, sem veldur því að yfirborðið er sums staðar smám saman að hækka – sérstaklega þar sem ekki er mikið vind- og vatnsrof sem fjarlægir efnin jafnharðan. Þar sem áfokið er mikið tekur jarðvegurinn á sig mynd *sandjarðar* í sendnum melum (sandmelum; sjá 17. kafla um rof). Það veldur því að skilin á milli *sandjarðar* og *melajarðar* eru oft ekki mjög skýr, en Bw-lagið og meira af lífrænum efnum í *melajörð* skilur á milli.

Mynd 11.12. A: *Melajörð*. Hér er greinilegt Bw-lag undir yfirborðinu með nokkuð af leir og meira af lífrænum efnum en gengur og gerist í jarðvegi auðna. Rætur melaplantna ná gjarnan niður úr sandlaginu á yfirborðinu niður í Bw-lagið.
B: Langar rætur lambagrass fara vítt um moldina til að safna vatni og næringu sem er af skornum skammti. Rótin er yfir 50 cm löng. Mynd: Ása L. Aradóttir.

Frostáhrif eru yfirleitt mjög áberandi í *melajörð*, m.a. í formi melatígla. Kornastærðin einkennist af silti sem er mjög frostnæmt efni og á sinn þátt í miklum frosthreyfingum. Frostnæmið veldur því að erfitt er að rækta svæði sem einkennast af *melajörð* fyrr en búið er að loka yfirborðinu, auk þess sem lágt innihald lífrænna efna (þar með skortur á nitri) gerir moldina ófrjóa til að byrja með. Að auki myndast mjög þéttur klaki í jörðu á vetrum (Berglind Orradóttir o.fl. 2008, Zaqout o.fl. 2022) sem veldur miklu yfirborðsrennsli þegar vatn skilar sér ekki niður í moldina eða grunnvatn á vetrum, og því er hætta á rofi sem og flóðum í ám og lækjum.

Mynd 11.13. *Sandjörð*. Myndin er tekin í hlaupfarvegi Gjálpargossins (1996). Athygli vekur að efnaveðrun hefur náð að lita efsta lagið brúnt á fimm árum (mynd tekin árið 2001).

11.4.4. *Malarjörð* (Gravelly Vitrisol)

Malarjörð er *glerjörð* (Vitrisol) á auðnum þar sem lítið er af fínefnum en mikið af malarefnum. Hér vantar Bw-lagið sem einkennir *melajörð*. *Malarjörð* er oft að finna á flæðisléttum, bæði við dragár og jökulvötn en einnig í hlíðum og malarhjöllum sem mynduðust við hæstu sjávarstöðu í ísaldarlok. Þetta er því nokkuð útbreidd jarðvegsgerð, t.d. á Suðurlandi og Suðaustur-landi (Markarfljótsaurar, aurar undir Vatnajökli) sem og á malarhjöllum á Vesturlandi. *Malarjörð* er oft þéttur jarðvegur og erfiður í ræktun þar sem frosthreyfingar eru ennfremur miklar. Sjálfgræðsla á slíku svæði er af þessum sökum iðulaga mjög hæg þrátt fyrir að það hafi verið friðað fyrir beit; loka þarf yfirborðinu til að ýta undir framvindu. Að öðru leyti svipar *malarjörð* til *melajarðar* hér að ofan.

11.4.5. *Sandjörð* (Arenic Vitrisol)

Sandjörð hefur mikla útbreiðslu á Íslandi (mynd 11.13), enda teljast sendin svæði vera samtals yfir 20 000 km². Sandefni og silt eru ráðandi. Hún telst til *glerjarðar,* sem flokkast undir *eldfjallajörð* (Andisol) samkvæmt Soil Taxonomy og einnig samkvæmt WRB að mestu. Yfirborðið er óstöðugt og hætt við rofi, bæði af völdum vatns og vinda. Þar sem leirefni og lífræn efni skortir í moldina er þetta ófrjó jörð samanborið við *sortujörðina* (þ.e. *brúnjörð, votjörð, svartjörð*); það skortir lífræn næringarefni og þá einkum nitur í *sandjörðina*. Vatnsheldni er ennfremur lítil og uppgufunarhraði mikill þegar dökkt yfirborðið hitnar í sólskini. Dæmi eru um að það mælist >50 °C í yfirborðinu í sterku sólskini. Slíkur hiti hefur ennfremur mjög slæm áhrif á lífríkið sem þarna nemur land, svo sem örverustarfsemi og nýgræðing.

Mynd 11.14. Yfirborð vikurfláka í nágrenni Heklu. *Vikurjörð* er ófrjósöm, helst illa á vatni og veðrast hægt ef vikurinn er súr (líparít). Því gróa svæði af þessu tagi afar hægt og illa.

Sandar myndast iðulega og stækka við það að sandefni berast út yfir landið frá upprunastað, t.d. í grennd við jökla og jökulár en einnig við gjóskufall. Sandefnin hvíla á misjöfnu undirlagi – sandurinn getur hafa safnast í mela eða sandefni borist yfir hraun. „Sandhraun" eru ákaflega algeng landslagsgerð á Íslandi (sjá 17. kafla um sandauðnir).

Sandlag og þar með *sandjörð* er misþykk í mishæðóttum hraunum, allt frá fáum cm upp í marga metra. Flokkunarkerfið sem hér er lýst tiltekur ekki þykktartakmarkanir og því telst allt yfirborð þessarar landslagsgerðar hafa *sandjörð*, þótt misþykk sé. Sem fyrr sagði skilgreinir WRB lágmarksþykkt fyrir flokka á borð við *eldfjallajörð* (30 cm), en slík þykktartakmörk myndu gera kortlagningu jarðvegs á sandhraunum afar erfiða (raunar einnig á *melajörð* og *malarjörð*) þar sem þykktin reikar frá fáum sentimetrum til margra metra á fremur litlu svæði. Soil Taxonomy tiltekur ekki slík lágmörk fyrir þykkt jarðvegs. Sendinn jarðvegur hefur mikla útbreiðslu á jörðinni, en slíkir sandar eru yfirleitt kvarssandar (SiO_2) en stundum kalksandar ($CaCO_3$) og jafnvel gifssandar ($CaSO_4$). Kvars og kalk eru mjög óvirk efni með lítið yfirborð (<0,1m²/g) og jarðvegurinn telst til *frumjarðar* (Entisol í Soil Taxonomy).

Gjóskuefni íslenskra sanda hafa umtalsvert yfirborð og því er gjóskuefnið virkara með tilliti til vatnsheldni, vatnsmiðlunar og jónrýmdar. Það má segja að íslenskar sandauðnir séu mjög sérstakar samanborið við önnur sandsvæði í heiminum. Þær eru í eðli sínu frjórri og auðveldari í ræktun samanborið við kvarssandinn; mesti vandinn fylgir því að gera yfirborðið stöðugt þannig að gróður geti numið land og þróast, og að koma lífrænum efnum í hringrás í kerfinu (sjá *Að lesa og lækna landið*, ÓA og Ása L. Aradóttir 2015 og 23. kafla).

11.4.6. *Vikurjörð* (Pumice Vitrisol)

Vikurjörð er að finna í nágrenni virkustu eldfjallanna, svo sem við Heklu, á Veiðivatnasvæðinu, í nágrenni Öskju og víðar (mynd 11.14.). Vikur getur bæði verið basískur eða kísilríkur (súr gjóska). Hann er að stærstum hluta meira en 2 mm í þvermál og *vikurjörðin* er skilgreind á grunni vikursins en ekki með tilliti til efnafræðilegra eða annarra flokkunarfræðilegra skilyrða.

Súr vikur (t.d. ljós líparítvikur) er mun erfiðari með tilliti til ræktunar og landgræðslu en basískur vikur. Meira er af lausum katjónum í basíska vikrinum, sem veðrast einnig mun hraðar en hinn súri eftir að hann hefur fengið á sig gróðurhulu. Þá getur jarðvegur á svæðum með kísilríkum vikri orðið súr, ekki síst þar sem úrkoma er mikil, t.d. í Öræfasveit. *Vikurjörð* nær iðulega ekki þeim mörkum sem erlend flokkunarkerfi setja fyrir *eldfjallajörð* (t.d. <0,4% $(Al+½Fe)_{ox}$ sem er skilgreining á tilvist allófans og/eða lífrænna fjölliða) en telst eigi að síður vera undirflokkur *glerjarðar* í þessu kerfi; flokkurinn er einvörðungu skilgreindur á grunni vikursins, sem fyrr sagði.

11.5. Annar jarðvegur

Á mynd 11.3 er yfirlit yfir flokkun íslenskrar moldar í fjóra flokka: **1.** *glerjörð*, **2.** *sortujörð* (sem telur *brúnjörð*, *votjörð* og *svartjörð*), **3.** *mójörð* og að lokum **4.** annan jarðveg. Í þessum síðastnefnda flokki eru nokkrar jarðvegsgerðir, en þær hafa yfirleitt lítið verið rannsakaðar hérlendis. Helstar þeirra eru *frerajörð*, *bergjörð* og *kalkjörð*.

11.5.1. *Frerajörð* (Cryosol)

Frerajörð er jarðvegur þar sem frost er í jörðu árið um kring. Yfirborðið þiðnar

Mynd 11.15. *Frerajörð* á Hofsafrétt, norðvestan Hofsjökuls, svokallaðar Orravatnsrústir. Þær eru yfirleitt 2–4 m háar með þurrlendismóa ofan á rústunum. Nokkrir tugir cm eru niður á sífrera, sem síðan nær niður á margra metra dýpi (sjá Þorstein Sæmundsson o.fl. 2012). Hlýnun jarðar er farin að hafa mikil áhrif á rústasvæði landsins – rústirnar minnka og virka lagið ofan sífrerans dýpkar með árunum.

Mynd 11.16. *Bergjörð* einkennir urðarskriður á borð við þær sem hér má sjá, en einnig yfirborð hrauna og klappa.

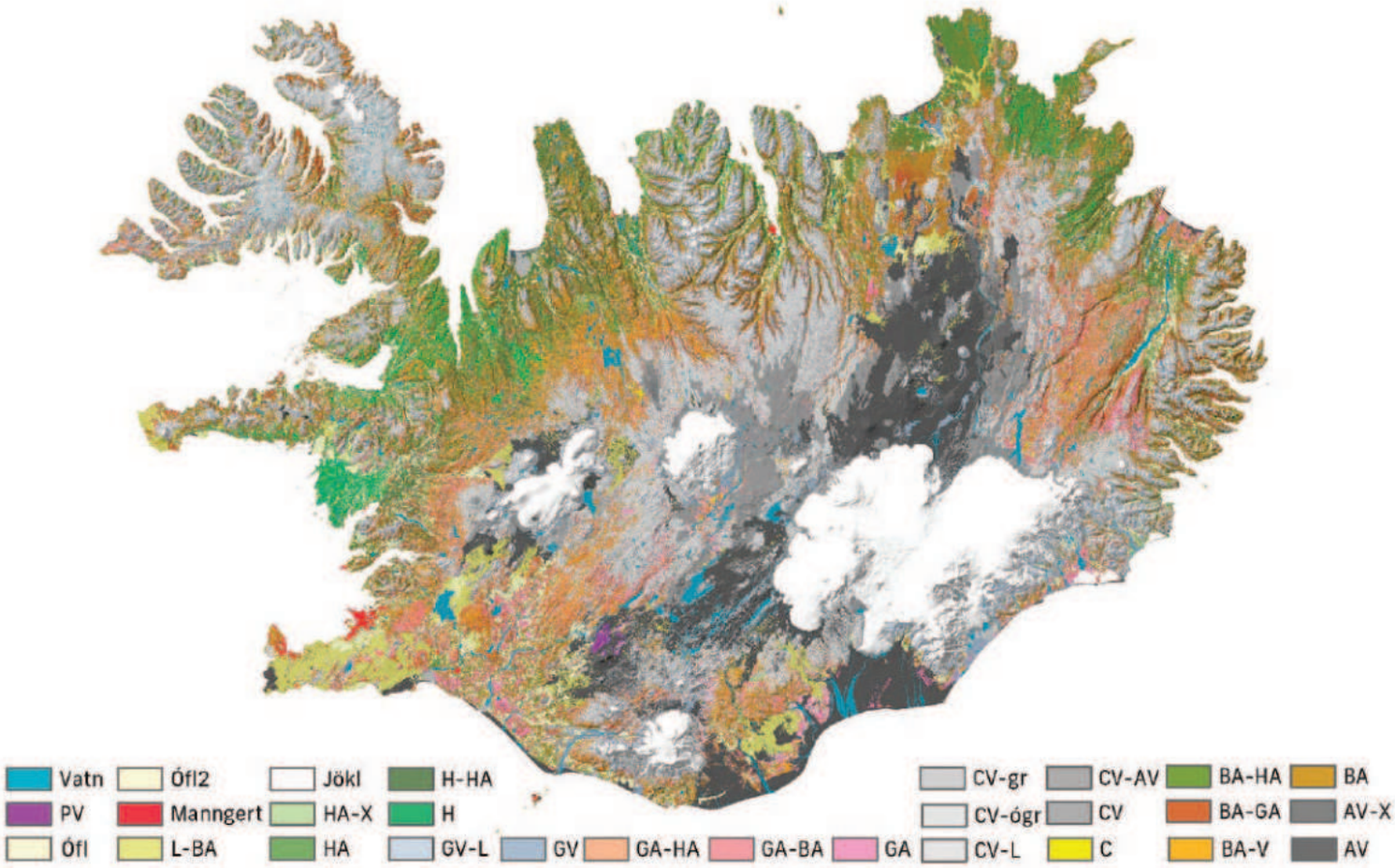
að einhverju leyti á sumrin og er lagið sem þiðnar nefnt „hið virka lag“ (e. active layer). Það er misjafnt hvað langt er niður á sífrerann og í erlendum flokkunarkerfum er gert ráð fyrir að hann sitji ekki neðar en 2 m til að moldin teljist til *frerajarðar*. Hið virka lag er oft afar mikið raskað af frosti. Þessi mold er einkennandi á rústasvæðum landsins (mynd 11.15, sjá kafla um kulferli) en er væntanlega einnig að finna í auðnum hátt til fjalla, sem m.a. sést á kortum sem byggjast á líkanagerð (Harris o.fl. 2007), en það hefur lítið verið rannsakað að öðru leyti.

Líkön sýna sífrera á hálendum svæðum á Norðurlandi, á milli Hofsjökuls og Langjökuls sem og á Tröllaskaga. Gera má því skóna að sífreri sé víða í jörðu á hálendi Vestfjarða. *Frerajörðin* íslenska er afskaplega margbreytileg því hún getur bæði verið með umtalsvert kolefni og leir í grónu landi á rústasvæðunum og kolefnissnauð í sífrera á auðnum landsins sem hæst standa.

11.5.2. *Bergjörð*

Bergjörð er lítið mótaður jarðvegur ofan á klöpp, grófum bergskriðum, hraunum o.s.frv. þar sem fínefni minni en 2 mm eru í litlum mæli (mynd 11.16). Jarðvegur þessara svæða er ófrjór því lítið er um moldaragnir sem geta miðlað næringu. Hraun eru afar útbreidd á landinu, sem og urðarskriður (e. scree), en þar er þessa jarðvegsgerð einkum að finna. Einnig má telja bergholt á Vesturlandi þar sem klöppin er í yfirborðinu, svo dæmi sé tekið. Eftir því sem meira safnast af áfoksefnum á slíkt yfirborð, t.d. hraun, breytist jarðvegsgerðin smám saman í *sandjörð* ef landið helst ógróið en *brúnjörð* þar sem gróður nemur land.

Ekki hefur ennþá verið ákvarðað hvenær lágmarksdýpt áfoks- og moldarefna er náð þannig að moldin teljist ekki lengur *bergjörð*, en meginhugsunin er sú að laus efni ættu að vera nægjanlega þykk til að háplöntur geti numið þar land (nokkrir mm eða cm). Sendin hraun eru á meðal algengustu landforma á Íslandi og þar skiptast á *sandjörð* og *bergjörð*.



Mynd 11.17. Jarðvegskort af Íslandi. Kortið byggist á útgáfunni frá 2009 en er nokkuð uppfært. Kortið er grunnur að notkun jarðvegsgagna frá Íslandi í alþjóðlegum gagnagrunnum um jarðveg í heiminum. Eldri kort eru í afar grófum mælikvarða og eru ekki nýtileg til að ákvarða jarðvegsgerð fyrir hvern ákveðinn blett, en nýrri útgáfan sem hér birtist er í mun betri upplausn. Gerð verður nánari grein fyrir henni á heimasíðu ritsins. Skýringar á skammstöfunum jarðvegsflokka eru í töflu 11.1.

11.5.3. *Kalkjörð*

Víða inni á fjörðum er að finna kalksteinsfjörur, m.a. við sunnanvert Snæfellsnes, við Breiðafjörð og í sumum fjörðum Vestfjarða. Þessi sandur getur fokið alllangar leiðir og hefur þá áhrif á mold langt út fyrir útbreiðslusvæði sitt. Sandsvæðin teljast vera *kalkjörð* sem hefur allt aðra eiginleika en *eldfjallajörð* á borð við *glerjörð* annarra sandauðna á landinu.

11.6. Jarðvegskort

Fyrstu drög að nýju jarðvegskorti voru birt af Rannsóknarstofnun landbúnaðarins (Rala) á alþjóðlegri jarðvegsráðstefnu á Íslandi 1998, en kortið var útskýrt nánar í ritrýndri grein árið 2004 (ÓA 2004) og varð aðgengilegt á netinu frá og með 1998. Það var birt með formlegri hætti í *Náttúrufræðingnum* árið 2009 (ÓA og Hlynur Óskarsson). Síðan þá hefur það verið uppfært reglulega. Lengst af var það þó í grunninn svipað og kortið frá 1998 og er í mælikvarðanum 1:350 000, sem er grófur mælikvarði. Því er ekki ætlað að sýna með nákvæmum hætti jarðvegsgerð á einhverjum tilteknum stað heldur megindrætti fyrir landið allt. Það sýnir meginflokka jarðvegs á hverju svæði og breytileika þeirra eftir landshlutum. Nú er unnið að því að færa kortið upp í mun nákvæmari mælikvarða með notkun á öðrum gagnagrunnum, m.a. áfokskorti og vistgerðakorti Náttúrufræðistofnunar Íslands, en ný vinnuútgáfa af kortinu er birt á mynd 11.17.

Á kortinu sést að *brúnjörð* (BA) er áberandi í og við gosbeltin sunnanlands og norðan, sem og á svæði þar sem bæði *votjörð* (GA) og *brúnjörð* koma fyrir, t.d. á Suðurlandsundirlendinu. Samsettir flákar á kortinu endurspegla grófan mælikvarða þess þar sem margar jarðvegsgerðir koma fyrir á hverju svæði. Samfelld svæði *mójarðar* (H) og þar sem *mójörð* og *brúnjörð* eru megingerðir eru á Vestur- og Norðvesturlandi. Samsetti flokkurinn *brúnjörð – svartjörð* (HA) – *votjörð* þekur víðfeðm svæði á Austur- og Norðvesturlandi, *svartjörðin* þar sem er blautast og/eða hlutfallslega minna áfok, en *votjörðin* er nær áfokinu og *brúnjörð* á þurrlendi. Það er einkennandi fyrir íslenskt landslag hvað breytileiki vistgerða og moldar getur verið mikill innan lítils svæðis, sem gerir kortlagningu af þessu tagi nokkuð flókna – yfirleitt þarf að grípa til samsettra flokka eins og gert er á þessu grófa korti, en jafnvel einnig á kortum sem eru í mun meiri upplausn (mynd 11.17).

Fyrrnefnt jarðvegskort, sem birt var í *Náttúrufræðingnum* árið 2009, er aðgengilegt hjá Landbúnaðarháskóla Íslands og hefur verið notað í margvíslegum tilgangi. Það er m.a. grunnurinn að því að unnt sé að nýta upplýsingar um íslenska mold í alþjóðlegu samhengi. Þær koma fyrir á kortum sem sýna jarðveg norðurslóða (Jones o.fl. 2010) og Evrópu (Soil Bureau Network 2005) sem og á heimskortum á vegum FAO og USDA-NRCS (Soil Taxonomy). Góð samvinna er á milli stofnana og samtaka sem halda utan um flokkun jarðvegs og jarðvegskortlagningu á heimsvísu, og gögnum er hiklaust deilt á milli þeirra.

11.7. Frekari flokkun og nýtt jarðvegskort

11.7.1. *Sortujörð*

Jarðvegskort ÓA/LbhÍ/Landgræðslunnar hefur þann agnúa að vera í grófum mælikvarða – því er einvörðungu ætlað að varpa ljósi á megindrætti íslensks jarðvegs. Unnt er að gera mun nákvæmara kort með þeirri einföldu flokkun sem hér hefur verið lýst, og er sú vinna þegar hafin en skort hefur nægjanlegt fjármagn til verksins. Nokkrar mikilvægar ástæður liggja til þess að nauðsyn er á að gera nýtt

Mynd 11.18. Dæmi um mósaík margra jarðvegsgerða á tiltölulega litlu svæði í landslaginu. Til vinstri er *mójörð* og *svartjörð* í dalbotninum sem þróast yfir í *brúnjörð* á þurrlendi með miklu lífrænu innihaldi (>10% C). Brúnjörðin smálækkar í hlíðum þar sem einnig koma fyrir *melajörð* og *bergjörð*, og hugsanlega *frerajörð* efst. Til hægri skiptast á *votjörð, brúnjörð* og *bergjörð* á mjög litlu svæði. Því er nauðsynlegt að grípa til samsettra jarðvegsflokka á kortum.

Nýtt jarðvegskort er mikilvægt

- Mold er grunnþáttur vistkerfa og það er mjög bagalegt hve mjög skortir upplýsingar um jarðveg hinna ýmsu vistgerða landsins sem og skilning á eðli og útbreiðslu mismunandi jarðvegsgerða landsins.

- Nauðsynlegt er að ráðast í gerð nýs jarðvegskorts til að fá betri sýn á moldina í tengslum við kolefnishringrás landsins, m.a. kolefnisstöðu vistkerfa, losun og bindingu, þ. á m. áhrif landnýtingar á kolefnismagn moldarinnar og mögulega bindingu CO_2 í vistkerfum í framtíðinni með breyttri landnýtingu.

- Betri upplýsingar vantar um flokkun moldar og eiginleika hennar í tengslum við ræktun matvæla (jarðrækt, heyframleiðsla, skógrækt o.fl.) og einnig í tengslum við uppgræðslu.

- Betri skilnings er þörf á jarðvegsgerðum og útbreiðslu þeirra í tengslum við landgræðslu og vistheimtaraðgerðir, sem og við mat á ástandi lands, þar sem bera þarf núverandi ástand saman við mögulegt ástand („vistgeta"; e. potential), sbr. lög um landgræðslu 155/2018. Mikið vantar upp á að unnt sé að framfylgja lögunum að þessu leyti.

Frekari skipting *brúnjarðar* gæti t.d. verið:

- Allófan (leirrík mold) *votjörð* og *brúnjörð*. Leirkennd *brúnjörð* (silandic).

- Siltrík, meðalleirrík *votjörð* og *brúnjörð* (siltmold – siltloam).

- Lífræn (histic) *brúnjörð*. >10 eða 12% C í efstu 15 cm í þurrlendi, t.d. birkiskógum.

- Gróf/sendin *votjörð* og *brúnjörð.*

- Gróflagskipt (mold með grófu lagi <30 cm frá yfirborðinu) sem hefur áhrif á vatnsbúskap og rofgirni.

- Grunn *brúnjörð* eða *votjörð* á sandi eða mel (t.d. landgræðslusvæði), mætir eiginleikum *glerjarðar* er varðar leirinnihald en hefur >1% C í a.m.k. 2 cm þykku yfirborðslagi.

- *Brúnjörð* þar sem stutt er niður á grunnvatn.

jarðvegskort með mun betri upplausn: Vonandi rennur upp sú tíð að skilningur vex á nauðsyn þess að gera ný og betri jarðvegskort fyrir landið. Höfundur ritsins hefur unnið að undirbúningi slíkrar kortagerðar, m.a. velt upp hvernig frekari flokkun moldarinnar gæti verið háttað. Tveir þættir, sem jafnframt eru ráðandi fyrir flesta aðra jarðvegseiginleika, ættu að ráða flokkun *brúnjarðar* og *votjarðar*: leirinnihald (eða kornastærð) og kolefnisinnihald. Dýpt jarðvegsins og gróf gjóskulög ættu einnig að móta frekari flokkun. Sjá kassa fyrir ofan sem dæmi um frekari flokkun *brúnjarðar*. Æskilegt er að slík skipting taki einnig mið af WRB-FAO-kerfinu þannig að fremur auðvelt sé að flytja íslensku jarðvegsflokkana undir tiltekna flokka WRB. En þó verður íslenskur veruleiki og þarfir landsmanna að hafa forgang. Hér voru ekki dregin nákvæm skil á milli undirflokka, t.d. með því að tilgreina ákveðna prósentu allófans eða skilgreina grófleikann nákvæmlega; þau skil þurfa að þróast við frekari mótun flokkunarinnar. Ennfremur geta aðrar leiðir komið til greina. Frekari flokkun gæti byggst á lífrænu innihaldi, t.d. kolefnisinnihaldi í efstu 15 cm

jarðvegsins, t.d. fyrir *brúnjörð* (sjá töflu 11.2).

Tafla 11.2. Frekari flokkun á grunni kolefnisinnihalds.

HLUTFALL	% C
Lágt	<2% C
Fremur lágt	2–4% C
Meðal	4–6% C
Fremur hátt	6–8% C
Hátt	>8% C
Histic	>10–12% C

11.7.2. *Glerjörð*

Mikilvægt er að aðgreina *glerjörð* betur en nú er gert. Sem dæmi má nefna *sandjörð* þar sem sandhraun og sandmelar eru t.d. mismunandi jarðvegsgerðir. Þá er einnig mikilvægt að skilja á milli sanda þar sem fíngert silt er stór hluti efnisins, t.d. á flæðum framan við jökla, og sanda þar sem hann er grófgerðari o.s.frv. Unnt er að skipta *melajörð* og *malarjörð* eftir kornastærð, yfirborðsgerð og lífrænu innihaldi, en einnig ummerkjum um flóð (fluvic í WRB), jarðsil o.fl. þáttum. *Vikurjörð* að sama skapi eftir kornastærð og efnasamsetningu vikursins (t.d. kísilríkur eða basískur).

11.7.3. Landgræðslusvæði

Þar sem gróður nemur land, m.a. fyrir tilstuðlan landgræðsluaðgerða, myndast mjög áhugaverður jarðvegur til að byrja með. Oft og tíðum er þetta þunn motta sem inniheldur rætur og önnur lífræn efni ofan á sendnu eða malarkenndu yfirborði. Þessi motta ræður þó miklu um eiginleika vistkerfisins. Sum þessara svæða standa á sléttlendi þar sem grunnvatn er hátt og þar þróast votlendi með tímanum (mynd 11.19). Slík þróun frá svartri sandauðn til votlendis verður að teljast afar sérstök á heimsvísu.

Landgræðslusvæðin þurfa sérflokkun fyrir mold sem einkennist af þunnri mottu með virkri næringarefnahringrás ofan á óvirku efni. Skilin eru iðulega afar skörp, svo sem á sandsvæðum. Þessi svæði hafa bæði einkenni *sortujarðar* og *glerjarðar* og ættu að hljóta flokkun og heiti í samræmi við það, t.d. sortuglerjörð. Þar væri hægt að skilja enn frekar á milli með tilliti til lífræns innihalds. Hér vantar frekari þróun á flokkuninni og það er mikilvægt að hafin sé vinna í þá veru.

Mynd 11.19. Votlendi sem er að myndast í kjölfar uppgræðsluaðgerða á vatnasviði Hornafjarðarfljóts. Myndast hefur þunn gróðurmotta yfir sandinum. Myndun votlendis á svartri sandauðn er æði sérstakt fyrirbrigði á heimsvísu. Flokkun þess gæti t.d. verið nefnd „vot sortuglerjörð“ eða einfaldlega „grunn *votjörð*“.

Viðauki – Nokkur snið flokkuð samkvæmt íslenska kerfinu, Soil Taxonomy og WRB

Hér á eftir birtast myndir af átta sniðum þar sem getið er flokkunar samkvæmt kerfi ÓA/Landbúnaðarháskólans (IS), Soil Taxonomy (ST) og WRB. Flokkun ST gerð af Curtis Monger o.fl. og tekin niður allt kerfið að undanskildu neðsta stiginu, sem væri „series“ sem nefnt er eftir svæðum eða stöðum (t.d. Korpa „series“ fyrir jarðveg svipuðum moldinni á Korpu (fyrsta myndin)). Tvær flokkanir fylgja Soil Taxonomy í mörgum tilfellum því ekki er ljóst hvort „frigid“ eða „cryic“ loftslagsbelti eiga við á mörgum svæðanna (sjá kassa í kaflanum). Ábyrgð á flokkun samkvæmt WRB: Peter Schad.

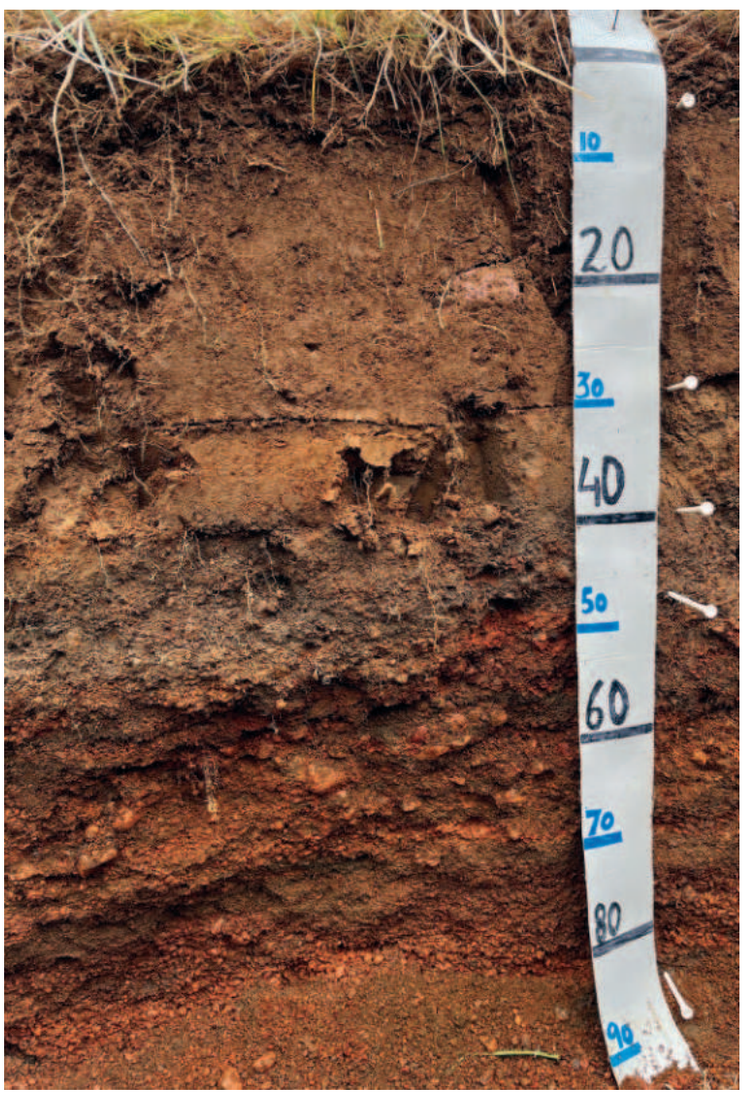
Fjallað er um sniðin Ós og Hella í ÓA o.fl. 2007, ÓA 2004, 2015. Sniðið við Þjóðfell: ÓA og Kimble 2001. Umfjöllun um önnur snið í ÓA o.fl. 2005 og mörg þeirra í ÓA 2015.

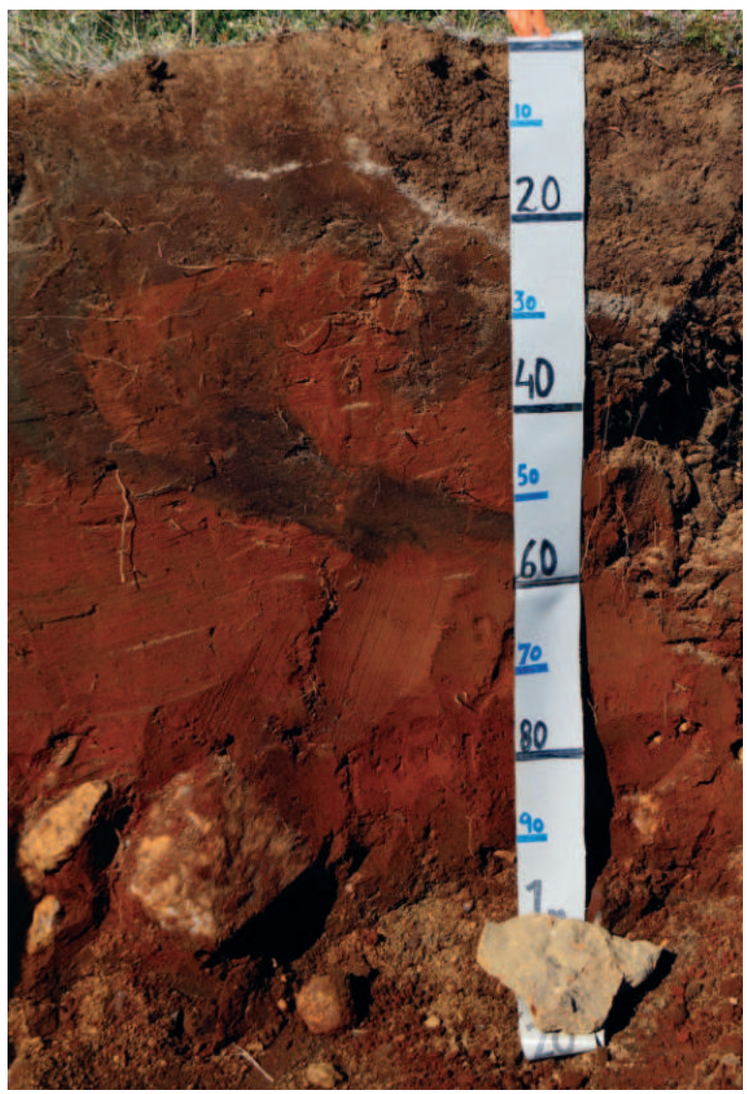
1. Korpa

Korpa, Reykjavík, á framræstu landi sem hefur verið plægt (tilraunaland). **IS:** Brúnjörð (Brown Andosol). Er á mörkum votjarðar en grunnvatn gengur upp að 40 cm dýpi (efstu 30 cm ráða flokkuninni). Grámi neðan 40 cm og rauðar járnútfellingar úr vatni neðan 50 cm, vottur af harðpönnu neðarlega í sniðinu („placic“ og „duric“ einkenni). **ST:** Hydrous over medial-skeletal, amorphic, frigid Duric Placaquand. **WRB:** Eurtric Katofluvic Epiandic Gleysol (Episiltic, Katoarenic, Drainic, Hyperhumic, Limonic, Endoskeletic).

2. Fell

Austan brúar yfir Lagarfljót. Mjög frosthreyft snið. **IS:** Dæmigerð brúnjörð (Brown Andosol). **ST:** Medial over ashy-skeletal, amorphic Vitric Haplocryand. **WRB:** Eutric Mollic Silandic Andosol (Siltic, Humic, Bathyskeletic, Endothixotropic, Turbic).





3. Þjóðfell

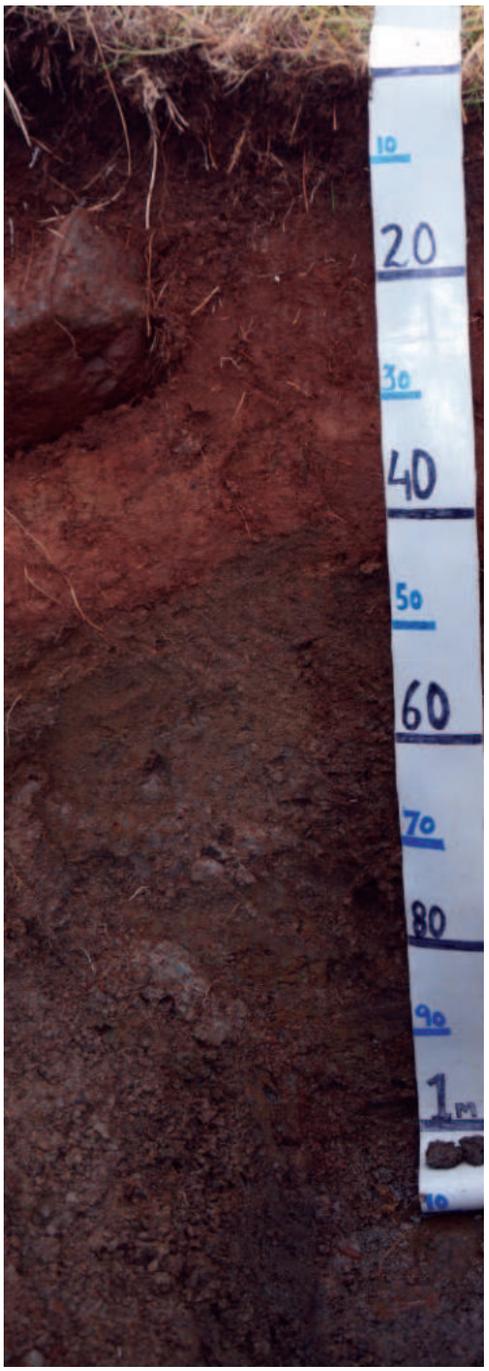
Auðn á öræfum austan Möðrudals-öræfa í >700 m hæð. **IS:** Glerjörð með sortueiginleika, nokkur merki jarðvegsþróunar (litur). **IS:** Melajörð (Cambic Vitrisol). **ST:** Ashy-skeletal, amorphic Typic Vitricryand. **WRB:** Eutric, Skeletic, Vitric Andosol (Arenic).

4. Hamar

Nálægt bænum Hamri í Hamarsfirði. Gætir einkenna hörðnunar neðar í sniðinu (plagic). **IS:** Brúnjörð (Brown Andosol). **ST:** Er á mörkum frigid og cryic loftslagsbelta jarðvegs (trúlega frigid) og því eru hér tvær niðurstöður fyrir flokkun: ef cryic: medial, amorphic Aquic Vitricryand; ef frigid: medial, amorphic, frigid Aquic Placudand. **WRB:** Eutric, Mollic, Endogleyic, Silandic Andosol (Siltic, Bathyfluvic, Humic, Encothisotrophic).

5. Ós

Í Miðfirði, sunnan Hvammstanga í framræstu landi, fremur stutt niður á jökulurð. **IS:** Svartjörð (Histic Andosol). **ST:** Medial, amorphic Histic Cryaquand. **WRB:** Eutric Katogleyic Vitric, Silandic Andosol (Pantoloamic, Drainic, Humic, Thixotropic, Turbic).



6. Viðborð

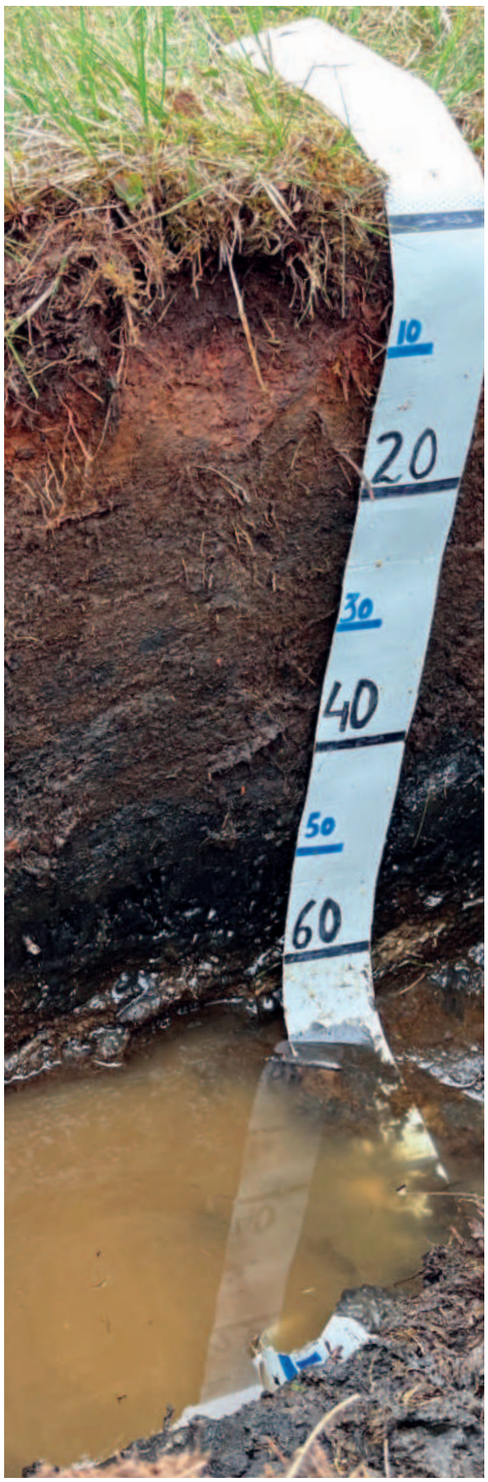
Á Mýrum, Hornafirði, óraskað votlendi, stutt niður á grunnvatn. **IS:** Svartjörð (Histic Andosol). **ST:** Ashy, amorphic, frigid Histic Vitraquand. **WRB:** Vitric Rheiic Fibric Histosol (Eutric). (Gert ráð fyrir >20% C sem er umdeilanlegt).

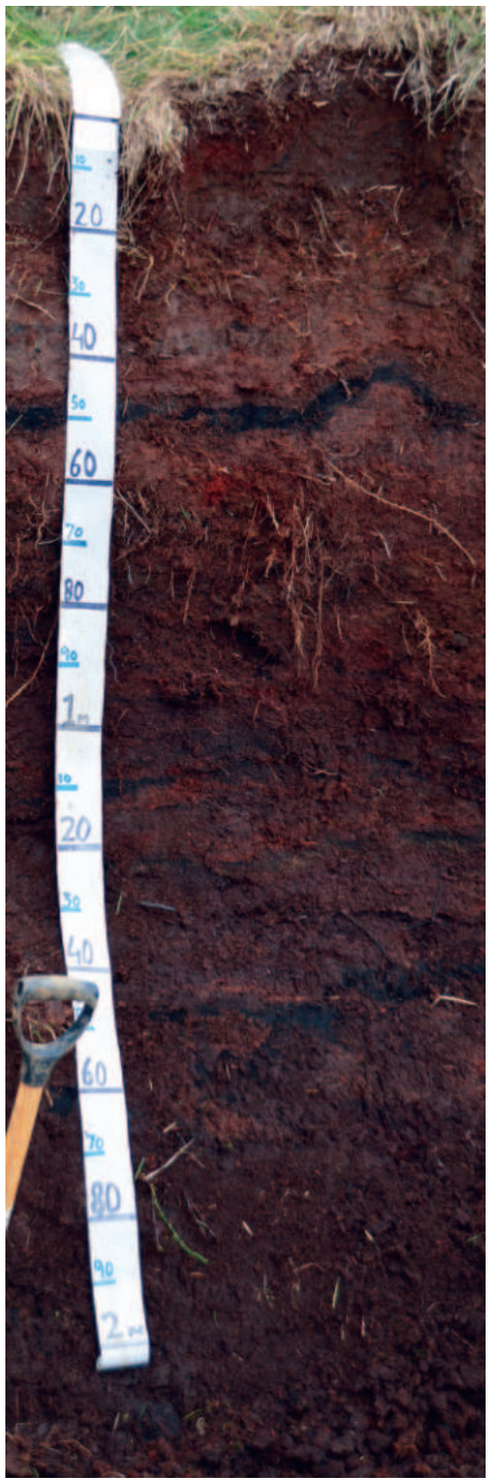
7. Hella

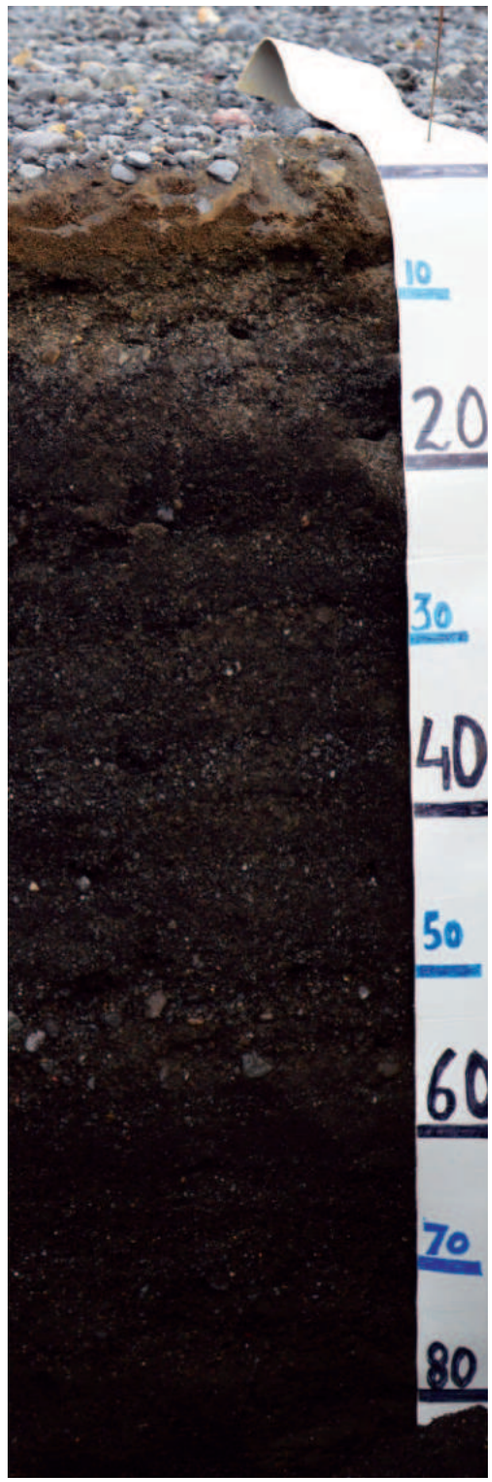
Skurður, framræst land nærri Rauðalæk. **IS:** Votjörð/svartjörð, á mörkum Gleyic/Histic Andosol. **ST:** Ashy, amorphic Eutric Pachic Fulvudand. **WRB:** Andic Rheic Drainic Hemic Histosol (Eutric, Orthomineralic). (Gert ráð fyrir >20% C sem er umdeilanlegt – en ansi breytilegt eftir því hvar var verið í skurðinum).

8. Skeiðarársandur

Árið 1996 í hlaupfarvegi. **IS:** Glerjörð (Vitrisol), sandjörð (Arenic Vitrisol). **ST:** Ashy-skeletal, amorphic, frigid Typic Udivitrand. **WRB:** Eutric Tephric Skeletic Pantofluvic Fluvisol (Pantoarenic) (hér ræður jarðfræði/flóð frekar en sortueiginleikarnir, sem er umdeilanlegt).







Heimildir

Andri Stefánsson og Sigurður Reynir Gíslason 2001. Chemical weathering of basalts, southwest Iceland: effect of rock crystallinity and secondary minerals on chemical fluxes to the ocean. American Journal of Science 301: 513–556.

Berglind Orradóttir, S.R. Archer, Ólafur Arnalds, L.P. Wilding og T.L. Thurow 2008. Infiltration in Icelandic Andisols: The role of vegetation and soil frost. Arctic, Antarctic and Alpine Research 40:412–421.

Bjarni Helgason og Grétar Guðbergsson 1977. Könnun á jarðvegi láglendissvæða umhverfis Lagarfljót. Rafmagnsveitur ríkisins, fjölrit, Reykjavík.

Björn Jóhannesson 1960. Soils of Iceland. Rit Atvinnudeildar Háskóla Íslands B-12. Reykjavík.

Björn Jóhannesson 1988. Íslenskur jarðvegur. Endurútgáfa á „Soils of Iceland" með yfirlitsjarðvegskorti og nýjum viðauka. Rannsóknastofnun landbúnaðarins, Reykjavík.

FAO-UNESCO 1998. World Reference Base for Soil Resources. World Soil Resources Reports 84, FAO, Róm, Ítalía.

Gennadiev, A.N., A.R. Geptner, A.P. Zhidkin, S.S. Chernyanskii og Y.I. Pikovskii 2007. Exothermic and Endothermic Soils of Iceland. Eurasian Soil Science 40:595–607. Upprunalega á rússnesku í Pochvovedenie 2007:661–675.

Grétar Guðbergsson og Sigfús Ólafsson 1978. Jarðvegskort af Möðruvöllum í Hörgárdal. Fjölrit Rala nr. 16, Reykjavík.

Gruner, M. 1912. Die Bodenkultur Islands. Archiv für Biontologie Bd. R. Friedlländer & Sohn, Berlín, Þýskaland.

Harris, C. og 21 annar höfundur 2007. Permafrost and climate in Europe. Monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses. Earth-Science Reviews 92:117–171.

IUSS Working Group WRB 2022. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4. útg. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vínarborg, Austurríki.

Jones, A., V. Stolbovoy, C. Tarnocai, G. Broll, O. Spaargaren og L. Montanarella (ritstj.) 2010. Soil Atlas of the Northern Circumpolar Region. European Commission, Publications Office of the EU, Luxemburg.

Nygard, I.J. og Björn Jóhannesson 1959. Soil map of Iceland. US Geological Survey. Birt með bók Björns Jóhannessonar 1960 (sjá þennan heimildalista).

Ólafur Arnalds 2004. Volcanic soils of Iceland. Catena 56:3–20.

Ólafur Arnalds 2015. The Soils of Iceland. World Soils Book Series. Springer, Dordrecht, Holland.

Ólafur Arnalds og Ása L. Aradóttir 2015. Að lesa og lækna landið. Landvernd, Landgræðsla ríkisins og Landbúnaðarháskóli Íslands, Reykjavík.

Ólafur Arnalds og Hlynur Óskarsson 2009. Íslenskt jarðvegskort. Náttúrufræðingurinn 78:141–153.

Ólafur Arnalds og J. Kimble 2001. Andisols of Icelandic deserts. Soil Science Society of America Journal 65:1778–1786.

Ólafur Arnalds, Bergrún Arna Óladóttir og Rannveig Guicharnaud 2005. Aðferðir við að lýsa jarðvegssniðum. Rit LbhÍ nr. 5. Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.

Ólafur Arnalds, F. Bartoli, P. Buurman, Hlynur Óskarsson, G. Stoops og E. García-Rodeja (ritstj.) 2007. Soils of Volcanic Regions of Europe. Springer, New York, USA.

Shoji, S., M. Nanzyo, R.A. Dahlgren og P. Quantin 1993. Evaluation and proposed revisions of criteria for Andosols in the World reference base for soil resources. Soil Science 161:604–615.

Sigurður Reynir Gíslason 2008. Weathering in Iceland. Jökull 58:387–408.

Sigurður Þórarinsson 1961. Uppblástur á Íslandi í ljósi öskulagarannsókna. Árbók Skógræktarfélags Íslands 1961:17–54.

Soil Bureau Network 2005. Soil Atlas of Europe. European Commission, Office for Official Publications of the European Communties, Luxemburg.

Soil Survey Staff 1999. Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. 2. útg. Agriculture Handbook No. 436. USDA-NRCS, U.S. Government Printing Office, Washington DC, USA.

Soil Survey Staff 2003. Keys to Soil Taxonomy. 9. útg. USDA-NRCS, Lincoln, Nebraska, USA.

Tu, H.Y. 1960. Some mineralogical properties of Icelandic soils. Viðauki í Björn Jóhannesson 1960 (sjá þennan heimildalista).

Zaqout, T., Hrund Ólöf Andradóttir og Ólafur Arnalds 2022. Infiltration capacity in urban areas undergoing frequent snow and freeze-thaw cycles: Implications on sustainable urban drainage systems. Journal of Hydrology 607:127495.

Þorsteinn Guðmundsson 1994. Jarðvegsflokkun FAO með hliðsjón af íslenskum aðstæðum. Fjölrit RALA nr. 167. Reykjavík.

Þorsteinn Guðmundsson 2018. Jarðvegsfræði. Myndun, vist og nýting. Háskólaútgáfan, Reykjavík.

Þorsteinn Sæmundsson, Ólafur Arnalds, C. Kneisel, Helgi Páll Jónsson og A. Decaulne 2012. The Orravatnsrustir palsa site in Central Iceland – Palsas in an aeolian sedimentation environment. Geomorphology 167–168: 13–20.

12 Eðliseiginleikar jarðvegs – bergefni og íslensk náttúra

Mynd 12.1. Litadýrð á háhitasvæði í Vonarskarði. Þarna er að finna fjölbreytt mengi leirsteinda og brennisteinssambanda sem gefa svæðinu lit. Mismunandi bergefni, bæði ómótuð gjóskuefni og leir sem myndast í moldinni, eru afar mikilvæg fyrir eðliseiginleika jarðvegs.

12.1. Bergefni

12.1.1. Móðurefnin

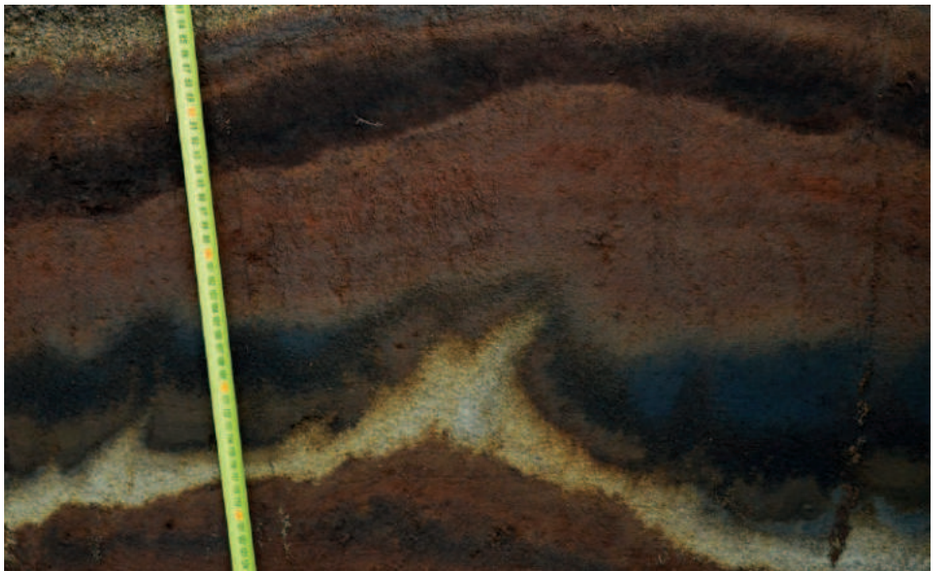
Í kafla um jarðvegsmyndun er fjallað um móðurefni jarðvegs sem einn þáttanna sem móta þróun moldarinnar. Gler (gjóska, eldfjallaaska) er hið eiginlega móðurefni íslensks jarðvegs sökum áfoksins sem breiðir teppi fokefna yfir landið og gjóskunnar sem berst út yfir landið í eldgosum. Þar sem moldin er ung er lítið veðrað gler drýgsti hluti bergefna jarðvegsins, t.d. á auðnum. Þá hefur jarðvegurinn svokallaða „vitric" eiginleika („vitr" merkir gler).

Magn og eðli glersins ræður miklu um eiginleika moldarinnar og þróun hennar. Gjóskan í íslenskri mold er af marg-breytilegri stærð og efnasamsetningu, misjöfn að útliti og lögun, holrými og yfirborðsflatarmál er ólíkt, og hún hefur breytilega efna- og eðliseiginleika. Allt eru þetta þættir sem ráða miklu um eiginleika jarðvegs og jarðvegsmyndun. Sem dæmi um afar ólík gjóskukorn í íslenskum jarðvegi má nefna þung og þétt basaltglerkorn (eðlisþyngd 2,9–3,2 g/cm³) og frauðkennd líparít-vikurkorn frá stórgosum í Heklu sem fljóta á vatni (<1 g/cm³). Sum fokefnanna eru þó sæmilega kristölluð, ekki síst þau sem berast um vestasta hluta landsins frá Hagavatnssvæðinu og svæðinu vestan við Langjökul á Vesturlandi (sjá kafla um sandauðnir á Íslandi). Gjóskurík bergefni hafa verið flokkuð á margvíslega vegu. Hér má nefna flokkun DePaepe og Stoops (2007) þar sem tekið er tillit til jarðvegs frá Íslandi en Stoops o.fl. (2008) birtu grein um bergefnin í íslenskri mold.

Ítarlegri upplýsingar um gjósku má m.a. finna í yfirlitsgrein sem höfundur þessa rits birti um gjósku og vistkerfi (OA 2013), m.a. um flokkun á gjóskunni og áhrif gjóskugosa á vistkerfi. Einnig má nefna grein Delmelle (2015) í *Encyclopedia of Volcanoes* þar sem er að finna mikinn fróðleik um eldgos og gosefni sem settur er fram á fremur aðgengilegan hátt (Sigurðsson 2015, ritstj.).

Líparítgjóskan (ljós gjóskulög) veðrast mun hægar en sú basíska og því varðveitist hún oft vel lítið veðruð í moldinni og verður að auðþekkjanlegum leiðarlögum við gjóskulagarannsóknir (mynd 12.2).

Ýtarlegar rannsóknir hafa verið gerðar á veðrun basaltgjósku og bergs hérlendis af Sigurði R. Gíslasyni og samstarfsmönnum hans (t.d. Eiríksdóttir et al. 2008; Sigurður Gíslason o.fl. 2006, 2009; Kardjilov et al. 2006, Andri Stefánsson og Sigurður Gíslason 2001) en þær sýna vel öra efnaveðrun basaltkornanna.



Mynd 12.2. Ljós og dökk öskulög í íslenskum jarðvegi. Gjóska af ýmsu tagi er móðurefni moldarinnar og þau veðrast mishratt eftir kornastærð og efnasamsetningu. Gróf gjóskuefni hafa iðulega veðrast lítið í moldinni, ekki síst ljós líparítvikur.

12.2. Kornastærð

Fjallað er um gerð og magn leirs í moldinni í næsta kafla. Kornastærð moldarinnar í heild skiptir þó ekki síður máli: skipting agnanna á milli kornastærðarflokkanna leirs, silts og sands. Kornastærðin hefur afgerandi áhrif á lykilþætti jarðvegsins á borð við ísig, vatnsheldni,

vatnsleiðni auk jónrýmdar o.fl. Ákvörðun kornastærðarflokks á vettvangi með svokallaðri „handaðferð“ eða „putta-aðferð“ (e. hand texturing) gefur góða mynd af þessari dreifingu.

Svörfun jökla er ráðandi þáttur í myndun silts í heiminum í gegnum jarðsöguna. Silt fýkur frá jökuljöðrum og flóðasvæðum og getur myndað þykk setlög (löss) þar sem áfokið safnast saman, eins og fjallað var um í 8. kafla um jarðvegsmyndun. Fokið nær þó langt út fyrir hin eiginlegu löss-setlög þar sem siltið blandast öðrum jarðvegsefnum.

Það áfok sem fellur til yfirborðsins á Íslandi er að langstærstum hluta silt en sums staðar að einhverjum hluta sandur næst uppfoksstöðum. En aðstæður á hverjum stað þar sem siltið safnast fyrir eru misjafnar og ráðast einkum af því: 1. hve mikið áfok (silt) hefur borist á hvern stað, 2. hvernig efnaveðrun hefur mótað jarðveginn, 3. hve mikið af lífrænum efnum hefur safnast fyrir, og síðast en ekki síst 4. hve mikið af gjóskulögum eru í jarðveginum. Kornastærð jarðvegslaga í helstu jarðvegsflokkum er birt í töflu 12.1.

Eins og vænta mátti er siltmold langalgengasti kornastærðarflokkurinn og ríkjandi flokkur nema á auðnum og í lítið þróuðum jarðvegi (*glerjörð*). Rannsóknir Björns Jóhannessonar (1960) leiddu þetta einmitt vel í ljós og var „silt loam“ eða siltmold ein megineiningin í kortlagningu Björns.

Gjóskulögin koma skýrt fram í *brúnjörð* þar sem grófari lög stinga í stúf við fínni jarðveg umhverfis. Sendin jarðvegslög ráða ferðinni í *glerjörð*, eins og vænta mátti. Hin votlenda *svartjörð* finnst fjærst virku áfoki og er því alla jafna mun fínkornóttari en t.d. *glerjörð*. Flest sniðin í *brúnjörð* innihalda gjóskulög og því er hluti jarðvegslaga *brúnjarðar* metinn sem

Gler og efnaveðrun

Við veðrun á basalti losnar um jónir á borð við Ca^{++}, Mg^{++}, K^{+} og Na^{+}, sem að mestu berast til sjávar, og hefur þetta ferli verið nefnt efnarof á íslensku. Kalsíum binst kolefni og súrefni á þessari vegferð og endar sem kalsíumkarbónat (kalk; $CaCO_3$).

Þetta ferli er afar mikilvirkt við að draga koltvísýring úr andrúmsloftinu, sem er mikilsvert í tengslum við kolefnisbúskap andrúmsloftsins og hlýnun jarðar. Sumar af þessum katjónum verða vitaskuld eftir í jónrýmdarsætum og gegna þar mikilvægu hlutverki hvað varðar sýrustig og næringarástand moldarinnar.

Önnur mikilvæg afleiða veðrunarinnar er þróun *eldfjallajarðar* þegar allófan, ferrihýdrít og ímógólít kristallast úr jarðvegslausninni (þ.e. mynda nýjar leirsteindir) sem verður til úr þeim efnum sem losna við veðrunina. Auk þess bindast ál og járn að einhverju leyti við lífrænar fjölliður og mynda málm-húmusknippi (MHK). Veðrun og myndun jarðvegs hérlendis er efni 14. kafla um jarðvegsmyndun.

Tafla 12.1. Kornastærð í mismunandi jarðvegsflokkum fyrir mismunandi jarðvegslög í gagnagrunni LbhÍ (heildarfjöldi sýna úr hverjum flokki, *mójörð* undanskilin). Samtals tæplega 400 jarðvegslög.

	KORNASTÆRÐARFLOKKUR – % *æ grófara sé farið til hægri*					
JARÐVEGSFLOKKUR	LEIRMOLD	SILTMOLD	MOLD	SANDMOLD	MYLDINN SANDUR	SANDUR
Svartjörð	36	40	8	4	12	0
Votjörð	17	44	19	10	10	0
Brúnjörð	4	47	26	9	40 (öskulög)	3
Glerjörð	2	6	2	38	44	8

myldinn sandur. En í *brúnjörð*, fjarri virku uppfoki, er siltmoldin ráðandi. Líklega er hlutfall leirmoldar í *svartjörð* ofmetið þar sem mjög lífræn lög greinast stundum til leirmoldar með „puttaaðferðinni“ enda þótt þau séu það ekki, því rotnuð lífræn efni hafa svipaða áferð.

Vegna þess hve margar jarðvegstegundir á Íslandi myndast við áfok (löss) er moldin frekar laus við steina sem hamlað geta ræktun með ýmsum tækjum þar sem áfokslagið er nægjanlega þykkt. Þar sem áfokið hefur verið lítið, t.d. víða á Vestfjörðum, er stutt niður á undirlagið og frost getur lyft grjóti upp á yfirborðið yfir vetrarmánuðina. Við þær aðstæður gat það verið ansi starfsamt og erfitt hér áður fyrr að tína grjót úr túnum — og alltaf kom upp meira grjót að ári. Það sama á við þar sem sáð hefur verið til túna í melum, samspil grjóts og frostlyftingar getur orsakað grýtt yfirborð enda þótt grjót hafi verið fjarlægt í upphafi.

Mynd 12.3. Mælingar á rúmþyngd jarðvegslaga í sniði nálægt Gullfossi. Dósir (frá Ora í þessu tilfelli) sem eru opnar í báða enda eru reknar varlega inn í tiltekið jarðvegslag. Síðan er skorið frá dósunum og þær teknar, moldin þurrkuð og vegin til að ákvarða rúmþyngd. Að lokum er jarðvegurinn sigtaður til að kanna hvort korn >2 mm séu til staðar en þau þarf að draga frá (vigt og rúmmál). Þetta snið einkennist af mörgum grófum gjóskulögum úr Heklu og Kötlu. Myndin tengist BSc-verkefni Rannveigar Guicharnaud (2002), en hún rannsakaði rúmþyngd moldar vítt og breitt um landið.

12.3. Rúmþyngd

Rúmþyngd segir til um hvað hver rúmmálseining jarðvegs vegur þegar moldin er þurr. Rúmþyngd er grundvallareiginleiki jarðvegs sem hefur áhrif á loftrými, loftun og vatnseiginleika og er jafnframt notuð við flokkun á *eldfjallajörð*. Einvörðungu er miðað við virkt efni jarðvegsins (<2 mm), steinar sem eru stærri en 2 mm eru undanskildir í útreikningum á rúmþyngd. Einingin er ýmist t/m^3 eða g/cm^3 sem er þó sama einingin: hvað hver rúmmetri vegur mörg tonn eða hve mörg grömm hver rúmsentimetri vegur. Rúmþyngd jarðvegs er gjarnan nálægt 1 g/cm^3. Föst efni (bergefni) hafa yfirleitt eðlisþyngd frá 2,5–3 g/cm^3 en gabbró (basískt djúpberg) getur verið nær 3,8 g/cm^3, svo munurinn hér á milli felur í sér holrými sem léttir jarðveginn. Því minni sem rúmþyngdin er, þeim mun meira holrými er til staðar.

Lífræn efni eru afar létt í sér og þar með hefur mómold (*mójörð*) yfirleitt afar litla rúmþyngd en þeim mun meira holrými. Lítil rúmþyngd jarðvegs felur það oftast í sér að hann eigi auðvelt með að binda og miðla vatni, og slíkur jarðvegur er léttur í sér og auðveldur í vinnslu.

Íslenskur jarðvegur er *eldfjallajörð* og rúmþyngdin er því alla jafna fremur lítil.

Mælingar á rúmþyngd hafa einkum verið gerðar í tengslum við námsverkefni en einnig ýmsar rannsóknir á jarðvegi, t.d. þær er meta kolefnisbindingu jarðvegs þar sem rúmþyngd er undirstöðuatriði. Viðamesta rannsóknin á rúmþyngd jarðvegs er BS-verkefni Rannveigar Guicharnaud (2002) en rannsóknin var gerð í tengslum við uppbyggingu á jarðvegsgagnagrunninum Ými (nú hjá LbhÍ, mynd 12.3).

Almennt gildir að eftir því sem *eldfjallajörð* er þróaðri eykst holrýmið og rúmþyngdin minnkar með myndun allófans, ferrihýdríts og imógólíts annars vegar og hins vegar uppsöfnun á málm-húmus-fjölliðum (MHK), sem eru örefnin (e. colloids) sem einkenna *eldfjallajörð*. Jafnframt safnast mikið af lífrænum efnum í moldina (oft 6–12% C ef nýting er hófleg), sem er einmitt eitt af einkennum *eldfjallajarðar*. Magn lífrænna efna er þó háð landnýtingu o.fl. þáttum. Annar meginþáttur sem lækkar rúmþyngdina hérlendis er uppsöfnun lífrænna efna, sem þurfa ekki að vera tengd allófani eða MHK, einfaldlega vegna hægs rotnunarhraða af völdum kulda og vegna þess að súrefnisskortur hægir á rotnun í votlendum.

Tengsl rúmþyngdar og lífræns kolefnis sjást glögglega á meðfylgjandi grafi (mynd 12.4). Lægstu gildin eru um 0,15 g/cm³, sem telst mjög lágt. Þau finnast í *mójörð* og *svartjörð*, en Þorsteinn Guðmundsson (1978) fékk svipuð gildi fyrir jarðvegssýni úr þessum gerðum jarðvegs á Norðvesturlandi. Svipuð og jafnvel lægri gildi finnast í mómýrum nágrannalandanna.

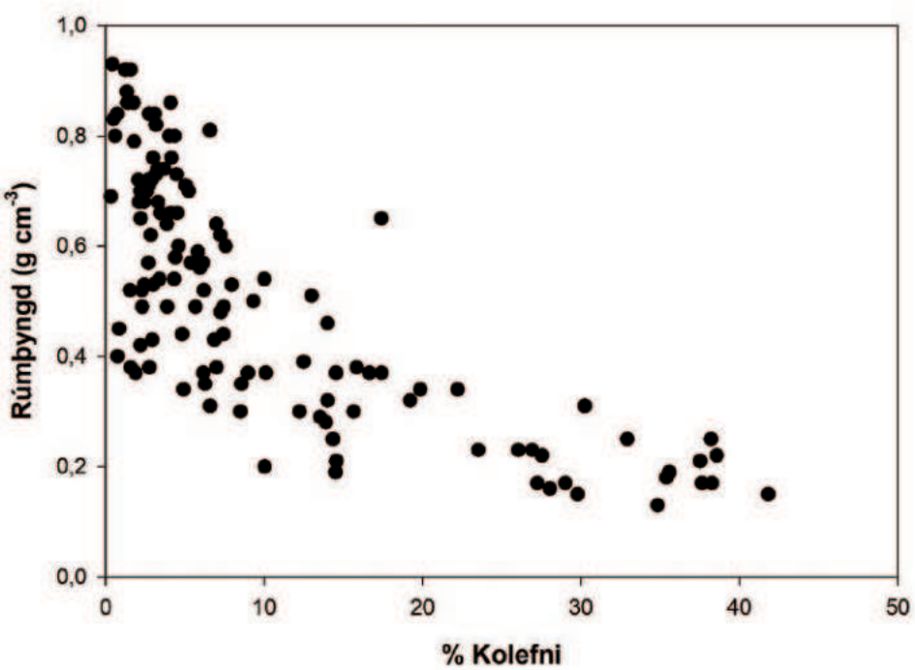
Niðurstöðurnar eru mjög sambærilegar þeim sem fást fyrir *eldfjallajörð* í heiminum – sýnt hefur verið fram á að þar sem mikið er af leir í *eldfjallajörð* er rúmþyngdin oft um 0,5 g/cm³ (Shoji o.fl. 1993). Um leið og lífrænt C fer yfir 10% markið fer rúmþyngd að meðaltali undir 0,4 g/cm³. Auk þess sést að rúmþyngdin er að stærstum hluta undir 0,8 g/cm³. Hærri gildin eiga við um ólífræn öskulög og *glerjörð* þar sem vantar bæði lífræn efni og leirsteindir til að minnka rúmþyngdina.

Miðað við gögn LbhÍ og niðurstöður Rannveigar Guicharnaud (2002) fylgja tengsl rúmþyngdar (BD) og lífræns efnis jöfnunni:

$$BD=0{,}812 - (C\% \times 0{,}0203)$$

Mest óvissa er við lág kolefnisgildi þar sem einnig þarf að líta til eðlis bergefnanna.

Rúmþyngd er afar mikilvæg stærð þegar verið er að reikna út magn kolefnis í jarðvegi, t.d. sem þyngd á rúmmetra eða magn kolefnis á ha, þar sem kolefnishlutfallið er margfaldað með rúmþyngd til að fá út heildarmagn kolefnis. Fjallað er um kolefnisbindingu sérstaklega síðar í ritinu, enda tengist hún hringrás koltvísýrings og loftslagsbreytingum sem mikilvægt er að gera skil.



Mynd 12.4. Rúmþyngd og tengsl við lífræn efni í jarðvegi. Hver punktur táknar mælingu á einu jarðvegslagi. Gögn úr gagnagrunninum Ými (Rannveig Guicharnaud 2002).

12.4. Vatnseiginleikar

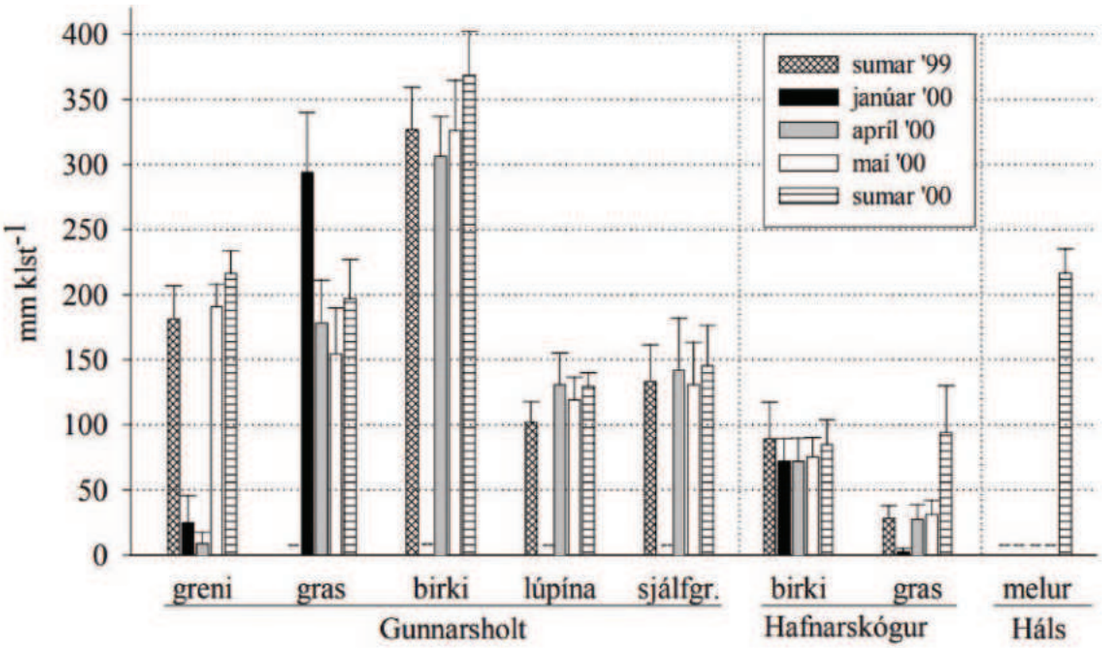
Eiginleiki moldar til að taka við úrkomu og miðla henni á ný er undirstaða fyrir virkni vistkerfa og fæðuframleiðslu. Jafnframt hreinsar moldin mengun úr vatninu á leið þess til grunnvatns og straumvatna. Til þess að vistkerfi starfi með eðlilegum hætti þarf vatn að komast ofan í moldina (ísig), bindast ögnum hennar (vatnsrýmd, vatnsbinding) og berast um hana (vatnsleiðni).

Íslensk mold undir gróðri (*sortujörð*) ber glögg einkenni *eldfjallajarðar* almennt þegar kemur að vatnseiginleikum; hún getur bundið afar mikið vatn og miðlað því síðan til vistkerfisins eftir þörfum. En breytileikinn er mikill, eins og reynt verður að skýra í textanum sem hér fylgir. Ástæða er til að benda á greinar Jóns Guðmundssonar og Hlyns Óskarssonar (2006) og Jóns Guðmundsson o.fl. (2006) í *Ræðaþingi landbúnaðarins* um vistkerfi og vatnasvið. Þá hafa greinar Ian Strachan o.fl. (1999a,b) að geyma mikið af upplýsingum um vatnseiginleika í gjóskuríkum jarðvegi.

12.4.1. Ísig

Vatn þarf að komast ofan í jarðveginn eftir að það fellur sem regn á yfirborðið til þess að nýtast vistkerfum. Það er nefnt ísig á íslensku. Ísig er mælt í mm/klst, þ.e. hve mörgum millimetrum vatns moldin tekur við á klukkutíma. Ísigið í mm/klst er síðan hægt að bera saman við úrkomu (í mm) og eru algengustu gildi á milli 1 og 20 mm/klst. Ef ísigið er hægara en sem nemur úrkomunni er hætta á afrennsli og vatnsrofi. Ísig er ákaflega mismunandi á milli jarðvegstegunda almennt, en stór holrými og sprungur herða mjög á innflæðinu. Sprungur geta t.d. myndast í smektítríka mold eða sem frostsprungur. Leirríkur jarðvegur hefur gjarnan hægasta ísigið (lítið um stór holrými), en slíkur jarðvegur hefur aftur á móti mestu vatnsrýmdina. Sandur hefur aftur á móti örasta ísigið, en skortir hæfileika til að binda vatnið í moldinni.

Mikilvægar upplýsingar um ísig á Íslandi fengust með rannsóknum Berglindar Orradóttur o.fl., sem m.a. voru birtar í MSc-ritgerð hennar (2002), og öðrum



Mynd 12.5. Meðal-ísigsshraði (± staðalskekkja) í greniskógi, graslendi, birkiskógi, lúpínubreiðu og sjálfgræddu landi í Gunnarsholti, í birkiskógi og graslendi við Hafnarskóg og í mel við Neðra-Háls í Kjós. Mynd frá Berglindi Orradóttur o.fl., 2006.

greinum (Berglind Orradóttir o.fl. 2006, 2008), en einnig úr rannsóknum Tareks Zaqout við Háskóla Íslands (2022). Rannsóknir Berglindar og Tareks leiða í ljós að ísig á Íslandi er fremur ört yfir sumarmánuðina, eins og yfirleitt þekkist fyrir *eldfjallajörð*. Rétt er að hafa í huga að jarðvegur hér er oft grófur á gosbeltunum og við þau, en þar sem mikið er af allófanleir mynda kornin stöðug samkorn af silt-stærð, sem örvar ísigið (öfugt við blaðsilíköt).

Lítil rúmþyngd gefur einnig til kynna mikil holrými sem örva vatnsflæðið innan jarðvegsins. Samkornin binda hins vegar mikið vatn. Rannsóknir sýna að ísig í jarðveg á sumrin er gjarnan á milli 30 og 360 mm/klst og er langsamlega örast í sendnum jarðvegi (100–360 mm/klst) en 28–94 mm/klst í fínni jarðvegi. Gríðarlegur munur getur verið á hraða ísigs á hverjum stað, jafnvel 25-faldur munur á milli einstakra mælinga (Berglind Orradóttir o.fl. 2006). Því er ljóst að nær öll úrkoma sem fellur á sumrin berst greiðlega niður í íslenska mold, nema þar sem halli er mikill eða jarðvegurinn of vatnsósa til að taka við öllu vatninu (mettaður).

Allt öðru máli gegnir um ísig að vetri en sumri, eins og vænta má, þar sem frost er í jörðu. Þá hægir á ísiginu, en það er afskaplega breytilegt eftir því hve mikið frost er í jarðveginum og hvers eðlis ísigið er. Ísig að vetri er mun örara þar sem gróðurþekja er öflug á borð við birkiskóg eða graslendi en á auðnum og illa förnu landi. Þar eru meiri líkur á að myndist þéttur ís í moldinni (e. concrete ice) en holklaki undir öflugum gróðri einkennist aftur á móti oft af gljúpum ís (e. porous ice). Nýjar rannsóknir í Landsveit sýna sömu niðurstöður (Erphys – ÓA óbirt gögn) sem og rannsóknir á ofanvatnlausnum við Urriðaholt (Tarek Zaqout o.fl. 2022). Þar hefur myndast ógegndræpur ís í lúpínubreiðum á vetrum, en graslendi hefur á hinn bóginn örara ísig á vetrum. Ógegndræpur ís myndast einnig iðulega í mold greniskóga á heimsvísu sem og hérlendis, en þar er meiri hætta á að þéttur ís myndist samanborið við birkiskóga, enda yfirborðið ekki hulið gróðri eins og sést á mynd 12.6. Þó geta myndast sprungur þar sem ís er þéttur, sem hleypa þá vatni greiðlega niður á nokkurt dýpi, oft moldarmenguðu afrennsli, sem hæglega getur stuðlað að mengun vatnsbóla eða aukið á skriðuhættu.

Hægt ísig að vetri á illa grónu landi hefur gríðarlega miklar afleiðingar fyrir íslensk vistkerfi og vatnafar (myndir 12.7 og 12.8). Þegar dregur úr einangrun gróðurþekjunnar þar sem gróðurfar er rýrt eykst hætta á vatnsrofi. Rofdílar og moldir utan í rofabörðum mynda einnig þéttan ís sem veldur vatnsrofi. En mesta breytingin verður þó þegar stór landsvæði missa alveg gróðurhuluna og hinn þétti holklaki og vatnsagi (og stundum tímabundin íshella) draga mjög úr stöðugleika í yfirborði auðnanna

Mynd 12.6. Svörður í sitkagreniskógi til vinstri en í lúpínubreiðu til hægri að hausti. Stutt er í bera mold. Oft myndast þéttur ís við yfirborðið sem hleypir ekki vatni niður. Jafnframt geta myndast frostsprungur sem leiða moldarmengað vatn í grunnvatn nærri staðnum. Hætta er á afrennsli og rofi í ofsaregni eða þýðu á vetrum.

Mynd 12.7. Vatn á yfirborði auðna að vetri vegna ógegndræps holklaka (þéttur ís). Vatnsaginn getur valdið miklu vatnsrofi á vetrum í mikilli úrkomu og/eða snjóbráð. Á þessum stöðum sést aldrei vatn á yfirborði eftir að frost fer úr jörðu. Geitasandur á Rangárvöllum fyrir ofan en auðnir norðan Heklu fyrir neðan. Ljósmyndir: Berglind Orradóttir (f.o.) og Elín Fjóla Þórarinsdóttir (f.n.).

– sem er einn þeirra þátta sem veldur mjög hægri framvindu á slíkum svæðum, jafnvel eftir að þau hafa verið friðuð fyrir beit.

12.4.2. Vatnsbinding, vatnsrýmd

Í 4. kafla var fjallað um laust vatn og bundið vatn ásamt hugtökum og skýringum á því hvernig vatn binst í moldinni, sem rétt er að rifja upp. Það eru fyrst og fremst lífræn efni og leir sem binda vatn og miðla því. Silt leiðir vatn greiðlega um moldina (í allar áttir) en bindur lítið vatn. Sandur hvorki leiðir né bindur vatn nema sandefnin séu gropin, sem raunar á oft við um gjósku og gler, en þá er einhver vatnsbinding til staðar þótt takmörkuð sé. Talað er um vatnsmettun þegar laust vatn hefur hripað úr jarðveginum vegna þyngdarafls, og er það vatnsinnihaldið við t.d. 0,1 eða 0,3 bara togspennu.

Gróður visnar við u.þ.b. 15 bara togspennu og vatnsinnihaldið er þá skilgreint sem visnunarmark. Vatnsmagnið sem nemur mismuninum á innihaldi við vatnsmettun og visnunarmark er skilgreint sem nýtanlegt vatn (e. plant available water) eða möguleg vatnsbinding (e. water holding capacity), sem jafnframt lýsir vatnsrýmd moldarinnar.

Gríðarlegur munur er á vatnsbindihæfileikum hinna ýmsu jarðvegsgerða á Íslandi og þar kemur til mismunandi kornastærð (leirmagn) og mismikið af lífrænum efnum. En síðan getur einnig verið ákaflega mikill munur á milli einstakra jarðvegslaga innan hvers sniðs. Í töflu 12.2 eru dæmigerð gildi fyrir jarðvegslög í hinum ýmsu jarðvegsflokkum. Hér vekur fyrst athygli hve vatnsinnihaldið getur verið feykilega mikið við mettun, sem endurspeglast í gildum sem eru yfir 100% – þ.e. meira er af vatni en sem nemur eiginþyngd moldarinnar.

Slíkt vatnsmagn er raunar eitt af einkennum mómoldar víða um heim. En gildin fyrir *eldfjallajörð* eru einnig mjög há, hærri en þekkist almennt fyrir annan jarðveg en *mójörð* (Histosol) í heiminum. En það er einnig mjög athyglisvert hve gildin eru há við visnunarmark; umtalsvert vatn er fastbundið í jarðveginum þegar hann er orðinn svo þurr að plöntur ná ekki að nýta meira vatn. Þessi háu gildi eru einkennandi fyrir *eldfjallajörð* og *mójörð* um heim allan og þau sýna að þessar jarðvegsgerðir geta miðlað ógrynni af vatni.

Allt öðru máli gegnir um *glerjörð*, gildin fyrir hana eru allt að 10 sinnum lægri en t.d. fyrir *mójörð*. Gildin fyrir *glerjörð* eru hins vegar afar misjöfn, *melajörð* með Bw-lagi (e. cambic horizon) getur bundið talsvert af vatni og miðlað því á ný. *Sandjörð* heldur einnig í töluvert vatn, mun meira en þekkist með sand sem gerður er af efnum á borð við kvars, því glerefnin hafa umtalsvert yfirborð sem vatn binst við.

Mynd 12.8. Ísilögð auðn nærri Hálslóni í aprílmánuði. Hér berst ekki mikið vatn niður í moldina í vatnsveðrum.

Lífrænu jarðvegsgerðirnar (*mójörð* og *svartjörð*) hafa mjög há gildi fyrir nýtanlegt vatn. Hærri gildin fyrir *votjörð* og *brúnjörð* teljast einnig mjög há, en lægri gildin sem þarna eru sýnd eiga einkum við um grófan jarðveg nærri gosbeltum eða gjóskulög innan sniðanna. Þessi mikla vatnsbinding gefur til kynna að stór hluti íslensks jarðvegs geti miðlað vatni í þurrkatíð, jafnvel svo vikum skiptir, án þess að vatnið gangi til þurrðar.

Einnig ætti að vera hægt að hlaða miklu vatni í jarðveginn með vökvun til að vega upp á móti langvarandi þurrkum þar sem slíkar aðstæður eru fyrir hendi. Öðru máli gegnir um ræktun á *glerjörð*, t.d. á svokölluðum sandatúnum, þar sem hætt er við að vatn gangi til þurrðar

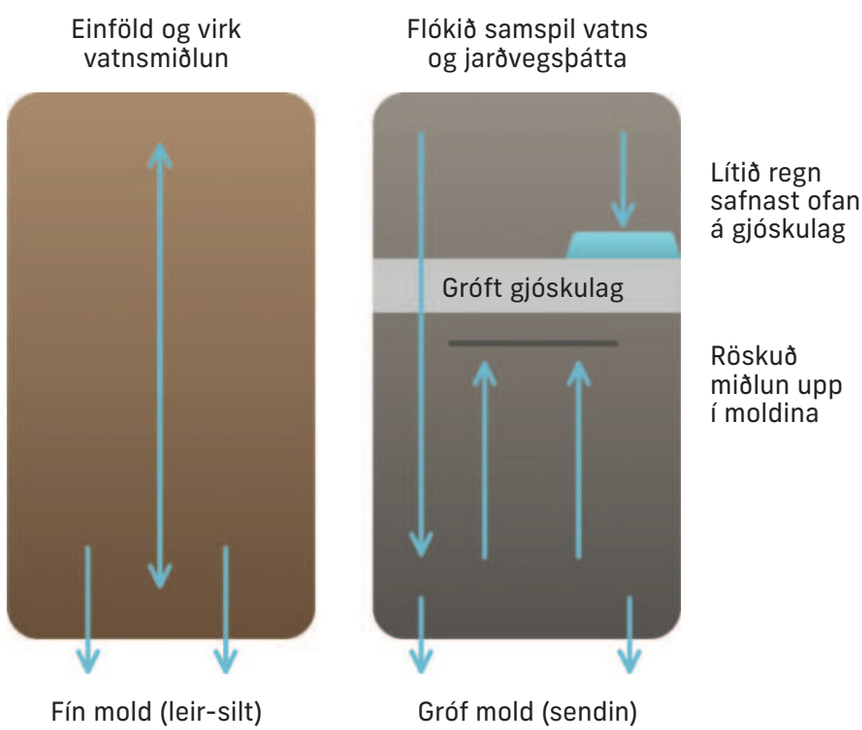
Tafla 12.2. Vatnsbinding eftir jarðvegsflokkum. Dæmigerð gildi. Allt að tífaldur munur er á milli þeirra jarðvegsflokka sem minnst halda í vatn (*glerjörð*) og þeirra sem hafa mesta vatnsbindingu (*mójörð*).

JARÐVEGSFLOKKUR	VATNSMETTUN (0,3 BÖR)	VISNUNARMARK (15 BÖR)	NÝTANLEGT VATN
	% vatn		
Mójörð	200–350	150–250	80–200
Svartjörð	100–200	75–150	50–125
Votjörð	40–100	30–70	15–40
Brúnjörð	30–100	15–70	15–40
Glerjörð	5–40	5–30	2–15

tiltölulega fljótt, eins og reynslan sýnir. Þegar litið er til heildarmagns vatns í moldinni lýsa þessi prósentugildi þó aðeins hluta myndarinnar, rúmþyngd og dýpt jarðvegsins skipta einnig miklu máli.

Glerjörð er iðulega grunn en dýpt hinna jarðvegsgerðanna er afar misjöfn. Þar sem miðað er við þurrvigt jarðvegsins er ljóst að munurinn á heildarmagni vatns í hverju jarðvegslagi minnkar því lífræna moldin er létt en bæði *votjörð* og *brúnjörð* talsvert þyngri.

Gildi á bilinu 80–200% fyrir vatnsheldni í töflunni hér fyrir framan eru margfölduð með 0,2–0,4 g/cm³ fyrir *mójörð* en gildin á bilinu 15–40% fyrir *votjörð* og *brúnjörð* með u.þ.b. 0,65 g/cm³ og nálægt 1 g/cm³ fyrir *glerjörð* (og deilt með 100 til að breyta % í hlutfallstölu); niðurstaðan er g vatns í hverjum cm³ eða t/m³. Þennan mun þarf að taka með í reikninginn þegar hugað er að vatnshag, vatnsmiðlun og rennsli til grunnvatns. Hlutfallslega lítil vatnsmiðlun í *glerjörð* er eitt af því sem torveldar náttúrulega framvindu á auðnasvæðum, ásamt þáttum á borð við skort á yfirborðsstöðugleika, fræregni og öruggu seti, næringu o.fl. Dökkt yfirborð auðnanna hitnar auðveldlega í sólskini og uppgufun verður þá mjög ör, moldin skrælnar á mjög stuttum tíma. Hin lífræna moldarskán (lífskán – e. biocrust) er einmitt oft forsendan fyrir framvindu því hún minnkar uppgufun, gerir yfirborðið stöðugra og myndar öruggt set fyrir fræ.



Mynd 12.9. Í einsleitri fíngerðri mold (til vinstri) dreifist vatn vel um allt sniðið og berst upp að rótum plantna þegar þornar um. Þar sem gróf jarðvegslög, t.d. gjóskulög, rjúfa vatnsleiðnina (til hægri) er miðlun vatns takmörkuð bæði upp og niður fyrir gjóskulagið. Vatn berst ekki niður í gegnum lagið fyrr en við mettun þegar laust vatn (e. gravitational water) lekur niður í gegn. Ekkert bundið vatn berst upp eða niður í gegnum lagið því vatnsleiðni fínni efna er engin.

12.4.3. Vatnsleiðni

Vatnsleiðni (e. hydraulic conductivity) er mjög mikilvægur eiginleiki jarðvegs sem hefur áhrif á vatnsmiðlun og vatnsbúskap vistkerfa. Þessi eiginleiki kemur að mjög miklu gagni við líkanagerð er varðar nitur og vatnsflæði og fleiri eiginleika þar sem nauðsynlegt er að nota upplýsingar um jarðveg (sjá t.d. Friðrik Pálmason o.fl. 1996; Strachan o.fl. 1999a,b).

Þá er þessi eiginleiki afar þýðingarmikill í tengslum við framræslu. Nokkrir vísindamenn hafa unnið að mælingum á vatnsleiðni á Íslandi (t.d. Sigfús Ólafsson 1974, Árni Snæbjörnsson 1982, Strachan o.fl. 1999a) og eftirtektarverð er samantekt Árna Snæbjörnssonar (1982) á eðliseiginleikum mýra. Mikið vantar þó upp á að góðar upplýsingar séu til um vatnsleiðni á landsvísu. Slíkar mælingar eru erfiðar, enda breytist vatnsleiðni með vatnsspennu í jarðveginum.

Áhrif grófra jarðvegslaga á flæði vatns um moldina geta verið mjög afgerandi. Slík lög takmarka í raun athafnasvæði rótarlagsins; vatn berst ekki upp til plantna í gegnum grófa lagið (mynd 12.9) því vatnsleiðni sem byggist á litlum moldarögnum er ekki til staðar. Næringarefni sem eru í jarðvegslausn neðan við hið grófa jarðvegslag nýtast plöntum ekki heldur og næringar-

hringrásin er í raun bundin við efsta lag moldarinnar. Þessar aðstæður eru fremur algengar í nágrenni virkustu eldfjallanna, t.d. Heklu og Kötlu (sjá mynd 12.4 hér á undan sem sýnir mælingu á rúmþyngd). Þetta kemur niður á frjósemi vistkerfisins og gerir það mun viðkvæmara fyrir áföllum, sérstaklega í kjölfar mikillar nýtingar sem minnkar lífrænan forða í rótarlaginu.

Annað sem fylgir jarðvegi sem þessum er að bundið vatn kemst ekki niður fyrir hið grófa lag. Í stað þess safnast vatnið ofan gjóskulagsins uns vatnsmagnið nær mettun, en þá getur það hripað niður í grófa lagið. Leið þess eftir það er m.a. háð landhalla o.fl. þáttum. Ef járn (Fe^{2+}) er í vatninu getur það fallið út sem ferrihýdrít þegar járnið oxast við öskulagið og myndað falleg rauð litabönd.

Vistkerfi eru misvel í stakk búin til að takast á við gróf gjóskulög undir yfirborðinu. Djúpstæð rótarkerfi sem fylgja trjátegundum á borð við birki vaxa niður í gegnum gróf lög sem eru nálægt yfirborðinu (jafnvel niður fyrir 40–50 cm) og brjóta þau upp. Framboð vatns og næringar er með allt öðrum hætti en ef gróður með grunnstætt rótarkerfi yxi á yfirborðinu. Sumir afréttir sunnanlands í nágrenni Heklu og Kötlu voru viði vaxnir hér áður fyrr, en eftir því sem skóginum hrakaði vegna nýtingar breyttust stór svæði í auðn í kjölfar landhnignunar og mikillar jarðvegseyðingar. Það ferli var vitaskuld nokkuð flókið, en þessi áhrif grófra gjóskulaga á vatnseiginleika moldarinnar hafa væntanlega ráðið töluverðu þar um.

12.4.4. Land vatnsins: moldin og vatnshagur

Fólk á stórum svæðum jarðar býr við vatnsskort og slæm vatnsgæði. Í Evrópu streyma meginvatnsföll um mörg ríki uns þau renna til sjávar. Mengun og slæm vatnsmiðlun á einu svæði hefur ekki aðeins staðbundin áhrif; mengun og flóð berast frá einu ríki til annars og hafa einnig mikil áhrif á strandsvæðin við ósa fljótanna. Flest nágrannalönd hafa sett strangar reglur um verndun vatns, ekki síst lönd Evrópusambandsins.

Vatnsland

Erlendir fræðimenn sem hafa ferðast um landið hafa sagt höfundi þessa rits að þeir álíti að vatn sé öðru fremur það sem einkenni náttúru landsins, að Ísland sé ekki land snævar heldur „Vatnsland“.

Ofgnótt vatns gerir það að verkum að margir landsmenn bera litla virðingu fyrir vatni, ekki síst vatnsgæðum – við tökum þessum verðmætum sem gefnum hlut.

Mynd 12.10. Ofsaflóð í Mosfellsbæ vegna mikillar úrkomu og snjóbráðar, en afrennslið er af landi sem er illa gróið á köflum, og þá aðallega á melum og rofdílum. Takið eftir ísnum í rofdílnum neðst fyrir miðju. Horfur eru á að ástandið batni á þessu svæði þar sem landið hefur verið friðað fyrir beit og skógrækt er stunduð á hluta vatnasviðsins.

Vatnsból og gróðurfar

Hér á landi nýta flestar vatnsveitur grunnvatn sem kemur úr borholum eða vatn sem kemur fram í ferskum lindum. Á þeim svæðum er mikilvægt að gæta að því að mold sé hulin gróðri.

Birkikjarr og graslendi er heppilegt gróðurfar við vatnsból og á vatnstökusvæðum því það lokar landinu afar vel og ísig helst á vetrum (gropóttur holklaki).

Meiri hætta er á yfirborðsrennsli og innrennsli um sprungur í frosinni mold og þar með moldarmengun frá auðnum, barrskógum og lúpínubreiðum vegna minni botngróðurs og af því að þar myndast þéttari holklaki. Í dreifbýli eru vatnsból víða á yfirborði sem mikilvægt er að vernda gegn mengun.

Auðnir og vatnshagur. Sem áður sagði er ísig oft afar takmarkað um vetrartímann í auðnum og illa förnu landi. Það hefur margvísleg áhrif á vatnshag. Þar sem land er illa gróið rennur stór hluti vatnsins af landinu í ár og læki, oft verulega mengað af jarðvegsefnum; vatnið nýtist ekki í vistkerfunum, sem hamlar orkunámi og hringrás næringarefna. Illa gróin svæði hafa mikil áhrif á vistkerfi langt út fyrir hin ógrónu svæði, m.a. vatnshag á víðfeðmum svæðum (mynd 12.10).

Mikið yfirborðsrennsli getur haft áhrif á nýtingu vatns til raforkuframleiðslu. Vatnið nýtist þar sem lón eru til staðar sem grípa rennslið og jafna það en að öðrum kosti verður vatnsrennslið mjög ójafnt. Afrennsli veldur flóðum sem geta haft stórtjón í för með sér á vistkerfum og mannvirkjum. Þá er líklegt að rennslishættir á auðnum hafi neikvæð áhrif á frjósemi stöðuvatna og straumvatna, m.a. með tilliti til lífríkis og veiði. Margar bestu veiðiár landsins er einmitt að finna á vel grónum vatnasviðum, gjarna þar sem einnig eru votlendi og vötn sem jafna rennslið.

Miklar sveiflur í rennsli valda ýmsum spjöllum á farvegum auk þess sem miklar hitasveiflur verða í vatninu þegar rennslið er ójafnt. Aurburður sem fylgir flóðum getur valdið miklu tjóni á öllu vatnasviðinu, í vötnum og á haf út. Vatn frá auðnum ber ekki næringu inn í vatnakerfin með sama hætti og frá grónu landi (sjá Jón Guðmundsson og Hlyn Óskarsson, 2006). Flóð hafa þannig bæði áhrif á efnaflutning sem og þá tegundahópa sem búa í straumvötnum. Mikilvægt er að efla rannsóknir á þessum þáttum í framtíðinni. Að lokum ber þess að geta að eðli auðna hefur áhrif á veðurfar. Mikil uppgufun frá auðnum á sumrin og yfirborðshiti í sólskini hefur áhrif á veðurfarsþætti. Hér vantar einnig mikið upp á þekkingu sem brýnt er að bæta úr.

Vatnsból. Moldin er afar mikilvæg fyrir verndun grunn- og neysluvatns. Hún sigtar út mengun og heldur vatninu hreinu. Moldarmengun sem hlýst af ófullnægjandi gróðurhulu litar vatn og getur skilað bakteríum í drykkjarvatn, jafnvel þar sem neysluvatn er tekið úr borholum. Erlendis er stundum reynt að halda gróðri og mold frá vatnsbólum sem eru á yfirborði til að minnka moldarmengun og hættu á að saur eða mengun frá dauðum dýrum berist í vatnið. Þá geta barrskógar valdið litarmengun á yfirborðsvatni og þeim er yfirleitt haldið frá vatnsbólum.

Árhelgi. Víða erlendis er bannað að yrkja jörðina út að ám, lækjum og skurðbökkum til að koma í veg fyrir moldarmengun og að áburður berist í vatnið. Slík mengun getur haft áhrif langt út fyrir vatnasviðið, m.a. á grunnsævi. Hér á landi mætti virða vatnshelgi (e.

Mynd 12.11. Misþyrming vatns í árhelginni. Myndirnar eru teknar frá sama stað sín hvorum megin vegar. Til vinstri er mikið af mold sem berst í lækinn, sérstaklega í vatnsveðrum. Til hægri er sami lækur og vel gróið að bökkunum. Hið mengaða vatn berst út í friðlandið í Grunnafirði.

riparian zone) mun betur en gert er. Dæmi um ranga landnotkun er sýnd hér á mynd 12.11.

Þá ber einnig mikið á því að mannvirki séu reist á viðkvæmum árósasvæðum, ekki síst í þéttbýli. Staðsetning stórra hesthúsabyggða ætti að taka mið af því að afrennsli geti ekki valdið mengun á grunnvatni eða í ám, lækjum og á grunnsævi. Votlendiskerfi á ósasvæðum og leirum sem þeim fylgja eru iðulega afar mikilvæg búsvæði og njóta því sérstakrar verndar. Vegir og mannvirki yfir árósasvæði valda „slitrun" (e. fragmentation) á búsvæðum og vatnakerfum í mold og grunnvatni sem mjög æskilegt er að forðast. Víða erlendis er unnið að því að fjarlægja vegamannvirki og annað sem þrengir að árfarvegum og veldur slitrun á ósasvæðum.

Mynd 12.12. Aurugur smálækur í ofsaregni þar sem vatnsmagnið hefur margfaldast. Yfirborðsrennsli á illa förnu landi ber með sér jarðvegsefni í lækinn og það skortir á gróðurhulu til að tempra vatnsrennslið.

12.5. Aðrir eðliseiginleikar

12.5.1 Þjálnimörk, skortur á samloðun og skriður

Þjálnimörk gefa góða mynd af samloðun moldarinnar og hvernig hún breytist eftir því sem vatnsmagnið eykst. *Eldfjallajörð* á Íslandi einkennist af skorti á blaðsilíkötum sem annars staðar eru þau efni sem helst halda moldinni saman. Leirinn myndar klasa sem eru af siltstærð og hafa takmarkaða samloðun, en um leið getur jarðvegurinn tekið við óhemjumiklu af vatni sem dregur úr hættu á vatnsrofi þegar úrkoman fellur; nema á vetrum þegar jörð er auð og klaki hamlar írennsli.

Þjálnimörkin, sem einnig eru nefnd Atterberg-mörk, eru þjálnimark (PL, „plastic limit"), flæðimark (LL, „liquid limit") og þjálnitala (PI=LL-PL; „plastic index"), en þeim er lýst nánar í 10. kafla um *eldfjallajörð*. Þessi mörk eru grundvöllur margra verkfræðilegra flokkunarkerfa fyrir laus jarðefni (sjá t.d. almennar kennslubækur um jarðverkfræði) og skipta miklu fyrir verkfræðilega eiginleika jarðvegs sem og jarðvegsrof.

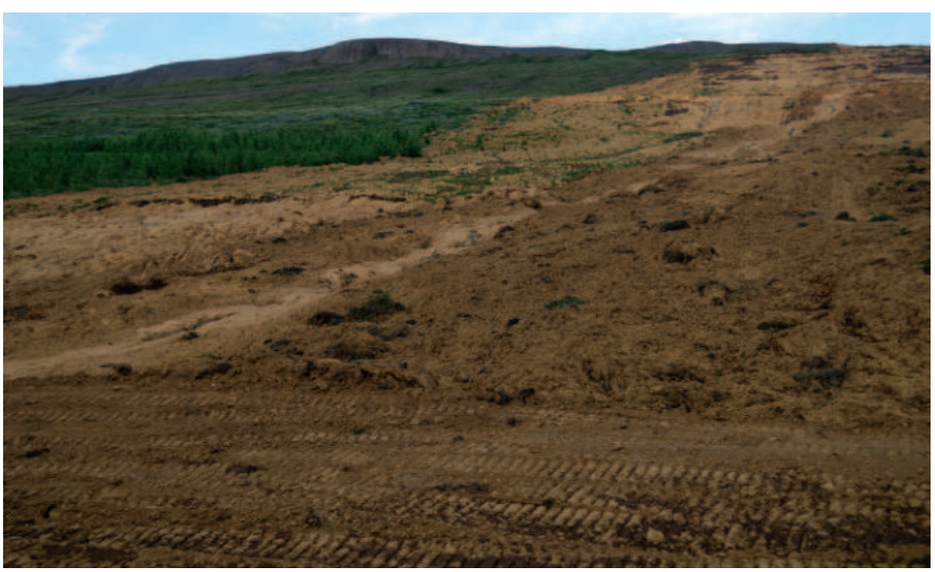
Gríðarleg vatnsrýmd er eitt af megineinkennum *eldfjallajarðar*. Þegar moldin er algjörlega vatnsmettuð getur vatnsinnihaldið numið >150%, þ.e. vatnið er mun þyngra en föst efni moldarinnar. Og af því að samloðunin er lítil (vantar blaðsilíköt) verður massinn eins og deigrennandi vatn þegar moldin nær flæðimarkinu. Jafnframt er það bil sem moldin er þjál áður en hún nær flæðimarki mjög lítið, hún er í raun ýmist óþjál eða rennandi vatn (PI nálægt núlli) (myndir 10.15 og 12.13).

Mynd 12.13. Mold og flæðimark. Klumpurinn til hægri er óraskað jarðvegssýni, en til vinstri er annar klumpur sem hefur verið velt um í lófanum. Vatnsinnihaldið var það hátt að moldarsýnið náði skyndilega flæðimarkinu. Þessi jarðvegur er úr Mýrdal.

Mynd 12.14. Ein af skriðunum sem féllu í Kaldakinn vorið 2013. Mun stærri skriður féllu en þessi (sjá næstu mynd). Vel sést að skriðumassinn er á vökvaformi (yfir flæðimarki), en skriðan þornar hins vegar fremur fljótt og verður að mold með töluverðri samheldni. Myndina tók Sveinn Brynjólfsson.

Mikil vatnsheldni og hvernig *eldfjallajörð* hagar sér þegar hún nær flæðimarkinu verður til þess að skriðuföll eru algeng á eldvirkum svæðum. Svo er einnig hér á landi. Hættast er við skriðum þegar snjóbráð eða mikið úrfelli ná að metta jarðveginn fullkomlega.

Oft má rekja uppruna skriðu rétt neðan við bráðnandi snjóskafl að vori þegar öll brekkan fyrir neðan er vatnsmettuð. Þungi moldarefnanna í slíkum brekkum verður gríðarlegur og skiptir vatnið þar mestu (t.d. 150–200% vatnsinnihald). Þegar massinn gefur eftir rennur skriðan niður sem þunnfljótandi aur en „storknar“ síðan aftur sem mold.



Mynd 12.15. Stærsta skriðan sem féll í Kaldakinn vorið 2013. Myndin er tekin rúmum mánuði eftir að skriðan féll. Moldin er orðin þurr að mestu og landið jafnvel tekið að gróa.

Gjóskulög á nokkru dýpi geta truflað innflæði vatnsins og virkað sem eins konar vatnspúðar og rennslisfletir, sem væntanlega hefur verið raunin þegar stórar skriður féllu í Kaldakinn vorið 2013 (myndir 12.14 og 12.15). Mest er hættan á skriðum sem þessum þar sem moldin er nokkuð þykk og fín í sér (mikið af silti og leir) og þar sem gjóskulög á nokkru dýpi virka sem rennslispúðar.

Aurskriður sem þessar eru mjög hættulegar í byggð. Yfirleitt gróa hlíðarnar vel upp aftur, ekki síst ef umhverfið er vel gróið. Tré með djúpstæð rótarkerfi minnka hættu á skriðuföllum.

Beit þungra beitardýra í hlíðum stóreykur hættu á skriðuföllum, ekki síst á vorin og haustin. Kindagötur og annað rask í hlíðum rjúfa samfellu rótarmottunnar og geta verið upphafspunktar skriðufalla. Þær geta aukið ísig (írennsli) inn í moldina almennt og þar geta myndast sprungur í illa gróið yfirborð á vetri sem síðan leiða vatn í moldina, t.d. þegar skaflar eru að bráðna. Hafa ber í huga að upptökin eru oft hátt í hlíðum þar sem erfitt er að hafa áhrif á aðstæður nema með hóflegri landnýtingu. Þar sem byggð stafar hætta af skriðuföllum sem þessum er hægt að minnka vatnsrennsli í mold með því að veita vatni aðra leið, sem er víða gert á *eldfjallasvæðum*, gæta

hófs í beitarnýtingu og reisa leiðargarða fyrir hugsanlegar skriður.

Ástæða er til að horfa til þessara þátta þegar gróðurfar er mótað í hlíðum þar sem þykkur siltríkur jarðvegur eða siltrík setlög ráða ríkjum. Ógróið land eða yfirborð klætt gróðri sem veldur mikilli frostmyndun í moldinni getur orðið til þess að sprungur myndast sem geta síðan leitt mikið vatn niður í siltlögin í vatnsveðrum eða við snjóbráð.

Þetta á t.d. við um lúpínu (mynd 12.16) sem oft er sáð til ofan við þéttbýli og jafnvel í snjóflóðagarða. Ekki er þó víst að lúpínan eigi hlut að máli í skriðuföllunum á Seyðisfirði – en það er þó eigi að síður mikilvægt rannsóknarefni. Þéttur grassvörður er mun heppilegri gróðurþekja við þessar aðstæður – sem jafnvel má þétta með mjög hóflegri beit. Víði- og birkikjarr myndi auka enn betur á samloðun jarðvegsins. Hátt gras sem leggst niður undan halla og snjóþunga getur aftur á móti myndað „sleipt“ yfirborð sem snjóflóð geta runnið eftir.

Mynd 12.16. Upptök stóru skriðunnar sem féll á Seyðisfirði. Lúpínubreiða hylur yfirborðið. Hætta er á að djúpar frostsprungur myndist í lúpínuyfirborðinu á vetrum þar sem vatn sem fylgir ofsaregni eða snjóbráð á greiða leið í siltríka mold og setlög undir yfirborðinu. Óvíst er hvort lúpínan hafi hér átt hlut að máli – en ástæða er til að skoða þessa þætti vel þegar reynt er að minnka hættu á skriðuföllum. Þéttur grassvörður og birkikjarr er mun heppilegra til að hylja svæði sem þessi. Myndin er tekin sumarið 2021.

12.5.2. Ferðamaðurinn og gönguslóðin

Ferðaþjónusta er meðal undirstöðuatvinnugreina landsins og sú stærsta samkvæmt ýmsum mælikvörðum. Þessi atvinnugrein er reist á þeirri auðlegð sem felst í náttúru landsins og menningu. Miklu skiptir að náttúra landsins standist hið aukna álag sem fylgir ferðamönnum, en til þess þarf mjög víða að bæta undirstöður og innviði. Mikill fjöldi gangandi fólks veldur átroðslu sem ekki verður mætt öðruvísi en með markvissri stígagerð. Graslendi þolir alla jafna mikið álag að sumri, en ef átroðslan er úr hófi og stendur einnig yfir vor og haust myndast ísnálar í rofnu yfirborðinu á vetrum, sem síðan stuðlar að eyðileggingu kerfisins og rofi ef landið er í halla (mynd 12.17) (sjá einnig 16. kafla um kulferli).

Mynd 12.17. Stígur með vaxandi umferðarálagi. Eftir að yfirborðið tók að trosna fóru ísnálar að myndast í yfirborðinu, og þær skilja eftir sig ógróna rofbletti. Í framhaldinu verður stígurinn að drullusvaði í bleytu og rof verður þar sem landinu hallar. Sjá einnig 16. kafla um kulferli.

Mynd 12.18. Reiðhjól geta valdið miklum skemmdum á útjörð, m.a. göngustígum. Áhrif þeirra geta verið margföld á við göngufólk. Það er m.a. vegna þess að þunginn (kg/cm²) er meiri en hjá gangandi fólki, hjólandi einstaklingur spyrnir af miklum krafti upp á við og því getur átakið verið margfalt meira. Síðan er bremsað og um leið rótað í sverði þegar farið er niður. Förin eru samfelld, sem stuðlar að myndun vatnsrása í kjölfarið. Áhrif vélhjóla (svokallaðra „crossara") eru ennþá alvarlegri.

Mynd 12.19. Gönguslóði beint upp hlíð. Mosfellsbær.

Stígagerð kallar á verkkunnáttu. Nokkur undirstöðuatriði sem fjallað hefur verið um í þessari bók koma þar til álita. Það þarf m.a. að vega saman halla landsins og yfirborðsgerð ásamt væntanlegu álagi.

Gróft undirlag þolir almennt betur álag, en myldin (mikið af silti) og leirkennd mold (mikið af allófanleir) þolir raskið afar illa og rennur auðveldlega til með vatni, sbr. myndina hér til hliðar. Við þær aðstæður þarf oft að skipta um undirlag við gerð stíga. Sérhæfðar plastmottur og trjákurl hafa reynst vel við stígagerð hérlendis.

Miklu skiptir að koma vatnsrennsli af stígum, m.a. með svokölluðum „slagbröndum". Þeir leiða vatnið af stígunum og minnka þá vegalengdina sem vatnið rennur niður brekkurnar og þar með rennslishraða þess (sem eykst eftir því sem samfelld brekkan er lengri). „Slagbrandar" munu vera kenndir við hinn goðsagnakennda „Vatna-Brand" sem var brautryðjandi í notkun þeirra á fjallvegum. Oft þarf að huga að því að leggja stíga skáhallt upp brekkurnar til að minnka hallann, og þá er auðveldara að leggja slagbranda til að beina vatnsrennsli af stígnum. Stíga ætti alls ekki að leggja beina leið upp hallann (mynd 12.19). Fjallahjól geta valdið miklum skemmdum í halla þar sem mikið er bremsað og ekki síður í votlendum (sjá myndir 12.18 og 12.20).

Langar samfelldar brekkur valda mestu vatnsrofi (sbr. kafla um líkön fyrir vatnsrof, 19. kafli). Breytilegur halli og ávalt landform (e. concave, halli minnkar niður brekku) er til bóta, sérstaklega ef inn á milli eru láréttir fletir. Íhvolft landform (e. convex) þar sem halli vex niður brekku leiðir til aukins rofs eftir því sem neðar dregur í brekkuna. Þar sem við á þarf að leggja tröppur. Mikilsvert er að koma í veg fyrir að stígurinn þrengist um of við tröppur því að það veldur auknu vatnsálagi auk

þess sem göngumaðurinn er þá gjarn á að stíga út fyrir stíginn. Göngustígar yfir votlendi eru óheppilegir og þar ætti að leggja timburgólf (mynd 12.20 – ofan á Helgafelli). Þar sem álagið er mest þarf slitþolið yfirborð, hellulögn, timbur o.s.frv., en því getur fylgt ærinn kostnaður sem þó kann að vera hóflegur miðað við arðinn og mikilvægi þess að koma í veg fyrir skemmdir. Það fylgir því mikill kostnaður að gera við skemmdir, oft fylgja því meiri fjárútlát en að vanda til verka í upphafi.

12.5.3. Loftrými, jarðvegshiti, hitaleiðni, jarðstrengir o.fl.

Loftrými í jarðvegi verður til þegar jarðvatn rennur burt, hann þornar vegna þurrka eða rætur plantna taka upp vatn. Til þess að gróður þrífist til langframa þarf lágmarksloftrými. Ian Strachan (1999b) gerði rannsóknir á loftrými jarðvegs í Gunnarsholti, en annars eru slíkar mælingar heldur fáar (sjá Guðrúnu Nínu Pedersen og Derya Berber 2018). Þá eru rannsóknir á varmaeiginleikum jarðvegs sömuleiðis fáar. Ljóst er að *brúnjörð* leiðir hita mjög illa og því geta háspennulagnir hitnað mikið við þær aðstæður, sem m.a. hefur valdið vandræðum við lagningu raflína í jörð hérlendis.

Ársmeðalhiti í jarðvegi er að mörgu leyti góður mælikvarði á loftslagsbreytingar. Langtímamælingar hérlendis renna styrkum stoðum undir þá staðreynd að loftslag fari hlýnandi (sjá Guðrúnu Nínu Pedersen og Derya Berber 2018).

Mynd 12.20. Skemmdir vegna gangandi og hjólandi fólks á fjölfarinni leið yfir votlendiskafla. Stígurinn er farinn að „breiðast út“ með tilheyrandi skemmdum á stóru svæði. Hér væri æskilegt að krækja hjá votlendinu eða leggja timburgólf yfir það. „Betri er krókur en kelda.“

Heimildir

Andri Stefánsson og Sigurður Reynir Gíslason 2001. Chemical weathering of basalts, southwest Iceland: effect of rock crystallinity and secondary minerals on chemical fluxes to the ocean. American Journal of Science 301:513–556.

Árni Snæbjörnsson 1982. Eðliseiginleikar mýra (fyrri rannsóknir). Í: Árni Snæbjörnsson (ritstj.), Þættir um mýrajarðveg á Íslandi. Fjölrit Bændaskólans á Hvanneyri 36:71–94.

Berglind Orradóttir 2002. The influence of vegetation on frost dynamics, infiltration rate and surface. MSc-ritgerð, Texas A&M University, College Station, Texas, USA.

Berglind Orradóttir, Ólafur Arnalds og Jóhann Þórsson 2006. Ísig vatns í jarðveg. Áhrif gróðurs og frosts. Fræðaþing landbúnaðarins 2006:102–107.

Berglind Orradóttir, S.R. Archer, Ólafur Arnalds, L.P. Wilding og T.L. Thurow 2008. Infiltration in Icelandic Andisols: The role of vegetation and soil frost. Arctic, Antarctic and Alpine Research 40:412–421.

Björn Jóhannesson 1960. Soils of Iceland. Rit Atvinnudeildar Háskóla Íslands B-12. Reykjavík.

De Paepe, P. og G. Stoops 2007. A classification of tephra in volcanic soils. A tool for scientists. Í: Ó. Arnalds, F. Bartoli, P. Buurman, H. Óskarsson, G. Stoops og E. García-Rodeja (ritstj.), Soils of Volcanic Regions of Europe. Springer, New York. Bls. 119–125.

Delmelle, P., S. Opfergelt, J-T. Cornelis og C-L. Ping 2015. Volcanic soils. Í: Haraldur Sigurðsson (aðalritstj.), Encyclopedia of Volcanoes, Elsevier, Amsterdam, Holland. Bls. 1253–1264.

Eydís S. Eiríksdóttir, Sigurður Reynir Gíslason og E.H. Oelkers 2013. Does temperature or runoff control the feedback between denudation and climate? Insights from NE Iceland. Geochimica et Cosmoshimica Acta 107:65–81.

Eydís S. Eiríksdóttir, P. Louvat, Sigurður Reynir Gíslason, Níels Ö. Óskarsson og Jórunn Harðardóttir 2008. Temporal variation of the chemical and mechanical weathering in NE Iceland, evaluation of a steady state model of erosion. Earth and Planetary Science Letters 272:78–88.

Friðrik Pálmason, Halldór Þorgeirsson, Hólmfríður Sigurðardóttir, Hómgeir Björnsson og Ólafur Arnalds 1996. Niturlosun í jarðvegi. Búvísindi 10:185–208.

Guðrún Nína Pedersen og Derya Berber 2018. Jarðvegshitamælingar á Íslandi. Staða núverandi kerfis og framtíðarsýn. Veðurstofa Íslands, Skýrsla VÍ 2018–009, Reykjavík.

Haraldur Sigurðsson (aðalritstj.) 2015. Encyclopedia of Volcanoes, Elsevier, Amsterdam, Holland.

Jón Guðmundsson og Hlynur Óskarsson 2006. Vistkerfi og vatnasvið. Fræðaþing landbúnaðarins 2006:63–75.

Jón Guðmundsson, Ólafur Arnalds og Hlynur Óskarsson 2006. Vatnsheldni mismunandi jarðvegsflokka. Fræðaþing landbúnaðarins 2006:362–364.

Kardjilov, M.L., Sigurður Reynir Gíslason og Guðrún Gísladóttir 2006. The effect of gross primary production, net primary production and net ecosystem exchange on the carbon fixation by chemical weathering of basalt in northeastern Iceland. Journal of Geochemical Exploration 88:292–295.

Ólafur Arnalds 2013. The influence of volcanic tephra (ash) on ecosystems. Advances in Agronomy 121: 331–380.

Rannveig Guicharnaud 2002. Rúmþyngd í íslenskum jarðvegi. B.Sc.-ritgerð, Jarð- og landfræðiskor, Háskóli Íslands, Reykjavík.

Sigurður Reynir Gíslason, E.H. Oelkers og Árni Snorrason 2006. The role of river-suspended material in the global carbon cycle. Geology 34:49–52.

Sigurður Reynir Gíslason, E.H. Oelkers, Eydís S. Eiríksdóttir, M.I. Kardjilov, Guðrún Gísladóttir, Bergur Sigfússon, Árni Snorrason, Sverrir Elefsen, Jórunn Harðardóttir, P. Torssander og Níels Óskarsson 2009. Direct evidence of the feedback between climate and weathering. Earth and Planetary Science Letters 277:213–222.

Shoji, S., M. Nanzyo og R.A. Dahlgren 1993. Volcanic Ash Soils. Genesis, Properties and Utilization. Developments in Soil Science 21, Elsevier, Holland.

Sigfús Ólafsson 1974. Fysiske og fysisk-kemiske studier af Islandske jordtyper. Licentiatafhandling. Hydroteknisk Laboratorium, Den Kongelige Veterina Landbohöjskole, Kaupmannahöfn, Danmörk.

Strachan, I., Bjarni D. Sigurðsson og J.H. McCaughey 1999b. Soil hydrology at the Gunnarsholt experimental plantation: Measurement and results. Búvísindi 12:39–46.

Strachan, I., Ólafur Arnalds, Friðrik Pálmason, Halldór Þorgeirsson, Bjarni D. Sigurðsson, Hólmfríður Sigurðardóttir og G. Novoselac 1999a. Soils of the Gunnarsholt experimental plantation. Búvísindi 12:27–38.

Stoops, G., M. Gérard og Ólafur Arnalds 2008. A micromorphological study of Andosol genesis in Iceland. Í: S. Kapur, A. Mermut og G. Stoops (ritstj.), New Trends in Micromorphology. Springer, Heidelberg, Holland. Bls. 67–90.

Zaqout, T., Hrund Ólöf Andradóttir og Ólafur Arnalds 2022. Infiltration capacity in urban areas undergoing frequent snow and freeze-thaw cycles: Implications on sustainable urban drainage systems. Journal of Hydrology 607:127495.

Þorsteinn Guðmundsson 1978. Pedological studies of Icelandic peat Soils. Ph.D.-ritgerð, University of Aberdeen, Skotland.

13 Efnaeiginleikar moldar móta náttúru landsins

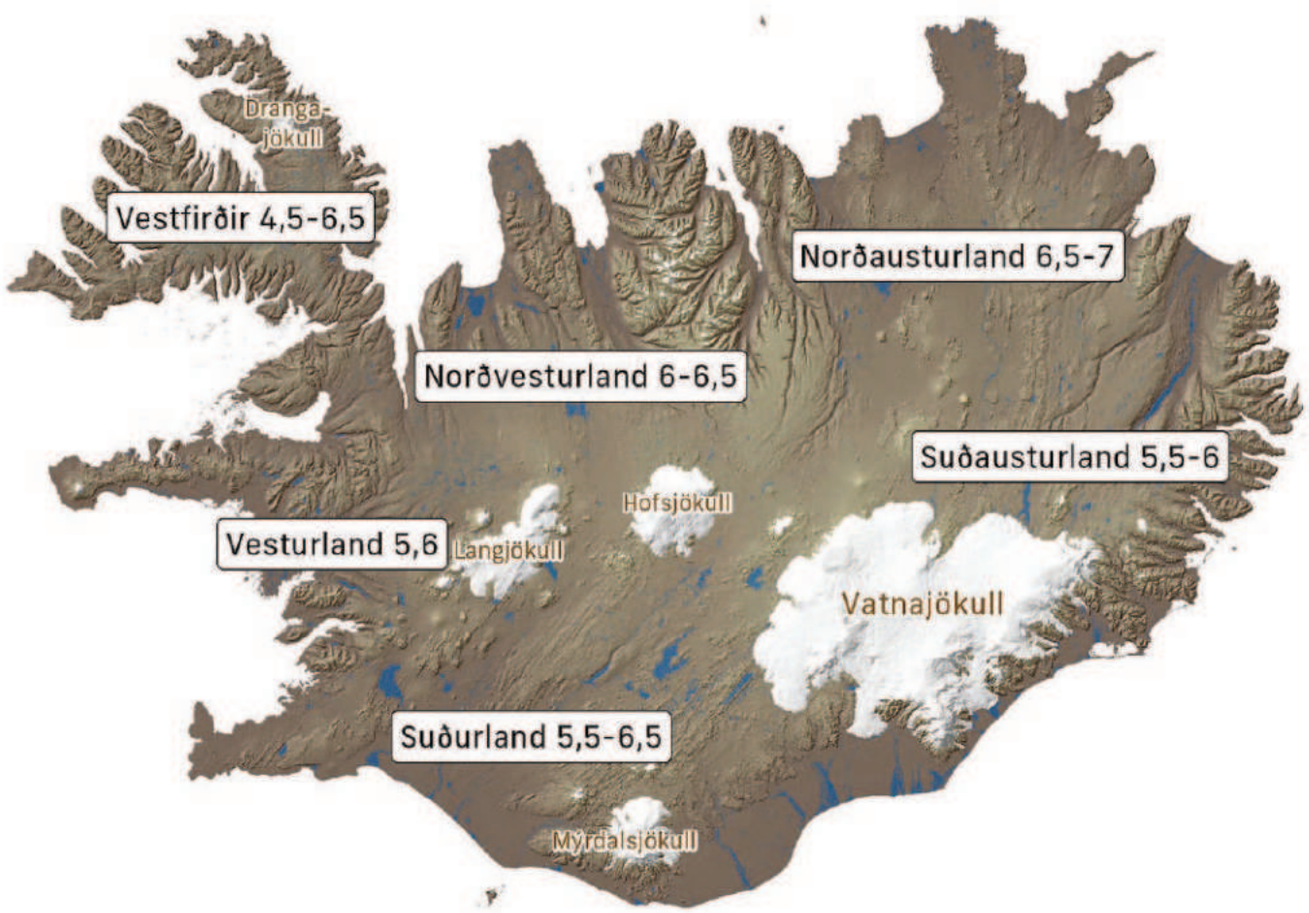
Mynd 13.1. Efnaeiginleikar íslenskrar moldar eru um margt sérstakir á heimsvísu – sambland sortueiginleika og annarra eiginleika er fylgja mold á norðlægum slóðum.

Efnaeiginleikar íslenskrar moldar eru svipaðir þeim sem almennt einkenna *eldfjallajörð*, sérstaklega *brúnjörð* og *votjörð*. Sumir þeirra eiginleika sem einkenna *eldfjallajörð* eru ekki eins vel þróaðir og þekkist í heitari löndum eða þar sem yfirborð er eldra og stöðugra. Moldin hér er ung, ekki síst í yfirborðslögum, og við búum við kalt loftslag þannig að efnaveðrun er iðulega styttra komin hér en í sambærilegum jarðvegi erlendis.

Efnaeiginleikarnir eru breytilegir og háðir því hve áfokið er mikið, gjóskufalli og ekki síður hæð yfir sjávarmáli, enda er rotnun lífrænna efna og efnaveðrun mun hægari eftir því sem ofar dregur. Hér eru settar fram almennar upplýsingar um efnaeiginleika á borð við sýrustig og lífræna eiginleika. Margar þeirra eiga uppruna sinn í verkefninu „Ými“ sem rekið er við Landbúnaðarháskóla Íslands (áður Rannsóknastofnun landbúnaðarins) og felst í að afla gagna í gagnagrunn um íslenskan jarðveg (sjá ÓA o.fl. 2005). Einnig er sótt í gögn úr COST 622-verkefninu, sem vikið var að í 10. kafla um *eldfjallajörð*, auk þess sem nýttar eru margvíslegar rannsóknarniðurstöður sem birtar hafa verið í innlendum og erlendum ritum. Margt af því sem hér er sett fram var áður birt í bókinni *The Soils of Iceland* (ÓA, 2015).

13.1. Sýrustig

Áfok basískra gosefna er ráðandi þáttur fyrir sýrustig í mold hérlendis, en úrkomumagn hefur einnig sín áhrif. Gosefnin veðrast fremur hratt (sjá 10. kafla um *eldfjallajörð* og næsta kafla) og við það losnar um basískar katjónir á borð við Ca^{++} og Mg^{++} sem hamla því að sýrustigið lækki með tímanum, jafnvel þótt lífræn efni safnist fyrir í moldinni. Því er sýrustig nokkru lægra



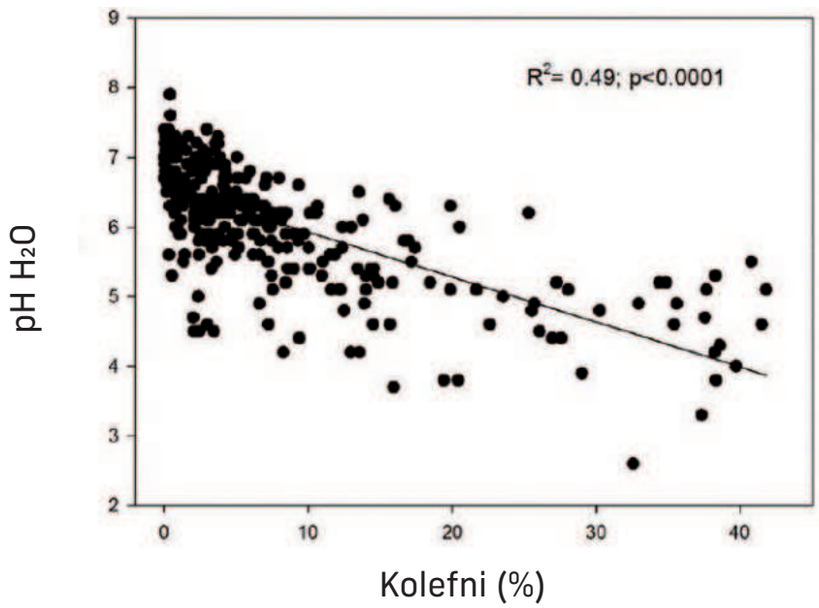
Mynd 13.2. Sýrustig í *brúnjörð* í mismunandi landshlutum. Algeng gildi sem fengin eru úr gagnagrunni LbhÍ.

fjær áfoksbeltunum en á svæðum þar sem áfok er meira. Mikil úrkoma hefur lækkandi áhrif á sýrustigið og því er það alla jafna hærra í úrkomuskugga á Norður- og Norðausturlandi en á Suðurlandi þar sem úrkoman er meiri. Þessir megindrættir eru í samræmi við það sem Björn Jóhannesson hafði komist að og birti í riti sínu um íslenskan jarðveg árið 1960. Dreifing sýrustigs í *brúnjörð* er sýnd á mynd 13.2.

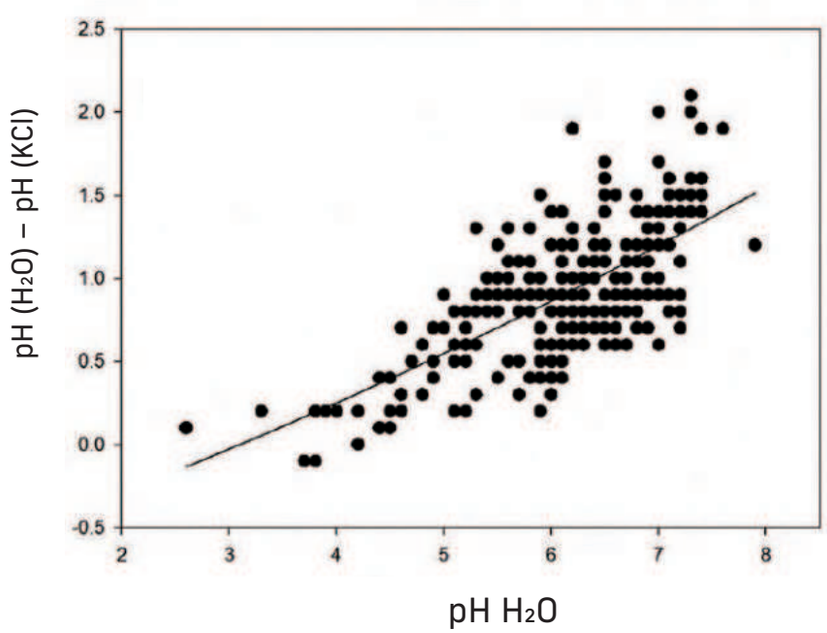
Sýrustig í *brúnjörð* er yfirleitt yfir 6 á svæðum norðanlands sem hafa talsvert áfok en heldur lægra austanlands og sunnan þar sem er meiri úrkoma enda þótt áfokið sé svipað. Sýrustigið er nokkru lægra í *brúnjörð* á Vesturlandi og sérstaklega á Vestfjörðum þar sem áfokið er lítið. Sýrustig í votlendisjörð er yfirleitt um 1 gildi lægra en í jarðvegi þurrlendis og hefur mælst allt niður í 4 í *mójörð* á Vestfjörðum. Svo lágt sýrustig getur haft neikvæð áhrif á vistkerfi og í ræktun, og er oft gripið til þess að bera kalk á tún þar sem pH er svo lágt. Einnig ætti að virka vel að bera basaltsand á ræktunarsvæði til að hækka sýrustig (losar um basískar katjónir og efni sem hafa jákvæð áhrif á moldina þegar sandurinn veðrast). *Glerjörð* er lítið mótuð mold með fáum lífrænum efnum sem lækka pH. Gildin fyrir *glerjörð* eru að mestu á bilinu 7–8, gjarnan í kringum 7,5. Það eru skýr tengsl á milli magns lífrænna efna í jarðveginum (mælt sem % C) og sýrustigs, eins og sjá má á mynd 13.3. Hæstu pH-gildin, sem ná allt upp í 8, er að finna í *glerjörð*, eins og áður gat, en sum lífrænustu sýnin eru með pH fyrir neðan 4,5. Athygli vekur þó hve sýrustigið er ákaflega breytilegt miðað við kolefnismagn enda þótt heildarmyndin sé skýr. Margir aðrir þættir hafa áhrif á sýrustigið, m.a. hve vel jarðvegurinn er ræstur, magn áfoksefna, úrkoma, jarðvegsdýpi o.fl.

Það sýrustig sem var kynnt hér að ofan er mælt í vatnslausn. Einnig er tíðkað að mæla sýrustig í veikri KCl-lausn (1 M), en K^+ í lausninni ýtir Al^{3+} og H^+ úr jónrýmdarsætum sem hefur þau áhrif að lækka pH. Mælingin gefur því til kynna svokallaðan „súrforða“ (e. reserve acidity).

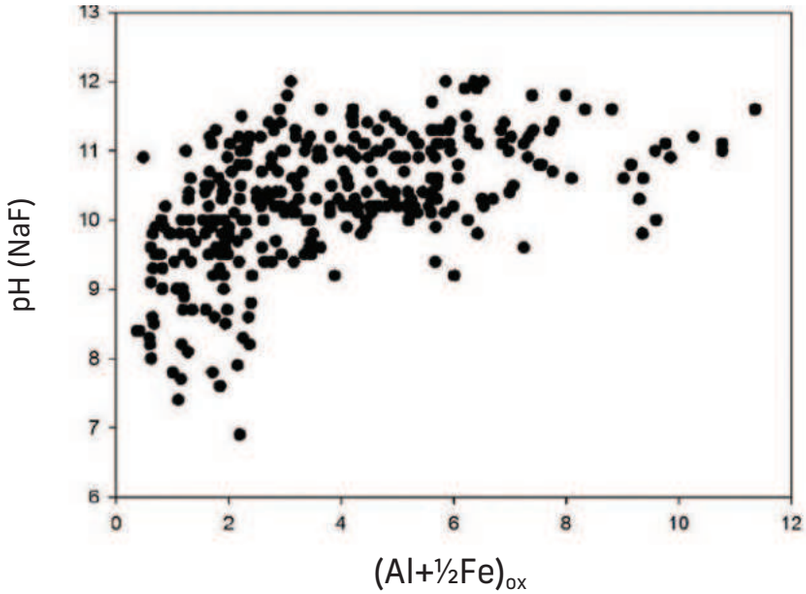
Sýrustigið lækkar yfirleitt á bilinu 0,5–1,5 við mælingu í KCl-lausn, eins og sést á mynd 13.4, og bilið fer hækkandi með vaxandi pH, en þá hækkar jafnframt jónrýmdin, eins og síðar er vikið að. Því



Mynd 13.3. Tengsl á milli sýrustigs (mælt í H_2O) og lífrænna efna (mælt sem kolefni). Gögn úr gagnagrunni LbhÍ; 319 jarðvegslög.



Mynd 13.4. „Súrforði“ (e. reserve acidity, pH H_2O – pH KCl; í raun Al^{3+} og H^+ á jónrýmdarsætum) við mismunandi pH mælt í vatni. Veik KCl-lausn rekur Al^{3+} og H^+ úr jónrýmdarsætum og þannig er munurinn sem sýndur er á y-ásnum fenginn. Gildið fyrir súrforða hækkar með hækkandi pH. Gögn úr gagnagrunni LbhÍ.



Mynd 13.5. NaF-svörun sýrustigs miðað við sortueiginleika sem eru mældir með oxalat-lausn (Al + ½Fe)$_{ox}$. Gildin eru yfirleitt yfir 10 nema þar sem sortueiginleikar eru minnstir í *glerjörð* og *mójörð*. Gögn úr gagnagrunni LbhÍ.

er ljóst að umtalsvert af Al^{3+} og H^{+} sitja á jónrýmdarsætum í íslenskri mold en hafa ekki áhrif á sýrustig moldarinnar þar. Þetta er einn af þeim þáttum sem útskýra af hverju svo varasamt er að mæla basamettun í *eldfjallajörð* auk þess sem jónrýmdin er mjög háð pH o.fl.

Mæling á sýrustigi moldar í veikri NaF-lausn er ein þeirra aðferða sem notuð er til að kanna hvort hún teljist til *eldfjallajarðar* (sjá 10. kafla um *eldfjallajörð*). Hin örsmáa F^{-}-jón losar um OH^{-}-jónir á yfirborði allófans, ferri-hýdríts og mál-húmus-fjölliða (MHK) sem leiðir til þess að sýrustigið hækkar mikið. Því gefur þessi mæling til kynna sortueiginleika (e. andic properties) sem gjarnan eru mældir sem (Al + ½Fe)$_{ox}$, þ.e. ál og járn leysanlegt í oxalat-lausn.

Gögn fyrir íslenskan jarðveg sýna vel þessa NaF-svörun (mynd 13.5). Sýrustigið í NaF-lausn er yfirleitt yfir 9,5 og er einkum á milli 10 og 11,5. Bæði *glerjörð* og *mójörð* (lægri (Al + ½Fe)$_{ox}$) geta haft lægri svörun í NaF-lausn.

Þekkt er að sýrustig í barrskógum getur verið umtalsvert lægra en t.d. í graslendi og laufskógum enda þótt aðstæður geti verið svipaðar að öðru leyti. Það vekur upp spurningar um hvort sýrustig moldar taki að lækka í barrskógum sem plantað er til á Íslandi, sem myndi teljast til neikvæðra umhverfisáhrifa.

Ljóst er að áfokið hérlendis vegur upp á móti mögulegri lækkun sýrustigsins, en komi til lækkunar á sýrustigi er líklegast að slík neikvæð áhrif mælist þar sem áfok er hlutfallslega lítið og úrkoma mikil, t.d. á Vesturlandi og á úrkomusvæðum á Suðausturlandi. Gögn frá Fljótsdalshéraði (Bos 2021) sýna ekki marktæka lækkun í plöntuðum barrskógum, a.m.k. ekki enn sem komið er, en mælingar á Þingvöllum sýndu marktæka lækkun um 0,2 á pH-skalanum, sem telst umtalsvert (María Svavarsdóttir 2018). Höfundur mældi 6 sýni utan og 6 sýni innan barrskógar í Haukafelli á Mýrum (Hornafirði) sem sýndi lækkun um 0,5 gildi, sem telst afar mikið. Þar er úrkoma mikil (sjá ritgerð Freyju Ragnarsdóttur Pedersen 2022).

Ljóst er að mikilvægt er að auka til muna rannsóknir á áhrifum barrskóga á sýrustig jarðvegs á Íslandi – og vera kann að niðurstöðurnar verði hvatning til þess að setja frekari útbreiðslu barrskóganna einhverjar skorður.

13.2. Hleðslueiginleikar

Það er fjallað nokkuð ítarlega um hleðslueiginleika í 8. kafla bókarinnar *The Soils of Iceland* (ÓA 2015), en hér er umfjöllunin heldur styttri og einfaldari.

Jónrýmd (e. cation exchange capacity, CEC) er hæfileiki moldarinnar til að binda og miðla katjónum á milli jónrýmdarsæta og jarðvegsvatns. Þessi eiginleiki er nauðsynlegur til að rætur plantna geti tekið katjónir upp úr jarðvegslausninni. Mikil jónrýmd er nauðsynleg fyrir frjóa mold og það eru einkum leir og lífræn efni sem ljá moldinni þennan eiginleika.

Í *eldfjallajörð* eru lífrænar fjölliður (MHK) einnig mjög mikilvægar fyrir jónrýmd.

Í stuttu máli má segja að jónrýmd í *mójörð*, *svartjörð*, *votjörð* og *brúnjörð* sé alla jafna fremur hagstæð og raunar víða mjög mikil. Hún er lægri í *glerjörð* en samt víða sambærileg og þekkist í ræktunarjörð erlendis, t.d. í *melajörð*. Jónrýmdin er háð pH í íslenskum jarðvegi og er því meiri sem sýrustigið er hærra. Þannig er jónrýmdin hærri nærri gosbeltinu en fjarri því og þar sem úrkoma er mikil vegna þess að pH er lægra á síðartöldu svæðunum.

Mikilvægustu katjónirnar eru Ca^{++}, Mg^{++}, K^{+} og Na^{+}, sem teljast til hinna basísku katjóna. Al^{3+} og H^{+} teljast til súrra katjóna sem gera moldina súra. Hlutfall basískra katjóna í heildarjónrýmd (sem %) er sérstakur eiginleiki sem nefndur er **basamettun**. Eftir því sem meira er af Al^{3+} og H^{+} á jónrýmdarsætum lækkar basamettunin. Súrar katjónir og basamettun er skýrð í 5. kafla um efnaeiginleika jarðvegs.

Jónrýmd er afar mismunandi á milli jarðvegsflokka á Íslandi en mismunandi aðferðir við mælingar flækja þó málin. Nokkuð er til af mælingum sem gerðar eru við pH 8,2 sem gefa mun hærri niðurstöður en gildi fyrir jónrýmd sem mæld eru við sýrustig moldarinnar hverju sinni. Einnig er nokkuð til af mælingum á jónrýmd sem eru gerðar við pH 7. Einna besta yfirlitið um hleðslueiginleika jarðvegs er að finna í gögnum evrópska COST 622-hópsins (ÓA o.fl. 2007), og hér eru gefin nokkur dæmi í meðfylgjandi töflu (tafla 13.1).

Summa basa er greinilega allmiklu hærri en jónrýmd við sýrustig jarðvegsins fyrir *svartjörð*, efsta sniðið í töflunni. Litlu munar í *brúnjörð* og *votjörð* þar sem sortueiginleikarnir eru ekki eins greinilegir og sýrustigið nokkru hærra. Athygli vekur hvað anjónrýmdin er há, sem nýtist m.a. til að halda í jónir á borð við NO_3^- (að vísu fremur laust) og Cl^-. Það er skýrt hve sýrustig og lífræn efni eru afgerandi fyrir jónrýmd, sem vex hröðum skrefum með pH og getur orðið

Tafla 13.1. Hleðslueiginleikar yfirborðssýna í COST 622-verkefninu. Summa basa er mæld með ammóníumasetati við pH 7. CEC_7 er jónrýmd sem fengin er með því að leggja saman summu basa og Al sem er losað með KCl. CEC_S er jónrýmd mæld við sýrustig moldarinnar (e. compulsive exchange procedure). AEC er anjónrýmd. Gögn úr Buurman o.fl. 2007.

LAG	DÝPI	pH (H_2O)	C	SUMMA BASA	AL (KCl)	CEC_7 *jónrýmd*$_7$	CEC_S *jónrýmd*$_S$	AEC *anjónrýmd*
	cm		%	- - - - - - - - $cmol_c$ /kg (meq /100 g) - - - - - - - -				
EUR N7 Ós, Norðvesturland (*Svartjörð; Histic Andosol*)								
O	0–5	6,3	19,9	42,6	0,14	42,7	17,8	6,4
Ah1	5–17	5,8	16,6	43,3	0,14	43,4	18,5	5,2
2Ah2	17–35/50	5,9	13,0	18,5	0,17	18,6	10,8	4,5
EUR N8 Auðkúluheiði, hálendi, Norðvesturland (*Brúnjörð; Brown Andosol*)								
Ah1	3–11/19	6,1	6,6	18,2	0,26	18,5	20,9	3,9
Ah2	11/19–21/27	6,5	5,7	18,7	0,13	18,9	20,9	4,2
Bw1	21/27–26/34	6,8	4,2	17,7	0,02	17,7	18,6	4,2
EUR N9 Hella, Suðurland (*Votjörð; Gleyic Andosol*)								
A1	0-55	5,7	10,0	19,4	0,4	19,8	18,0	5,1

mjög há sé hún mæld við pH 8,2 (sem er algeng aðferð). Þannig getur jónrýmd við sýrustig moldar mælst um 20 $cmol_c$ /kg (meq/100 g) en 30 við pH 7 og 40–50 við pH 8,2. Eins og áður sagði má segja að jónrýmd *sortujarðar* á Íslandi (*svartjörð*, *votjörð*, *brúnjörð*) sé fremur hagstæð með tilliti til frjósemi moldarinnar. Jónrýmd *mójarðar* er alla jafna ennþá hærri (en mjög háð sýrustigi). *Glerjörð* hefur mun lægri jónrýmd, en þó það háa að séu aðrar aðstæður hagstæðar ætti katjónir ekki að skorta, m.a. við uppgræðslu á auðnum, sérstaklega á *melajörð*.

Yfirleitt er Ca^{++} algengasta jónin í jónrýmdarsætum (50–70%) hérlendis og hlutfall Ca er almennt hærra en gerist í *eldfjallajörð* í Evrópu. Um 25–30% eru Mg^{++}. Minna er af Na^{+} (2–5 $cmol_c$ /kg) og K^{+} (0,5–2 $cmol_c$ /kg).

Lesendur eru hvattir til að gjalda varhug við tölum um basamettun fyrir íslenska mold því oftar en ekki er jónrýmdin mæld við hærra pH en moldin hefur en summa basa við lægra pH. Niðurstaðan verður gjarnan tiltölulega lág basamettun sem í raun á sér ekki stoð.

Jónrýmd og geislavirkni. Geislavirkt úrfelli inniheldur geislavirkar jónir sem geta bundist í jarðveginum. Geislavirkt sesíum (eða sesín; ^{137}Cs) er meðal þeirra efna sem mest fellur af til jarðar eftir kjarnorkusprengingu eða slys í kjarnorkuverum. Sesíum hefur helmingunartíma um 30 ár. Það var eitt meginefnanna sem féllu vítt um Evrópu eftir kjarnorkuslysið í Chernobyl. Eftir tilraun Sovétmanna með gríðarlega öfluga vetnissprengju, svokallaða „Tsar-bombu“ árið 1961, féll mikið af geislavirkum efnum á norðurhveli, en í kjölfarið var gerður samningur um bann við tilraunum með kjarnavopn í andrúmsloftinu. ^{137}Cs er þeirrar náttúru að bindast afar fast við jónrýmdarsæti og mun fastar en þær katjónir sem annars halda þeim sætum. Því binst geislaúrfelli í yfirborðslögum jarðvegs og er þar áratugum saman.

Moldin síar út mengunina og verndar grunnvatn en geislavirknin í moldinni getur vitaskuld valdið geislamengun í ræktun og borist um alla fæðukeðju vistkerfa. Rannsóknir á Íslandi sýna að geislavirkni binst gríðarlega fast í efstu 5 cm jarðvegsins (Magnús Á. Sigurgeirsson o.fl. 2005). Rannsóknirnar sýndu að jafnvel *glerjörð* með aðeins 2–5% leirinnihald bindur einnig ^{137}Cs, sem er einstakt fyrir sendinn jarðveg í heiminum. Þessar staðreyndir hafa verið notaðar til að rannsaka jarðvegsrof víða um heim og er þá einkum notað úrfellið frá vetnissprengju Sovétmanna árið 1961, sem finnst í yfirborði jarðvegs vítt um heiminn en einkum þó á norðurhveli jarðar. Geislavirkni frá þeirri sprengju er nú aðeins um fjórðungur þess sem hún var í upphafi.

13.3. Fosfór – fosfórbinding

Fosfórbinding er meðal greiningar-einkenna *eldfjallajarðar* (sjá 10. kafla). Fosfórbinding (e. P-retention) lýsir sér þannig að fosfór sem borinn er á land eða berst í mold með öðrum hætti binst við agnir jarðvegsins og skilar sér ekki aftur út í jarðvegsvatnið. Fosfórafrennsli er lítið frá landbúnaðarsvæðum með *eldfjallajörð*. Fosfórinn safnast smám saman upp við endurtekna áburðargjöf.

Fosfóráburður í miklu magni er gjarnan notaður í ræktun á eldfjallasvæðum, t.d. í Japan. Umtalsvert magn af fosfór er notað í ræktun á Íslandi og safnast hann smám saman upp (sjá t.d. Bjarna Helgason 2002). Evrópskar rannsóknir (Madeira o.fl. 2007) sýna að bindingin er einkum tengd ál-húmus-fjölliðum, allófani og ferrihýdríti. Íslensk mold bindur mikinn fosfór, einkum leirrík mold eða þar sem málm-húmus-fjölliður

eru til staðar. Fosfórbinding er minni í grófum jarðvegi og jarðvegslögum sem eru mynduð af súrum (líparít) gjóskulögum.

Bjarni Helgason (2002) birti yfirlitsgrein um fosfór í íslenskum jarðvegi. Hann sýndi fram á að það væru aðallega lífræn efni sem byndu fosfórinn utan gosbeltisins (um 50%) en lífræn binding væri minni innan gosbeltisins (17%). Þetta kann þó að stafa af því að moldin utan gosbeltanna er yfirleitt lífrænni en innan þeirra. Hlutfall kolefnis og fosfórs (C:P) var afskaplega breytilegt eða 66–400.

Aðgengi plantna að fosfór tengist að frekar litlu leyti magni lífrænna efna, enda er þess að vænta í *eldfjallajörð*.

13.4. Efnaskol fyrir *eldfjallajörð*

Oxalat-skol og pýrófosfat-skol (e. extractions) eru þær meginaðferðir sem notaðar eru til að ákvarða sortueiginleika jarðvegs (e. andic soil properties) og magn allófans, ferrihýdríts og málm-húmus-fjölliða. Það eru ákaflega mikilvægir þættir *eldfjallajarðar* sem eru mældir með slíkum efnaskolum. Oxalat-skolun og mæling á áli, járni og kísli, sem leysist upp í oxalat-lausninni, er notuð til að ákvarða magn allófans (Si_{ox}), ferrihýdríts (Fe_{ox}) og málm-húmus-fjölliða (Al_{ox} og Fe_{ox}). Oxalatið leysir upp bæði málm-húmus-fjölliður (MHK) og steindirnar en pýrófosfat (Al_{pyr} og Fe_{pyr}) mælir einvörðungu málmana sem bundnir eru lífrænum efnum og eru mælikvarði á MHK. $(Al+½Fe)_{ox}$ er

Fosfór og eldgos

Nauðsynlegt er að bera fosfór á land við uppgræðslu og í ræktun, en þroskuð náttúruleg vistkerfi á borð við birkiskóga hafa trúlega gnótt fosfórs fyrir hringrás næringarefna. Áburðaráhrif gjósku frá eldgosinu í Eyjafjallajökli stafaði að hluta til af fosfór í öskunni – sem hafði sérstaklega örvandi áhrif á vöxt birkis, t.d. í Þórsmörk, en ekki síður niturbindandi tegundir á borð við umfeðming, sem gera einmitt miklar kröfur til fosfórs í mold. Niturbinding þeirra hafði síðan áhrif á vöxt annarra tegunda.

Mynd 13.6. Úr Þórsmörk 2011. Aska úr Eyjafjallajökulsgosinu hafði örvandi áhrif á vöxt niturbindandi tegunda á borð við smára og umfeðming, en einnig á birki. Mynd: Hreinn Óskarsson.

notað til að ákvarða sortueiginleika (e. andic soil properties) og flokkun á *eldfjallajörð* (sjá kafla um *eldfjallajörð*). Hlutföllin (Al_{pyr}/Al_{ox} og Fe_{pyr}/Fe_{ox}) gefa til kynna hve mikill hluti áls og járns sem mynda sortueiginleika er bundinn í MHK. Í töflu 13.2 eru birtar niðurstöður fyrir sex snið sem sýna breytileika á milli jarðvegsgerða, jarðvegslaga og staða á landinu.

Efsta sniðið er af *svartjörð* á Norðvesturlandi (Ós) með allmiklu af lífrænum efnum; %C á milli 13 og 20% í efstu lögum (3. dálkur frá vinstri). Oxalat-leysanlegt Al og Fe, gefið sem $(Al+½Fe)_{ox}$, er í meðallagi (1,7%) upp í há gildi (5,2) í efri lögum. Athygli vekur að nokkuð stór hluti oxalat-leysanlegu efnanna leysist einnig upp í pýrófosfati (Al_{pyr} og Fe_{pyr}), með Al_{ox}/Al_{pyr}-hlutfallið á milli 0,29 og 0,39 í efri lögum og Fe_{ox}/Fe_{pyr}-hlutfallið ennþá hærra í flestum lögum. Þetta bendir til að í þessum lögum sé stór hluti Al og Fe bundinn í lífrænum fjölliðum, ekki síst járnið, en að álið sem losnar við veðrun sé bæði bundið í MHK og í allófani.

Sýrustig þessa sniðs er fremur lágt, sem eykur styrk Al^{3+} í lausninni, og það er fremur gripið af lífrænum efnum en að það myndi efnasamband með Si^{4+} sem allófansteindir. Breytileiki á milli jarðvegslaganna er hins vegar mikill sem vænta má. Þessar niðurstöður sýna að MHK eru veigamikill þáttur í lífrænum jarðvegi á láglendi landsins og gefa honum sortueiginleikana að hluta. Nokkuð há hlutföll Al_{pyr}/Al_{ox} og Fe_{pyr}/Fe_{ox} fást fyrir efstu tvö lög jarðvegs á Auðkúluheiði. Smásjárskoðun á lífrænu efnunum í sniðinu sýnir að þau eru fremur illa rotnuð (Stoops o.fl. 2008), en eigi að síður er veðrun á bergkornum (einkum basaltgler) nægilega ör til að skila járni og áli sem binst lífrænum efnum. Jarðvegur í Mýrdal hefur mjög mikla sortueiginleika sem endurspeglast í háum gildum fyrir $(Al+½Fe)_{ox}$ og hann er með óvenjulega mikið af ferrihýdríti (há gildi Fe_{ox}, allt að 14% ferrihýdrít). Mold úr þessu sniði sýndi jafnframt mikla kvikuhegðun (e. thixotropy).

Glerjörð með takmarkað af lífrænum efnum er með fremur lítið af málm-húmus-fjölliðum (MHK), eins og vænta má, en þó binst hluti lífræna efnisins sem myndast við framvindu með þeim hætti. Í töflu 13.2 eru sýnd gildi fyrir þrjú mismunandi snið í *glerjörð* og er sniðið á Geitasandi í nokkurra ára gamalli uppgræðslu með áburði og grasfræi. Hlutföllin Al_{ox}/Al_{pyr} og Fe_{ox}/Fe_{pyr} eru stærðargráðu lægri en fyrir *svartjörð* og *brúnjörð*. Eitt af greiningareinkennum *eldfjallajarðar* er >2% af $(Al+ ½Fe)_{ox}$ en sé gler til staðar lækkar 2% markið allt niður í 0,4% $(Al+½Fe)_{ox}$ eftir því hve mikið er af glerinu.

Það er einmitt nóg af gleri í íslenskri *glerjörð* (yfirleitt >60%, sjá ÓA og Kimble 2001) og því þarf hún aðeins að hafa >0,4% $(Al+½Fe)_{ox}$ til að flokkast sem Andosol (WRB, en þar gildir einnig að hafa lágmarksdýpt) eða Andisol (Soil Taxonomy, engar takmarkanir á dýpt). Það vekur aftur á móti athygli hversu há $(Al+½Fe)_{ox}$ -gildin eru fyrir íslenska *glerjörð*, eða að jafnaði yfir 2% í jarðvegslögunum sem sýnd eru í töflunni; enda flokkast nær öll *glerjörð* sem *eldfjallajörð* samkvæmt WRB og Soil Taxonomy og því er vikið frá þessum kerfum og búinn til sérstakur flokkur utan um jarðveg auðna á Íslandi í íslenska flokkunarkerfinu (sjá umfjöllun í 11. kafla um flokkun jarðvegs).

13.5. Lífræn efni

Í þessu riti er lögð mikil áhersla á mikilvægi lífrænna efna í mold. Þau eru orkuforði moldarinnar sem nýttur er af örverum til að viðhalda hringrás næringarefna. Aðgengi að nitri, sem er iðulega mest takmarkandi næringar-efnið, er oftast í réttu hlutfalli við

Tafla 13.2. Oxalat- og pýrófosfat-skolun jarðvegssýna frá sex stöðum. Mismunandi er hvort gögnin séu fyrir heil snið eða valin jarðvegslög. Stór hluti áls og járns er bundinn lífrænum fjölliðum í *svartjörð* með háu hlutfalli lífrænna efna, sem og yfirborð á Auðkúluheiði, en lítill hluti í Mýrdal og auðnajarðvegi (Vitrisol) þar sem allófan og ferrihýdrít eru ráðandi örefni (e. colloids). Kolefnisprósenta er einnig sýnd. T merkir að jarðvegslög séu stakt öskulag. Uppruni gagna er tilgreindur undir töflunni.

JARÐVEGSLAG	DÝPI	C	AL_{OX}	FE_{OX}	$(Al+½Fe)_{OX}$	AL_{pyr}	FE_{pyr}	AL_{pyr}/AL_{OX}	FE_{pyr}/FE_{OX}
	cm	%							
COST 622 EUR 07. Ós. Norðvesturland. *Svartjörð, Histic Andosol*[1]									
O	0–5	19,9	1,1	1,3	1,7	0,39	0,77	0,36	0,61
Ah	5–17	16,6	1,4	1,4	2,2	0,54	0,83	0,38	0,58
AC	17–35/50	13,0	2,1	6,1	5,2	0,83	1,17	0,39	0,19
2BC	35/50–65	17,4	2,4	0,6	2,7	1,16	0,78	0,49	1,24
3BC	65–73	6,7	2,9	0,6	3,2	0,83	0,44	0,29	0,69
3CB T	73–82	11,8	2,6	1,1	3,1	1,05	0,56	0,41	0,50
4Bw	82–90/100	8,5	5,2	0,8	5,6	1,08	0,75	0,21	0,96
4B/Cg	>90/100	0,5	0,3	0,6	0,6	0,02	0,15	0,06	0,25
COST 622 EUR 08. Auðkúluheiði. Hálendi, Norðvesturland. *Brúnjörð, Brown Andosol*[1]									
Ah1	3–11/19	6,6	1,9	1,4	2,6	0,40	0,48	0,21	0,34
Ah2	11/19–21/27	5,7	2,0	1,3	2,6	0,34	0,44	0,17	0,33
Bw1	21/27–26/34	4,2	2,7	1,5	3,5	0,29	0,30	0,11	0,19
2Bw2 T	26/34–37/42	2,0	1,5	0,7	1,9	0,13	0,12	0,08	0,16
3Bw3/4C	37/42–59/62	2,8	2,9	1,9	3,9	0,20	0,20	0,07	0,11
4C	>59/62	0,3	0,8	0,8	1,2	0,03	0,03	0,04	0,04
Mýrdalur, Suðurland. *Brúnjörð, Brown Andosol*[2]									
A4	36–51	2,1	2,5	5,3	5,1	0,2	0,2	0,08	0,04
Bw2	71–91	2,7	2,8	5,6	5,6	0,2	0,2	0,07	0,04
C2	171–181	3,3	5,3	8,1	9,3	0,3	0,3	0,06	0,04
C3-T	181–196	0,6	2,2	4,3	4,3	0,1	0,2	0,05	0,05
Geitasandur, Suðurland. 7 ára uppgræðsla (7-GR-TR). *Sandjörð, Arenic Vitrisol*[3]									
A1	0–5	0,7	1,2	2,1	2,2	0,090	0,073	0,08	0,03
A2	5–10	0,4	1,5	2,6	2,8	0,069	0,063	0,05	0,02
Sigalda. Suðurhálendi. *Sendin melajörð, Arenic Cambic Vitrisol*[4]									
2A1	2–22	0,11	1,0	1,9	2,0	<0,1	0,2	-	0,11
2A2	22–34	0,08	1,0	1,9	2,0	<0,1	0,1	-	0,05
3C	34–50	0,05	0,8	1,9	1,7	<0,1	0,2	-	0,11
Goðafoss. Norðurland. *Melaskella. Melajörð, Cambic Vitrisol*[2]									
Bw	0–7	0,8	2,1	2,9	3,6	0,2	0,1	0,10	0,03
C2	30–55	0,1	0,9	1,6	1,7	0,1	0,0	0,11	-

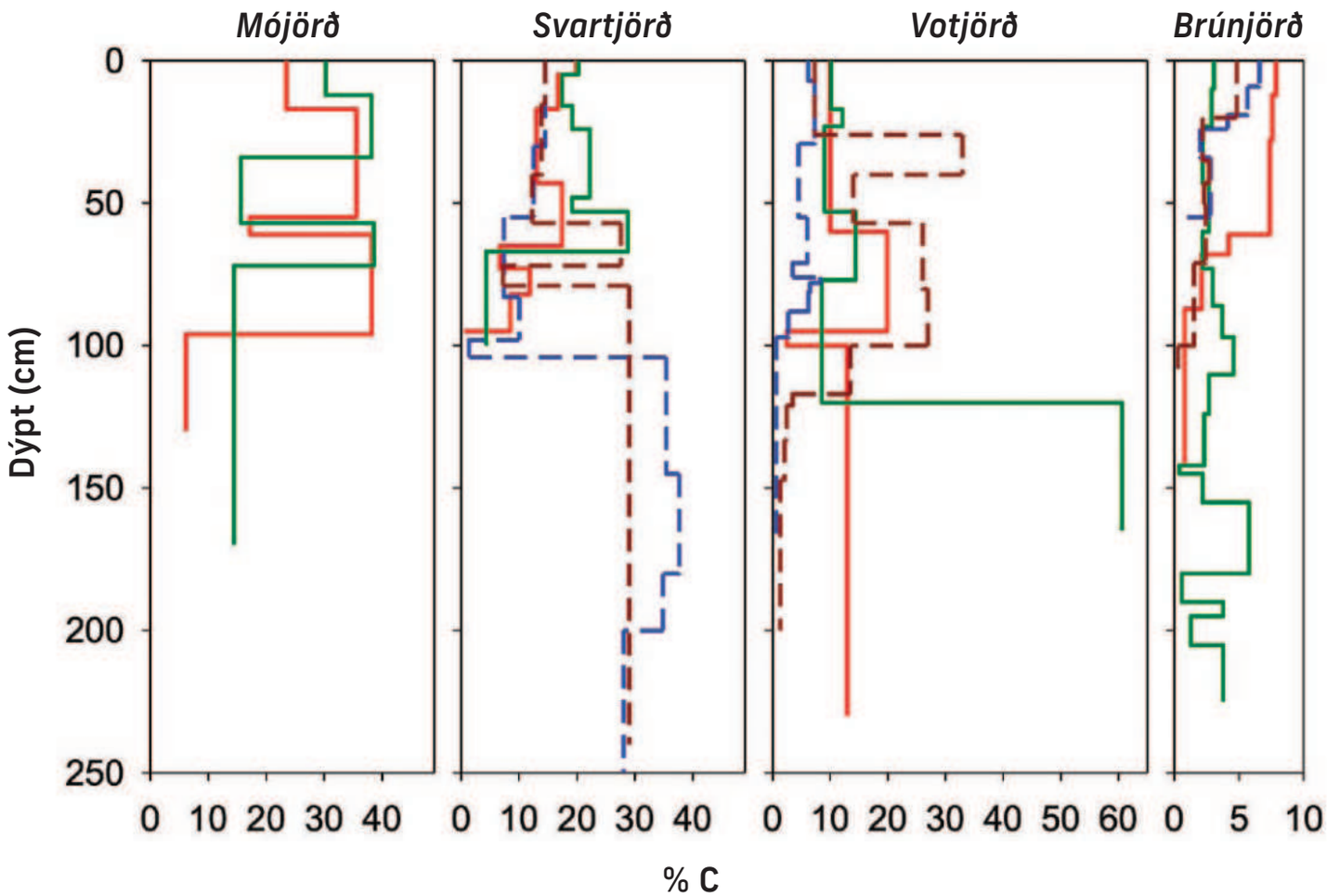
1: Gögn frá COST622, greiningar University of Santiago de Compostela, Spáni (sjá Buurman o.fl. 2007; Garcia-Rodeja o.fl. 2007). **2**: Gögn frá ÓA, 1990; ÓA o.fl. 1995. **3**: Gögn frá ÓA o.fl. 2013; **4**: Gögn frá ÓA og John Kimble, 2001.

heildarmagn lífrænna efna í yfirborðinu. Lífræn efni hafa mikla jónrýmd og geta bundið óhemjumikið magn vatns, rétt eins og leirefnin. Það er því ekki að ófyrirsynju að magn lífrænna efna er oft notað við flokkun á jarðvegi, það gefur einfaldlega svo miklar upplýsingar um moldina.

Það er rétt að hafa það í huga að efsta yfirborð moldarinnar er miðstöð næringarhringrásarinnar og því skiptir lífrænt innihald þar mestu máli. Flokkunarkerfi eru oft miðuð við efstu 15–35 cm jarðvegsins.

Það er mikið af lífrænum efnum í íslenskri *sortujörð* (jarðvegi undir gróðri) og sérstaklega er meira í þurrlendisjarðveginum en gengur og gerist, sem er eitt einkenni *eldfjallajarðar*. Þá ná hin lífrænu efni mun dýpra en almennt gengur og gerist í jarðvegi erlendis, sem m.a. má rekja til áfoksins sem sífellt grefur yfirborðið og veldur því að jarðvegurinn dýpkar smám saman. En gömul lífræn efni eru síðan nokkuð stöðug – þau rotna ekki alveg – m.a. vegna eiginleika *eldfjallajarðar* þar sem örefnin (leir, ál og járn og lífræn efni) binda lífrænu efnin. Svipuð einkenni þekkjast á öðrum eldfjallasvæðum jarðarinnar. Lífrænt innihald í nokkrum jarðvegsgerðum er sýnt á mynd 13.7.

Meðal þess sem gerir íslenska mold sérstaka er að lífrænu efnin safnast fyrir vegna 1. hárrar vatnsstöðu í votlendum sem minnkar oxun á lífræna efninu; 2. bindingar við allófan og sem málmhúmus-knippi, eins og er einkennandi fyrir *eldfjallajörð* almennt, og 3. hægrar rotnunar af völdum kulda, ekki síst á hálendinu.



Mynd 13.7. Dreifing lífrænna efna með dýpt í fjórum megingerðum jarðvegs. Sniðin einkennast af því að jarðvegslög djúpt í moldinni hafa einnig mikið af lífrænum efnum, en dreifingin er afar ójöfn um sniðin. Oft er meira af lífrænum efnum neðarlega í sniðum í votlendi.

Mójörð. Af mikilvægum rannsóknum á *mójörð* má nefna doktorsritgerð Þorsteins Guðmundssonar (1978) og rannsóknir COST 622-hópsins (almennt á lífrænum jarðvegslögum; sjá ÓA o.fl. 2007). Jarðvegur votlendis á Íslandi er að mörgu leyti sérstakur á heimsmælikvarða. *Mójörð* hefur mikil einkenni *eldfjallajarðar* en einnig *mójarðar* eins og hún þekkist erlendis (Histosol). Lífræna innihaldið er alla jafna mikið lægra í prósentum talið en þekkist í mómýrum norðurslóða vegna sífellds áfoks og stöku gjóskufalls.

Mómýrar Skandinavíu verða ekki fyrir áfoki og þar safnast saman tiltölulega ómenguð lífræn efni, eins og t.d. í barnamosamýrum (Sphagnum mosi). Heildarmagn mælt í tonnum kolefnis í rúmmetra getur þó verið svipað, eins og vikið er að í 18. kafla um mold, kolefni og loftslag.

Dýpt *mójarðar* hérlendis er afskaplega breytileg, allt frá fáum cm upp í marga metra, sem er sambærilegt við mómýrar í Skandinavíu. Hæst er kolefnishlutfallið í mýrum á Íslandi fjarri gosbeltunum, eins og víða á Vesturlandi, Vestfjörðum og Tröllaskaga, enda var mór víða notaður til brennslu á þessum svæðum og jafnvel numinn í stórum stíl (mynd 13.8). Mómýrar voru jafnvel rannsakaðar sérstaklega í því skyni að kanna orkuforða þeirra með tilliti til brennslumöguleika (t.d. Ólafur Bjarnason 1952, 1966). Vegna öskunnar og annarra bergefna í mómoldinni fylgdi mikil loftmengun brennslu á mó á Íslandi og því er hann afar óæskilegt eldsneyti, að ekki sé talað um það rask á vistkerfum sem fylgir því að nema móinn úr jörðu.

Eins og sést á mynd 13.7 er lífrænt innihald í sniðunum afar misjafnt og iðulega hærra nokkru undir yfirborðinu í yfirborðslögum. Í mómýrum (og einnig *svartjörð* og stundum *votjörð*) er víða að finna 2–3 lög með afar háu lífrænu innihaldi, svokölluð lurkalög. Áður en þau mynduðust hefur birkikjarr og víðir náð að nema land á hlýjum og þurrum skeiðum fyrir mörg þúsund árum. Þetta gerðist m.a. fyrir 8 500–6 000 árum (Margrét Hallsdóttir og Caseldine 2005). Votlendin breiddust út smám saman á ný eftir þetta birkiskeið (sjá Hreggvið Norðdahl o.fl. 2008).

Útbreiðsla birkis jókst aftur síðar og fram undir landnám á mörgum stöðum á landinu (sjá Margréti Hallsdóttur og Caseldine 2005, einnig Þorleif Einarsson 1991). Með hlýnandi veðurfari og minni beit er líklegt að birki hafi tekið að breiðast út enn á ný. Svo virðist sem mýrar þorni nú æ meira, t.a.m. á Vesturlandi; spurningin er hvort nýtt birkiskeið sé að hefjast vegna loftslagsbreytinga og hlýnunar jarðar.

Rotnunarstig hinna lífrænu efna er afskaplega mismunandi. Eldri grafin mólög eru gjarnan betur rotnuð en hin yngri, auk þess sem rotnunin er minni á köldum svæðum á hálendinu.

Svartjörð. Flest af því sem sagt var um lífræn efni og *mójörð* hér að ofan á einnig við um *svartjörð*. Skilgreining á *svartjörð* miðast við að hún hafi 12–20% C í efstu 30 cm jarðvegs að meðaltali. Oft er *mójörð* að finna neðan efstu 30 cm jarðvegsins (mynd 13.7, næstlengst til vinstri).

Ástæður þess að minna er af kolefni í efstu lögum moldarinnar má m.a. rekja til þess að áfok hafi aukist, t.d. yfir mýrlendi á Suðurlandi. *Svartjörð* er einnig oft að finna í jaðri votlenda þar sem bleytan er minni og uppsöfnun lífrænna efna því ekki eins áköf. Vegna þess að sýrustig *svartjarðar* er sums staðar nokkru hærra en í *mójörð*, t.d. á Norðurlandi og vestanverðu Suðurlandi (pH >5), eru þar skilyrði fyrir myndun allófans auk málm-húmus-knippa (MHK), enda flokkast moldin sem *sortujörð* (*eldfjallajörð*, Andosol). Hér

spilar því saman uppsöfnun lífrænna efna vegna andoxandi aðstæðna í votlendi, hæg rotnun vegna kulda, ekki síst til fjalla, og uppsöfnun MHK.

Votjörð. *Votjörð* er jarðvegur votlendis með minna en 12% kolefnis í efstu 30 cm jarðvegsins. Ástæður þess að ekki myndast *svartjörð* eða *mójörð* þar sem *votjörð* er að finna er iðulega mikið áfok og stundum gjóskufall. Þetta er að mörgu leyti afar sérstök jarðvegsgerð og er líklega fremur fágæt á heimsvísu (sjá umfjöllun ÓA o.fl. 2016). Lífrænt innihald er afskaplega misjafnt, bæði á milli sniða og á milli jarðvegslaga í sömu sniðum. Þar sem grunnvatn stendur hátt á gosbeltinu og áfok er mikið er kolefnisinnihald oft aðeins 1–3% C í yfirborðslögum, sem er ansi langur vegur frá lífrænum mómýrum. Dæmi um slík snið eru frá Fljótsdalsheiði, nálægt núverandi Hálslóni (mynd 13.9).

Meðaltal kolefnis í *votjörð* og *brúnjörð* er sýnt á mynd 13.10 hér fyrir neðan ásamt kolefni í jarðvegi auðna (Hlynur Óskarsson o.fl. 2004). Meðaltal kolefnis í *votjörð* er nálægt 8% samkvæmt þessari mynd en breytileikinn er afar mikill. Mikið áfok veldur því að moldin þykknar hratt, jafnvel >0,2 mm á ári. Þessi öra þykknun veldur því að minna safnast fyrir af lífrænum efnum í hvert jarðvegslag; það má orða það svo að ekki sé nægur tími fyrir mikla uppsöfnun áður en jarðvegurinn grefst undir ný áfokslög. Athygli vekur að oft er minna af lífrænu efni nokkru neðan yfirborðs en í yfirborðinu (dæld á grafinu, mynd 13.10).

Ástæða þessa er líklega þríþætt: i) mikið áfok á uppblástursskeiðum veldur örri þykknun moldarinnar og því minna kolefnisinnihaldi; ii) meira er af kolefni í efsta laginu þar sem gróska er mest hverju sinni; og iii) mikil landnýting (ofbeit) á köldum tímabilum (mikið beitarálag á sama tíma og uppskera er lítil vegna kulda) gengur á lífrænan forða moldarinnar á þessum tíma. Votlendi á gosbeltunum og við þau hafa oft nokkuð þykk gróf gjóskulög sem ekki hafa safnað miklu af lífrænum efnum. Þessi lög hafa einnig mikil áhrif á eðliseiginleika, eins og fjallað var um í kaflanum hér á undan. Vatnsleiðni stöðvast við gjóskulögin, en um þau getur streymt súrefni þannig að skiptist á oxun og afoxun sem leiðir til rauðra banda í jarðveginum (sjá 5. kafla um oxunarstig).

Brúnjörð. Magni lífrænna efna í *brúnjörð* svipar til þess sem gengur og gerist í annarri *eldfjallajörð* sem telst til „silandic"-hóps hennar, þ.e. *eldfjallajörð* sem einkennist fremur af allófani en málm-húmus-knippum (MHK). Kolefnisinnihald *brúnjarðar* er alla jafna á milli 2 og 8% (mynd 13.10) en getur verið meira í yfirborðslögum þar sem gróska er mikil. Meðaltalið er nálægt 4%, eins og sést á myndinni. Það er sterkt samhengi á milli grósku gróðurfars á yfirborðinu og kolefnisinnihalds, t.d. er mun meira af kolefni í yfirborðslögum birkiskógar, oft 6–15% (LbhÍ, óbirt gögn), en í rýru mólendi er kolefnisinnihaldið iðulega 2–5%. Hér spilar landnýting einnig inn í, mikil beit fjarlægir lífræn efni svo minna safnast fyrir í moldinni og kolefnisinnihaldið rýrnar með tímanum.

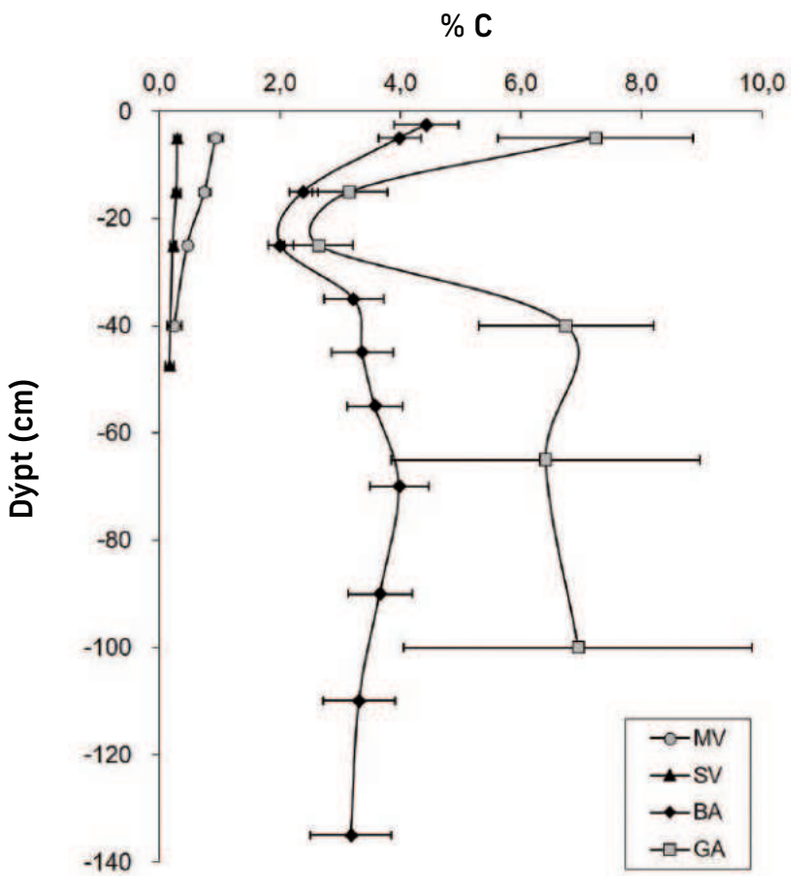
Mynd 13.8. Gamlar mógrafir í Héðinsfirði á Tröllaskaga. Mórinn var mikilvægt eldsneyti fyrr á tímum. Mynd: Ása L. Aradóttir.

Rýrt kvistlendi eða mosaþemba skilar minna af lífrænum efnum ofan í moldina en öflugt graslendi, blómlendi eða skógargróður, og lífrænt innihald verður ennþá takmarkaðra ef rýr gróðurlendi eru nýtt til beitar. Akuryrkja og mikil beit gengur einnig á lífræna forðann. Landnýting hefur minnkað kolefnisforða yfirborðslaga *brúnjarðar* sem hefur skilað óhemjumiklu magni af CO_2 út í andrúmsloftið, eins og fjallað er um í 22. kafla. Þá er einnig munur á kolefnisinnihaldi hvers jarðvegslag eftir áfoksstigi, meira safnast fyrir í jarðvegslögum þar sem áfok er lítið. En hafa skal í huga að hófleg beit í frjósömum vistkerfum, ekki síst graslendi, getur örvað uppsöfnun kolefnis í moldinni – en það á ekki við um hrunin vistkerfi.

Mynd 13.9. *Votjörð* á Fljótsdalsheiði nálægt virkum áfoksuppsprettum.

Rotnunarstig lífrænna efna í *brúnjörð* er afar misjafnt eins og í votlendisjarðvegi. Kuldi hægir á rotnuninni og því er *brúnjörð* á hálendinu minna rotnuð en mold víða á láglendi. Eldri jarðvegur neðar í sniðum er oft meira rotnaður en lífræn efni í yfirborðslögum. Þá er jarðvegur sem verður fyrir miklu áfoki verr rotnaður en þar sem meiri tími gefst áður en moldin grefst, eins og skýrt var frá hér að ofan í sambandi við votlendisjörð.

Auðnir. Takmörkuð gróðurhula og lítið kolefni í yfirborðslagi eru megineinkenni jarðvegs auðna og greiningareinkenni (<1,5% C). Alla jafna er minnst af kolefni í *sandjörð*, en umtalsvert magn er stundum að finna í *melajörð* (mynd 13.10). Kolefni í *melajörð* er af þrennum toga: 1. leifar af mold sem áður var á svæðinu, en moldin hefur rofist af yfirborðinu; 2. áfok vegna uppblásturs í nágrenninu; og 3. lífræn efni sem skila sér ofan í moldina enda þótt gróðurhulan sé frekar takmörkuð.



Mynd 13.10. Meðaltal kolefnis í auðnum (*melajörð* (CV) og *sandjörð* (AV)), *brúnjörð* (BA) og *votjörð* (GA). Graf unnið af Hlyni Óskarssyni o.fl. (2004). Það sýnir grundvallarmun á kolefnisinnihaldi auðna og moldar undir gróðri. Meðaltal *brúnjarðar* er nálægt 4% C en er hærra í *votjörð*. Grafið sýnir ljóslega dæld í kolefnisinnihaldi nokkru neðan yfirborðs sem skýrð er í textanum.

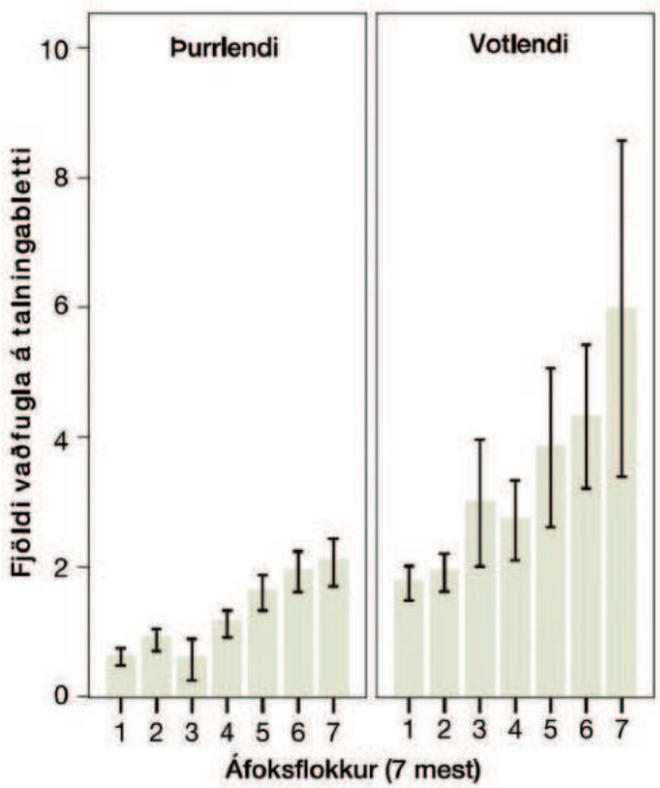
Mikið áfok einkennir stærstu auðnasvæðin. Áfokskorn sem setjast á auðnir eru jafnframt ekki stöðug og geta fokið

Frjósemi, fuglar og áfoksflokkar

Kolefni er einn helsti mælikvarðinn á frjósemi moldar. Því meira sem er af kolefninu, þeim mun frjósamari er hún. Þetta á þó fyrst og fremst við um þurrlendismold. C/N-hlutfallið skiptir einnig máli sem og hraði á umsetningu næringarefna.

Sýrustigið hefur áhrif á umsetninguna því lágt sýrustig getur virkað hamlandi auk þess sem flest næringarefni eru helst á aðgengilegu formi við fremur hlutlaust sýrustig (sjá kafla um mold og næringu). Fremur hátt sýrustig (nálægt hlutlausu, pH 6–7) og mikill veðrunarhraði á ferskum glerefnum þar sem áfok er mikið veldur því að frjósemi er einnig mikil í mold á áfoksbeltum – meiri en í mold fjærri þeim. Í ræktun kemur þessi munur ekki vel fram því áburðargjöf þurrkar iðulega út mun á milli svæða.

Fuglar eru víða efst í fæðukeðjunni og eru næmur mælikvarði á frjósemi og ástand vistkerfa. Á Íslandi kemur í ljós að þéttleiki varpfugla er alls ekki mestur þar sem hæstu gildin er að finna fyrir lífræn efni, heldur öfugt. Þéttleiki varpfugla er mestur þar sem áfokið er hvað mest (mynd 13.11), og þessi áhrif eru meira áberandi í votlendi en þurrlendi (Tómas Grétar Gunnarsson o.fl. 2015).



Jaðrakan

Mynd 13.11. Þéttleiki varpfugla miðað við áfoksflokka (Tómas Grétar Gunnarsson o.fl. 2015). Áfoksflokkarnir eru 7, en fjöldi fugla miðast við rannsóknareiningu (e. patch size (að meðaltali 2,1 ha). Strikin sýna staðalskekkju (SE). Mjög greinilegur og marktækur munur er á fjölda fugla í lægstu og hæstu áfoksflokkunum (mest áfok, áfoksbelti). Myndin til hægri er af jaðrakan, en útbreiðsla hans sýnir mikla samsvörun við magn áfoksefna (teikning: Fífa Jónsdóttir).

aftur og aftur. Frostlyfting á möl og grjóti veldur því að sandur og silt geta safnast undir yfirborðinu og grafið eldri jarðveg. Þannig geta jarðvegslög með nokkru af lífrænum efnum verið til staðar töluvert undir yfirborðinu í sendinni *melajörð*.

13.6. Nitur

Nitur er það næringarefni sem oftast skortir við ræktun og er því stærsti hluti áburðarefna. Magn þess í moldinni er einn þeirra mælikvarða sem lagður er á frjósemi vistkerfa. Söfnun niturs í moldina er meðal mikilvægustu ferlanna sem eiga sér stað á fyrri stigum framvindu, t.d. í kjölfar landgræðslu og í verkefnum sem miða að vistheimt.

Náið samhengi er á milli heildarmagns niturs og kolefnis í jarðveginum. Nitrið er gjarnan um 12–20 hluti kolefnisins – þ.e. C/N-hlutfallið er oftast á bilinu 12–20. Örverur sem brjóta niður lífræn efni sem falla til og keyra áfram næringarhringrásina eru mjög háðar nægu framboði af nitri. Ef C/N-hlutfallið er hátt (t.d. >20, þ.e. lítið af nitri í samanburði við kolefni) hafa plöntur hlutfallslega minna af nitri að moða úr því það er frekar tekið upp af örverum. Frjósemi getur því virkað minni en ella, enda þótt mjög mikið geti verið af lífrænum efnum í kerfinu.

Lágt C/N-hlutfall lífrænna efna er einkenni frjósamra og virkra vistkerfa með öra næringarhringrás. Þetta er sömuleiðis eitt af einkennum hinnar frjósömu moltu og annars lífræns úrgangs sem hefur verið meðhöndlaður þannig að hlutfall N í massanum hefur aukist (en við það losnar C sem CO_2 eða CH_4).

13.6.1. Nitur í vistkerfum á Íslandi

Magn niturs í vistkerfum á Íslandi er, sem fyrir segir, í réttu hlutfalli við heildarmagn lífrænna efna. Hlutfall kolefnis og niturs hefur verið ákvarðað í fjölda jarðvegssýna í mörgum rannsóknarverkefnum hjá Landbúnaðarháskóla Íslands, m.a. verkefnunum Ými og LULUCF. Heildarmagn niturs í efstu 30 cm jarðvegsins fer mjög eftir sömu flokkum og ráða kolefnisinnihaldinu: votlendi tefja rotnun og safna lífrænum efnum, en heildarmagn lífrænna efna er almennt hlutfallslega minna í þurrlendismold þar sem áfokið er mikið. Á móti kemur að rúmþyngd lækkar með auknu innihaldi kolefnis (og niturs) og því er munur á heildarmagni niturs eftir því hve áfok er mikið ekki eins mikill

Tafla 13.3. Nitur í efstu 30 cm mismunandi gróðurflokka (flokkun Nytjalands) deilt niður á áfoksflokka (ÓA 2010). Gögnin byggjast á gagnagrunnum LbhÍ. Rúmþyngd (BD) er reiknuð út frá magni lífrænna efna (sjá neðan við töfluna). Niðurstöðurnar byggjast á samtals 436 gildum.

ÁFOK	RÝRT MÓLENDI		RÍKT MÓLENDI		VOTLENDI	
	BD$	Forði	BD$	Forði	BD$	Forði
	g/cm³	*kg N/ha*	*g/cm³*	*kg N/ha*	*g/cm³*	*kg N/ha*
Mjög mikið	0,74	4 516	0,74	4 643	0,63	8 145
Mikið	0,66	9 551	0,67	8 746	0,58	11 802
Meðal	0,69	7 788	0,62	11 253	0,53	12 749
Lítið	0,60	10 704	0,53	14 347		Óviss

$: Rúmþyngd (BD) reiknuð með aðhvarfsjöfnu sem byggist á gagnagrunnum LbhÍ: BD=0,812 - (C% x 0,0203). Rúmþyngd er ekki reiknuð fyrir votlendi sem hefur mest af lífrænum efnum vegna mikils breytileika.

Blómplöntur og laust nitur

Mismunandi gróðurlendi endurspegla oft kolefnis- og niturforðann. Meira er af kolefni og nitri í óröskuðum, ríkum vistkerfum á borð við birkiskóga, jafnframt því sem lágt C/N, t.d. <12, endurspeglar öra næringarumsetningu þar sem nóg er af lífrænum efnum fyrir.

Ætla má að margar blómplöntur geri miklar kröfur til aðgangs að lausu nitri og sæmilega lágs C/N-hlutfalls og gefi því til kynna með nærveru sinni öfluga næringarhringrás.

og ætla mætti í fyrstu. Heildarmagn N í þurrlendi er gjarnan á bilinu 4 000 kg N/ha (mikið áfok) til >10 000 kg N/ha í þurrlendi þar sem áfok er minna (tafla 13.3) í efstu 30 cm moldarinnar. Taka skal fram að óvissa er allmikil í útreikningunum sem sýndir eru í töflu 13.3 þar sem rúmþyngdin sem notuð er við útreikningana er áætluð út frá kolefnismagni.

Enda þótt mun meira sé af kolefni í votlendum (*svartjörð* og *mójörð*) en í þurrlendi er heildarforði N í efstu 30 cm ekki að sama skapi meiri vegna þess að C/N-hlutfallið er yfirleitt hærra í votlendum, gjarnan yfir 25. Auk þess er rúmþyngdin mun minni (lægra gildi), oft 0,2–0,4, en margfaldað er með henni til þess að reikna út heildarmagn í kg á ha. Þegar votlendi eru ræst fram og súrefni kemst að lífrænu efnunum örvast rotnunin og kolefni tekur að losna út í andrúmsloftið sem CO_2. Við það tekur C/N-hlutfallið að lækka. Rannsóknir Gunnhildar Evu G. Gunnarsdóttur (2017) sýna þetta vel en hún bar saman kolefnis- og niturforða í framræstu og óröskuðu votlendi sem endurspeglar áhrif framræslunnar. Þar kemur fram að kolefnismagnið hafði lækkað úr 23,7 í 15,9% að meðaltali á nokkrum áratugum og C/N-hlutfallið lækkað úr 20,6 í 15,3% að meðaltali.

Niturskortur er áberandi í mjög rýrum kerfum á borð við *melajörð* og *malarjörð*. Niturmagn þarf að lágmarki að vera um 600–1 000 kg N/ha til að vistkerfin nái fullri virkni (t.d. Whisenant 1999). Slík söfnun tekur áratugi á láglendi en árhundruð á hálendi við íslenskar aðstæður. Þá er miðað við að jarðvegsskán og önnur niturbindandi lífform sem vinna nitur úr andrúmsloftinu séu til staðar. Á meðan þessi frumsöfnun á sér stað eru kerfin afar viðkvæm fyrir raski og nýtingu á borð við beit.

13.7. Lífríkið

Á undanförnum árum hafa rannsóknir á jarðvegslífverum og lífvirkni jarðvegs margfaldast (Jeffrey o.fl. 2010). Lífverur í jarðvegi eru snar þáttur í viðhaldi og virkni flestra eðlis- og efnaeiginleika jarðvegs. Jarðvegslífverur hafa til að mynda ráðandi áhrif á umsetningu lífrænna efna í jarðvegi og þar af leiðandi áhrif á framboð næringarefna.

Lífverur í mold hafa einnig veruleg áhrif á byggingu jarðvegs og þar með á ýmsa eðlisþætti eins og vatnsrýmd. Losun og binding gróðurhúsalofttegunda er einnig háð starfsemi lífvera jarðvegsins. Nokkuð hefur verið skrifað af yfirlitsgreinum um líf í jarðvegi hérlendis, t.d. Helgi Hallgrímsson (1969, 1975, 1976), Helgi Hallgrímsson og Jóhannes Sigvaldason (1974), Jóhannes Sigvaldason (1973) og Högni Böðvarsson (1961, 1989). En þrátt fyrir þessi greinaskrif eru eiginlegar rannsóknir á jarðvegslífverum fremur fáar á Íslandi. Nokkrar greinar hafa birst um rannsóknir á ákveðnum hópum jarðvegslífvera (Hólmfríður Sigurðardóttir og Guðni Þorvaldsson 1994, Hólmfríður Sigurðardóttir 1994). Minnst er á fleiri íslenskar rannsóknir á jarðvegslífi á Íslandi í 3. kafla.

Heimildir

Bjarni Helgason 2002. Lífrænn fosfór í íslenskum jarðvegi. Icelandic Agricultural Sciences 15:95–109.

Björn Jóhannesson 1960. Soils of Iceland. Rit Atvinnudeildar Háskóla Íslands B-12. Reykjavík.

Bos, J.C. 2021. Effects of afforestation on soil properties, ecosystem carbon stocks and biodiversity in East Iceland. MSc-ritgerð, Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.

Buurman, P., F. Bartoli, A. Basile, G. Füleky, E. García Rodeja, J. Hernandez Moreno og M. Madeira 2007. The physico-chemical database. Í: Ólafur Arnalds, F. Bartoli, P. Buurman, Hlynur Óskarsson, G. Stoops og E. García-Rodeja (ritstj.), Soils of Volcanic Regions of Europe. Springer, Heidelberg, Holland. Bls. 271–287.

Freyja Ragnarsdóttir Pedersen 2022. Breytingar á sýrustigi í jarðvegi barrskóga. BS-ritgerð, Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.

García-Rodeja, E., J.C. Novoa, X. Pontevera, A. Martinez-Cortizas og P. Buurman 2007. Aluminium and iron fractionation of European volcanic soils by selective dissolution techniques. Í: Ólafur Arnalds, F. Bartoli, P. Buurman, Hlynur Óskarsson, G. Stoops og E. García-Rodeja (ritstj.) 2007. Soils of Volcanic Regions of Europe. Springer, Heidelberg, Holland. Bls. 325–351.

Gunnhildur Eva G. Gunnarsdóttir 2017. A novel approach to estimate carbon loss from drained peatlands in Iceland. MS-ritgerð, Háskóli Íslands, Líf- og umhverfisvísindadeild, Reykjavík.

Helgi Hallgrímsson 1969. Lífið í jarðveginum. Ársrit Ræktunarfélags Norðurlands 66:31–69.

Helgi Hallgrímsson 1975. Um lífið í jarðveginum IV. Smádýralíf jarðvegsins í ýmsum gróðurlendum. Ársrit Ræktunarfélags Norðurlands 72:28–44.

Helgi Hallgrímsson 1976. Um lífið í jarðveginum V. Árstíðabreytingar jarðvegsfánunnar. Ársrit Ræktunarfélags Norðurlands 73:16–30.

Helgi Hallgrímsson og Jóhannes Sigvaldason 1974. Um lífið í jarðveginum III. Athuganir á rannsóknarreitum á Víkurbakka sumarið 1969. Ársrit Ræktunarfélags Norðurlands 71:36–55.

Hlynur Óskarsson, Ólafur Arnalds, Jón Guðmundsson og Grétar Guðbergsson 2004. Organic carbon in Icelandic Andosols: geographical variation and impact of erosion. Catena 56:225–238.

Hólmfríður Sigurðardóttir 1994. Ánamaðkar. Náttúrufræðingurinn 64:139–148.

Hólmfríður Sigurðardóttir og Guðni Þorvaldsson 1994. Ánamaðkar (Lumbricidae) í sunnlenskum túnum. Búvísindi 8:9–20.

Hreggviður Norðdahl, Ólafur Ingólfsson, Halldór G. Pétursson og Margrét Hallsdóttir 2008. Late Weichselian and Holocene environmental history of Iceland. Jökull 58:343–364.

Högni Böðvarsson 1961. Margt býr í jörðinni. Náttúrufræðingurinn 31:56–69.

Högni Böðvarsson 1989. Jarðvegsdýr. Í: Hrefna Sigurjónsdóttir og Árni Einarsson (ritstj.), Pöddur. Rit Landverndar 9:101–111.

Jeffery, S., C. Gardi, A. Jones, L. Montanarella, L. Marmo, L. Miko, K. Ritz, G. Peres, J. Römbke og W.H. van der Putten, (ritstj.) 2010. European Atlas of Soil Biodiversity. European Union, Office of Publications of the European Communities, Luxemburg.

Jóhannes Sigvaldason 1973. Um lífið í jarðveginum II. Nokkrar athuganir á dýralífi í tilraunareitum á Akureyri. Ársrit Ræktunarfélags Norðurlands 70:51–62.

Madeira, M., G. Füleky og E. Auxtero 2007. Phosphate sorption of European volcanic soils. Í: Ólafur Arnalds, F. Bartoli, P. Buurman, Hlynur Óskarsson, G. Stoops og E. García-Rodeja (ritstj.), Soils of Volcanic Regions of Europe. Springer, Heidelberg, Holland. Bls. 325–351.

Magnús Á. Sigurgeirsson, Ólafur Arnalds, Sigurður E. Pálsson, B.H. Howard og Kjartan Guðnason 2005. Radiocaesium fallout behaviour in volcanic soils in Iceland. Journal of Environmental Radioactivity 79:39–53.

Margrét Hallsdóttir og C. Caseldine. The Holocene vegetation history of Iceland, state-of-the-art and future research. Í: C. Caseldine, A. Russell, J. Harðardóttir og Ó. Knudsen (ritstj.), Iceland – Modern Processes and Past Environments. Developments in Quaternary Science 5, Elsevier, Amsterdam, Holland. Bls. 319–334.

María Svavarsdóttir 2018. Soil nutrients, properties and carbon stock comparison between native and non-native ecosystems in Þingvellir, Iceland. MS-ritgerð (óbirt). Háskóli Íslands. Reykjavík.

Ólafur Arnalds 1990. Characterization and erosion of Andisols in Iceland. PhD dissertation, Texas A&M University, College Station, Texas, USA.

Ólafur Arnalds 2010. Dust sources and deposition of aeolian materials in Iceland. Icelandic Agricultural Sciences 23:3–21.

Ólafur Arnalds 2015. The Soils of Iceland. Springer, Dordrecht, Holland.

Ólafur Arnalds og J. Kimble 2001. Andisols of Icelandic deserts. Soil Science Society of America Journal 65:1778–1786.

Ólafur Arnalds, Berglind Orradóttir og Ása L. Aradóttir 2013. Carbon accumulation in Icelandic desert Andosols during early stages of restoration. Geoderma 193–194:172–179.

Ólafur Arnalds, Bergrún Arna Óladóttir og Rannveig Guicharnaud 2005. Aðferðir við að lýsa jarðvegssniðum. Rit LbhÍ nr. 5. Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.

Ólafur Arnalds, C.T. Hallmark og L.P. Wilding. 1995. Andisols from four different regions of Iceland. Soil Science Society of America Journal 59:161–169.

Ólafur Arnalds, Hlynur Óskarsson, Jón Guðmundsson, Sigmundur Helgi Brink og Fanney Ósk Gísladóttir 2016. Icelandic inland wetlands: Characteristics and extent of draining. Wetlands 36:759–769.

Ólafur Arnalds, F. Bartoli, P. Buurman, Hlynur Óskarsson, G. Stoops og E. García-Rodeja (ritstj.) 2007. Soils of Volcanic Regions of Europe. Springer, New York, USA.

Ólafur B. Bjarnason 1952. Íslenzkur mór. Fjörlit Rannsóknaráðs nr. 3, Reykjavík.

Ólafur B. Bjarnason 1966. Íslenzkur mór. Atvinnudeild Háskóla Íslands, Reykjavík.

Stoops, G., M. Gérard og Ólafur Arnalds 2008. A micromorphological study of Andosol genesis in Iceland. Í: S. Kapur, A. Mermut og G. Stoops (ritstj.), New Trends in Micromorphology. Springer, Heidelberg, Holland. Bls. 67–90.

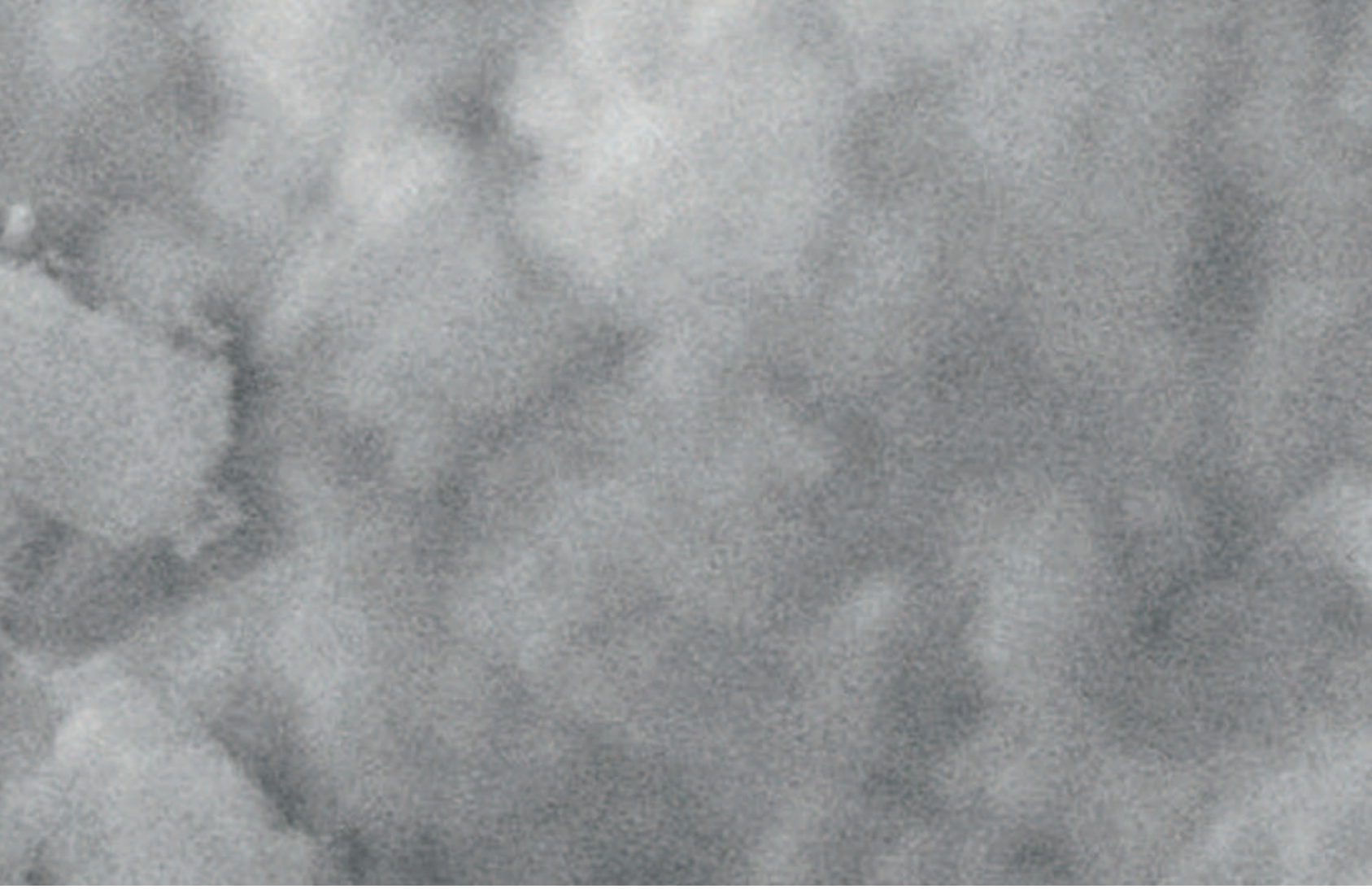
Tómas Grétar Gunnarsson, Ólafur Arnalds, G. Appleton, V. Méndez og J.A. Gill 2015. Ecosystem recharge by volcanic dust drives broad-scale variation in bird abundance. Ecology and Evolution 5:2386–2396. doi:10.1002/ece3.1523.

Whisenant, S. 1999. Repairing Damaged Wildlands: A Process-Orientated, Landscape-Scale Approach. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Þorleifur Einarsson 1991. Jarðfræði. Myndun og mótun lands. Mál og menning, Reykjavík.

Þorsteinn Guðmundsson 1978. Pedological studies of Icelandic peat Soils. PhD.-ritgerð, University of Aberdeen, Skotland.

14 Foldin þróast – jarðvegsmyndun



Mynd 14.1. Allófanský sem myndað er af ógrynni allófaneininga (steinda). Mynd: Stephan Kaufhold og Reiner Dohrmann. Myndin er fengin af vef „Images of Clay Archive of the Mineralogical Society of Great Britain & Ireland and The Clay Minerals Society“ (https://www.minersoc.org/images-of-clay.html).

14.1. Inngangur

Efnaveðrun og starfsemi lífvera í moldinni valda því að móðurefnin leysast smám saman upp. Örlög þeirra efna sem losna við efnaveðrun eru æði misjöfn. Sum þeirra skolast fremur greiðlega niður úr moldinni, ekki síst neikvætt hlaðnar jónir á borð við klór (Cl^-).

Sum efnanna ná nægjanlegum styrkleika í jarðvegslausninni til þess að geta myndað ný efnasambönd með öðrum sem losnað hafa. Langstærsti hluti bergefna er kísill (Si) og ál (Al) þar sem storkuberg er ríkjandi en kalsíum (Ca) á kalksteinssvæðum. Ál og kísill eru uppistaðan í flestum síðsteindum (eða ummyndunarsteindum; e. secondary minerals) sem kristallast í jarðveginum við efnaveðrun, ásamt súrefni og vetni úr vatninu.

Flestar leirsteindir eru myndaðar úr fjórhyrnu-einingum (e. tetrahedron) kísils og súrefnis (Si og O) og átthyrnu-einingum (e. oktahedron) áls og hýdroxíðs (Al og OH – sjá 2. kafla um bergefni). Leirsteindir eru, eins og áður sagði, sá hluti jarðvegsins sem mótar flesta eiginleika hans ásamt lífrænum efnum. Á Íslandi á sér stað ör efnaveðrun og þær leirsteindir sem myndast eru fyrst og fremst allófan (mynd 14.1), ímógólít og ferrihýdrít.

Hugmyndir um samsetningu moldar á Íslandi mótuðust lengi vel af því að hún var talin snauð af leir. Fyrstu ummerki um allófan í skrifum um íslenskan jarðveg birtust í viðauka við bók Björns Jóhannessonar, *Soils of Iceland*, (1960) sem ritaður er af Hsin Yuan Tu, þar sem minnst var á mögulega tilvist allófans. Sigurbjörn Einarsson (1979) skrifaði óbirta námsritgerð um allófan á Íslandi við Landbúnaðarháskólann í Ási í Noregi. En það var ekki fyrr en um 1990 sem skilningur á leirsteindafræði jarðvegs á Íslandi tók að þróast ört fram á við með birtingu vísindagreina.

Staðhæfingar þess efnis að engin efnaveðrun eigi sér stað í íslenskum jarðvegi og að hér sé enginn leir í moldinni eru ennþá til staðar í bókum um náttúru Íslands. Þessar ályktanir voru skiljanlegar þar sem loftslag telst kalt á Íslandi og venjulegar aðferðir sem tíðkast við rannsóknir á leir, svo sem notkun röntgengeisla, náðu ekki að greina leirinn í moldinni. Einnig virka venjulegar kornastærðar-greiningar ekki á *eldfjallajörð* og þar með íslenska mold. Rannsóknir síðari tíma sýna hins vegar að efnaveðrun á Íslandi er ákaflega hröð, sem stuðlar, ásamt sérstökum umhverfisaðstæðum og mannlegum áhrifum, að mjög sérstæðum jarðvegsgerðum.

14.2. Leirefnin

14.2.1. Hvaða leirsteindir?

Leir og lífræn efni eru þeir þættir í vef moldarinnar sem hafa hvað mest áhrif á eiginleika hennar. Áður hefur verið fjallað um leirefni í *eldfjallajörð* sem eru afar frábrugðin þeim leirsteindum sem finnast í öðrum jarðvegi. Allófan og ferrihýdrít eru mest áberandi í íslenskri mold, sem og ímógólít.

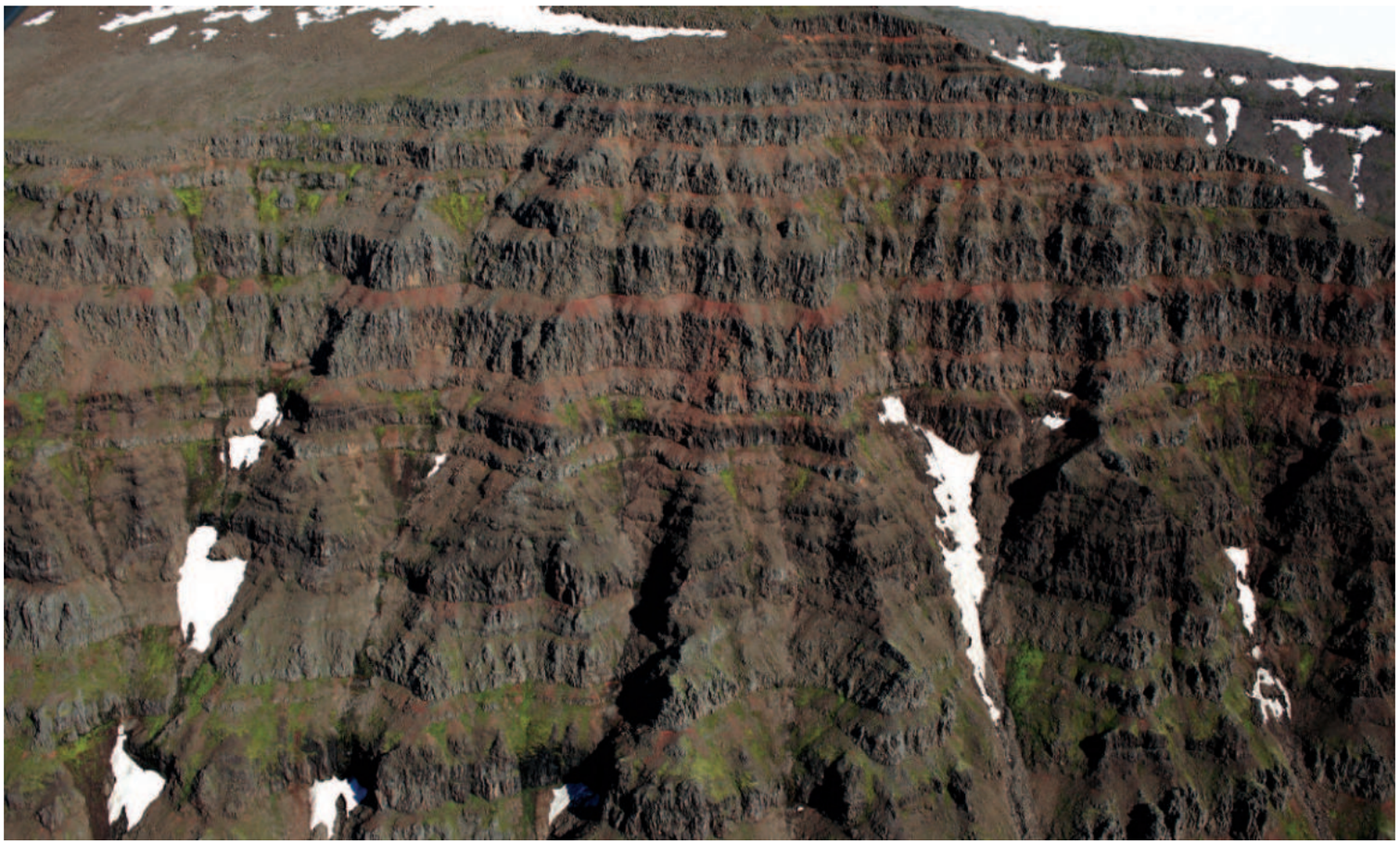
Eru þá ekki aðrar leirsteindir í íslenskri mold? Það skortir nokkuð á rannsóknir til að skera úr um það. Þó er ljóst að mikill fjöldi leirsteinda kemur fyrir á jarðhitasvæðum, m.a. smektít, götheít og fleiri járnsteindir, kaólínítsteindir, klórít o.fl. (t.d. Sigurður Markússon og Andri Stefánsson, 2011; Björke et al. 2015). Brennisteinn (S) í ýmsu formi og ýmsar leirsteindir gefa jarðhitasvæðum hina fjölbreytilegu litasamsetningu. Þá geta leynst setlög nálægt yfirborði sem eru leifar gamalla jarðhitakerfa þar sem blaðsilíköt og ýmsar aðrar síðsteindir

getur verið að finna, jafnvel námur þar sem fá má efni til leirbrennslu og annarra nota. Margvíslegar leirsteindir er einnig að finna í hinum svonefndu rauðu millilögum sem víða eru einkennandi fyrir tertíer hraunlagastaflann (mynd 14.2). Aflræn veðrun með frosti og þýðu, vatnsrennsli og skriðuföllum geta skilað slíkum efnum út í umhverfið. Leirinn sem berst með þeim hætti verður hluti af moldinni.

Fundist hafa merki um smektít í jarðvegi í dölum á Austurlandi (Marcus Kleber og ÓA, óbirt gögn) sem líklega á slíkan uppruna, en ekki hefur verið gerð ítarleg leit við þessar aðstæður. Hólmgeir Björnsson (1961) fann einnig ummerki um smektít í jarðvegi og stakk einnig upp á uppruna þess í bergi frá tertíer. Þá hefur fundist afar illa kristallað smektít í móhellunni á Suðurlandi sem hluti af þeim efnum sem líma hana saman (Martin Gerrard og Folkert van Oort, óbirt gögn úr COST 622-starfi, ÓA o.fl. 2007). Einnig hafa fundist merki um illa kristölluð blaðsilíköt í jarðvegi hér og þar. Athyglisvert er að Bonatotzky o.fl. (2021, 2022) fundu merki um klórít í fremur ungum súrum jarðvegi á Suðausturlandi, sem þau töldu að gæti átt uppruna í nálægum berglögum eða hafa borist með foki til landsins. Þá fann sami rannsóknahópur (Bonatotzky o.fl. 2019) ummerki um smektít og jafnvel fleiri lagsilíköt í votlendisjarðvegi á Suðausturlandi en uppruni þeirra er fremur óljós – þ.e. aðflutt efni eða mynduð á staðnum. Einnig hafa fundist merki um járnsteindina lepidókrósít í votlendismold á Vesturlandi (Thomas Arrigo o.fl. 2022). Þorsteinn Guðmundsson (2009) fann síderít (járnkarbónat) í mýri á Vesturlandi. Ljóst er að frekari rannsóknir á margvíslegum efnum í *mýrajörð* eiga eftir að skila mun flóknari samsetningu síðsteinda sem myndast við þessar aðstæður og þá einkum járnsteinda. Engin blaðsilíköt fundust hins vegar þrátt fyrir ítarlega

Ör efnaveðrun á Íslandi

Staðhæfingar um skort á efnaveðrun í íslenskri mold eru rangar og ættu alls ekki að sjást í efni sem notað er til kennslu í náttúrufræðum á Íslandi nú til dags. Efnaveðrun í mold er mjög ör hérlendis.



Mynd 14.2. Rauð millilög á milli hraunlaga í tertíer-staflanum í Norðfirði á Austurlandi. Þau innihalda margvíslegar síðsteindir, þeirra á meðal lagsilíköt á borð við smektít, sem geta síðan borist í jarðveginn fyrir neðan við veðrun og rof. Ljósmynd: Birgir V. Óskarsson.

rannsóknavinnu á nokkrum fjölda moldarsýna sem tekin voru úr *brúnjörð* og *votjörð*, m.a. í samvinnu við japanska vísindamenn (Wada o.fl. 1992; Ólafur Arnalds, 1994) og í tengslum við vinnu COST 622-hópsins á Íslandi (ÓA o.fl. 2007). Í það heila bendir allt til þess að allófan, ímógólít og ferrihýdrít ráði eiginleikum moldarinnar í langflestum tilfellum en blaðsilíköt í mun minna mæli og stundum ekki sem neinu nemur.

14.2.2 Hversu mikið er af leir í íslenskri mold?

Hvað er mikið af leir í íslenskum jarðvegi? Sem fyrr sagði var lengi vel talið að enginn leir væri í moldinni sökum þess að hann fannst ekki með hefðbundnum aðferðum og skorti samloðun sem blaðsilíköt ljá jarðvegi.

Þeir erfiðleikar sem við er að eiga þegar mæla á leir með hefðbundnum aðferðum í íslenskri mold koma vel fram á meðfylgjandi grafi fyrir sýni sem hafa bæði verið mæld með algengustu aðferðinni (pípettu-aðferð) og oxalat-skoli (mynd 14.3). Lóðrétti ásinn gefur til kynna raunverulegt leirmagn, sem er að stærstum hluta á milli 15 og 30% í þessu tiltekna safni sýna. Pípettu-aðferðin (láréttur ás), sem er algengasta aðferðin við mælingu á kornastærð, gefur nánast tilviljanakenndar upplýsingar um leirmagnið og sú aðferð gefur að meðaltali um 10 x lægri tölur en oxalat-skolið.

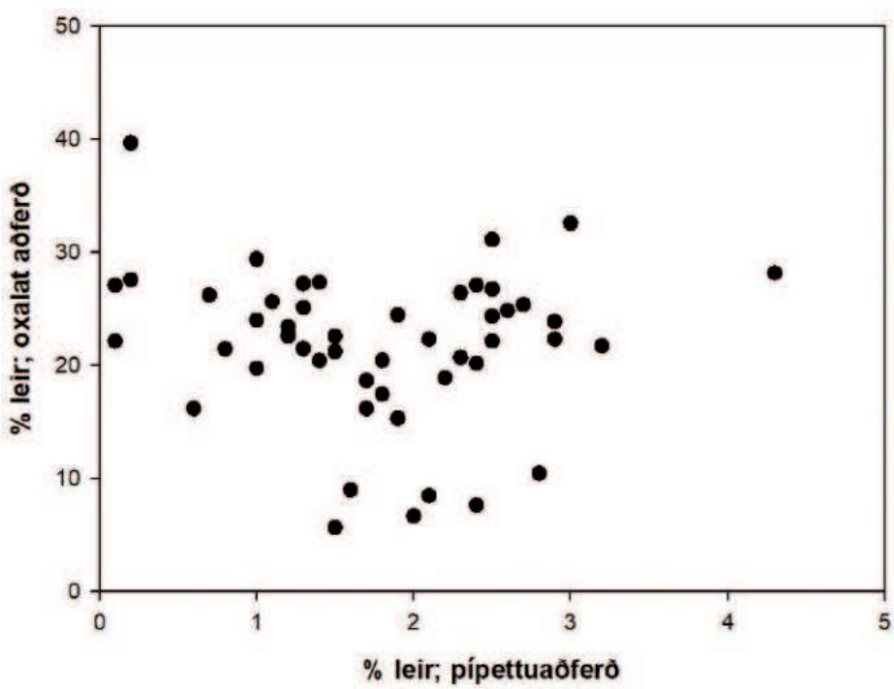
Meintur skortur á leir í íslenskri mold var áður útskýrður með því að hér á landi væri svo kalt að það hamlaði efnaveðrun þannig að ekki myndaðist neinn leir. En eins og komið hefur á daginn er efnaveðrun einmitt afar ör á Íslandi eins og annars staðar þar sem til fellur basísk gjóska. Það var á brattann að sækja að setja fram slíkar hugmyndir í upphafi (Wada o.fl. 1992, Ólafur Arnalds 1994),[1] enda er ekki svo ýkja langt síðan allófan- og ferrihýdrít-leirsteindir voru teknar í hóp „viðurkenndra steinda“ meðal leirsteindafræðinga.

Fljótlega varð ljóst að leirmagnið var umtalsvert og jafnvel mikið í sumum jarðvegslögum. En þó er það kannski meira einkennandi hve leirinnihald er breytilegt innan jarðvegssniða á milli mismunandi jarðvegsgerða og á landsvísu. Lítum t.d. á magn allófans í fjölda jarðvegssýna úr gagnagrunni LbhÍ, en þar er magn leirs sýnt á lóðrétta ásnum en kolefnisinnihald á lárétta ásnum (mynd 14.4).

Grafið á mynd 14.4 spannar nokkra jarðvegsflokka: *glerjörð* sem alla jafna er snauð af leir, *brúnjörð*, *votjörð*, *svartjörð* og *mójörð* (sem hafa mest af kolefni). Hér eru sýni sem hafa allt að 28% allófaninnihald, sem telst hátt, en enn meira hefur verið mælt af leir í öðrum sýnum. Mikil ummyndun (efnaveðrun) hefur orðið í moldinni þar sem svo há gildi mælast (sjá einnig Birgi Óskarsson o.fl. 2012). En meirihluti sýnanna hefur mun minna af allófani, algengustu gildin liggja á milli 5 og 18%. Ljóst er að hæstu gildin fylgja *brúnjörð* og *votjörð*,

1. Þegar höfundur kynnti niðurstöður sínar um leir í íslenskum jarðvegi á ráðstefnu Jarðfræðafélags Íslands, eftir að hafa lokið doktorsnámi í Texas, stóð einn af þekktari jarðfræðingum landsins upp og mótmælti niðurstöðunum – þær gætu ekki átt við rök að styðjast. Það sama gerðist eftir fyrirlestur fyrir landbúnaðarfólk þar sem einn fundargesta mótmælti harðlega niðurstöðunum – efnaveðrun í íslenskri mold myndaði ekki leirsteindir. Annar fundargesta þverneitaði því að unnt væri að tala um jarðveg á íslenskum auðnum.

Nokkuð erfiðlega gekk að koma niðurstöðum um leir í íslenskri mold á framfæri hérlendis, en þær birtust þó í *Náttúrufræðingnum* 1994. Nokkru síðar staðfestu rannsóknir Sigurðar Reynis Gíslasonar að efnaveðrun á Íslandi er mjög ör. Nú eru þetta viðteknar staðreyndir.



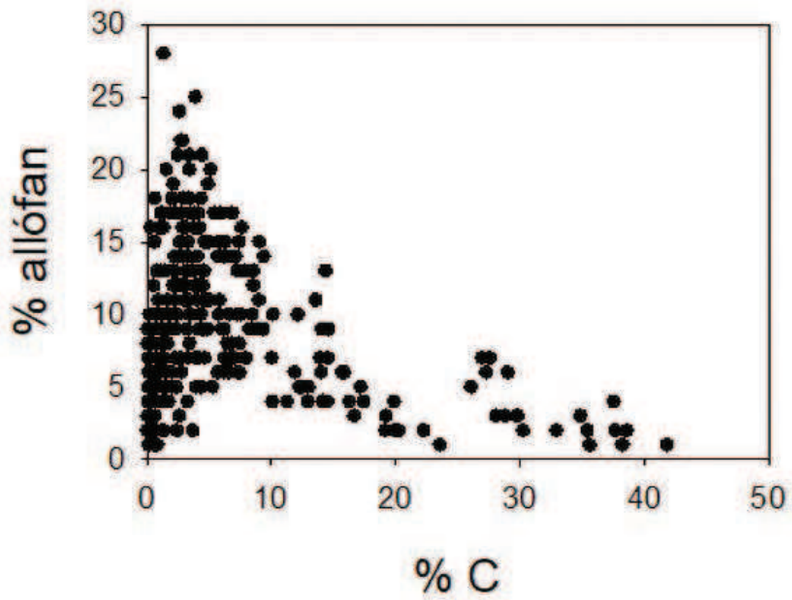
Mynd 14.3. Dæmi um mælingu á leirinnihaldi með oxalat-skoli og hefðbundinni aðferð (pípettu-aðferð) frá sömu íslensku sýnunum. Leirinn kemur ekki fram með þessari hefðbundnu aðferð (láréttur ás) en mælist allt að 40% með oxalat-aðferðinni í þessum sýnum (lóðréttur ás).

með meðalgildi kolefnis 1–10% C, en *svartjörð* og *mójörð* hafa mun minna af allófani. Í lífræna jarðveginum eru áljónir sem losna við veðrun gripnar af lífrænum sameindum til að mynda lífrænar fjölliður (MHK, sjá 10. kafla um *eldfjallajörð*). Rétt er að taka það fram að hluti þess efnis sem hér er sýnt sem allófanleir telst til ímógólíts, sem þó er mun minna af, en réttara væri kannski að tala um allófan og ímógólít.

Alla jafna er nokkru minna af ferrihýdríti en allófani í moldinni (mynd 14.5). Hæstu gildin (>20%) eru fengin við mælingar á rauðum dílum í jarðveginum. En þó að þessi gildi séu mun lægri en fyrir allófan er mun meira af ferrihýdríti en almennt finnst í *eldfjallajörð* annars staðar í heiminum. Ástæða þessa er hve móðurefni moldarinnar – basísk gjóska og önnur bergefni – eru rík af járni.

Ferrihýdrít myndast þegar járn losnar við veðrun á basískum móðurefnum. Það berst um jarðveginn í lausn sem tvígilt járn (Fe^{++}) sem getur gert jarðvegslausnina fagurbláa (mynd 14.6). Það er hins vegar ferrihýdrítið sem gefur moldinni hinn dæmigerða rauða lit og það þarf lítið af því til að moldin litist, jafnvel örfá prósent. Basísk gjóska í jafnmiklu magni og hér þekkist er óalgeng sem móðurefni – flest stór basísk eldgos framleiða fyrst og fremst hraunlög. Því má segja að hlutfallslega mikið magn ferrihýdríts sé eitt af megineinkennum moldar á Íslandi. Svipað mikið magn af ferrihýdríti finnst þó einnig þar sem ung basísk hraun veðrast ört í röku og hlýju loftslagi, t.d. á Havaí, en við þær aðstæður er ferrihýdrítið ekki stöðugt mjög lengi, það umbreytist smám saman í götheít og aðrar járnsteindir. Aðgengileg umfjöllun um járnsteindir í íslenskum jarðvegi eftir Þorstein Guðmundsson birtist í *Fræðaþingi landbúnaðarins* (2009).

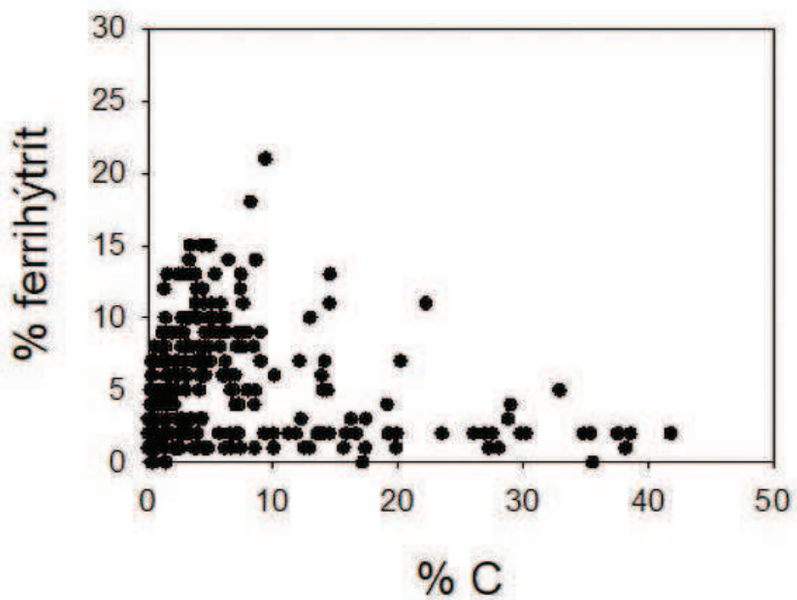
Besta leiðin til að meta heildarmagn leirs í íslenskri mold er að leggja saman



Mynd 14.4. Allófan í moldarsýnum. Gögn úr gagnagrunni LbhÍ (Ýmir). Magn leirs í moldarsýnunum er afar breytilegt. Minna er um leir í lífrænum jarðvegslögum af ýmsum ástæðum (út til hægri á x-ás).

magn allófans og ferrihýdríts (allófan telur hér einnig ímógólít þar sem oxalataðferðin gerir ekki greinarmun þar á milli). Dæmigerð gildi fyrir heildarmagn leirs eru á milli 10 og 30%.

Mest er af leir í *votjörð* og *brúnjörð* þar sem jarðvegur er ekki mjög grófur vegna öskufalls eða grófs áfoks. Leirmagn er meira á láglendi en á hálendinu því efnaveðrun er örari eftir því sem hitastig



Mynd 14.5. Ferrihýdrít í íslenskum jarðvegi og tengsl þess við kolefnisinnihald.

er hærra. Leirmagn eykst iðulega með vaxandi lífrænu innihaldi á bilinu 1–7%, eða þar til það nær eins konar toppi við 6–7% C, en síðan lækkar leirmagnið eftir því sem meira verður af kolefni. Allófan- og ferrihýdrít-myndun ræður ferðinni við hærra pH-gildi (5,5–6,5), og ef rask á borð við þunga beit, rof, mikið áfok eða gjóskufall er ekki mikið má segja að ríki friður fyrir efnaveðrun, en jafnframt safnast lífræn efni fyrir í jarðveginum.

Meira safnast fyrir af lífrænum efnum þar sem pH er lægra (t.d. 5 eða lægra) og þar ráða málm-húmus-fjölliður ferðinni en allófan myndast síður. Af-oxandi umhverfi í mýrum, lágur hiti og lágt sýrustig draga einnig úr myndun leirs. Samhengið á milli sýrustigs og myndunar allófans sést einkar vel á mynd 14.7. Allófan myndast í afar takmörkuðum mæli við sýrustig sem er lægra en 5, en jarðvegur með pH <5 er jafnframt oftast lífrænn. Mest finnst af allófani við sýrustig í kringum 6, en við hærra sýrustig er jarðvegurinn oft mjög gjóskuríkur (jafnvel *glerjörð*).

14.2.3. Al/Si-hlutfall og binding kolefnis við allófan

Eitt af einkennum allófans er að Al/Si-hlutfallið er misjafnt, en upplýsingar um innihald þessara efna eru fengnar með oxalat- og pýrófosfat-skolunum (e. oxalate and phyrophosphate extractions) og upplýsingar um Al/Si-gildið með $(Al_{ox}–Al_{pyr})/Si_{ox}$.

Oftast er hlutfall Al/Si nálægt 2 í *eldfjallajörð* víðs vegar um heiminn (Shoji o.fl. 1991, Parfitt og Kimble 1989) og annar útbreiðslutoppur er nálægt 1,5, en lægri gildi koma einnig fyrir. Hlutfallið

Mynd 14.6. Mýrarauði og blámi. Bláminn er afoxað járn (Fe^{++}) sem fellur skjótt út sem ferrihýdrít, sem er hinn dæmigerði mýrarauði. Myndunin er örvuð af jarðvegsörverum.

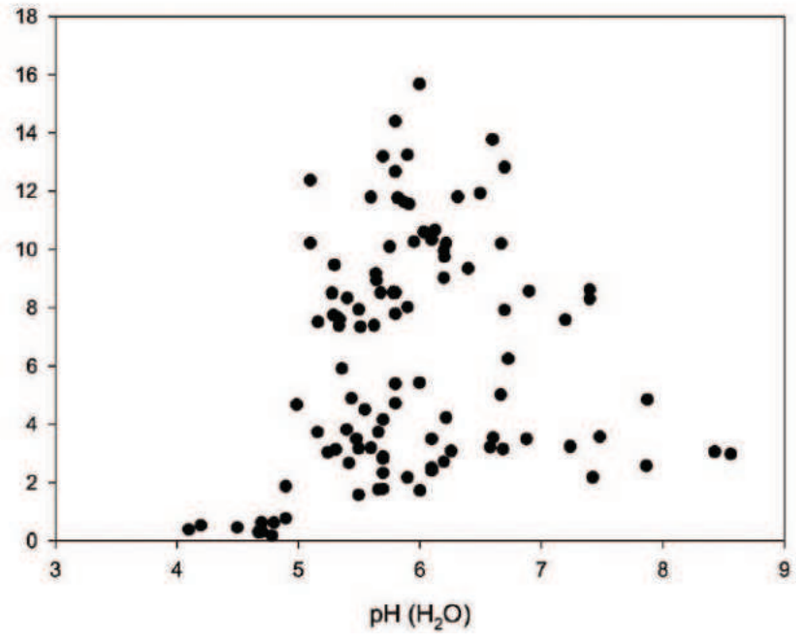
Al/Si í íslenskri mold er yfirleitt á bilinu 0,8–2, en athyglisvert er að hlutfallið er yfirleitt afar lágt í *glerjörð*, eða nálægt 1. Töluvert er um mold með allófani með Al/Si-hlutfall um 1,2. Hlutfallið er því almennt séð fremur lágt í íslenskri mold miðað við annan jarðveg eldfjallasvæða, sem m.a. er rakið til þess hve mikið er ennþá af gleri í íslensku moldarkerfunum (sjá nánar 9. kafla í *The Soils of Iceland*, ÓA 2015).

Sem fyrr segir eru Al og Fe sem losna við pýrófosfat-skolun (Al_{pyr} og Fe_{pyr}) einkum bundin við lífræn efni á formi málm-húmus-knippa eða fjölliða (MHK). Magn MHK tengist einkum sýrustigi jarðvegs og heildarmagni lífrænna efna. Hlutfallið $(Al+Fe)_{pyr}/C$ í málm-húmus-komplexum í *eldfjallajörð* er yfirleitt á bilinu 0,1–0,25 (Dahlgren o.fl. 1993; Nanzyo o.fl. 1993; Rodriguez Rodriguez o.fl. 2006). Með því að nota þetta hlutfall má áætla að 20–80% kolefnis í íslenskri mold sé á formi málm-húmus-komplexa. Gagnagrunnur Landbúnaðarháskólans sýnir ágætlega samhengi á milli Al_{pyr} og kolefnisinnihalds (mynd 14.8). Punktarnir dreifast þó ansi vítt um grafið, enda hafa bæði sýrustig og hitastig áhrif á myndun málm-húmus-komplexanna. Það er athyglisvert að MHK eru drjúgur hluti lífrænna efna, jafnvel við sýrustig hærra en 6 á Íslandi, en við svo hátt pH er þess að vænta að MHK sé einkum á formi allófan- og ferrihýdrít-MHK-tenginga.

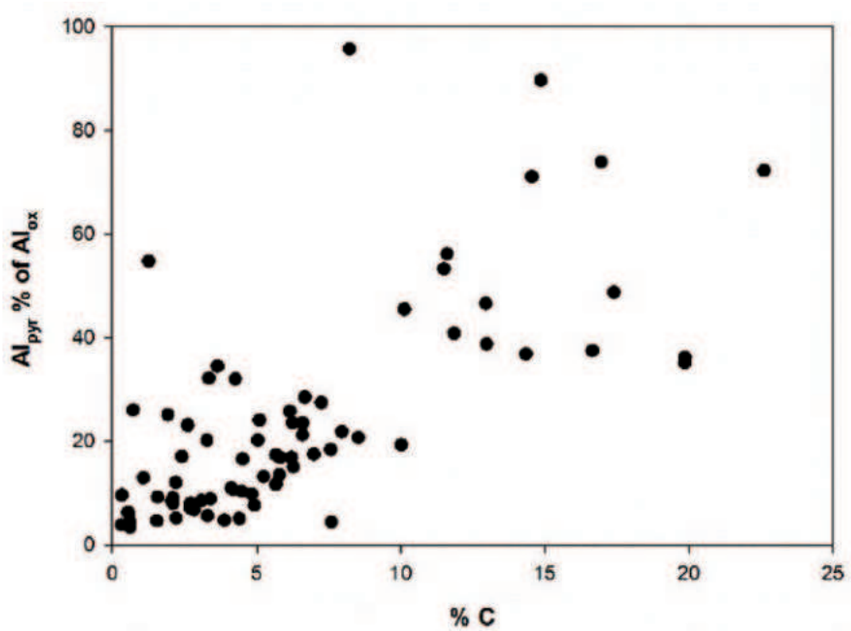
Ímógólít fannst í nokkrum en ekki öllum jarðvegslögum sem rannsökuð voru af Wada o.fl. (1992). Almennt séð er aðeins talað um allófanleir í íslenskum jarðvegi en ekki um ímógólít, þó að það sé sannarlega víða til staðar, en eiginleikar þessara steinda eru mjög hliðstæðar.

14.2.4. Um ferrihýdrít

Leirsteindin ferrihýdrít er almennt mjög virk og hefur mikið yfirborðsflatarmál og mikla vatnsheldni. Ferrihýdrít er steindin sem gefur moldinni hinn rauða lit. Hún er afar smá (3–7 nm) illa kristölluð Fe^{3+}-steind (Schwertmann og Taylor 1989, Bigham o.fl. 2002), einskonar gel. Hún er að hluta til það sem við köllum mýrarauða á Íslandi. Viðamesta rannsóknin sem gerð hefur verið á járnsamböndum í mýrlendi landsins hingað til var framkvæmd af Thomas Arrigo o.fl. (2022).



Mynd 14.7. Magn allófans í yfirborðssýnum (0–15 cm dýpi) og tengsl þess við sýrustig. Sýni frá 38 stöðum vítt og breitt um landið. Sjá Magnús Á. Sigurgeirsson o.fl. 2005).



Mynd 14.8. Samband áls sem er bundið við lífræn efni (Al_{pyr}) og heildarmagns lífrænna efna. Málm-húmus-komplexar (Al_{pyr}) verða æ meira ráðandi eftir því sem jarðvegurinn er lífrænni og sýrustig hans lækkar. Gögn LbhÍ.

Öfugt við allófan er ekki um að ræða nein skýr tengsl sýrustigs eða lífrænna efna við magn ferrihýdríts. Yfirleitt er meira af ferrihýdríti í neðri lögum en yfirborðslögum. Líklegt er að frost sem stöðvar flæði vatns tímabundið um jarðveginn auki myndun ferrihýdríts (Garcia-Rodeja o.fl. 2007). Stoops o.fl. (2008) tóku eftir því að sumt af ferrihýdrítinu var á fyrsta stigi þess að þróast yfir í götheít, helstu járnsteind jarðvegs í heiminum.

14.3. Jarðvegsmyndun

Á ensku er hugtakið „soil genesis" notað um jarðvegsmyndun, sköpun og þróun moldar frá upphafi sem ómótaðs bergs til þess jarðvegs sem nú er til staðar. Í klassískum fræðum um jarðvegsmyndun er yfirleitt litið til hinna fimm svokölluðu jarðvegsmyndandi þátta, eins og rætt er um í 8. kafla, þ.e. loftslags, landslags, móðurbergs, lífríkis og tíma.

Allt eru þetta þættir sem skipta miklu hér á landi, en eyjan okkar er þó tiltölulega lítil og breytileiki þessara þátta er mun minni en tíðkast innan svæða á víðfeðmum meginlöndum. Björn Jóhannesson (1960), Bjarni Helgason (1968) og Guttormur Sigbjarnarson (1969) o.fl. tóku snemma eftir mikilvægi áfoksins, hinni basísku náttúru bergefnanna og afgerandi áhrifum þeirra á jarðvatnsstöðu. Bjarni Helgason gerði rannsókn um 1960 (birt 1968) á eðli og þróun jarðvegs á Suðvesturlandi, en þekking á *eldfjallajörð* var stutt á veg komin þegar rannsóknin var gerð. Efnaveðrun var talin lítil og uppsöfnun lífrænna efna aðallega talin orsakast að kaldri veðráttu. Bæði Björn Jóhannesson (1960) og Bjarni Helgason (1968) gerðu sér grein fyrir því að áfok hefur mikil áhrif á jarðveginn, m.a. að kolefnisinnihald í votlendi minnkar eftir því sem nær dregur gosbeltunum.

Upp úr miðri síðustu öld var sýn manna á moldina að mörgu leyti „jarðfræðileg", sem er eðlilegt vegna þess að tekið var mið af gjóskulagafræðum; þykknun jarðvegsins vegna áfoks var kölluð jarðvegsmyndun. Það má svo sem til sanns vegar færa en er þó ekki það sem átt er við í moldarfræði með hugtakinu jarðvegsmyndun. Áfok er aðeins einn af mörgum áhrifaþáttum jarðvegsmyndunar sem tekur einnig og kannski frekar til þess sem gerist ofan í moldinni. Á undanförnum árum hefur þekking á jarðvegsmyndun aukist verulega hérlendis og er margra þessara rannsókna getið í eftirfarandi texta.

Það eru nokkrir þættir sem hafa yfirgnæfandi áhrif á sköpunarsögu moldarinnar á Íslandi, en virkni þessara þátta er afar mismunandi eftir staðsetningu í landslagi og á landinu almennt. Þessir meginþættir eru taldir upp á bls. hér til hliðar en ekki í neinni sérstakri röð. Þrír þessara þátta eru meginþættir er ráða flokkun moldarinnar í grunnflokka (áfok, grunnvatnsstaða og auðnir, þar sem er *glerjörð*). Margir þeirra eru nátengdir.

14.3.1. *Sortujörð*

Hér er fyrst fjallað um *sortujörð,* sem er mold sem myndast á grónu yfirborði og tekur til *brúnjarðar*, *svartjarðar* og *votjarðar*. Það sem einkennir þróun *sortujarðar* í megindráttum er að hún verður fyrir áfoki og stundum gjóskufalli. Þessi efni eru að mestu basísk að efnasamsetningu og veðrast ört. Veðrun á basalti viðheldur sýrustiginu, en þess má geta að hugtökin „basalt" og „basískur" eru samstofna orð. Veðrunarhraðinn örvast af eðli áfoks-efnanna því mikið yfirborðsflatarmál og brotin efnatengi í glerinu gera efnin óstöðugri gagnvart niðurbroti. Efnaveðrun er því gríðarlega hröð, örari en gengur og gerist við aðrar aðstæður.

Meginþættir sem móta þróun íslenskrar moldar

- **Stöðugt áfok glerefna** sem leggst eins og teppi yfir landið og verður móðurefni moldarinnar sem þykknar í samræmi við áfokið.

- **Gjóskufallsatburðir – öskulög**, allt frá fínum þunnum öskulögum til þykkra grófra öskulaga sem eru mismunandi að samsetningu og veðrast misjafnlega hratt. Þykk og gróf gjóskulög sem eru kísilrík (t.d. líparít) veðrast afar hægt.

- **Ungur aldur yfirborðslaga** sem er viðhaldið með áfoki og eldgosum. Illa kristölluð basísk bergefni veðrast hratt, sem örvar veðrun og hefur áhrif á samsetningu og eiginleika moldarinnar.

- **Grunnvatnsstaða** ræður því hvort votlendi, hálfdeigja eða mold myndast á þurrlendi.

- **Uppsöfnun lífrænna efna** er eitt megineinkenni *sortujarðar*.

- **Þróun sortueiginleika** (e. andic soil properties), glereiginleika (e. vitric properties) eða móeiginleika (e. histic soil properties).

- **Breytilegt hitastig**, m.a. eftir hæð yfir sjávarmáli, hallaátt, landshlutum o.fl. Hitastig hefur áhrif á veðrunarhraða, rotnun, örverustarfsemi og frjósemi vistkerfa.

- **Frost og þýða** móta íslensk vistkerfi með afgerandi hætti og viðhalda auðnum (m.a. vegna frostlyftingar og myndun ísnála). Um er að ræða ferli við hnignun lands sem mótar jarðvatnsstöðu, oxunar- og afoxunarferli.

- **Gróðurfar og landnýting**. Öflugt gróðurfar tengist virkri næringarhringrás og örum efnaferlum. Landnýting hefur áhrif á kolefnisinnihald sem síðan hefur áhrif á flesta aðra eiginleika moldarinnar. Minnkað kolefni getur valdið hruni vistkerfis – kolefnisforði í mold á þurrlendi er víðast hvar langt undir því sem eðlilegt getur talist í heilbrigðum vistkerfum.

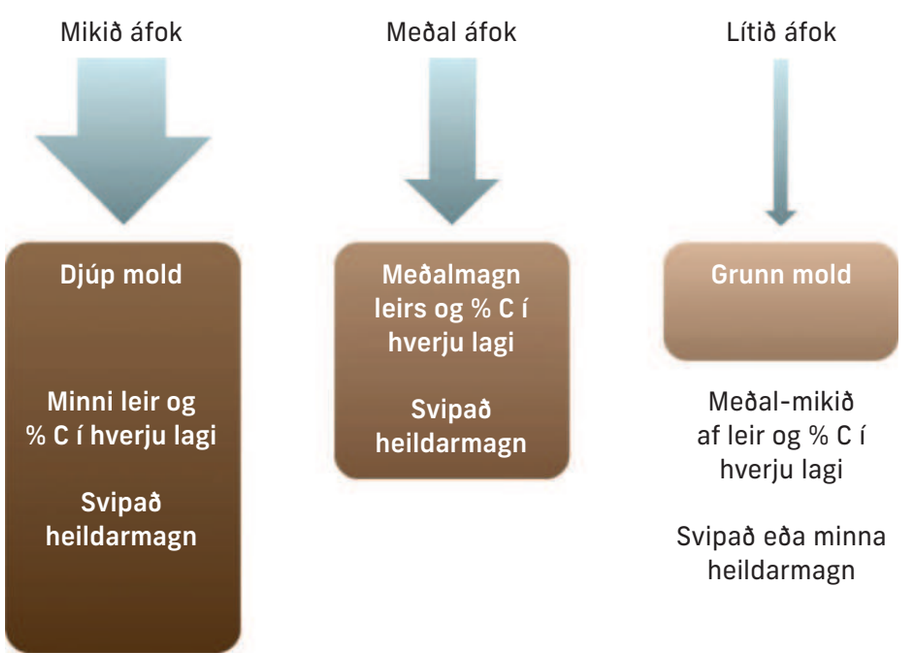
- **Mikið rof** mótar yfirborðið, eyðir vistkerfum og veldur tilflutningi á moldarefnum sem m.a. setjast aftur til og auka á jarðvegsþykknun.

- **Mikil útbreiðsla auðna** og *glerjarðar*, sem verður að teljast meðal einkenna íslenskrar náttúru.

- **Aðrir þættir** á borð við mikla útbreiðslu urðarhlíða. Móbergshlíðar eru sérstakar fyrir Ísland, en einnig eru kalksteinsfjörur víða áberandi.

Við það myndast steindirnar allófan, ímógólít og ferrihýdrít, sem áður var rætt um. Veðrunarhraðinn er örastur í yfirborðslögum sem hafa hvað mesta lífvirkni, eins og Bergur Sigfússon o.fl. (2008) og Birgir V. Óskarsson o.fl. (2012) hafa sýnt fram á í rannsóknum sínum. Það hægist á veðrunarhraðanum eftir því sem lögin grafast smám saman undir stöðugu áfoki en veðrunin stöðvast þó ekki.

Áfokshraðinn er vitaskuld mjög misjafn, örastur næst virkustu áfoksuppsprettunum en hægari fjær. Einnig er rétt að halda því til haga að veðrunarhraði getur verið ákaflega mismunandi innan sniða, og fer það allt eftir eðli efnanna í hverju jarðvegslagi. Kísilrík líparítkorn, t.d. frá Heklu (H1, H3, H4, sem eru mjög víða í sniðum), sýna yfirleitt ekki mikil merki um veðrun, og jafnvel ekki basísk gjóska ef hún er mjög gróf (t.d. gjóskulag „a“ frá 1480 á Norðausturlandi, sjá síðar). Þessi munur kemur einmitt mjög vel fram í því að líparítgjóskulag úr Öræfajökli frá 1362 er lítið veðrað á láglendi Suðausturlands, enda þótt hitastig þar sé fremur milt og úrkoma mikil á svæðinu (sjá Bonatotzky o.fl. 2019).



Mynd 14.9. Samspil áfokshraða, myndunar leirs og uppsöfnunar kolefnis.

Þar sem áfokið er lítið haldast áfoksefnin lengi í hinu virka yfirborðslagi áður en þau grafast undir meira áfoki: efnin fá lengri tíma til að veðrast við yfirborðið. Með öðrum orðum: það ríkir sérstakt samspil á milli efnaveðrunar og áfokshraða (mynd 14.9). Þar sem áfokið er umtalsvert myndast hlutfallslega minna af leir (áður en lagið grefst), en hraði efnaveðrunar er eigi að síður mjög ör. Þessi veðrun stjórnar síðan efnafræði vatnsins og myndun steindanna (sjá m.a. Berg Sigfússon 2004). En með tímanum hægir á veðrunarhraðanum eftir því sem gengur á þau glerbrot sem veðrast hvað auðveldast.

Þar sem áfokshraðinn er minnstur er þess að vænta að lífrænt innihald sé mun meira í hverju jarðvegslagi en þar sem áfokið er ört. Lífrænu efnin binda hluta af Al og Fe sem losnar við veðrunina sem málm-húmus-knippi og þar af leiðandi er leirmyndun ekki eins ör. Hins vegar er mikilvægt að líta ekki aðeins til hlutdeildar leirs og kolefnis (% C og % leir) heldur einnig til heildarmagns þessara efna (mælt í kg í rúmmetra eða kg á fermetra). Yfirleitt er ekki eins mikill munur á heildarmagni kolefnis og leirs á milli moldar sem verður fyrir mismiklu áfoki (sjá meðfylgjandi mynd).

Heildarmagn efna sem myndast við efnaveðrun er jafnvel mest í djúpa sniðinu enda þótt magn leirs í hverju lagi (%) sé mun minna en í grunna jarðveginum. Hér skiptir mismikil rúmþyngd miklu máli, en hún er hærri að meðaltali í djúpu moldinni þar sem áfok er mikið – mold með litlu af leir og lífrænum efnum er þyngri í sér en leirrík og lífræn mold.

Þau efni sem losna við efnaveðrunina bindast ekki öll í moldinni, heldur skolast hluti þeirra úr jarðveginum, t.d. mikið af Ca^{++}, Mg^{++}, K^{+} og Na^{+}, og berast t.d. til sjávar með ám og lækjum. Þetta hefur verið nefnt efnarof eða jarðefnarof (e. geochemical denudation)

og er oft mælt í tonnum sem berast af hverjum ferkílómetra eða öðrum svipuðum einingum (t/km² á ári). Hröð efnaveðrun í moldinni endurspeglast í öru jarðefnarofi. Efnarof á Íslandi hefur verið rannsakað af Sigurði R. Gíslasyni og félögum (sjá t.d. yfirlitsgrein 2008, og einnig Sigurð Gíslason o.fl. 2009) og niðurstöðurnar sýna að það er mjög ört.

Gildum sem sýna þykknun jarðvegs má einnig breyta í grömm áfoksefna á fermetra á ári. Magn áfoksefna getur verið frá fáum grömmum til >500 g/m² á ári (ÓA 2010), og er þá ekki tekið tillit til efnaveðrunar sem hefur mest áhrif á lægstu gildin. Hæstu gildin teljast mjög há á heimsmælikvarða, enda er áfokið meginþáttur í mótun náttúru Íslands, sem fyrr segir. Það er þó ekki aðeins á Íslandi þar sem áfok hefur mikil áhrif á myndun jarðvegs, það kemur einnig við sögu nærri öðrum eyðimerkursvæðum, svo sem í Afríku og Bandaríkjunum, þar sem áhrif áfoks eru iðulega vanmetin (Rasmussen o.fl. 2017), en óvíða annars staðar er áfok jafnráðandi í myndun jarðvegs og á Íslandi.

Höfundur þessarar bókar hefur á ferli sínum notað jarðvegssnið frá Goðafossi (mynd 14.10) til að skýra jarðvegsmyndun á Íslandi, en myndir af þessu sniði og rannsóknir sem tengjast því hafa m.a. verið notaðar í alþjóðlegum yfirlitsköflum um myndun *eldfjallajarðar* (ÓA 2008, McDaniel o.fl. 2012). Sniðið er einstaklega fallegt, með þykkum ljósum gjóskulögum úr Heklu sem gefa því sérstakan blæ, enda eru moldarsúlur (e. soil monoliths) af þessu sniði til á náttúrugripasöfnum erlendis.

Dæmigerð A-lög einkenna efsta hluta sniðsins niður á 15–20 cm dýpi þar sem veðrun er hvað örust og mest virkni lífvera með tilheyrandi umsetningu næringarefna. Það sem einkennir þró-unina er uppsöfnun lífrænna efna, sem eru á bilinu 4–7% C, en þó er mun minna af þeim í gjóskulögunum

Áfokshraði

Hve mikill er áfokshraðinn? Ef teknar eru saman upplýsingar sem birst hafa í fjölmörgum greinum um jarðvegsþykknun sem og gögn úr jarðvegsgagnagrunni LbhÍ (ÓA 2010) kemur í ljós að þykknunin er frá 0,01–0,03 mm á ári fjærst uppsprettum áfoks til >1 mm á ári þar sem áfok er mikið. Þetta samsvarar 1–3 cm þykkt þar sem áfok er minnst á 1.000 árum en til 1 m þar sem áfok er mikið á þúsöld.

Við notkun á gögnum um áfokshraða þarf að hafa í huga að þar sem veðrun er mikil og langvarandi, sérstaklega þar sem jarðvegur er þunnur og með miklu leirinnihaldi, hefur umtalsverður hluti moldarinnar veðrast og borist í burtu með efnarofi. Raunverulegt magn áfoksefna hefur þar með verið mun meira en þykkt jarðvegsins gefur til kynna. Einnig þarf að taka tillit til rúmþyngdar sem lækkar yfirleitt með veðruninni, þ.e. hver rúmmetri verður léttari með tímanum. Magn áfoksefna á tilteknu tímabili getur jafnvel hafa verið >30% meira en magntölur í nútíð gefa til kynna.

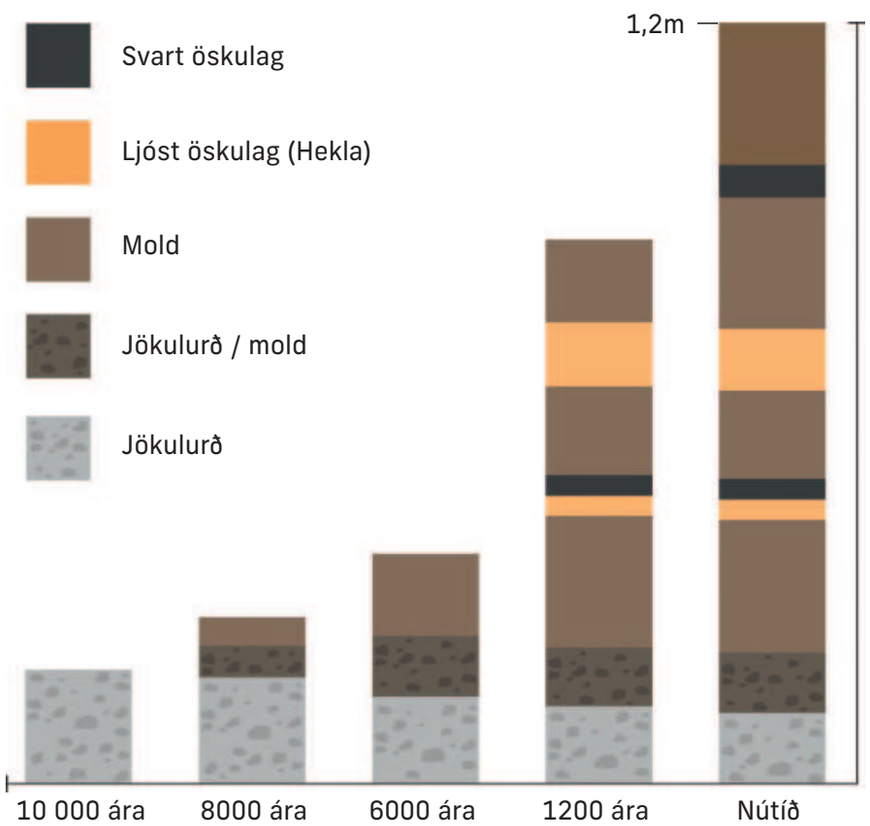
Áhrif efnaveðrunar á þykktina hefur þó ekki verið rannsökuð sem skyldi. Það er óljóst hvort hún breytist þannig að þykktin dragist saman við veðrunina eða að jarðvegurinn haldist svipaður að þykkt en með lægri rúmþyngd. Þetta er verðugt rannsóknarefni, ekki síst þar sem þykknunarhraði er notaður til aldursgreininga á jarðvegi. Þar má nefna margvíslegar fornleifarannsóknir og rannsóknir á náttúru Íslands, m.a. til að rekja umhverfisbreytingar, sbr. klassíska grein Sigurðar Þórarinssonar (1961) um vindrof, greinar Grétars Guðbergssonar (1975, 1996) um áfok og umhverfi í Skagafirði og grein Guttorms Sigbjarnarsonar (1969) um áfok og uppblástur á Haukadalsheiði.

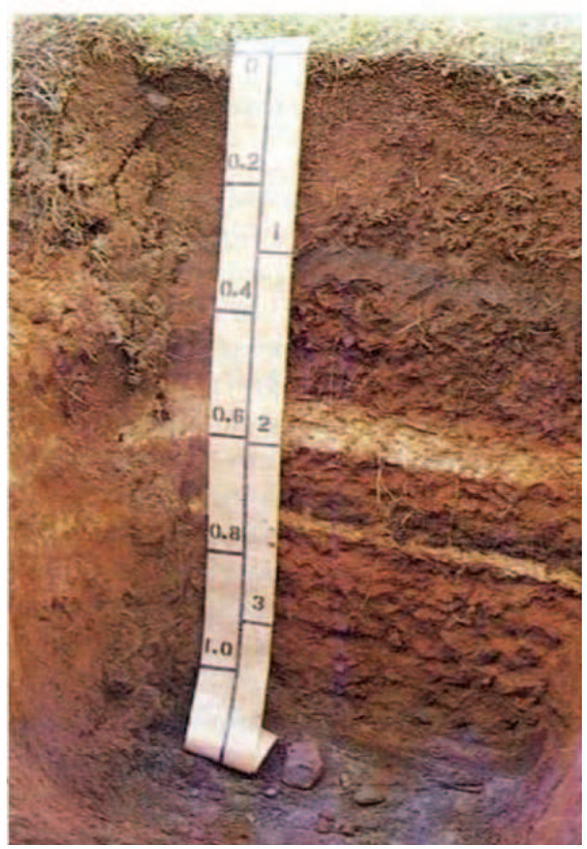
Fjöldi annarra rannsókna og vísindagreina hafa fylgt í kjölfarið, svo sem grein Guðrúnar Gísladóttur o.fl. (2010) um Krísuvíkursvæðið. Fjallað verður nánar um þessar og fleiri rannsóknir þar sem áfok kemur við sögu í 20. kafla um hrun íslenskra vistkerfa.

þar sem gildin eru aðeins 1,2–1,4% C. Stór hluti kolefnisins er varðveittur í neðri lögum sniðsins, eins og almennt á við um *eldfjallajörð*. Neðan við A-lögin eru Bw-lög þar sem umtalsverð efnaveðrun og leiruppsöfnun hefur átt sér stað. Hæst er leirinnihaldið (>30%) í moldarlaginu neðan við H4 og milli H3 og landnámslagsins, en á þessum tímabilum er þykknunarhraðinn hvað hægastur, enda áfokið minnst. Þá hefur gefist mestur tími fyrir efnaveðrun og þróun moldarinnar áður en hún grófst undir yngri lög. Eins og sjá má er neðsti hluti sniðsins, sem spannar 4–5 000 ár, aðeins um 25 cm og þykknunarhraðinn um 0,06 mm á ári (tafla 14.1). Síðan tekur við tímabil með nokkru örari þykknun en síðan aftur kyrrlátari tímar fram að landnámi.

Þykknunarhraði margfaldast við landnámið og verður um 0,2 mm á ári, en verður síðan ennþá örari eftir að gjóskulag „a“ fellur í goshrinu í Bárðarbungukerfinu um 1480. Það gos hefur valdið verulegu tjóni á vistkerfum á Norðausturlandi sem þá voru orðin veikari fyrir vegna landnýtingar í samanburði við tímann fyrir landnám. Þessi öri þykknunarhraði er dæmigerður fyrir mikið áfok á og við gosbelti landsins og í nálægð mestu rykuppsprettanna, sem vikið er að í 17. kafla um sandfok á Íslandi.

Veðrun hefur gengið lengst í moldinni sem þróaðist á því tímabili þegar áfokið var hægast. Það er hins vegar ekki mælikvarði á hraða veðrunar á hverjum tíma, eins og síðar verður vikið að. Ljósu gjóskulögin hafa veðrast minnst og innihalda innan við 10% leir. Hið grófa „a“-öskulag hefur einnig minna af leir en lögin beggja vegna, þrátt fyrir að efnasamsetning þeirra sé basísk, sem sýnir að áhrif grófleika bergefnanna geta verið mikil auk efnasamsetningarinnar, kristöllunar og annarra þátta.





Mynd 14.10. Sniðið við Goðafoss. Ljósu lögin eru Heklulög (H3 er einlitt efra lag, um 3.150 ára, og H4 er tvílitt neðra lag, um 4.250 ára). Ofarlega (um 0,3 m til vinstri á kvarðanum, 1 fet) er gjóskulagið „a“ úr Veiðivatnagosinu frá því um 1480 (Bárðarbungugos). Neðst er um 9.000 ára jökulurð. Aldur öskulaganna er fenginn úr grein Guðrúnar Larsen og Jóns Eiríkssonar (2008). Byggt á ÓA o.fl. 1995.

Unnt er að nota leirinnihaldið til að reikna út uppsöfnun leirs í tíma (aftasti dálkur í töflu 14.1). Útreikningarnir sýna að leirmyndun er ör í moldinni og sérstaklega á síðustu 500 árum. Leirinn hefur myndast úr bergefnum sem að mestu eru komin frá eldstöðvum Vatnajökuls. Rannsóknir sýna að ál er hlutfallslega stöðugt í jarðveginum (Birgir V. Óskarsson o.fl. 2012) og því má nota það sem viðmiðun til að reikna út veðrunarhraða, þ.e. hve mikið af bergefnum með efnasamsetningu Vatnajökuls þarf til að mynda leirinn. Veðrunarhraðinn reynist vera 9–140 t/km² á ári í dæmi Goðafosssniðsins og er þá einvörðungu miðað við ál og allófan. Aftur er þó rétt að hafa í huga að hluti þessa leirs er ættaður úr eldri jarðvegi vegna vindrofs, en erfitt er að meta það magn. Þessar tölur (9–140 t/km²) eru af sömu stærðargráðu og þær sem Sigurður R. Gíslason og samstarfsfólk hans hefur fengið út (20–150 t/km² á ári) með því að skoða efnasamsetningu afrennslis (Eydís S. Eiríksdóttir o.fl. 2008; Sigurður R. Gíslason 2006, o.fl. 2009; Kardjilov o.fl. 2006; sjá einnig yfirlitsgrein í tímaritinu *Jökli*: Sigurður R. Gíslason, 2008).

Þessi gildi eru afar há á heimsmælikvarða, en ástæður örrar efnaveðrunar voru ræddar hér á undan. Þess er að vænta að veðrunin verði örari eftir því sem hitastigið er hærra. Rannsókn Eydísar Salome Eiríksdóttur o.fl. (2013) á veðrun á Norðausturlandi, sem byggðist á losun Na^+ við efnaveðrun, gaf til kynna að veðrunarhraði ykist um 13% við einnar gráðu hækkun á hita.

14.3.2 *Glerjörð*

Glerjörðin er ungur jarðvegur með lítið af lífrænum efnum og leir, sem er einmitt sú skilgreining á *glerjörð* (<5% leir og <1,5% C) sem hefur verið notast við. ÓA og Kimble (2001) birtu yfirlitsgrein um myndun og eðli jarðvegs á íslenskum auðnum, sem hér hefur verið byggt á. Einnig má nefna rannsóknir Bonatotzky o.fl. (2022) sem juku á þekkingu á þróun ungs jarðvegs suður af Vatnajökli. *Glerjörð* er vitaskuld mismunandi, allt frá *sandjörð* til *melajarðar*. Ef gróðurhula verður sæmilega stöðug á yfirborðum sem þessum getur *glerjörð* þróast fremur hratt og verður þá að *sortujörð* (oftast *brúnjörð*) á nokkrum áratugum. Það er athyglisvert að nýfallin gjóska eða efni sem berast með jökulhlaupum hafa nægilega mikið af oxalatleysanlegum efnum (Al_{ox}, Fe_{ox} og Si_{ox}) til að *glerjörðin* teljist til *eldfjallajarðar* (Andosol). Lágt hlutfall Al/Si einkennir allófan í *glerjörð* (um 1). Efnaveðrun er umtalsverð á auðnum en yfirborðið er

Tafla 14.1. Þykknun og mælikvarðar á efnaveðrun í sniðinu við Goðafoss. Vísar til sniðs á mynd 14.10. AD: ártal; BP: aldur í árum.

TÍMABIL	ALDUR	ÞYKKNUN$	LEIR&
		mm á ári	*g/m² á ári*
„a" – „nú"	1480–1987 AD	0,51	62,3
Landnám – „a"	874–1480 AD	0,19	9,4
H3 – landnám	3150 PB–874 AD	0,039	6,5
H4 – H3	4250–3150 BP	0,12	16,0
Botnurð – H4	9000–4250 BP	0,059	10,2

$: Byggt á núverandi þykkt, ekki tekið tillit til taps vegna efnaveðrunar, lífrænnar uppbyggingar eða breytinga á strúktúr jarðvegsins.

&: Hluti þessa leirs kann að hafa myndast áður og vera aðfluttur vegna vindrofs á aðliggjandi svæðum.

yfirleitt of óstöðugt til að leir safnist fyrir í tiltekin lög. Þó er oft nokkuð af leir í *melajörð* sem getur að hluta til myndast á staðnum.

Glerjörð á Íslandi hefur mikið gildi fyrir rannsóknir á aðstæðum sem ríkja á reikistjörnunni Mars, en hópar á vegum bandarísku geimvísindastofnunarinnar (NASA) stunda einmitt slíkar rannsóknir hér á landi. Þar er m.a. verið að athuga gildi moldar á Mars fyrir fæðuframleiðslu og með hvaða hætti mætti ætla að moldin þróist með auknum súrefnisþrýstingi og tilkomu gróðurs við ræktun í gróðurhúsum þar.

14.3.2 *Mójörð – Svartjörð – Votjörð*

Ítarlegustu greinargerðirnar um þróun lífræns jarðvegs hérlendis er að finna í doktorsverkefni Þorsteins Guðmundssonar (1978) og niðurstöðum rannsókna COST 622-hópsins (ÓA 2007). Bonatotzky o.fl. (2019, 2020, 2021) bættu miklu við þessa þekkingu með viðamikilli rannsókn á myndun *mójarðar* á Suðausturlandi. Uppsöfnun lífrænna efna er einkenni *mójarðar* og *svartjarðar*, eins og vænta má. Rannsóknir Möckel o.fl. (2021a, 2021b) á lífrænum efnum á Norðvesturlandi, m.a. með tilliti til áhrifa áfoks og gjósku á þau og eðli þeirra, sýndu skýrt fram á að sortueiginleikar felast m.a. í myndun tiltölulega stöðugra lífrænna efna í moldinni. Þó er rétt að árétta að skortur á súrefni (afoxað umhverfi) í votlendum ásamt kulda eru einnig þættir í því að lífrænu efnin safnast fyrir, eins og á við annars staðar á norðlægum slóðum. En að auki bætast við ferli sem leiða til myndunar sortueiginleika (e. andic soil properties) þar sem lífræn efni bindast bæði leirefnum og sem málm-húmus-komplexar (MHK).

Þessi ferli eru mjög háð sýrustigi þar sem myndun MHK er ráðandi við lágt sýrustig (<5) en allófan við hærra sýrustig. Lífrænu efnin eru mun rotnari í jarðvegi láglendis en á hálendinu, en rotnunarstigið er einnig háð aldri; gömul lífræn lög í *mójörð*, *svartjörð* og *votjörð* eru oft mjög rotin.

Myndun lífræns jarðvegs á Íslandi er sérstök miðað við annan slíkan jarðveg í heiminum vegna áhrifa stöðugs áfoks á ferlið, sem þó er afar mismunandi á milli svæða. Lífræn efni í *mójörð* og öðrum votlendisjarðvegi á Íslandi eru afar mikilvæg fyrir kolefnisbúskap landsins, m.a. í tengslum við losun og bindingu gróðurhúsalofttegunda. Fjallað er um uppsöfnun lífrænu efnanna í samhengi við kolefnishringrásina annars staðar í þessu riti.

Heimildir

Bergur Sigfússon 2004. Assessment of in-situ weathering of an Histic Andosol – microcosm to field scale study. MSc-ritgerð, Jarðvísindadeild, Háskóli Íslands.

Bergur Sigfússon, Sigurður R. Gíslason og G.I. Paton 2008. Pedogenesis and weathering rates of Histic Andosol in Iceland: field and experimental soil solution study. Geoderma 144:572–592.

Bigham, J.M., R.W. Fitzpatrick og D.G. Schulze 2002. Iron oxides. Í: Dixon, J.B.G. og D.G. Schulze (ritstj.), Soil Mineralogy with Environmental Applications. Soil Science Society of America Book Series 7. Madison Wisconsin, USA. Bls. 323–366.

Birgir V. Óskarsson, M.S. Riishuus og Ólafur Arnalds 2012. Climate-dependent chemical weathering of volcanic soils in Iceland. Geoderma 189–190:635–651.

Bjarni Helgason 1968. Basaltic soils of South-west Iceland II. Journal of Soil Science 19:127–134.

Björke, J.K., Andri Stefánsson og Stefán Arnórsson 2015. Surface water chemistry at Torfajokull, Iceland-Quantification of boiling, mixing, oxidation and water-rock interaction and reconstruction of reservoir fluid composition. Geothermics 58:75–86.

Björn Jóhannesson 1960. The Soils of Iceland. Atvinnudeild Háskóla Íslands, Rit Atvinnudeildar B – No. 13, Reykjavík.

Bonatotzky, T., F. Ottner, Egill Erlendsson og Guðrún Gísladóttir 2019. The weathering of volcanic tephra and how they impact histosol development. An example from South-East Iceland. Catena 172:634–646.

Bonatotzky, T., F. Ottner, Egill Erlendsson og Guðrún Gísladóttir 2021. Weathering of tephra and the formation of pedogenic minerals in young Andosols, South-East Iceland. Catena 198:105030.

Bonatotzky, T., F. Ottner, Egill Erlendsson og Guðrún Gísladóttir 2022. The impact of environmental factors on early stage Andosol development south of Vatnajökull, Iceland. European Journal of Soil Science 73:e13224.

Dahlgren, R., S. Shoji og M. Nanzyo 1993. Mineralogical characteristics of volcanic ash soils. Í: Shoji, S., M. Nanzyo, R. Dahlgren (ritstj.), Volcanic Ash Soils – Genesis, Properties and Utilization. Elsevier, Amsterdam, Holland. Bls. 101–143.

Eydís Salome Eiríksdóttir, Sigurður Reynir Gíslason og E.H. Oelkers 2013. Does temperature or runoff control the feedback between denudation and climate? Insights from NE Iceland. Geochimica et Cosmoshimica Acta 107:65–81.

Eydís Salome Eiríksdóttir, P. Louvat, Sigurður R. Gíslason, Níels Óskarsson og Jórunn Harðardóttir 2008. Temporal variation of chemical and mechanical weathering in NE Iceland: Evaluation of a steady-state model of erosion. Earth and Planetary Science Letters 272:78–88.

García-Rodeja, E., J.C. Novoa, X. Pontevera, A. Martinez-Cortizas og P. Buurman 2007. Aluminium and iron fractionation of European volcanic soils by selective dissolution techniques. Í: Ólafur Arnalds, F. Bartoli, P. Buurman, Hlynur Óskarsson, G. Stoops, E. García-Rodeja (ritstj.), Soils of Volcanic Regions in Europe. Springer, Heidelberg, Þýskaland. Bls. 325–351.

Grétar Guðbergsson 1975. Myndun móajarðvegs í Skagafirði. Journal of Agricultural Research in Iceland 7:20–45.

Grétar Guðbergsson 1996. Í norðlenskri vist. Um gróður, jarðveg, búskaparlög og sögu. Icelandic Agricultural Sciences 10:31–89.

Guðrún Gísladóttir, Egill Erlendsson, R. Lal og J. Bigham 2010. Erosional effects on terrestrial resources over the last millennium in Reykjanes, southwest Iceland. Quaternary Research 73:20–32.

Guðrún Larsen og Jón Eiríksson 2008. Holocene tephra archives and tephrochronology in Iceland – a brief overview. Jökull 58:229–250.

Guttormur Sigbjarnarson 1969. Áfok og uppblástur. Náttúrufræðingurinn 39:68–118.

Hólmgeir Björnsson 1961. Analyser på isländska jordar. Óbirt skýrsla, Landbúnaðarháskóli Íslands (áður Atvinnuvegadeild Háskóla Íslands).

Kardjilov, M.L., Sigurður Reynir Gíslason og Guðrún Gísladóttir 2006. The effect of gross primary production, net primary production and net ecosystem exchange on the carbon fixation by chemical weathering of basalt in northeastern Iceland. Journal of Geochemical Exploration 88:292–295.

McDaniel, P., D.J. Lowe, Ólafur Arnalds og C-L. Ping 2012. Andisols. Í: Huang, P.M., Y. Li og M.E. Sumner (ritstj.), Handbook of Soil Science. 2. útg. CRC Press, Taylor & Francis, Boca Raton, Florida, USA. Bls. 33,29–33,48.

Magnús Á. Sigurgeirsson, Ólafur Arnalds, Sigurður Emil Pálsson, B.H. Howard og Kjartan Guðnason 2005. Radiocaesium fallout behaviour in volcanic soils in Iceland. Journal of Environmental Radioactivity 79:39 DG 53.

Möckel, S.C., Egill Erlendsson og Guðrún Gísladóttir 2021a. Andic soil properties and tephra layers hamper C turnover in Icelandic peatlands. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences 126:e2021JG006433.

Möckel, S.C., Egill Erlendsson, I. Prater og Guðrún Gísladóttir 2021b. Tephra deposits and carbon dynamics in peatlands of a volcanic region: Lessons from the Hekla 4 eruption. Land Degradation and Development 32:654–669.

Nanzyo, M., R. Dahlgren og S. Shoji 1993. Chemical characteristics of volcanic ash soils. Í: Shoji, S., M. Nanzy, R.A. Dahlgren (ritstj.), Volcanic Ash Soils. Genesis, Properties and Utilization. Developments in Soil Science 21, Elsevier, Amsterdam, Holland. Bls. 145–187.

Ólafur Arnalds 1994. Leir í íslenskum jarðvegi. Náttúrufræðingurinn 63:73–85.

Ólafur Arnalds 2008. Andosols. Í: W. Chesworth (ritstj.), Encyclopedia of Soil Sciences. Springer, Dordrecht, Holland. Bls. 39–46.

Ólafur Arnalds 2010. Dust sources and deposition of aeolian materials in Iceland. Icelandic Agricultural Sciences 23:3–21.

Ólafur Arnalds 2015. The Soils of Iceland. World Soil Book Series. Springer, Dordrecht, Holland.

Ólafur Arnalds og J. Kimble 2001. Andisols of deserts in Iceland. Soil Science Society of America Journal 65:1778–1786.

Ólafur Arnalds, C.T. Hallmark og L.P. Wilding 1995. Andisols from four different regions of Iceland. Soil Science Society of America Journal 59:161–169.

Ólafur Arnalds, F. Bartoli, P. Buurman, Hlynur Óskarsson, G. Stoops og E. García-Rodeja (ritstj.) 2007. Soils of Volcanic Regions in Europe. Springer, Heidelberg, Þýskaland.

Parfitt, R.L. og J.M. Kimble 1989. Conditions for formation of allophane in soils. Soil Science Society of America Journal 53:971–977.

Rasmussen, C., R.A. Lybrand, C. Orem, J. Kielhofer og M. Holleran 2017. Soils of the western range and irrigated land resource region: LRR D. Í: L.T. West, M.J. Singer og A.E. Hartemink (ritstj.), The Soils of the USA. World Soils Book Series. Springer, Cham, Sviss. Bls. 115–130.

Rodriguez Rodriguez, A., C.D. Arbelo, J.A. Guerra, J.L. Mora, J.S. Notario og C.M. Armas 2006. Organic carbon stock and soil erodibility in Canary Islands Andosols. Catena 66:228–235.

Schwertmann, U. og R.M. Taylor 1989. Minerals in Soil Environments. 2. útg. Soil Science Society of America Book Series 1. Í: J.B. Dixon og S.B. Weed (ritstj.), Minerals in Soil Environments. Madison, Wisconsin, USA. Bls. 379–438.

Sigurbjörn Einarsson 1979. Allofaner i eoliske sedimenter og tefraavsetninger på Island. Hovedopgave (thesis), Norges landbrukshögskole, Ås, Noregi. Óbirt námsritgerð.

Sigurður H. Markússon og Andri Stefánsson 2011. Geothermal surface alterations of basalts, Krýsuvík Iceland – Alteration mineralogy, water chemistry and the effects of acid supply on the alteration process. Journal of Volcanology and Geothermal Research 206:46–59.

Sigurður R. Gíslason 2008. Weathering in Iceland. Jökull 58:387–408.

Sigurður R. Gíslason, E.H. Oelkers og Árni Snorrason 2006. The role of river-suspended material in the global carbon cycle. Geology 34:49–52.

Sigurður Gíslason, E.H. Oekjers, Eydís Salome Eiríksdóttir, M.I. Kardjilov, Guðrún Gísladóttir, Bergur Sigfússon, Árni Snorrason, Sverrir O. Elefsen, Jórunn Harðardóttir, P. Torssander og Níels Óskarsson 2009. Direct evidence of the feedback between climate and weathering. Earth and Planetary Science Letters 277:213–222.

Sigurður Þórarinsson 1961. Uppblástur á Íslandi í ljósi öskulagarannsókna. Ársrit Skógræktarfélags Íslands 1960–1961:17–54.

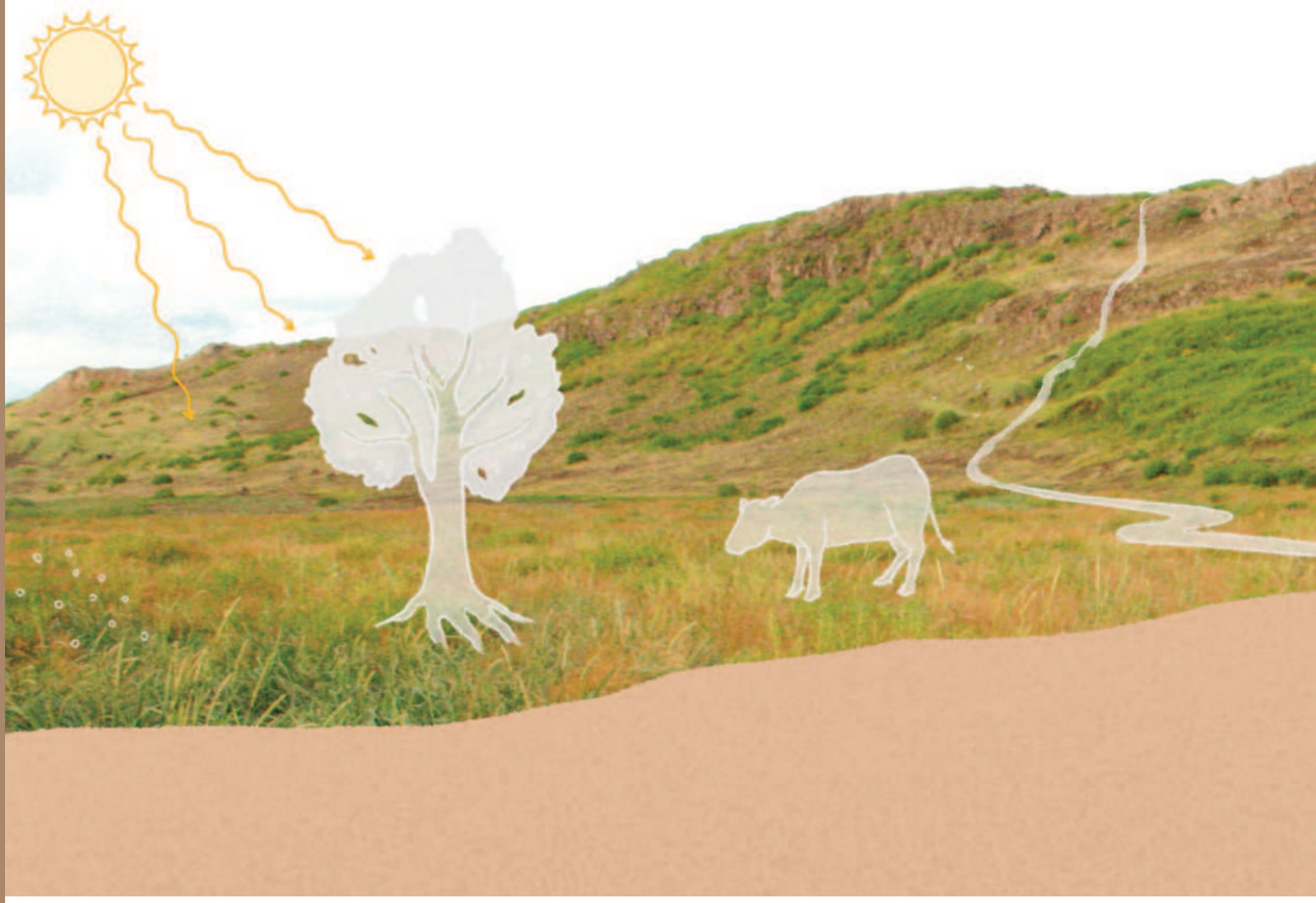
Stoops, G., M. Gerard og Ólafur Arnalds 2008. A micromorphological study of Andosol genesis in Iceland. Í: S. Kapur, A. Mermut, G. Stoops (ritstj.), New Trends in Micromorphology. Springer, Heidelberg, Þýskaland. Bls. 67–90.

Thomas Arrigo, L.K., L. Notini, J. Shuster, T. Nydegger, S. Vontobel, S. Fischer, A. Kappler, R. Kretzshmar 2022. Mineral characterization and composition of Fe-rich flocs from wetlands of Iceland: Implications for Fe, C and trace element export. Science of the Total Environment 816:151567.

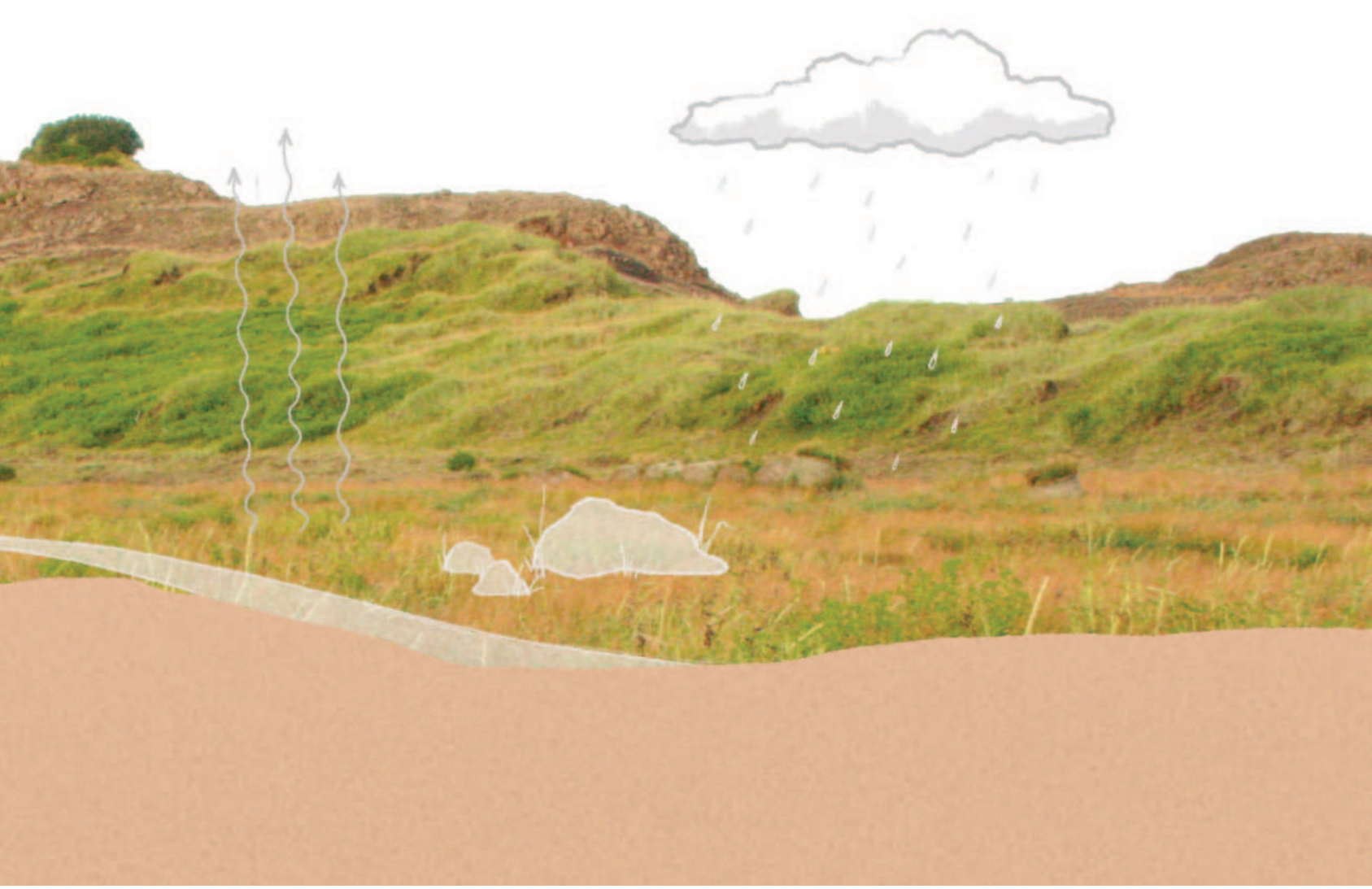
Wada, K., Ólafur Arnalds, Y. Kakuto, L.P. Wilding og C.T. Hallmark 1992. Clay minerals of four soils formed in eolian and tephra materials in Iceland. Geoderma 52:351–365.

Þorsteinn Guðmundsson 1978. Pedological Studies of Icelandic Peat Soils. Óbirt PhD-ritgerð. University of Aberdeen, Skotland.

Þorsteinn Guðmundsson 2009. Járnsteindir í mýrum. Fræðaþing landbúnaðarins 2009:433–437.



15 Næring og mold



Mynd 15.1. Mynd sem gefur hugmynd um hringrás næringarefna. Kerfið er drifið af orku sólar sem er numin með ljóstillífun plantna. Teikning: Fífa Jónsdóttir.

Stærsta og mikilvægasta atvinnugreinin

Það er hverjum og einum holt að velta fyrir sér kostnaðinum við framleiðslu á fæðu og efnum í klæði fyrir hvern jarðarbúa, en sá kostnaður nemur um 120 þúsund krónum á verðlagi 2022.

Sé þessi upphæð margfölduð með fjölda jarðarbúa (um 8 milljarðar) verður til stjarnfræðilega há fjárhæð — landbúnaður er langsamlega stærsta atvinnugrein veraldar og sú mikilvægasta. Og byggist á moldinni.

Plöntur sækja sér þá næringu sem þær þarfnast í moldina. Hringrás næringarefna í moldinni er undirstaða lífs á landi og er meðal mikilvægustu viðfangsefna jarðvegsfræða (mynd 15.1). Vænn hluti þess fólks sem menntar sig í jarðvegsfræðum starfar á sviði plöntunæringar, m.a. við að rannsaka og leiðbeina um áburðarþörf og leita leiða til þess að auka hagkvæmni og uppskeru við ræktun matvæla. Vistfræðileg viðfangsefni á sviði plöntunæringar eru þó ört vaxandi – bæði í dreifbýli og þéttbýli. Framleiðsla matvæla á jörðinni byggist að meginhluta á jarðyrkju með áburðargjöf þar sem notuð eru lífræn og ólífræn áburðarefni.

Mikilvægustu næringarefnin fyrir plöntur eru bundin lífrænum efnum en með hjálp ensíma og örvera er þeim umbreytt í ólífrænt form sem er aðgengilegt gróðri. Aukin uppskera er fengin með því að bæta við skömmtum af þeim næringarefnum sem plöntur þurfa í mestu magni, annars ganga þau til þurrðar og upp kemur næringarskortur. Nitur er það næringarefni sem oftast þarf að bæta við í ræktun, enda þarf mikið af því til að viðhalda eðlilegri hringrás næringarefna og góðri uppskeru. Mikil áburðarnotkun hefur aftur á móti valdið stórfenglegum vandamálum vegna mengunar á grunnvatni, vötnum og innhöfum, auk losunar gróðurhúsalofttegunda út í andrúmsloftið.

Telja má að næringarhringrásin falli undir sérstaka fræðigrein sem útilokað er að gera ítarleg skil í kafla sem þessum – hér verður aðeins brugðið upp skissu af viðfangsefninu.

Friðrik Pálmason, fyrrum sérfræðingur hjá Rannsóknastofnun landbúnaðarins (nú Landbúnaðarháskóli Íslands), helgaði starf sitt plöntunæringarfræðum. Að lokinni starfsævi gaf hann út viðamikið rit: *Plöntunæringar- og áburðarfræði* (2013). Ritið er aðgengilegt á vef LbhÍ. Þar er að finna margháttaðan fróðleik sem getur hjálpað nemum að tileinka sér þessi fræði, ekki síst þeim sem koma að ræktun með einum eða öðrum hætti, enda birtist þar samantekt á rannsóknum sem gerðar hafa verið á Íslandi á ýmsum áburðarefnum. Í ritinu er ennfremur að finna mjög áhugaverðan vísindasögulegan fróðleik.

Mynd 15.2. Jörðin búin til ræktunar. Efsta lagið plægt upp en síðan er sáð og borið á. Bóndinn á aðgang að upplýsingum hjá ríkisstofnun um hæfilegt magn áburðarefna. Þær upplýsingar byggja á víðtækum rannsóknum. Landbúnaður – og þá einkum jarðrækt í ýmsu formi – er langsamlegasta stærsta atvinnugrein jarðar sem fæðir og klæðir jarðarbúa.

15.1. Flokkun og nýting næringarefna

Í moldinni er að finna fjölbreytt næringarefni, m.a. katjónir og anjónir sem sitja á jónrýmdarstöðum, efni sem bundin eru í lífrænum efnasamböndum og ólífræn efnasambönd. Mörg efnanna losna og verða aðgengileg í vistkerfum við efnaveðrun og þegar lífræn efni rotna í moldinni – við hringrás næringarefna. Mun meira magn steinefna er bundið í bergefnum og þar eru þau ekki aðgengileg fyrir lífríkið, en þau losna smám saman við efnaveðrun og jarðvegsmyndun þar sem lífríki jarðvegsins kemur mjög við sögu.

Næringarefnum er yfirleitt skipt í tvo hluta: annars vegar þann hluta sem

gróður þarf mikið af til þess að hann dafni, svonefnd meginefni (e. macro-nutrients), en hins vegar snefilefni (e. micro-nutrients) sem gróður þarf mun minna af, enda þótt þau séu algjörlega nauðsynleg fyrir afkomu plantna (tafla 15.1) og lífríkið í heild. Hafa verður í huga að plöntur eru að stærstum hluta gerðar úr efnasamböndunum C, O og H, aðalefnum lífkerfisins, en hér eru aftur á móti til umfjöllunar efni sem aflað er úr jarðveginum, vatnslausn og andrúmsloftinu.

Í meðfylgjandi töflu er listi yfir þau efni sem plöntur þarfnast til viðhalds og vaxtar. Hafa ber í huga að manns-líkaminn þarfnast nokkurra annarra efna en hér eru talin, svo sem natríums (Na, er í töflunni), joðs (I), króms (Cr) og selens (Se). Jafnvel er talið að líkaminn þurfi agnarögn af arseni (As), nikkeli (Ni), kísli (Si), liþíum (Li), og vanadíum (V), en þau fræði öll eru nú í örri þróun. Bóron var lengi talið ónauðsynlegt mönnum en er nú talið mikilvægt (Oertli, 2008).

Næring berst aðallega til rótanna með þrenns konar hætti. Í fyrsta lagi vaxa rætur stöðugt inn í nýtt umhverfi þar sem næringu er að finna. Í öðru lagi berast næringarefni að rótinni í vatnslausn, m.a. vegna mismunar á styrk efna, en lausnin leitast ávallt við að jafna út

Tafla 15.1. Meginefni og snefilefni í jarðvegi sem nauðsynleg eru plöntum.

MEGINEFNI		%	
Nitur	N	2–4	Í próteinum (svo sem ensímum), grænukornum og kjarnsýrum. Er nýtt í orkuvinnslu (bruni á kolvetnum).
Kalí	K	1–3	Margvísleg not við tillífun, hvati, tekur þátt í myndun próteina, osmósu o.fl.
Kalsíum	Ca	0,5–3	Byggingarefni. Tekur þátt í ýmsum efnahvörfum.
Natríum	Na	0,2–1	(Misjafnt hvort er nauðsynlegt plöntum).
Súlfúr	S	0,2–0,5	Í próteinum (amínósýrum o.fl.). Tekur þátt í myndun próteina, tillífun o.fl. Mikil lykt (oft „vond“, t.d. af hvítlauk) tengist iðulega brennisteini. Vítamín (B1).
Fosfór	P	0,1–0,4	Mikilvægur fyrir orkuflutning (ATP) í próteini. Er í DNA og RNA. Einnig í beinum. „Orkugjaldmiðill.“
Magnesíum	Mg	0,1–0,5	Í blaðgrænu o.fl. Stjórnar virkni ensíma o.fl.
SNEFILEFNI		**ppm[1]**	
Járn	Fe	50–300	Hluti margra efnasambanda, rafeindaskipti (orkuflutningur) o.fl.
Mangan	Mn	20–250	Virkjar ensím, efnahvörf við ljóstillífun, Mn (afoxun) oxar vatn svo myndast O_2 og H^+, myndun C-vítamíns.
Sink	Zn	20–100	Efnasambönd og efnahvörf (dehydrogenase).
Bóron	B	10–50	Líklega í vaxtarhormónum. Lítið vitað.
Kopar	Cu	5–15	Hluti ensíma og ýmissa efnasambanda. Ljóstillífun og öndun, rafeindaskipti.
Klór	Cl	0,2–2	Ljóstillífun og í ensímum sem kljúfa vatn (í O og H).
Kísill	Si	0,2–2	(Styrktarefni, misjafnt hvort það sé talið nauðsynlegt plöntum).
Mólybden	Mo	<0,1–1	Hluti ensíma og í niturbindingu (afoxar nítrat).
Kóbolt	Co	0,04–0,2	Niturbinding (niturnám), B12-vítamín.

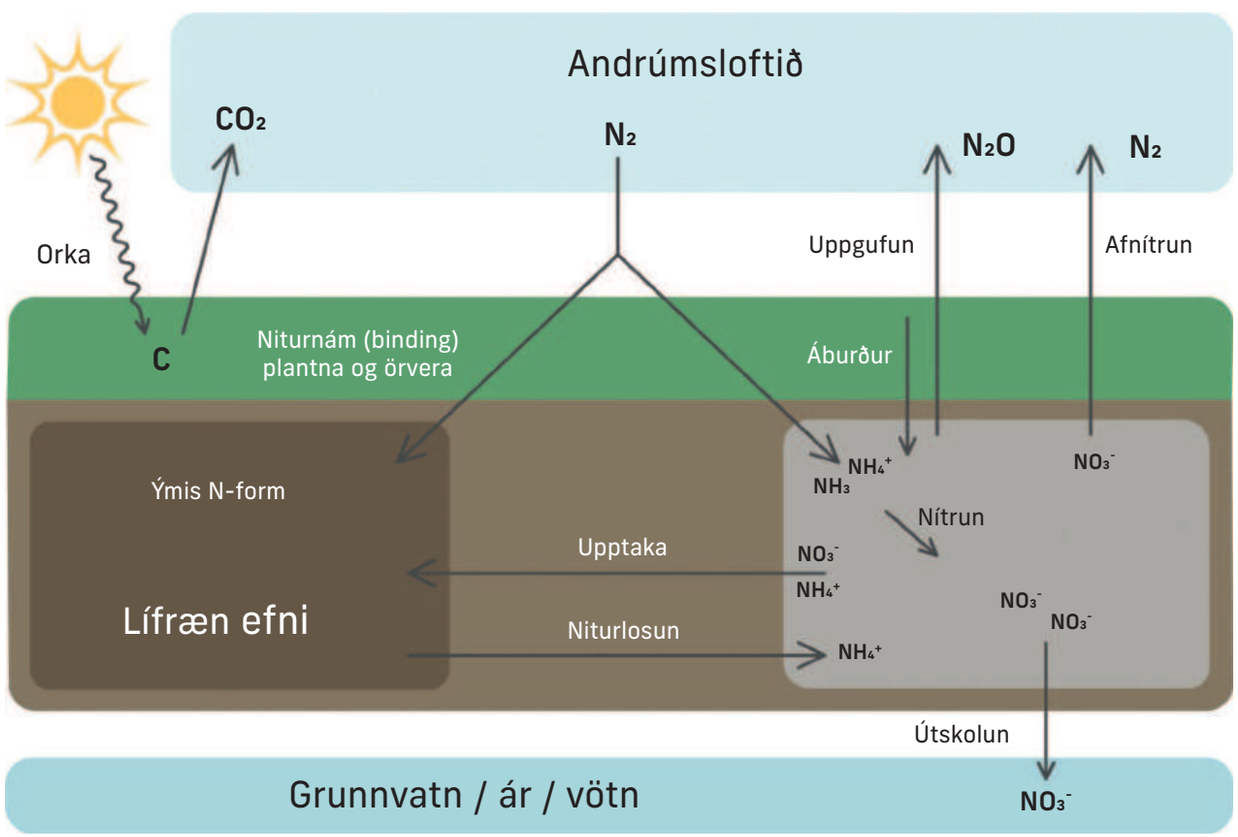
1: ppm, parts per million. Milljónasti hluti eða % deilt með einni milljón.

styrk eftir að efni eru fjarlægð úr lausn inn í rót plöntu (e. diffusion). Í þriðja lagi berast jónir með lausninni með massaflæði þegar þornar og blotnar og vatn flæðir um moldina (e. mass flow).

15.2. Nitur og niturhringrásin

Nitur er það næringarefni sem oftast skortir við ræktun á landi. Í þroskuðum náttúrulegum vistkerfum sem eru í jafnvægi við vistgetu (e. potential, sjá síðustu kaflana), þ.e. kerfum sem ekki eru nýtt til uppskeru, viðhelst nitrið í hringrás og skortir yfirleitt ekki nema aðrar umhverfisaðstæður séu hamlandi. Þar sem gengið hefur verið á næringarforðann eða þar sem gróður er að þróast á landi sem áður var gróðurvana er nitrið takmarkandi efni. Heilbrigðar plöntur innihalda yfirleitt 2–4% af nitri, sem er ansi mikið ef haft er í huga að plöntur eru að mestu gerðar úr C, H og O. Niturskortur í plöntum lýsir sér í því að þær fölna eða gulna (e. chlorosis), sérstaklega yst á blöðum þar sem vöxtur á sér stað.

Niturhringrásin er meðal mikilvægustu ferla náttúrunnar en hér eru aðeins kynntir megindrættir hennar (mynd 15.3). Andrúmsloftið er að mestu samsett úr nitri á forminu N_2. Þetta vill fara fram hjá mörgum því umfjöllun um andrúmsloftið beinist eðlilega alla jafna að súrefni og koltvísýringi. Lofthjúpurinn er tæplega 78% N (sem N_2), 21% O_2, um 0,9% Ar (argon) og um 0,04% CO_2. Það má því segja að nóg sé til af nitri fyrir lífheiminn, vandinn er að N_2 í andrúmsloftinu er alls ekki á aðgengilegu formi og tekur ekki þátt í efnahvörfum lífsins. Á því formi er nitrið hlutlaust, óhvarfgjarnt (e. inert) og skaðlaust, enda mikið notað sem hlutlaust gas í margvíslegum tilgangi, t.d. þar sem þarf að mynda mikinn þrýsting. Gríðarlega orku þarf til að koma því á aðgengilegt form fyrir plöntur.



Mynd 15.3. Niturhringrásin, mjög einfölduð. Örvarnar gefa til kynna ferli sem hafa sérstakt heiti. Plöntur taka einkum upp nitur á forminu NO_3^- en einnig sem NH_4^+.

Nitur getur haft mörg oxunarstig, sem skýrir að hluta til mikilvægi þess í lífrænum efnahvörfum. Oxunarstigin sveiflast frá +5 (mjög oxað) í NO_3^- til -3 í NH_3 (mjög afoxað). Frá oxuðu til afoxaðra forma er röðin þessi:

FORM	OXUNARSTIG
oxað	
NO_3^-	+5
NO_2^-	+3
NO	+2
N_2O	+1
N_2	0
NH_3/NH_4^+	-3
afoxað	

Fyrir plöntuna skiptir þó höfuðmáli að ná sem mestu N, og er þá sama á hvaða formi eða oxunarstigi það er, en aðeins tvö þessara efnasambanda eru í raun aðgengileg plöntum í einhverjum mæli: **NH_4^+** (ammóníum) og **NO_3^-** (nítrat), og er **nítrat** mikilvægara þegar á heildina er litið; ammóníum kemur aðallega fyrir í fremur basísku umhverfi. Reyndar er það svo að nítrat er afoxað á fyrstu stigum upptöku í plöntum, aðallega í rótum, til að geta myndað NH_4^+ (ammóníum) eða NH_3 (ammoníak) áður en það nýtist plöntunni í efnahvörfum.

Ýmis efnahvörf og ferli verða til þess að i) nitur berst ofan í moldina; ii) það kemst á nýtanlegt form; og iii) það tapast á ýmsa vegu út úr kerfinu. Á mynd 15.3. eru mörg þessara ferla sýnd sem og heiti þeirra. Það ferli sem leiðir til þess að N_2 er losað úr andrúmslofti og ofan í jarðveg er nefnt niturbinding, nitursöfnun eða **niturnám** (e. fixation, sjá umfjöllun um hugtakið hér á eftir) og leiðir til þess að NH_4^+ verður til.

Gríðarlega orku þarf til að mynda NH_4^+ úr N_2. Eldingar eru m.a. mikilvirkar við að mynda NH_4^+ í lofthjúpnum. Á Íslandi var niturábuður framleiddur úr andrúmsloftinu með rafmagni í Áburðarverksmiðju ríkisins í Gufunesi, en stofnun þeirrar verksmiðju telst með mikilvægustu framfaraskrefum þjóðarinnar á síðustu öld, en hún er nú aflögð. Hin mikilvæga jón NH_4^+ er nefnd ammóníum og hún er raunar hluti af mörgum algengum efnasamböndum sem eru í daglegri notkun, svo sem hið illa lyktandi ammoníak (ammonía), en NH_3 er hættuleg gastegund í miklum styrk og er m.a. notuð í hreinsiefni. Ammóníum (NH_4^+) sem er í jarðvegslausn á greiðan aðgang að jónrýmdarsætum, „binst" þeim tímabundið og nýtist plöntum þegar það losnar úr jónrýmdarsætunum.

Almennt séð losnar mjög mikil orka þegar NH_4^+ oxast (einnig NH_3^+, sem er gas) enda er það notað í sprengiefni. Niturdíoxíð (NO_2^-, nítrít) er notað sem rotvarnarefni í matvælum, t.d. í kjötvörum, en er eitrað þegar styrkur þess er mikill og þykir því óhollt, sem og flest önnur rotvarnarefni (rotvörnin felst í eituráhrifum, sem neytendur matvæla ættu ávallt að hafa í huga – mörg þeirra eru krabbameinsvaldandi).

Áburðarverksmiðjur eru almennt hættulegar umhverfi sínu sökum sprengihættu. Ein öflugasta sprenging sem átt hefur sér stað, ef kjarnorkusprengingar eru frátaldar, varð í Beirút í Líbanon þegar stór „gleymd" áburðargeymsla sprakk í loft upp. Framleiðsla á niturábuði byggist á aldagömlum aðferðum en þess er að vænta að nýjar og ódýrari aðferðir ryðji sér til rúms á næstu árum sem vonandi létta undir fæðuframleiðslu í fátækari ríkjum heims. Grunnurinn er alltaf aðgangur að nægri orku en nóg er af N_2 í andrúmsloftinu.

Niturnám (niturbinding; e. nitrogen fixation). Í íslenskum ritum er yfirleitt

talað um niturbindingu, það sem hér er nefnt niturnám. Þýðingin „niturbinding“ á því sem nefnt er „N-fixation“ á ensku er gömul og að mörgu leyti óheppileg því með ferlinu er nitrið gert aðgengilegt plöntum, það er ekki verið að binda það. Þetta er grunnhugtak í náttúrufræðum yfir annað af mikilvægustu efnaferlum lífsins. Hugtakið kemur fyrir í orðabók Arnar og Örlygs (nú Mál og menning, Sören Sörensson, 1984), en þar er það skilið eftir án þýðingar, sem er nokkuð sérkennilegt.

Hugtakið „fix“ þýðir hér að breyta úr loftkenndu ástandi í efnasamband í vökva. Fyrir lesendur þessa rits hef ég ákveðið að nota hugtakið „niturnám“. Það lýsir ferlinu mun betur en „binding“. Þá er rétt að hafa í huga að binding er notað í öðrum skilningi í hringrásum annarra næringarefna – sem dæmi má nefna að fosfórbinding þýðir að fosfór binst öðrum efnum sem gera hann óaðgengilegan, t.d. kalsíum. Æskilegt væri að koma betra og samræmdara skipulagi á notkun hugtaka í jarðvegs-næringarfræðinni til að auðvelda nemendum og áhugafólki um viðfangsefnið lífið.

Það er sannarlega nóg til af nitri í andrúmsloftinu, sem áður sagði, en það þarf aftur á móti mikla orku eða sérhæfðar lífverur til að hafa not af því. Þar koma til sögunnar svokallaðar niturbindandi bakteríur („niturnáms-bakteríur“ eða „niturnemar“) sem lifa í sambýli við rætur niturbindandi plantna. Lúpína, smárategundir, alfa-alfa, baunagras og aðrar jurtir af ertublómaætt og ýmsir runnar hafa þennan eiginleika, en einnig eru eldingar drjúgar við að bæta nýtanlegu formi af nitri inn í vistkerfi jarðar. Kolabrennsla skilar einnig miklu magni niturs í andrúmsloftið og stuðlar að ákomu niturs, m.a. í Kína, Evrópu og Bandaríkjunum þar sem kolaorkuver eru útbreidd.

Nitur berst með vindum langar leiðir og bætist við vistkerfi með regni, en mjög erfitt er að mæla þessi áhrif.

Mynd 15.4. Lífræn jarðvegsskán inniheldur lífverur sem vinna nitur úr andrúmsloftinu, sem nýtist síðan í vistkerfum. Þessar lífverur eru afar mikilvægar við að sjá náttúrulegum vistkerfum fyrir nitri, jafnvel sem nemur >30 kg N á hektara á hverju ári (ÓA óbirt gögn). Skánin sem myndin er af myndaðist á 15 árum í 650 m hæð í kjölfar þess að svæðið var friðað fyrir búfjárbeit og áburðargjöf í tvö ár.

Niturmengun frá Evrópu sást t.d. iðulega áður fyrr sem gulleitt sólarlag – en það er orðið sjaldgæfara nú eftir að þeim orkuverum sem menguðu hvað mest í Vestur-Evrópu var lokað.

Gagnsemi niturbindandi (niturnemandi) plöntutegunda er augljós og slíkar tegundir eru í raun undirstaða landbúnaðar víða um heim. „Cyano-bacter", eða blágrænubakteríur og skyldar lífverur, sem m.a. finnast í lífrænni jarðvegsskán og rætt var um í tengslum við lífræn efni (3. kafli), vinna einnig svipuð afrek, sem eykur gildi þeirra sem frumherja við landnám plantna því vistkerfin þurfa mikið af nitri til þess að gera hringrás næringarefna sæmilega virka (mynd 15.4).

Niturlosun/rotnun (e. mineralization eða ammonification). Þetta ferli færir nitur sem bundið er í lífrænum efnum yfir á nýtanlegt form. Lífrænt N er gert aðgengilegt þegar NH_3 (gas) losnar í jarðvegslausn og verður síðan að NH_4^+ í lausninni. Þvag inniheldur mikið af nitri á forminu NH_2 (bundið lífrænum sameindum) sem gengur undir svipuð efnahvörf og verður að NH_3. Þvagefni eru mjög mikilvæg áburðarefni og eru hluti af lífrænum áburði sem borinn er á við ræktun. Þvagefnið „urea" er mikið notaður áburður erlendis og er í raun lausn sem er mettuð af NH_3. Sprengihætta samfara meðhöndlun á slíku efni er mikil.

Nítrun (e. nitrification). Tvær bakteríur vinna á NH_4^+ og oxa þetta efnasamband í NO_3^-. Annars vegar er það bakterían nitrosomonas, sem framleiðir NO_2^- og losar um leið orku og H^+, en hins vegar nitrobacter sem oxar NO_2^- í NO_3^- en við það losnar einnig orka og H^+ (takið eftir H^+ í NH_4^+). Þessi ferill er afar mikilvægur í landbúnaði, m.a. við áburðargjöf, en hefur jafnframt sýrandi áhrif á jarðveginn því mikið af prótónum (H^+) losna við efnahvörfin og geta valdið skemmdum á moldinni. Því skiptir máli á hvaða formi nitur er borinn á jarðveg. Mikil jónrýmd, sem einmitt einkennir stærstan hluta af íslenskum jarðvegi, minnkar sýrandi áhrif tilbúins áburðar.

Afnítrun – uppgufun (e. denitrification – volatilization). Afnítrun er ferli sem leiðir til afoxunar nítrats (NO_3^-) svo það verður að hláturgasi (N_2O), og að lokum að N_2 (afturhvarf til andrúmsloftsins). Hláturgas og N_2 eru loftegundir sem losna auðveldlega úr mold til andrúmsloftsins. Þetta ferli gerist þar sem súrefnisstyrkur er lítill og niturox íðin taka sæti súrefnis í efnaferlum (taka við rafeindum, svipað og súrefni við bruna á kolefni, en súrefni er mikill rafeindafíkill), en efnahvarfið þarf að hafa greiðan aðgang að kolefni. Lífræn ensím eru afar mikilvæg við þetta ferli, eins og mörg önnur efnaferli í jarðvegi. Eins og ljóst má vera eru þessi og svipuð efnahvörf háð því að súrefnisþrýstingur sé lágur (lítið af súrefni, loftfirrð), t.d. í votlendi. Losun á hláturgasi hefur verið mæld úr röskuðum mýrum á Íslandi og einnig úr röskuðum mólendum sem eru rök hluta ársins (Keller o.fl. 2020).

Hláturgas (N_2O) er afar öflug gróðurhúsalofttegund (200–300 sinnum öflugri en CO_2) og því er brýnt að það losni sem minnst úr landbúnaðarkerfum og röskuðum votlendum. Hláturgas losnar í litlum mæli úr náttúrulegum óröskuðum votlendum, sem taka upp kolefni á móti og hafa því ekki eins mikil áhrif á styrk gróðurhúsalofttegunda. Hætta er á losun N_2O í kerfum sem hafa ofgnótt af nitri við rakar aðstæður – gæti t.d. átt sér stað í sumum lúpínubreiðum (ekki vitað). Við þær aðstæður hefði lúpína neikvæð loftslagsáhrif þrátt fyrir að binda kolefni.

Niturupptaka (e. immobilization; fjötrun, gera óvirkt). Þetta ferli er í raun upptaka á N þar sem það myndar lífræn efnasambönd, sem gerir nitrið um leið óvirkt í jarðvegi í bili, í fjötrum lífrænna efna.

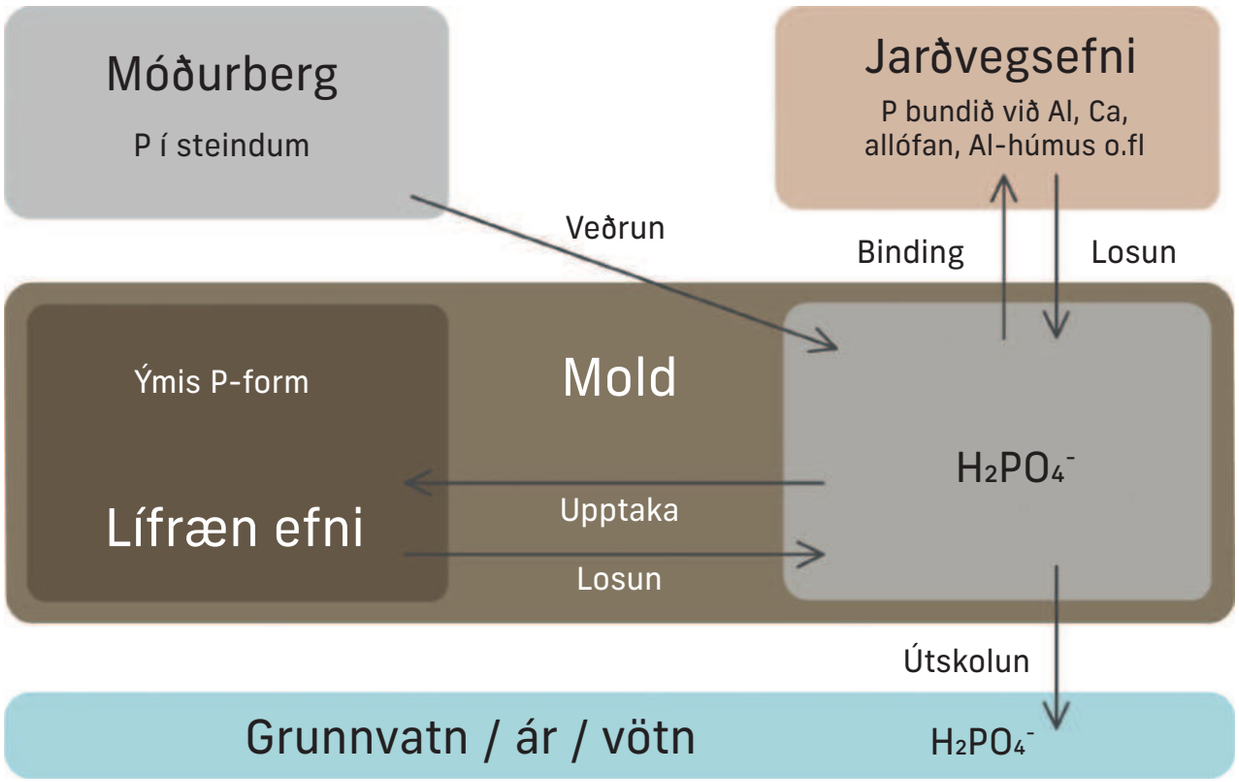
Útskolun. Fjallað var um útskolun í tengslum við myndun jarðvegs (8. kafli), t.d. þegar E- og Bt-lög þróast, en þá var einkum rætt um ferli innan sniðanna. Jarðvegslausnir tapast einnig úr moldinni þegar hún verður vatnsósa; laust vatn (e. gravitational water) streymir til grunnvatns, stöðuvatna og straumvatna. Það er afar mikilvægt að hafa í huga að mörg mikilvæg form niturs finnast einkum í jarðvegslausninni og þá ekki síst nítrat (NO_3^-).

Ef vatn skolast úr jarðveginum tapast nítrat (NO_3^-) með vatninu. Þetta getur verið bagalegt fyrir landbúnað þar sem mikilvægt er að áburðarnýting sé sem best. Nitrið er í ofanálag afar mengandi þar sem stuðpúðann vantar í straumvötnin og grunnvatnið. Áburðarmengun hefur einmitt orðið til þess að grunnvatn er ódrykkjarhæft á stórum svæðum í Evrópu og víðar.

15.3. Fosfór og fosfórhringrásin

Fosfór er eitt þeirra efna sem er lífsnauðsynlegt fyrir plöntur auk þess sem tiltölulega mikið þarf af efninu – það er í hópi svokallaðra meginefna. Fosfór er hluti af ATP sem er eins konar orkumiðill fyrir flest lífefnaferli. Þau ferli sem þarfnast orku fá þau yfirleitt frá ATP. Fosfór er m.a. mikilvægur fyrir ljóstillífun plantna og fræmyndun. Hann er jafnframt bæði í DNA og RNA. Öfugt við nitur er mikið af fosfór (P) í jarðskorpunni, en það er afar mismunandi eftir bergtegundum. Niturbindandi tegundir á borð við smára og alfa-alfa gera miklar kröfur til aðgengis að fosfór. Svepprætur eru taldar hjálpa til við upptöku á fosfór.

Yfirleitt er fremur lítið magn af lausum fosfór í mold þar sem hann er m.a. bundinn lífrænum efnum. Fosfórskortur er viðvarandi vandamál í löndum



Mynd 15.5. Einfölduð skýringarmynd af fosfórhringrásinni. Plöntur taka upp fosfór einkum á forminu H_2PO_4. Fosfór kemst í moldina við veðrun á bergi og þegar lífræn efni rotna. Losun P frá allófani og málm-húmus-fjölliðum er iðulega lítil.

þar sem skógar hafa verið ruddir til landbúnaðarnota, t.d. í Afríku. Fosfórinn tapast með minnkandi magni lífrænna efna í moldinni og kerfinu í heild. Ofgnótt fosfóráburðar með tilheyrandi mengun er víða vandi í ríkari löndum heims. Plöntur þurfa mun minna af P en N; oftast 10–20 sinnum minna. Mest er af fosfór í ýmsu setbergi. Oft er vandinn sá að gera fosfórinn aðgengilegan plöntum.

Á mynd 15.5 er sýnd einfölduð fosfórhringrás. Við veðrun á berginu losnar um fosfór – einkum á forminu $H_2PO_4^-$ í jarðvegslausn – sem jafnframt er meginform fosfórs sem plöntur taka upp. Ef kalk er í kerfinu (mikið af Ca^{++}, hátt pH) hvarfast þessi jón við kalsíum og myndar torleyst efnasamband. Það hefur einnig tilhneigingu til að bindast áli og járnhýdroxíðum, en P á því formi er mjög torleyst og því óaðgengilegt fyrir plöntur. Þessi efni eru m.a. notuð til að fella út fosfór við meðhöndlun á fosfórmenguðu vatni. Eins og sést á myndinni kemur nýtanlega fosfórjónin ($H_2PO_4^-$) úr þremur áttum: frá lífræna efninu við hringrás lífrænna efna (næringarefnahringrás), að einhverju leyti frá ólífrænum samböndum (P bundið kalki, Al- og Fe-efnasambönd o.fl.) og við veðrun á bergsteindum sem innihalda fosfór, t.d. apatíti. Þess má geta að efnasamsetning beina og tanna í mannslíkamanum er mjög skyld apatíti. Fosfór getur, rétt eins og nitur, auðveldlega tapast við útskolun og veldur þá mengun. Fosfórmengun straumvatna, stöðuvatna og innhafa er alvarlegt vandamál víða um heim þar sem áburðarnotkun er mikil. Í náttúrulegum vistkerfum er hins vegar yfirleitt nóg af P í hringrásinni, slík kerfi eru frekar takmörkuð af N. Í graslendi er mest af fosfórnum bundið lífrænum efnum í moldinni, en í skógum er minna af P í moldinni. Við ræktun þarf hins vegar að bera á fosfór.

Það er eitt megineinkenni *eldfjallajarðar* (Andosol) að hún bindur fosfór, teppir hann í torleystum efnasamböndum. Fosfórinn binst bæði allófan-steindum og málm-húmus-fjölliðum (sjá kafla um *eldfjallajörð*) og losnar ekki þaðan. Þar sem þannig háttar til safnast fosfór smám saman fyrir í moldinni við áburðargjöf, en halda þarf áburðargjöfinni áfram, ár eftir ár, til að tryggja góða uppskeru. Á móti kemur að yfirleitt er lítil hætta á fosfórmengun frá *eldfjallajörð*, sem einnig á við hér á landi.

15.4. Súlfúr (brennisteinn)

Náttúruleg hringrás súlfúrs í vistkerfum er nokkuð flókin. Efnið getur haft mjög mörg oxunarstig, rétt eins og nitur. Oxun súlfúrs er vitaskuld bruni, sem getur verið mjög öflugur, enda var efnið notað í sprengiefni – púður – áður fyrr, sem endurspeglast í heitinu brennisteinn sem gjarnan er notað um súlfúr. Hér eru bæði heitin notuð að einhverju leyti, en höfundur er fylgjandi þeirri stefnu að heiti frumefna sé nálægt alþjóðlegum heitum sem endurspeglast þá í tákni efnisins (N fyrir nitur, S fyrir súlfúr). Mörgu í hringrás súlfúrs svipar til niturhringrásarinnar; súlfúr berst í mold úr andrúmsloftinu en einnig að hluta úr bergefnum og stærsti hluti hans binst lífrænum efnum í næringarhringrásinni. Rætur taka upp súlfúr þegar hann losnar við rotnun lífrænna efna.

Yfirleitt þurfa plöntur um 1/10 hluta súlfúrs miðað við nitur. Margar bergtegundir innihalda umtalsvert magn súlfúrs, en hann berst einnig í moldina sem mengun, ekki síst þar sem kol eru brennd við orkuframleiðslu. Hér á landi geta kynstrin öll af súlfúr borist í andrúmsloftið í eldgosum og sumt af honum berst í moldina með regni. Brennisteinn er einkum tekinn upp á forminu SO_4^{-2} (súlfat). Bakteríur og ensím eru afar mikilvæg við oxunarferli brennisteins. Súlfúrtvíoxíð (SO_2) er eitrað, jafnvel þótt það sé til staðar í mjög litlum mæli, en þó geta plöntur

tekið það upp í gegnum laufin (sjá Tisdale og Nelson, 1975).

Súlfúr er stundum hluti áburðarefna við ræktun, sérstaklega þegar ræktunartegundir gera miklar kröfur til þess eða eru viðkvæmar fyrir brennisteinsskorti. Niturbindandi tegundir sem stuðla að niturnámi þurfa að hafa gott aðgengi að súlfúr sem og margar káltegundir. Laukar innihalda mikið af súlfúr eins og ráða má af lykt þeirra. Þar sem næringarefni eru að stórum hluta bundin ofanjarðar, eins og í regnskógum, getur stór hluti súlfúrforðans tapast við bruna. Eyðing regnskóganna felur því í sér tap á mikilvægum næringarefnum úr kerfinu á borð við súlfúr, sem síðar kallar á mikla áburðargjöf við ræktun nytjategunda.

Súlfat (SO_4^{-2}) getur tapast úr mold með útskolun á svipaðan hátt og $H_2PO_4^-$ og NO_3^-. Ofgnótt súlfúrs getur einnig orðið verulegt vandamál vegna þess að efnið getur sýrt moldina. Súr mold er algeng á námasvæðum, t.d. þar sem kol og ýmsir málmar eru unnir úr jörðu, og því er efnafræði súlfúrs mikilvæg í námafræðum. Við þær aðstæður er nauðsynlegt að leita leiða til að hækka sýrustigið, sem yfirleitt er afar kostnaðarsamt.

Hér á landi er mikið af brennisteini á jarðhitasvæðum og við jarðhitavirkjanir. Súlfúr frá gufuaflsvirkjunum tærir gróður og getur skemmt viðkvæm rafmagnstæki af sömu ástæðu, m.a. kopar í tengingum, jafnvel í mikilli fjarlægð frá mannvirkjunum því lítið þarf til. Sprenging verður við mjög hraða oxun á afoxuðu formi brennisteins. Brennisteinn var numinn úr jörðu á háhitasvæðum hérlendis á öldum áður og fluttur út, m.a. til að nota í púður á þeim tímum sem Evrópuþjóðir áttu í sífelldum styrjöldum innbyrðis, allt þar til öflugra sprengiefni var fundið upp sem byggðist á nitri.

15.5. Basískar katjónir (K, Ca, Mg, Na)

Í þessum undirkafla er fjallað um katjónir sem einkum berast til planta frá jónrýmdarsætum, en þangað eru þær komnar fyrir tilstuðlan efnaveðrunar á bergi. Jónirnar eru kalí (K), kalsíum (Ca), magnesíum (Mg), mangan (Mn) og járn (Fe). Auk þess teljast margar katjónir til snefilefna sem fjallað er um hér síðar.

15.5.1. Kalí

Kalí (K) er það efni sem plöntur þurfa í hvað mestum mæli; það er 1–4% K í laufum plantna, litlu minna en af nitri. Gríðarlegt magn er því fjarlægt af kalí rétt eins og nitri í landbúnaðarkerfum. Kalí er notað í vatnsbúskap plantna (osmósa o.fl.), það er mikilvægur liður í starfsemi margra ensíma og nýtist í ljóstillífun og niðurbroti sykra, svo dæmi séu tekin. Gnótt af K stuðlar m.a. að viðnámi plantna gegn þurrkum og plöntusjúkdómum. Iðulega er hætt við kalískorti í ræktun, enda er það eitt þriggja meginefna sem notuð eru í áburði ásamt N og P. Kalí losnar við veðrun úr bergi, sest í jónrýmdarsæti og er miðlað þaðan sem K^+. Það tapast einkum með útskolun, en þegar mold hefur mikla jónrýmd og basamettun er yfirleitt gnægð af aðgengilegu kalí til staðar sé ekki gengið á forðann með ræktun. Margar plöntur, m.a. ræktunartegundir, taka upp ofgnótt af K sé það til staðar í miklu magni, sem má kalla „lúxus-neyslu“ efnisins (e. luxury consumption) og getur valdið K-skorti þegar til lengri tíma er litið.

Erlendis þar sem leirsteindin illít er í jarðvegi er mikil hætta á að K^+ festist í kristalgrindum illíts og nýtist þar með ekki (e. fixation). Þetta vandamál er ekki til staðar hérlendis svo vitað sé.

15.5.2. Kalsíum og magnesíum

Kalsíum (Ca^{++}) kemst í jarðvegslausn með svipuðum hætti og kalí. Framboð á því er mjög háð sýrustigi og jónrýmd því yfirleitt er meira af Ca í jónrýmdarsætum eftir því sem sýrustigið er hærra. Þar sem mikið er af kalsíum í móðurbergi, svo sem í kalksteini og ýmsum basískum bergtegundum eins og hér á landi, er lítil hætta á að kalsíum skorti. Þó er upptaka á kalsíum og notkun þess í plöntum nokkuð viðkvæm fyrir hlutföllum við aðrar jónir, t.d. Mg^{++}; ef þau hlutföll eru mjög óvenjuleg getur gætt ýmiss konar skortseinkenna eða vanþrifa.

Magnesíum (Mg^{++}) er afar svipuð jón og kalsíum; báðar eru þær tvígildar en kalsíum er haldið fastar í jónrýmdarsætum. Minna þarf af magnesíum en kalsíum, en deilt er um hvort til sé æskilegt hlutfall Ca miðað við Mg. Nýlegar rannsóknir benda þó til ofmats á mikilvægi þessa hlutfalls. Það er einkum þegar berg inniheldur mikið Mg en ekkert Ca sem hætta er á vandamálum vegna skorts á kalsíum.

15.6. Snefilefni

15.6.1. Helstu snefilefni

Rannsóknir á næringarefnum í jarðvegi í tengslum við ræktun snúast að langstærstum hluta um meginefnin nitur, kalí og fósfór sem oftast eru uppistaða áburðarefna. Önnur meginefni sem stundum eru í áburði eru t.d. kalsíum og súlfúr (brennisteinn). Með vaxandi þrýstingi á jarðvegsauðlindina, bættri mælitækni og aukinni umræðu um tengsl snefilefnaframboðs og lýðheilsu hefur umfjöllun stóraukist um snefilefni í jarðvegi. Slík umræða er þó oft á tilfinningalegum nótum og þess gætir nokkuð að fram komi tillögur um skyndilausnir í ræktun eða á heilsufarsvandamálum sem ekki eiga sér fræðilegar forsendur. Víðfeðmar tilraunir hafa verið gerðar til að komast að því hvaða áhrif skortur á snefilefnum í plöntum og dýrum hefur við mismunandi jarðvegsaðstæður, ekki síst í tengslum við ræktun nytjajurta. Ekki er hægt að gera þessu fjölbreytta viðfangsefni ítarleg skil í riti sem þessu en bent á afbragðskafla í Weil og Brady 2017 sem dæmi.

Járn (Fe) og **mangan** (Mn). Yfirleitt eru gildi járns og mangans fremur há í íslensku fóðri, sem m.a. má rekja til áfoks efna með há Fe- og Mn-gildi (ÓA 2015). Hátt Mn-gildi má eflaust skýra bæði með basískri efnafræði bergefnanna og afoxun í votlendum og vegna frosts í jarðvegi (sjá hér aftar um frost og þýðu).

Kopar (Cu) er iðulega bundinn lífrænum fjölliðum (málm-húmus-komplexar) í jarðvegi, sem einmitt er mikið af í íslenskri mold (Mengel, 2008). Þannig er koparskortur oft í *barrskógajörð* í nágrannalöndunum, en hún er rík af lífrænum fjölliðum eins og moldin hérlendis. Bjarni Guðmundsson og Þorsteinn Þorsteinsson (1980) mældu snefilefni í grasi og skýrðu frá lágum gildum fyrir kopar. Rannsókn Grétars Hrafns Harðarsonar o.fl. (2006) sýndi lág gildi kopars í heysýnum og einnig sinks. Kristín Vala Ragnarsdóttir og Hawkins (2006) sýndu fram á að Cu-gildi í íslenskum jarðvegi gæti verið afar lágt og að hlutfall Mn/Cu væri mögulega óhagstætt með tilliti til heilbrigðis. Mælingum ber þó ekki alveg saman og þess má geta að Panek og Kepinska (2002) fundu hærri Cu-gildi í íslenskri mold en gengur og gerist t.d. í Mið-Evrópu.

Sink (Zn). Skortur á sinki er yfirleitt rakinn til jarðvegs með hátt sýrustig (kalkjarðvegur) en lífrænar fjölliður geta einnig bundið sinkið. Af þeim er ofgnótt í mörgum íslenskum jarðvegsgerðum, eins og áður hefur komið fram. Nokkrar rannsóknir hafa verið gerðar á bindingu sinks í jarðvegi hérlendis sem sýna að

Snefilefnin eru mikilvæg!

Þau snefilefni í jarðvegi sem oftast koma til umræðu eru járn (Fe), mangan (Mn), sink (Zn), bór (B), kopar (Cu), mólýbden (Mo), nikkel (Ni) og selen (Se). Margfalt meira þarf af járni og mangan samanborið við mólýbden og nikkel.

Þessi efni gegna margvíslegu hlutverki í lífefnafræði plantna og dýra. Kopar, járn og mólýbden eru mikilvæg fyrir oxunar- og afoxunarferli í ensímum.

Mangan er afar mikilvægt fyrir sýklavarnir plantna og snefilefni eru raunar mikilvæg almennt til að sporna við plöntusjúkdómum. Skortur getur leitt til sjúkdóma í dýrum, þar á meðal í mannfólki.

hún er sterk en það sogast sennilega fast á yfirborð járnhýdroxíða (Gunnar Sigurðsson o.fl. 2007). Arsen virðist hegða sér með svipuðum hætti (Bergur Sigfússon, óbirt gögn). Hér er einnig rétt að geta rannsókna Torkells Jóhannessonar o.fl. (2005, 2007) og Kristínar Völu Ragnarsdóttur og Hawkins (2006) á kopar og mangani í tengslum við riðu á Íslandi.

Mólýbden (Mo) finnst einkum í jarðvegslausn sem MoO_4^{-2} og hefur að mörgu leyti svipaða hegðan og fosfór ($H_2PO_4^-$) í moldinni. Þessi jón binst fast við járn- og áloxíð og hýdroxíð. Málm-húmus-knippi (fjölliður), sem eru ráðandi í *svartjörð* og *mójörð*, eru þessarar náttúru og eru líkleg til að binda mólýbden líkt og gerist með fosfór. Leirefni í íslenskum jarðvegi, allófan og ferrihýdrít, hafa svipuð einkenni og ál- og járnsteindir og því er ekki ólíklegt að Mo sé að finna í fremur lágum styrk í íslenskum gróðri, en þó einkum þar sem sýrustig er lágt (t.d. á Vestfjörðum). Styrkur Mo virðist afar breytilegur í íslensku heyi (Torkell Jóhannesson o.fl., 2005, 2007) og getur verið of lágur með tilliti til heilsufars dýra.

Selen (Se) er í sjálfu sér ekki nauðsynlegt fyrir vöxt plantna en er mikilvægt fyrir dýr, þar með búfé og fólk. Mikið hefur verið ritað um hugsanlegan þátt selenskorts í krankleika íslenskra húsdýra (sjá Grétar Hrafn Haraldsson o.fl. 2006). Samkvæmt mælingum er selenstyrkur í heysýnum lágur og gæti valdið selenskorti (sjá t.d. Torkell Jóhannesson o.fl. 2005; Grétar Hrafn Haraldsson o.fl. 2006). Fróðlegt væri að tengja þessar mælingar betur við jarðvegseiginleika, en aðrir þættir svo sem vaxtartími, vaxtarhraði o.fl. kann að hafa áhrif hérlendis (Baldur Símonarson o.fl. 1984).

15.7. Miðlun næringarefna

Við jarðvegsmyndun öðlast moldin smám saman mikilvæga eiginleika sem eru nauðsynlegir fyrir miðlun næringarefna. Hér eru nefndir nokkrir þessara eiginleika sem hafa áhrif á framboð næringarefna, bæði meginefna og snefilefna.

Lífræn efni og sortuefni. Uppsöfnun Lífrænna sameinda er afar mikilvæg. Lífræn efni eru næringarforði og stjórna m.a. miðlun meginefna á borð við kolefni, nitur og snefilefni. Sortuefnin, þ.e. lífrænar fjölliður, allófan og ferrihýdrít, hafa tilhneigingu til að fastbinda mörg mikilvæg næringarefni, t.d. fosfór og ýmis snefilefni.

Örverur bæði umbreyta og losa um næringarefni sem plöntur nýta. Örverur nota einnig næringarefni, sem m.a getur valdið tímabundnum skorti á efnum á borð við nitur. Nýting örvera á næringarefnum hægir á tapi næringar úr jarðveginum með útskolun. Örverurnar vinna einnig í sambýli við rætur og örva upptöku á margvíslegum snefilefnum. Lágt hlutfall C/N örvar starfsemi örvera (t.d. <12) en hátt hlutfall takmarkar örverustarfsemi og rotnun plöntuleifa.

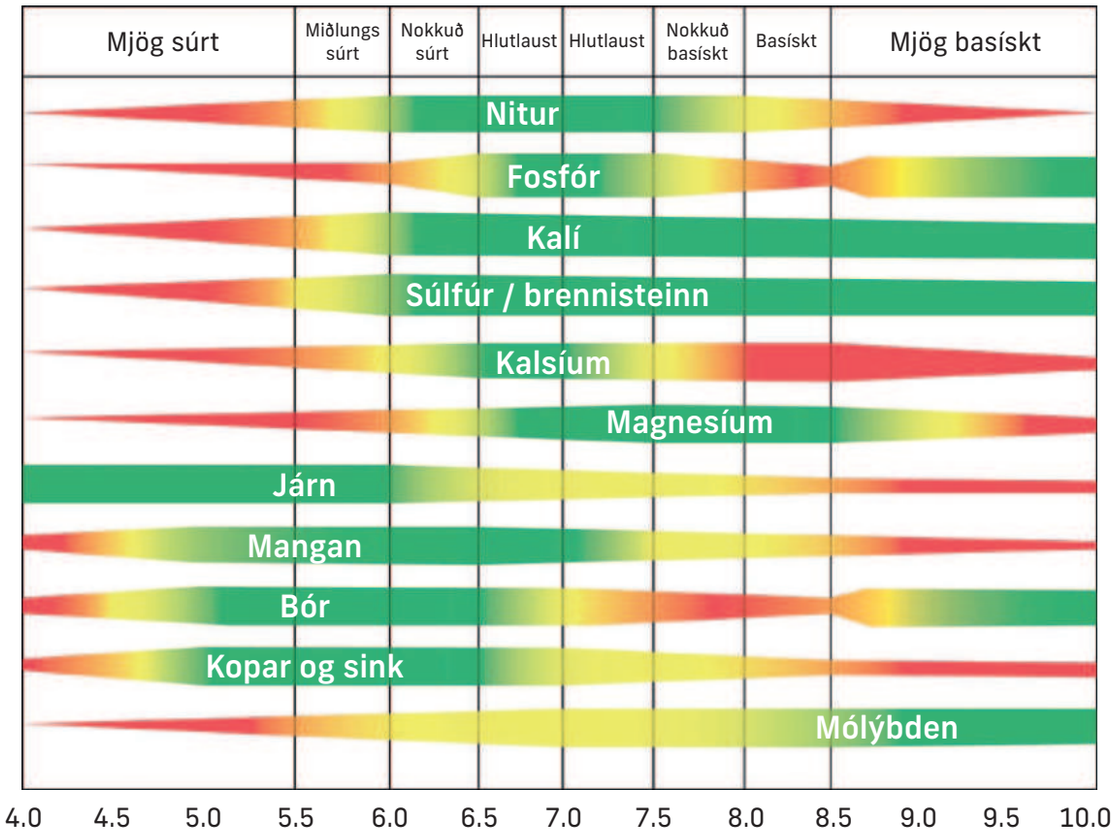
Oxun-afoxun. Framboð og form flestra snefilefna er háð afoxunarspennu í jarðvegi. Þannig stuðlar afoxun í súrefnissnauðum jarðvegi að auknu framboði á Fe, Co, Cu, Mn, Mo, Ni og Zn. Þetta getur einnig valdið eitrun í jarðvegi við vissar aðstæður. Oxun og afoxun stjórnar að hluta framboði lífrænt bundinna næringarefna, en við oxun þeirra verða þau aðgengileg plöntum.

Framboð snefilefna í jarðvegi hefur áhrif á virkni ensíma, en mörg snefilefni eru mikilvægur hluti af byggingu ensíma en önnur kveikja á virkni þeirra. Oxun á sér stað fyrir tilstuðlan ensíma sem

liðka bæði fyrir oxun og afoxun með því að bera rafeindir milli mismunandi efnasambanda jarðvegsins. Ensím sem stuðla að afoxun lífrænna efna við loftfirrtar aðstæður stuðla að losun gróðurhúsalofttegunda úr jarðvegi á borð við hláturgas (N_2O) og metangas (CH_4).

Jónrýmd. Lífræn efni og leirefni gefa moldinni jónrýmd (e. cation exchange capacity). Lífrænar sameindir og leirsteindir hafa hleðslu sem yfirleitt er jákvæð og veldur því að jákvætt hlaðnar jónir á borð við Ca^{++}, Mn^{+}, K^{+} og Mg^{++} loða við agnirnar. Þeim er síðan miðlað til róta plantna eftir því sem þörf er á, meginefnum jafnt sem snefilefnum. Jónrýmd er afar breytileg eftir jarðvegsgerðum en alla jafna minnst í mjög veðruðum hitabeltisjarðvegi og jarðvegi þar sem lítið er af lífrænum efnum og leir (t.d. sendnum jarðvegi). Jónrýmd hefur einnig áhrif á virkni ensíma og upptöku plantna á slíkum sameindum (Quiauampoix 2008). Mikil jónrýmd stuðlar að bindingu skaðlegra efna svo sem þungmálma í jarðvegi og tefur þar með útskolun þeirra úr mold í drykkjarvatn eða upptöku þeirra af plöntum. Jónrýmd er tengd kornastærð og því er þess að vænta að minna næringarframboð sé í grófum sandjarðvegi en leirmold, svo dæmi sé tekið, auk þess sem útskolun er meiri í sandinum sem getur valdið tapi á næringarefnum.

Sýrustig (pH) stjórnar efnajafnvægi og formi margra næringarefna (mynd 15.6). Ef moldin súrnar minnkar styrkur ýmissa mikilvægra næringarefna, jafnframt því sem eitraðar jónir á borð við Al^{3+} koma til skjalanna. Kjörsýrustig næringarefna er nátengt kjörsýrustigi örvera (pH 6–7) en sýrustig hefur mikil



Mynd 15.6. Framboð næringarefna fyrir plöntur er afar háð sýrustigi. pH 6–7 er yfirleitt hagstæðast. Sem dæmi má nefna að Mo, Ca og Mg tekur að skorta við pH 5–5,5 sem er algengt sýrustig í íslenskum votlendum (jafnvel lægra). Framboð á mörgum þessara efna tekur einnig að minnka við hátt pH, en óalgengt er að pH á Íslandi fari yfir 7,5, en það er einkum hátt í auðnum. Myndin er byggð á svipuðum myndum og eru í kennslubókum um jarðveg og á alnetinu.

áhrif á virkni þeirra. Súr jarðvegur dregur til að mynda verulega úr starfsemi þeirra sem leiðir til þess að hann verður ófrjósamur. Æskilegt sýrustig fyrir mörg næringarefni (pH 6–7) er einmitt algengt sýrustig *brúnjarðar* á Íslandi, en *svartjörð* og *mójörð* hafa iðulega lægra sýrustig.

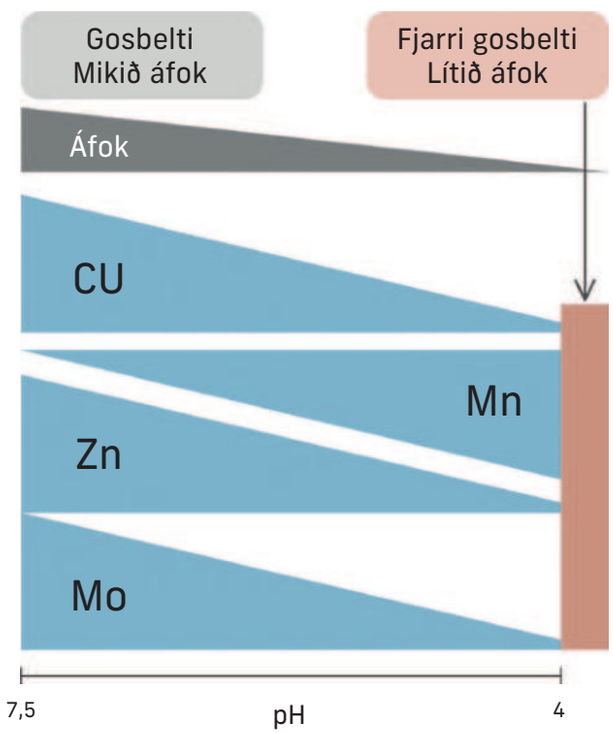
Veðrunarhraði, áfok, regn og útskolun. Eyðist það sem af er tekið. Náttúruleg vistkerfi þar sem uppskeran er ekki fjarlægð ár hvert eru í jafnvægi. Nýting vistkerfa fjarlægir orku og næringarefni úr kerfunum. Veðrun losar næringarefni úr bergefnum í stað þeirra sem eru fjarlægð við ræktun, en áburðargjöf er yfirleitt nauðsynleg til að viðhalda styrk meginefnanna sé mikið uppskorið.

Heitt og rakt loftslag stuðlar að örri veðrun, en framboð og gerð bergefna vega í mörgum tilfellum þyngra en veðurfarsaðstæður. Veðrunarhraði er að jafnaði örastur í ungum jarðvegi, mun örari en þar sem veðrun hefur gengið mjög langt. Veðrunarhraði í hitabeltinu er t.a.m. afar hægur enda þótt veðurfarið gefi tilefni til örrar veðrunar, nema þar sem áfok, flóð, öskufall og annað rask hleður kerfin með nýjum bergefnum. Veðrunarhraði er mjög ör á Íslandi, sem eykur framboð næringarefna.

Sum næringarefni berast í moldina með áfoki (ryki) eða regni, en útskolun úr jarðveginum getur rýrt styrk mikilvægra næringarefna svo sem niturs og fosfórs, ekki síst í sendnum jarðvegi (skortir jónrýmd) og þar sem úrkoma er mikil, t.d. á söndum sunnanlands. Þar sem áfok er minnst á landinu, t.d. á Vestfjörðum, er hugsanlegt að skortur geti orðið á tilteknum snefilefnum en jafnvel offramboð á öðrum (mynd 15.7), en mjög skortir rannsóknir sem tengja slíka jarðvegsþætti við mælingar á snefilefnum á Íslandi.

Jarðefnafræði er mikilvægur þáttur með tilliti til næringarframboðs. Víða er lögð mikil áhersla á að kortleggja jarðefnafræði landsvæða, svo sem í Kanada, Bandaríkjunum og Bretlandi, m.a. til að kanna hugsanlegan skort eða ofgnótt á tilteknum snefilefnum í uppskeru (sjá t.d. Environment Canada 2002; Kristín Vala Ragnarsdóttir og Hawkins 2006). Skortur á snefilefnum getur valdið ýmsum sjúkdómum í búfé og fólki, eins og fram hefur komið.

Aðrir þættir. Meðal annarra þátta sem má nefna eru samkeppni jóna, efnasamsetning og hlutfall skyldra jóna, plöntutegundir, samsetning og ástand örveruflóru o.fl. Allir þessir þættir hafa áhrif á næringarhringrásina og upptöku plantna á næringarefnum.



Mynd 15.7. Tilgáta um framboð nokkurra snefilefna í votlendismold á Íslandi í tengslum við áfok. Þess er að vænta að mun minna framboð sé af kopar (Cu), sinki (Zn) og mólýbdeni (Mo) í fremur súrum jarðvegi fjarri uppsprettum áfoks, t.d. á Vestfjörðum, sem gæti jafnvel haft áhrif á uppskeru og heilsufar búfjár (rauða svæðið á myndinni). Þar er aðgengi að Mn hinsvegar mikið, sem getur haft áhrif á upptöku kalsíums o.fl. Sjá mynd 15.6, en á þessari mynd hefur pH-skala verið snúið við, það er hátt pH til vinstri á myndinni.

15.8. Áburður og ræktun

Það er kostnaðarsamt að framleiða áburð og mikilvægt að nota hann skynsamlega. Á undanförnum árum hefur verið lögð mjög mikil áhersla á að minnka umhverfisáhrif áburðargjafar.

Dæmi um það eru lagasetningar víða um lönd, m.a. á vettvangi Evrópusambandsins, til að vernda árhelgi yfirborðsvatns og koma í veg fyrir mengun grunnvatns, innhafa og vatnshlota.

15.8.1. Tilbúinn áburður – NPK

Um áratugaskeið notaðist Landgræðslan við flugvél við sáningu og áburðargjöf við uppgræðslu. Hún bar einkennisstafina TF NPK og var öldruð flugvél af gerðinni Douglas DC3 (mynd 15.8), en rituð hefur verið fróðleg bók um sögu áburðarflugsins á Íslandi. NPK vísar til helstu efnanna í tilbúnum áburði: **niturs**, **fosfórs** og **kalís** og alltaf í þessari röð.

Yfirleitt er hlutdeildar áburðarefnanna í prósentum getið með áberandi hætti utan á umbúðum, svo sem á áburðarpokum eða flöskum fyrir almennan markað. Dæmi um slíka merkingu væri 23 – 23 – 12, hlutdeild áburðarefnanna niturs, fosfórs og kalís í þessari röð. En mikilvægt er að gera sér grein fyrir hvað þessar tölur þýða í raun og veru. Þær eiga sér langa hefð og byggjast á þekkingu frá árdögum áburðarfræða. Hlutdeild fosfórs í áburði er sett fram sem P_2O_5, sem áður var talið það form sem P væri tekið upp af plöntum, sem er þó í raun $H_2PO_4^-$. Það sama á við um kalí sem var gefið upp sem oxíðið K_2O. Nitur er hins vegar alltaf gefið upp sem % N, þ.e. sem hlutdeild hreins niturs. Í raun þarf að margfalda uppgefið innihald fosfórs með stuðlinum 0,44 og kalís með stuðlinum 0,83 til að fá hlutdeild þessara áburðarefna í moldinni sem P og K. Áburður með NPK-innihaldi 23 – 23 – 12 hefur því í raun 23% N, 10% P og 10% K.

Að auki eru bæði kalsíum (Ca) og súlfúr (S) oft í áburði og stundum önnur efni eftir aðstæðum á borð við jarðvegsgerð og ræktartegund. Unnt er að draga mjög úr notkun tilbúins áburðar með skynsamlegri nýtingu lífræns áburðar sem fellur til við framleiðsluna og það gera íslenskir framleiðendur í ríkum mæli.

Áburður og fæða

Með sönnu má telja að þróun áburðarnotkunar sé ein meginstoð grænu byltingarinnar svokölluðu, sem er m.a. undirstaða þess að unnt er að fæða og klæða jafnmarga jarðarbúa og raun ber vitni.

En það má líka færa fyrir því rök að ræktunin hafi víða verið ansi dýru verði keypt með eyðingu regnskóga fyrir ræktarland, raski á vatnshag á tröllauknum skala, mengun moldar og vatnshlota, og svo mætti lengi telja.

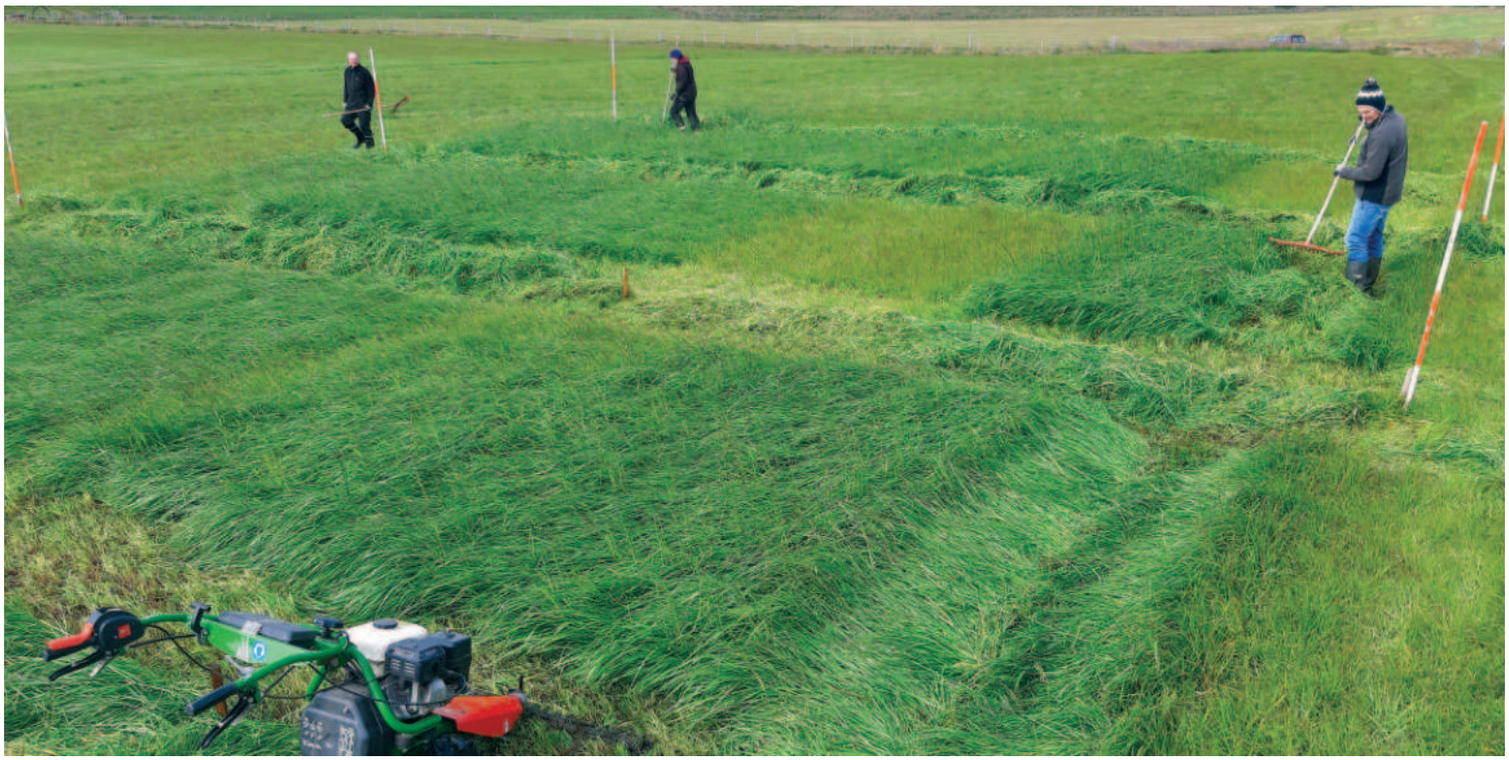
Mynd 15.8. Landgræðsluflugvélin svokallaða af gerðinni Douglas DC3 bar einkennisstafina TF-NPK (sjá aftarlega á vélinni) eftir meginefnunum í áburði. Nýlega var gefin út bók um sögu áburðarflugsins á Íslandi (Sveinn Runólfsson og Páll Halldórsson 2021). Mynd: Niels Helmoe-Larsen/Landgræðslan.

15.8.2. Hve mikill áburður?

Á Íslandi hafa verið gerðar umfangsmiklar tilraunir með áburðargjöf í ræktun, ekki síst á vegum Rannsóknastofnunar landbúnaðarins fyrir árið 2005 og síðar hjá Landbúnaðarháskóla Íslands (mynd 15.9). Ráðlögð áburðargjöf byggist á niðurstöðum úr þessum tilraunum, sem eykur líkur á hámarksnýtingu áburðargjafarinnar. Hægt er að sækja sér fróðleik og leiðbeiningar um áburðargjöf hjá Ráðgjafarmiðstöð landbúnaðarins (rml.is). Yfirleitt er gert ráð fyrir 80 til 140 kg af N á hvern ha í ræktun á túnum og grænfóðri, 10–25 kg af P á ha og 20 til 60 kg af K, háð aðstæðum og magni þeirrar uppskeru sem sóst er eftir.

Þegar of mikið er borið á hækkar kostnaður á hverja einingu uppskeru mjög ört og hagkvæmnin minnkar og það sama á við ef of lítið er borið á. Einnig þarf að taka tillit til stærðar þess ræktarlands sem notað er hverju sinni, kostnaðar við endurvinnslu túna og fleiri þátta. Húsdýr leggja til óhemjumikinn úrgang, u.þ.b. 12 tonn þurrefnis eftir hverja mjólkurkú á ári, svo dæmi sé tekið. Húsdýraáburður hefur iðulega 2–4% N og mörg önnur nauðsynleg næringarefni. Lífrænn áburður nýtist því hraðar sem C/N-hlutfall áburðarins er lægra. Það er vitaskuld afar mikilvægt að skila sem mestu af áburðarefnunum sem falla til með þessum hætti aftur inn í kerfið. Lífrænn áburður hefur einnig þann kost að minni hætta er á útskolun næringarefna: þau losna hægar og eru tengd lífrænum efnum. Þó getur mengun fylgt húsdýraáburði, t.d. þar sem mikið er notað af lyfjum og öðrum aðskotaefnum í framleiðslunni.

Lífrænn áburður hefur margháttuð jákvæð áhrif á ræktunarmold, svo sem að auka lífrænan massa, bæta vatnsheldni og jónrýmd auk þess sem honum fylgir aukin virkni örvera. Þá hefur lífræni áburðurinn breiðari virkni því honum fylgja mun fleiri nauðsynleg næringarefni en aðeins meginefnin NPK sem borin eru á með tilbúnum áburði.



Mynd 15.9. Áburðartilraunir eru mikilvægur liður í að ákvarða hæfilegt magn áburðar til að hámarka nýtingu áburðargjafar. Áburður er stór kostnaðarliður í landbúnaðarframleiðslu og því mikilvægt að ná sem mestri hagkvæmni. Áburður eykur uppskeru upp að ákveðnu marki en áburðargjöf umfram það er óþarfa sóun. Myndin er af tilraunaræktun á vegum Landbúnaðarháskóla Íslands. Mynd: Þóroddur Sveinsson.

Hlutfallslega eru jákvæðuáhrifin mest þar sem borið er á fremur ólífrænan jarðveg. Sjá mynd 15.10 af mykjudreifingu.

15.8.3. Lífræn ræktun

Áhersla á lífrænar ræktunaraðferðir hefur aukist víða um heim á undanförnum árum samhliða auknum áhuga á umhverfisvernd og heilsuvitund. Ljóst er að þessar aðferðir geta stuðlað að betri meðferð á mold, minnkað jarðvegsrof og aukið endurnýtingu áburðarefna. Lífræn ræktun byggist mjög á lífrænum áburði á borð við mykju, tað, þvagefni og moltu, sem hefur marga mikilvæga kosti fram yfir tilbúinn áburð, eins og áður sagði.

Hugmyndafræði lífrænnar ræktunar fellur vel að markmiðum alþjóðasamfélagsins um sjálfbæra þróun. Á meðal þess jarðræktarfólks sem hefur sýnt andstöðu við lífrænar ræktunaraðferðir er bent á að lífræn ræktun kalli á aukið landrými sem víða sé ekki til staðar, auk þess sem uppskera á flatarmálseiningu og í heild geti minnkað umtalsvert. Það er þó alls ekki einhlítt. Á móti kemur að notkun á hvers kyns eiturefnum í landbúnaði getur haft neikvæð áhrif á umhverfi og lýðheilsu. Lífrænar ræktunaraðferðir tryggja ennfremur bætta meðferð húsdýra sem víða stenst ekki siðferðileg sjónarmið um dýravelferð. Það ber hins vegar að varast alls kyns hindurvitni og kreddur sem hafa fengið talsvert rúm bæði hjá þeim sem aðhyllast lífrænar ræktunaraðferðir og þeim sem hafa lagst eindregið gegn þeim. Það er augljóst að lífrænar ræktunaraðferðir sem byggjast á styrkum faglegum grunni geta haft jákvæð áhrif á verndun moldarinnar sem og lýðheilsu (mynd 15.11).

15.9. Mengun og lýðheilsa

Rétt er að víkja hér að lokum að mold og lýðheilsu, en sömu lögmál gilda

Mynd 15.10. Dreifing á lífrænum áburði er mikilvægur liður í sjálfbærri nýtingu auðlinda. Lífræni áburðurinn hefur margt umfram ólífrænan áburð. Mynd: Áskell Þórisson.

um ferli mengunarefna um moldina og nauðsynlegra næringarefna. Eftirfarandi kafli byggist á umfjöllun ÓA og Rannveigar Guicharnaud frá 2008.

Jarðvegur telst vera mengaður þegar hann inniheldur óeðlilega hátt hlutfall frumefna eða efnasambanda sem getur haft skaðleg áhrif á heilsu manna og dýra. Skaðleg efni geta verið bæði ólífræn (t.d. þungmálmar) og lífræn (t.d. skordýraeitur, olíuafurðir og klórberandi efni). Þungmálmar eiga uppruna sinn að rekja til jarðskorpunnar. Bæði menn og dýr innbyrða lítið eitt af þungmálmum með mat og drykk; flestir málmar eru nauðsynleg næringarefni fyrir allar lífverur, en í afar litlu magni. Ef styrkur þeirra verður hins vegar of hár tekur að gæta eituráhrifa. Þungmálmar eru taldir sérstaklega hættulegir þar sem þeir safnast upp í lífkeðjunni mun hraðar en þeir brotna niður eða losna. Háan styrk þessara málma má iðulega rekja til iðnaðar en einnig til landbúnaðar, t.d. áburðar og svifryks.

Mynd 15.11. Á Neðra Hálsi í Kjós er stunduð lífræn framleiðsla á mjólkurafurðum. Vel er hugað að skjóli fyrir kýrnar með ræktun skjólbelta. Ekki er notaður tilbúinn áburður við framleiðsluna.

Skaðlegustu þungmálmarnir eru taldir vera As, Pb, Cd, Cu, Cr, Se og Hg. Algengir sjúkdómar af völdum þeirra valda skaða á taugakerfi (Pb, Se og Cr), öndunarfærum (Cd), lifur og nýrum (Cu og Cr), heila (Hg) og æðakerfi manna og dýra (Se). Þungmálmar berast í menn og dýr þegar styrkur þeirra er t.d. of hár miðað við bindigetu jarðvegs, ekki síst þar sem jörðin er ófrjó með litla jónrýmd, en þá aukast líkur á mengun neysluvatns. Þungmálmar frá iðnaði geta einnig borist í neysluvatn með straumvatni.

Afdrif lífrænna mengunarefna

- Lausbundin þrávirk lífræn efni með lágan mólmassa geta losnað úr jarðvegi sem lofttegundir.
- Ef þrávirka efnið er vatnsleysanlegt getur það skolast úr jarðvegi í grunnvatn og neysluvatn.
- Þrávirkt lífrænt efni getur bundist við yfirborð jarðvegsagna (leir og lífræn efni) og langur tími getur liðið áður en það losnar aftur út í umhverfið og veldur skaða.
- Þrávirk efni geta bundist lífmassa jarðvegs til frambúðar.
- Niðurbrot örvera getur umbreytt mengandi efnum í skaðlaus efnasambönd.
- Lífræn efni geta einnig brotnað niður og orðið skaðlaus vegna jarðefnafræðilegra þátta og má þar á meðal nefna vötnun (e. hydrolysis) og oxun.

Skordýraeitur, olíuafurðir og klórberandi efni eru svokölluð lífræn mengunarefni. Þau hafa einnig verið nefnd þrávirk enda talin einkar skaðsöm þar sem þau brotna afar hægt niður en safnast upp í fituvefjum lífvera. Áhrifin magnast eftir því sem þau færast ofar í lífkeðjuna. Erfitt er að brjóta niður þrávirk lífræn efni þar sem mörg þeirra eru hluti af löngum lífrænum keðjum eða stórum sameindum sem torvelt er að sundra. Afdrif lífrænna mengunarefna eru afar margvísleg (Martin 1999) (sjá textabox til vinstri).

Þrávirk lífræn efni berast fyrst og fremst í menn með fituríkri fæðu á borð við fisk, kjöt og mjólkurvörur (Martin 1999). Dæmi um heilsutjón af völdum lífrænna mengunarefna eru krabbamein, athyglisbrestur, sykursýki, fósturskaði og stytting meðgöngutíma, svo eitthvað sé nefnt.

15.10. Lokaorð

Moldin er miðstöð næringarhringrásar og fæðuframleiðslu heimsins. Óðafjölgun mannfólksins veldur nú gríðarlegu álagi á vistkerfi jarðar og andrúmsloftið. Ekki verður þessari þróun snúið við nema með alþjóðlegri samvinnu. Áður fyrr mynduðu ríki eins konar sjálfbær kerfi sem gátu þrifist þrátt fyrir mun minni samskipti við önnur lönd en nú tíðkast. Þó var hagsæld yfirleitt mest í þeim menningarsamfélögum sem voru alþjóðleg í eðli sínu og byggðust á viðskiptum ríkja á milli. En heimurinn er annar nú á dögum, í raun byggir aðeins eitt samfélag manna jörðina og ekki verður hægt að leita annað um þær auðlindir sem þrýtur.

Ekkert annað en alþjóðleg samvinna og sameiginlegar reglur um umgengni við náttúruna geta tryggt velferð vistkerfa hnattarins til framtíðar. Alþjóðlegir samningar og markmið á vettvangi Sameinuðu þjóðanna eru ákaflega mikilvæg leiðbeining til þjóðríkja og alþjóðasamfélagsins um verndun og endurheimt vistkerfa. Þar má nefna:

- Samningur SÞ um aðgerðir gegn eyðimerkurmyndun (UN Convention to Combat Desertification; UN-CCD).
- Samningur SÞ um líffræðilega fjölbreytni (UN Convention on Biodiversity; UN-CBD).
- Samningur SÞ um loftslagsbreytingar (UN Framework Convention on Climate Change; UN-FCCC).
- Þúsaldarmarkmið Sameinuðu þjóðanna, mörg þeirra tengjast vistkerfum og mold.
- Áratugur Sameinuðu þjóðanna helgaður vistheimt (UN Decade on Ecological Restoration, 2021–2030).

En þrátt fyrir góðan ásetning miðar allt of hægt að snúa við hnignun vistkerfa. Og það vantar sérstakan alþjóðasamning um verndun jarðvegs, enda þótt víðast geri þjóðríki sér grein fyrir mikilvægi þessarar auðlindar. Allir þeir samningar sem hér er getið snerta þó verndun jarðvegs með einhverjum hætti. Nánar er fjallað um landhnignun og kolefnishringrásina síðar í þessu riti.

Heimildir

Kaflinn er m.a. byggður á alfræðiritum um jarðveg (Chesworth 2008, Hillel 2005), vinsælli kennslubók um frjósemi jarðvegs (Havlin o.fl. 2005) og síðast en ekki síst óstyttri útgáfu af The Nature and Properties of Soils eftir Weil og Brady (2017).

Í síðastnefndu bókinni er að finna marga ítarlega kafla um næringarefni sem miðast m.a. við að miðla ríkulegum upplýsingum til þeirra sem stunda ræktun af einhverju tagi. Einnig er stuðst við The Soils of Iceland (ÓA 2015), grein ÓA og Rannveigar Guicharnaud um mold og næringu (2009) og íslenskar rannsóknir á notkun áburðarefna, þeirra Bjarna Helgasonar, Hólmgeirs Björnssonar, Guðna Þorvaldssonar, Þorsteins Guðmundssonar, Friðriks Pálmasonar o.fl. auk annarra heimilda sem er getið.

Baldur Símonarson, Guðný Eiríksdóttir, Sigurður Sigurðsson og Þorsteinn Þorsteinsson 1984. Selenskortur og seleneitrun. Freyr 80:910–912.

Bjarni Guðmundsson og Þorsteinn Þorsteinsson 1980. Þungmálmar í íslensku grasi. Íslenskar landbúnaðarrannsóknir 12:3–10.

Chesworth, W. 2008. Encyclopedia of Soil Sciences. Springer, Dordrecht, Holland.

Environment Canada 2002. Natural sources of trace element contaminants. Environment Canada, NWRI, www.nwri.ca/threatsfull/ch14-1-1.html.

Friðrik Pálmason 2013. Plöntunæringar- og áburðarfræði. Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.

Guðni Þorvaldsson og Þorsteinn Guðmundsson 2006. Snefilefni í jarðrækt. Fræðaþing landbúnaðarins 2006:170–178.

Gunnar Sigurðsson, Ágúst Bjarnason, Rannveig Guicharnaud og G.I. Paton 2007. Frumrannsókn á gróðurskemmdum við háspennumöstur á Suðvesturlandi. Skýrsla unnin fyrir Landsnet á vegum Línuhönnunar, Línuhönnun, Reykjavík.

Grétar H. Harðarson, Arngrímur Thorlacius, Bragi Líndal Ólafsson, Hólmgeir Björnsson og Tryggvi Eiríksson 2006. Styrkur snefilefna í heyi. Fræðaþing landbúnaðarins 2006:179–189.

Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale og W.L. Nelson 2005. Soil Fertility and Fertilizers. An Introduction to Nutrient Management. Pearson – Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA.

Hillel, D. (ritstj.) 2004. Encyclopedia of Soils in the Environment. Academic Press, Cambridge, UK.

Keller, N., M. Stefani, Sigríður R. Einarsdóttir, Ásta K. Helgadóttir, Jón Guðmundsson, Arnór Snorrason, Jóhann Þórsson og Leone Tinganelli 2020. National Inventory Report 2020. Emissions of Greenhouse Gases in Iceland from 1990 to 2018. Umhverfisstofnun, Reykjavík.

Kristín Vala Ragnarsdóttir og D.P. Hawkins 2006. Bioavailable copper and manganese in soils from Iceland and their relationship with scrapie occurrence in sheep. Journal of Geochemical Exploration 88:228–234.

Martin, A. 1999. Biodegradation and Bioremidiation. 2. útg. Academic Press, San Diego, Kalifornía, USA.

Mengel, K. 2008. Nutrient potential. Í: W. Chesworth (ritstj.), Encyclopedia of Soil Science. Springer, Dordrecht, Holland. Bls. 494–500.

Oertli, J.J. 2007a. Plant nutrients. Í: Ward Chesworth (ritstj.), Encyclopedia of Soil Science. Springer, Dordrecht, Holland. Bls. 560–571.

Oertli, J.J. 2007b. Soil fertility. Í: Ward Chesworth (ritstj.), Encyclopedia of Soil Science. Springer, Dordrecht, Holland. Bls. 656–668.

Ólafur Arnalds 2015. The Soils of Iceland. World Soils Book Series, Springer, Dordrecht, Holland.

Ólafur Arnalds og Ása L. Aradóttir 2015. Að lesa og lækna landið. Landvernd, Landbúnaðarháskóli Íslands og Landgræðsla ríkisins, Reykjavík.

Ólafur Arnalds og Rannveig Guicharnaud 2008. Lýðheilsa og mold. Fræðaþing landbúnaðarins 2008:59–70.

Panek, E. og B. Kepinska 2002. Trace metal (Cd, Cu, Pb, Zn) and sulphur content in soils and selected plant species of Iceland. A pilot study. Icelandic Agricultural Sciences 15:3–9.

Quiquampoix, H. 2008. Enzymes and proteins, interactions with soil-constituent surfaces. Í: W. Chesworth (ritstj.), Encyclopedia of Soil Science. Springer, Dordrecht, Holland. Bls. 210–216.

Sveinn Runólfsson og Páll Halldórsson 2021. Landgræðsluflugið. Endurheimt landgæða með eins hreyfils flugvélum. Sæmundur, Selfossi.

Sören Sörenson 1984. Ensk-íslensk orðabók með alfræðilegu ívafi. Örn og Örlygur, Reykjavík.

Tisdale, S.L., W.L. Nelson og J.D. Beaton 1985. Soil Fertility and Fertilizers. 4. útg. Macmillan Publishing Company, New York.

Torkell Jóhannesson, Kristín Björg Guðmundsdóttir, Tryggvi Eiríksson, Jakob Kristinsson og Sigurður Sigurðarson 2005. Molybdenum and sulphur in forage samples from scrapie-free, scrapie-prone and scrapie-afflicted farms in Iceland. Icelandic Agricultural Science 18:53–58.

Torkell Jóhannesson, Kristín Björg Guðmundsdóttir, Tryggvi Eiríksson, Jakob Kristinsson og Sigurður Sigurðarson 2007. Overview. Seven trace elements in Icelandic forage. Their value in animal health and with special relation to scrapie. Icelandic Agricultural Science 20:3–24.

Weil, R.R. og N.C. Brady 2017. The Nature and Properties of Soils. Pearson, Boston, USA.

16 „Á Ísa-köldu landi“ – frost í jarðvegi og ásýnd landsins

Mynd 16.1. Fátt er meira lýsandi fyrir íslenskt landslag en þúfan, svona rétt eins og jöklar og fjöll. Áhrif frosts á mold mótar yfirborð alls landsins. Eitt sinn var stungið upp á því að hafa fisk eða þurrkuð þorskflök í fána landsins. Þúfan kæmi rétt eins til greina.

Vantar áherslu á frostið

Nauðsynlegt er að bera skynbragð á eðli frosts og áhrif þess á umhverfið til að skilja íslenska náttúru. Þó er það svo að frosti í mold hefur ekki verið gefinn mikill gaumur hérlendis og er iðulega að litlu getið þegar fjallað er um náttúru landsins.

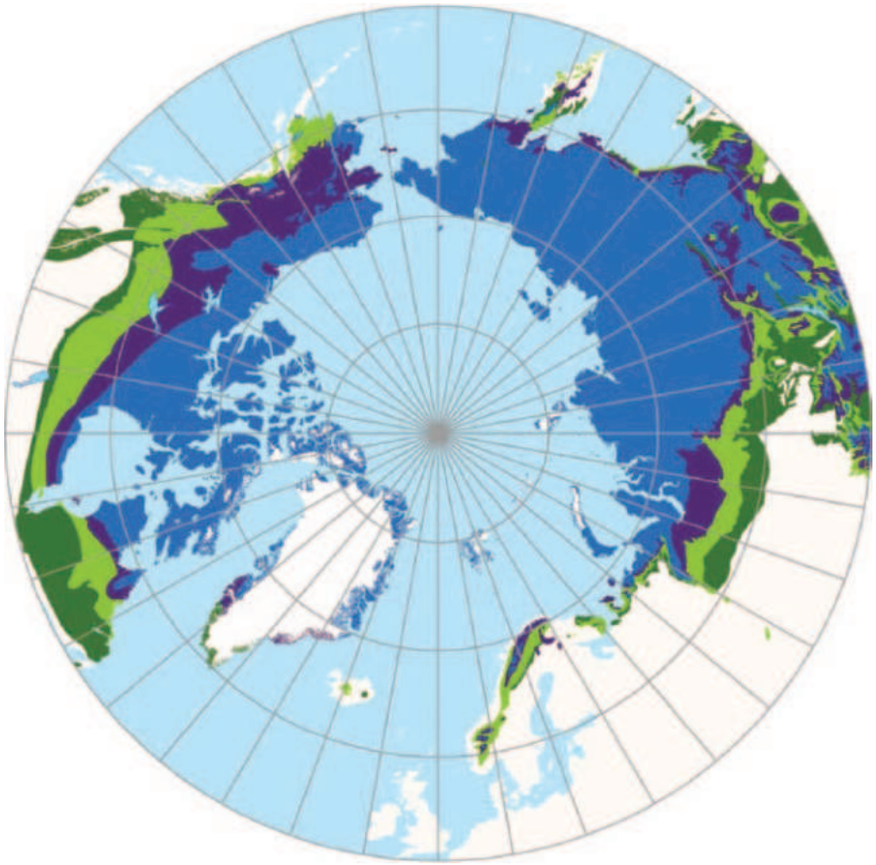
16.1. Frost mótar allt yfirborð landsins

Fátt mótar vistkerfi og yfirborð landsins með eins afgerandi hætti og frost, enda er tungumálið ríkt af hugtökum er tengjast snjó, frosti og ís. Við búum „á klakanum“ er sagt þegar fólk „fær upp í kok“ af ótíð vetrarins. „Frost“ er athyglisvert hugtak sem er skilgreint út frá hitastigi og hegðun vatns, lífsvökvanum eina sanna – það er frost þegar vatn breytist í fast form. Við það verða æði merkilegar breytingar í moldinni. Frostið drífur virk ferli sem þróa yfirborðseinkenni á borð við þúfur og melatígla sem þekja nær allt landið. Frostið hreyfir til moldina og hefur afgerandi áhrif á landnám plantna og viðnám vistkerfa gegn raski og nýtingu. Frostið hefur áhrif á virkni örvera sem og ferð vatns um moldina og getur ýtt undir tímabundin afoxunarferli sem móta líffræði og efnaeiginleika moldarinnar. Taka verður tillit til mögulegs frosts í jörðu þegar hugað er að ýmsum verklegum framkvæmdum, svo sem lagningu vega, landslagsmótun, byggingum og lögnum í jörð.

Rannsóknir á áhrifum frosts á íslensk vistkerfi eru fremur fáar hérlendis. Það sem ritað er í eldri heimildum ber oft merki þess að skilningur á ferlum hafi á tíðum verið heldur lítill. Hugtök eins og „ísnálar“ á yfirborðinu koma mjög seint til skjalanna. Í ljósi þess hve áhrif frosts og þýðu eru mikil hérlendis er mikilvægt að varpa ljósi á þau í sérstökum kafla þessa rits.

Á pólsvæðunum helst frost í jörðu árið um kring en þó getur efsta lag jarðvegsins þiðnað á sumrin. Varanlegt frost í jörðu er nefnt sífreri (e. permafrost). Jarðvegur með sífrera í jörð er nefndur Gelisol í bandaríska kerfinu Soil Taxonomy, Cryosol samkvæmt WRB en *frerajörð* í því kerfi sem hér er notað. Áhrif frosts á mold eru afar mismunandi eftir því hverrar gerðar hún er. Þeir þættir sem ráða mestu eru m.a. vatnsrýmd og vatnsleiðni í moldinni, en einnig einangrun yfirborðsins og inngeislun sem mótast m.a. af gróður- og snjóhulu.

Frerajörð hefur mun meiri útbreiðslu en flestir gera sér í hugarlund (mynd 16.2). Talið er að sífreri sé í jörðu á um 23 milljón ferkílómetrum lands á pólsvæðunum utan jökla. Sunnar á norðurhjaranum er frostið árstíðabundið í jarðvegi frost á vetrum en þiðnar á sumrin. Þúfur eru afleiðing frosts í jarðvegi, svo og melatíglar, rústir á hálendinu og ýmis landform í hlíðum landsins. Land þar sem frost hefur áhrif er gríðarlega víðfeðmt og nær til stærsta hluta tempraða beltis jarðar. Á ísöld náði þetta svæði mun sunnar og margvísleg ummerki frosts frá þeim tíma er enn að finna í jörðu – og ruglar margt áhugafólk um náttúrufræði.



Mynd 16.2. Útbreiðsla sífrera á norðurslóðum í grófum dráttum. Blátt: samfelldur sífreri (91–100%), dimmblátt: ósamfelldur sífreri (51–90%), ljósgrænt: mjög ósamfellt (10–50%), dökkgrænt: einangraðir flákar (<10%). Myndin er fengin úr Soil Atlas of the Northern Circumpolar Region (Jones o.fl. 2010, bls. 20).

16.2. Heimskautasvæði, loftslag og Ísland

Rétt er að glöggva sig á nokkrum hugtökum er varða heimskautasvæðin áður en lengra er haldið. Pólsvæði norðursins eru nefnd „Arctic"-svæði (heita eftir „Arktos" úr grísku sem er nafn á stjörnumerkinu Birninum) en suðrið „Antarctic" (úr grísku og þýðir andstætt eða öfugt við norður).

Pólsvæðin skiptast í „há-arktísk" og „lág-arktísk" svæði, en sunnan þess síðarnefnda eru jarðarsvæði, „subarctic" landsvæði þar sem sífreri er ekki samfelldur en frostáhrif mikil. Ísland hefur gjarnan verið talið á mótum tempraða beltisins og „sub-arktíska" svæðisins en þess sub-arktíska og „lág-arktíska" á hálendinu. Samkvæmt kortum og skilgreiningum sem birtar eru í *The Soil Atlas of the Circumpolar Region* (Jones o.fl. 2010) og byggjast á vistfræði, landslagi og loftslagsþáttum er Ísland staðsett í miðju „sub-arktíska" beltinu. Stundum er sagt að 10°C meðalhiti í júlí marki skilin á milli boreal-svæðisins (barrskógabeltið) og heimskautasvæðisins (sub-arktíska svæðið), þ.e. lína sem stundum er notuð til að skilgreina heimskautasvæðin, en hún liggur víða í miðjum hlíðum landsins (sjá m.a. CAFF, 2001). Þó verður að hafa í huga að þessar skilgreiningar eru nokkuð á reiki, t.d. eru pólsvæðin stundum skilgreind við hvarfbaugana (66°66′), en sá nyrðri liggur að norðurströnd landsins. Sú afmörkun er afar gölluð því hún tekur hvorki tillit til lífríkis né loftslags. Þessar skilgreiningar skipta þó ekki öllu máli – heldur miklu fremur áhrif frostsins – en rétt er að hafa þær í huga vegna þess hve oft þær koma fram í rituðu máli um kulferli.

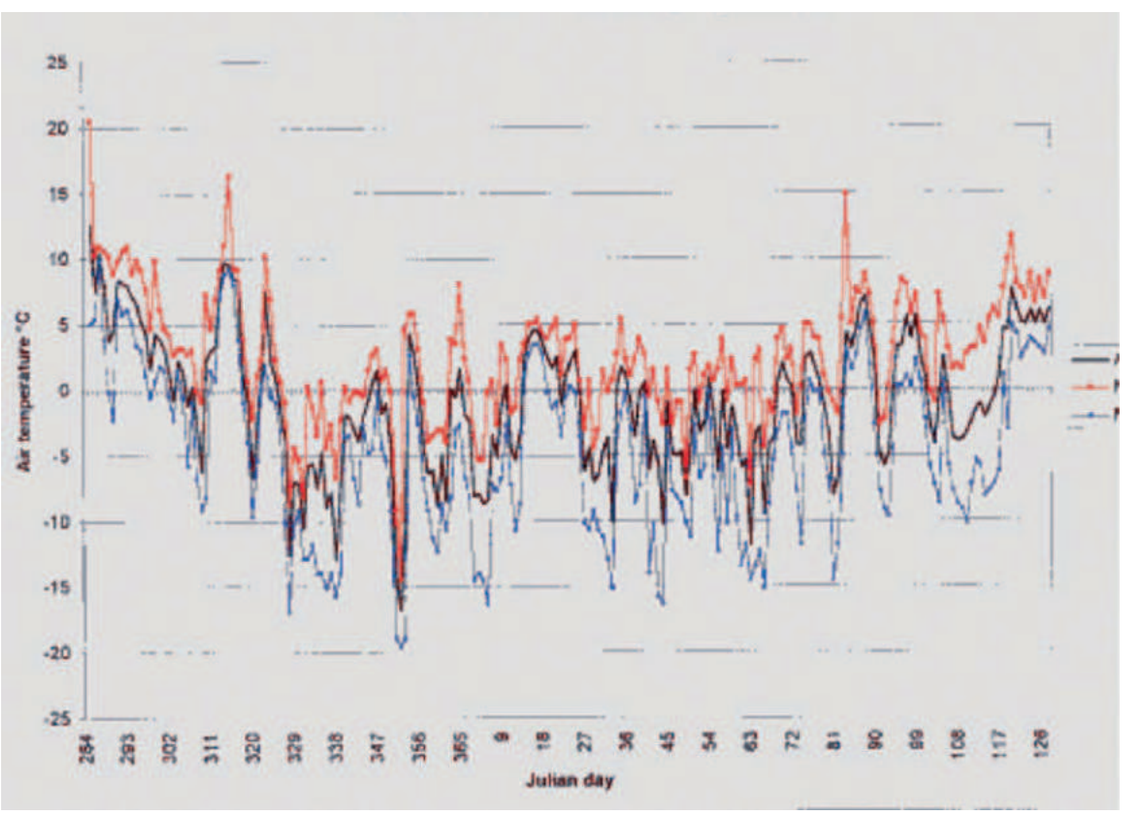
Staða Íslands í heimskautajaðrinum er augljós og sífreri finnst hér víða í jörðu, eins og síðar er fjallað um. En loftslag á Íslandi er þó með umtalsvert öðrum hætti en víðast ríkir á heimskautasvæðunum. Segja má að norðlæg lega landsins, suðlægir loftstraumar með tilheyrandi

Kulferli

Hugtakið **kulferli** er notað sem samheiti yfir áhrif frosts og þýðu við yfirborð lands. Á ensku er hugtakið „periglacial processes".

Fræði sem helguð eru kulferlum hafa m.a. verið nefnd „cryology" eða kulfræði. Reyndar hafa „kulfræðingar" varið mikilli orku í skilgreiningar og hugtök í sínum fræðum, en þeim þræði verður lítið sinnt hér.

„Periglacial" er annað hugtak sem er mikið notað og merkir bókstaflega nágrenni jökla, en kulferli eiga sér stað á öllum svæðum þar sem vatn frýs í mold á vetrum.



Mynd 16.3. Línurit sem sýnir yfirborðshita á Geitasandi á Rangárvöllum.

„The Icelandic cycle“

Segja má að yfirborðið á Íslandi frjósi og þiðni á víxl oftar en nokkurs staðar annars staðar. Þetta hefur stundum verið kallað „the Icelandic cycle“ (Washburn 1980).

lægðagangi („Íslandslægðin“) og Golfstraumurinn – sem flytur gríðarlega mikinn varma í átt til landsins – togist á um völdin. Þetta veldur því að lofthiti er mjög oft nálægt frostmarki langtímum saman og yfirborðið er ýmist að þiðna eða frjósa. Jafnvel yfirborð moldar á hálendinu þiðnar af og til á vetrum þegar orkumiklar lægðir koma langt suður úr hafi og flytja mikinn varma yfir landið. Á mynd 16.3 er línurit yfir yfirborðshita á Geitasandi (Berglind Orradóttir og ÓA, óbirt gögn) sem sýnir vel hvernig hitinn sveiflast langtímum saman í kringum frostmark.

Hiti í mold meginlanda á norðurslóðum einkennist frekar að því að moldin frýs á haustin en þiðnar á vorin – svona í megindráttum.

16.3. Útbreiðsla og þykkt sífrera

Kort af landi þar sem sífreri er í jörðu á norðurslóðum er sýnt á mynd 16.2. Samfelldur sífreri einkennir Síberíu sem og norðurhluta Kanada og Alaska. Víðfeðm svæði er einnig að finna í fjalllendi Mongólíu, Himalajafjöllum og í Klettafjöllum Kanada og Bandaríkjanna, sem og í syðri hluta Andesfjalla. Á landsvæðum á Grænlandi sem eru án jökuls er sífreri í jörðu, nema allra syðst, og það sama á við um íslaust land á Suðurskautinu. Samtals eru sífrerasvæðin um 23 milljónir km² en land á jörðinni í heild tæplega 150 milljónir km² og því er þetta mjög stór hluti lands ofan sjávarmáls.

Sífrerinn í moldinni er afar misþykkur, allt frá því að vera innan við einn metra á þykkt og upp í nokkur hundruð metra djúpur næst pólunum í Síberíu og Kanada. Á undanförnum árum virðist ísþykkt norðurslóða hafa farið minnkandi og á sumum jaðarsvæðum er sífrerinn tekinn að hörfa, sérstaklega eftir 1970. Þessar breytingar eru af völdum loftslagshlýnunar (Tarnocai o.fl. 2009).

16.4. Vatn frýs í jarðvegi

16.4.1. Frostbylgja, vatnsþurrð og eðlisvarmi

Vatn eykur rúmmál sitt þegar það frýs. Það er fátítt um efni þegar þau fara úr vökvaformi í fast efni – þetta telst meðal sérkennilegustu eiginleika vatns (sjá kaflann um vatn í jarðvegi). Rúmmálsaukningin er nálægt 10%. Breytingin er þó engan veginn nægjanleg ein og sér til þess að skýra hvers vegna púfur myndast við frost eða annarra einkenna verður vart í yfirborði moldar.

Annar mikilvægur og afar sérstæður eiginleiki vatns sem mótar þróun holklaka í jarðvegi er gríðarlegur eðlisvarmi þess. Þegar vatn frýs losnar eðlisvarminn út í umhverfið sem hamlar á móti áhrifum frostsins sem kælir moldina. Eftirfarandi er mjög einfölduð umfjöllun um þær aðstæður sem leiða til hvað mestar rúmmálsaukningar við það að moldin frýs (mynd 16.4).

Aðstæður sem sýndar eru á myndinni miða við að tiltölulega stutt sé niður á grunnvatn. Við það að lofthiti fer niður fyrir frostmark tekur yfirborð jarðvegsins að kólna uns efsta lagið byrjar að frjósa. Vatnið frýs yfirleitt ekki í samfelldan klump, heldur myndast eins konar frostlinsur í moldinni. Mót frosins og ófrosins jarðvegs eru nefnd frostskil eða frostbylgja (e. freezing front) og eru bæði þessi hugtök notuð hér. Þegar vatn frýs gefur það frá sér varmaorku, en vatnið hefur einmitt mikla varmarýmd eða eðlisvarma (mikil orka sem vatn getur tekið við og gefið frá sér).

Þessi hiti vegur upp á móti því að frostbylgjan færist neðar í jarðveginn

og getur jafnvel valdið því að frostskilin stöðvast alveg eða færast afar hægt niður í moldina. Annað mikilvægt atriði er að vatnið „binst“ við frostbylgjuna þegar það frýs. Þá verður vatnsþurrð í næsta nágrenni hennar í samanburði við jarðveginn þar fyrir neðan.

Vatnsspennan er því meiri (hærri neikvæð tala) en neðar í jarðveginum og því dregst vatn í átt að frostskilunum til að jafna út spennumuninn. Standi grunnvatn hátt í jörðu er nægt vatn fyrir hendi og því getur mikið vatn sogast að frostskilunum sem hafa að öðru leyti staðnæmst. Við það að æ meira vatn frýs við frostskilin verður umtalsverð rúmmálsbreyting í moldinni: hún lyftist. Þetta ferli skýrir myndun margra þeirra frostfyrirbrigða sem fjallað er um hér á eftir.

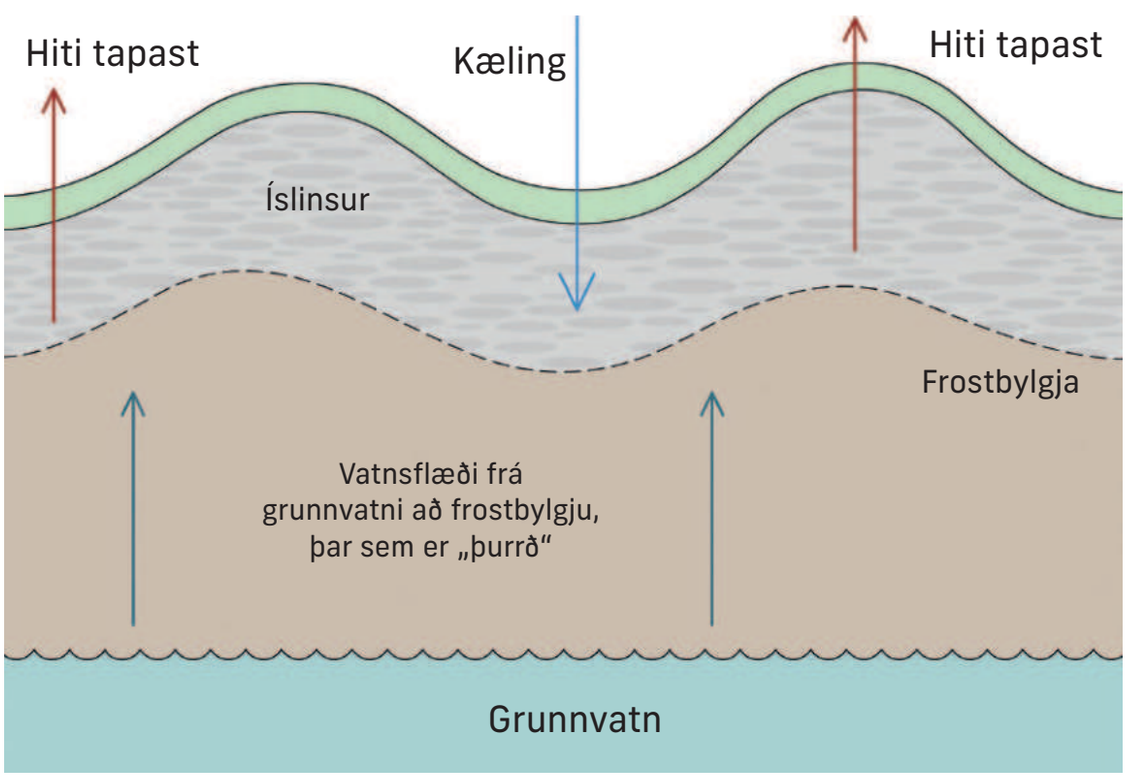
16.4.2. Varmaflæði og frost

Margir þættir hafa áhrif á þróun frostmyndana í jarðvegi. Hugum fyrst að varmaleiðni. Ýmislegt mótar varmaleiðni í moldinni, svo sem magn og gerð lífrænna efna og bergefna, holrými, vatnsinnihald, rúmþyngd og hitastig. Loft leiðir varma illa en vatn aftur á móti mjög vel, og það getur einnig geymt mikinn varma. Því færist frost hraðar niður eftir rökum jarðvegi en þurrum. Mikið vatn getur þó tekið við æði miklum varma án þess að frjósa. Varmaleiðni eykst með aukinni rúmþyngd (hlutfallslega minna loftrými) og vatnsinnihaldi, en hin háa varmarýmd vatns lækkar varmadreifinguna (e. diffusion) sem leiðir til þess að:

varmadreifing =
varmaleiðni / varmarýmd

þ.e. mikill kuldi á yfirborðinu berst ekki auðveldlega niður eða hitinn upp; vatnið bæði tefur dreifingu kuldans og gleypir varmann.

Gróður á yfirborði hefur margvísleg áhrif á hitaleiðni jarðvegs og þar með á kulferli. Gróður mótar t.d. vatns-



Mynd 16.4. Þegar vatn frýs í moldinni verður þurrð á þeim stað sem leiðir til þess að vatn „sogast“ að frostbylgjunni. Vatnið losar mikinn varma þegar það frýs sem hamlar á móti ferð frostbylgjunnar niður í moldina og hún getur verið nánast kyrrstæð um langa hríð. Við það flyst umtalsvert mikið vatn að sama stað í moldinni sem þenst sífellt meira út.

búskap og snjóalög. Eftir því sem meira er af vatni í yfirborðinu eykst varmaleiðnin, en snjór og gróður á yfirborði mynda einangrun sem minnkar hitastigssveiflur. Heildaráhrif snjólaga á yfirborðinu hækka meðalárshita jarðvegsins þar sem einangrunin kemur í veg fyrir varmatap úr honum. Því skipta þeir þættir sem hafa áhrif á snjóalög miklu fyrir jarðveginn.

Lífrænt lag við yfirborðið (O-lag) ásamt mosa á yfirborðinu hægja á þiðnun á vorin og minnka þar með meðalárshita jarðvegs, en ástæðan er m.a. mikil vatnsheldni þessara laga með lágri varmadreifingu þegar jörðin er ófrosin, en mikil varmaskipti eru milli jarðvegs og lofts þegar jörð er frosin (Berglind Orradóttir 2002).

Hin dökku gosefni sem einkenna yfirborð auðna á Íslandi hafa sérkennileg áhrif á varmaástand yfirborðsins. Þessi efni eru afar einangrandi, enda er vikur notaður sem slíkur í byggingum. Víða á gjóskusvæðum má finna gamlan snjó undir gjósku sem hefur borist með rofi út yfir snævi þakið yfirborð (mynd 16.6). Hins vegar getur yfirborðið hitnað mikið á sólríkum dögum (>50°C í yfirborði) sem veldur örri uppgufun svo að jarðvegurinn þornar algjörlega í þurrkatíð, en um leið eykst einangrunargildi yfirborðs auðnarinnar.

Mynd 16.5. Frostlyfting. Frostfrítt efni, sandur og möl, er undir stéttinni. Frost myndast því ekki undir stéttinni en yfirborð grasflatarinnar lyftist í frostum sökum holklaka og ýtir við stéttinni í jaðrinum. Á sumrin eru stéttin og grasið í sömu hæð.

16.5. Viðkvæm og frostnæm íslensk mold

Frost hefur ekki áhrif á moldina nema að vatn sé til staðar sem síðan getur m.a. borist að frostbylgjunni þegar frýs. Moldarefni leiða vatn misgreiðlega, sandur leiðir ekki vatn en vatnsleiðni um leir er mjög hæg. Vatnsleiðni er hröðust í siltefnum. Leir og lífræn efni halda hins vegar best í vatnið, og mold sem er rík af þessum efnum getur innihaldið mikið af vatni sem frýs í frosti. Trefjar í lífrænum efnum hamla hins vegar á móti því róti sem getur orðið þegar moldin frýs.

Jarðvegi sem er ríkur af silti er sérdeilis hætt við áhrifum af frosti; hann er talinn **frostnæmur** (e. frost susceptible). Siltefni skortir jafnframt samloðun sem leir og lífræn efni ljá moldinni. Vatnsósa siltefni ofan á frosnu undirlagi hafa enga samloðun og renna auðveldlega til. Þetta vita þeir sem eiga leið um berangur þegar frost er að fara úr jörðu því auðvelt er að sökkva nokkuð djúpt í yfirborðið í hverju skrefi. Bílar sökkva í moldarvegi á vorin þegar svona hagar til. Þar sem saman fer mikil vatnsrýmd og mikið af siltefnum, svo sem í kornastærðarflokkunum siltleir og leirmold, er hætta á frosthreyfingum og frostskemmdum.

Efni sem halda litlu vatni og leiða ekki vatn sem er bundið jarðvegsögnum (þ.e. ekki laust vatn) verða fyrir litlum frostáhrifum. Þá er gjarnan talað um frostfrí efni. Frostfrí efni eru fyrst og fremst möl og sandur. Verklegar framkvæmdir á norðurslóðum kalla á það að frostnæm efni séu fjarlægð og frostfríum efnum komið fyrir í þeirra stað.

Þetta gerir margvíslegar framkvæmdir á Íslandi margfalt kostnaðarsamari en þar sem frosts gætir lítið á suðlægari breiddargráðum.

Eðliseiginleikar *eldfjallajarðar* gera moldina alla jafna að frostnæmu efni og því er mikil hætta á áhrifum kulferla á Íslandi. Leirefnin allófan og ferrihýdrít hafa geysilega mikla vatnsheldni, jafnvel >150% miðað við þurrvigt. Að auki hagar leirinn sér þannig að hann myndar stöðuga klasa sem eru af silt-stærð. Vatnsleiðni í moldinni er því alla jafna greið, bæði á auðnum (*glerjörð*) og þar sem gróður er á yfirborði (*brúnjörð* og *votjörð*). Ofan á þetta bætist að samloðun moldarinnar við vatnsmettun er ákaflega lítil og víða getur moldin náð **flæðimarki** (e. liquid limit) og sýnir þá jafnvel kvikuhegðun. Það fer semsagt saman að jarðvegurinn haldi miklu vatni, vatnsleiðni sé greið og að hann skorti samloðun.

Allt þetta veldur því að íslensk mold er einstaklega frostnæm. Og þá er komið að þeirri staðreynd að hér frýs og þiðnar oftar en þekkist annars staðar á byggðu bóli. Það er því engin furða að áhrif frosts á íslenska náttúru séu mikil. Því er eins og áður sagði allt kapp lagt á að losna við jarðvegsefni og setja í staðinn möl og sand þar sem unnið er að verklegum framkvæmdum á borð við vegagerð og húsbyggingar.

Mynd 16.6. Ís sem hefur einangrast frá umhverfinu vegna foks á vikri yfir snjó. Myndin er tekin í Öskju. Mynd: Pavla Dagsson-Waldhauserová.

Mynd 16.7. Drulla að vori í mel. Frosið undirlag og vatnsósa siltrík mold. Það getur verið tafsamt að fara um illa gróið land þegar frost er að fara úr jörðu. Bílar, mótorhjól og reiðhjól geta valdið afar miklum skemmdum við aðstæður sem þessar.

16.6. Frostgerðir

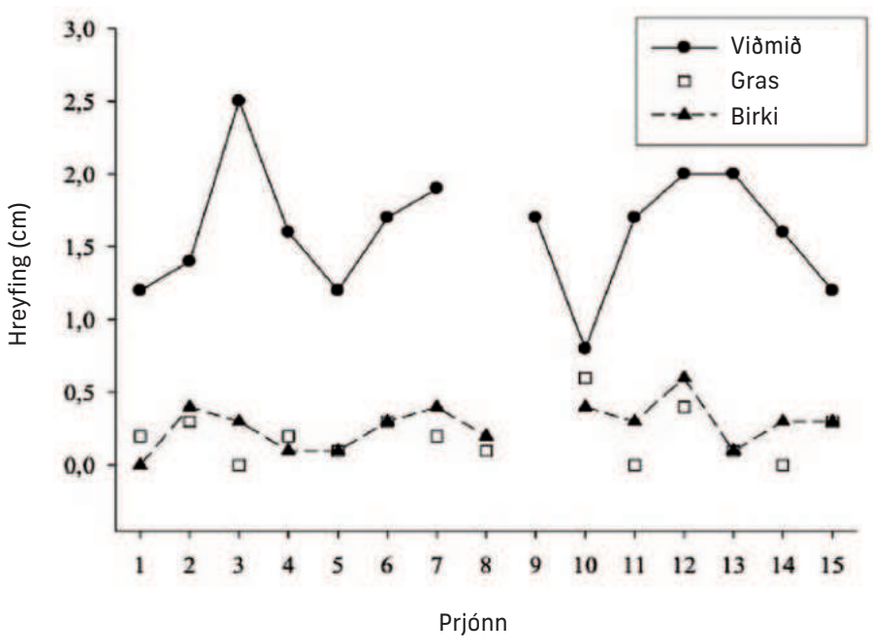
16.6.1. Holklaki

Frosið vatn í jarðvegi er mismunandi að gerð. Ísinn getur verið töluvert gegndræpur eða samfelldur gegnþéttur ísklumpur og allt þar á milli. Það skiptir afar miklu máli fyrir **vatnshag** (e. hydrology) hvers svæðis hvernig ís myndast í jarðveginum á vetrum. Sé ísinn gegndræpur nær vetrarbráð að síga smám saman ofan í moldina í stað þess

að renna burt á yfirborðinu. Myndist gagnheill ís kemst vatn ekki ofan í jarðveginn, t.d. þegar þiðnar tímabundið á vetrum. Ísklumparnir eru væntanlega einnig skaðlegir viðkvæmum gróðri með grönnu rótarkerfi.

Rannsóknir á tilraunasvæðunum á Geitasandi á Rangárvöllum sýna vel áhrif gróðurhulu á frostlyftingu (mynd 16.8). Ógrónir viðmiðunarreitir hreyfðust umtalsvert en þar sem tekist hafði að mynda svörð (skán og háplöntur) var frostlyftingin tiltölulega lítil í samanburði, jafnvel þótt stutt væri síðan uppgræðslan hófst.

Sýnt hefur verið fram á að gróðurfar hefur mikil áhrif á hvers konar klaki myndast í mold hérlendis (Berglind Orradóttir 2002, Berglind Orradóttir o.fl. 2008, Zaqout o.fl. 2022), sem er í samræmi við alþjóðlega reynslu. Í jarðvegi laufskóga og gróskumiklu graslendi myndast oftast gegndræpur klaki. Hins vegar myndast oftar þéttur holklaki undir barrskógum þar sem skógarbotninn er ekki þakinn ríkulegum undirgróðri. Rannsóknir Berglindar sýna vel að þetta á einnig við á Íslandi þar sem ísig getur verið nokkuð á vetrum í birkiskógum og graslendi en síður í barrskógi. Auðnirnar eru þó æði sérstakar að þessu leyti – þar myndast þéttur klaki sem hleypir takmarkaðri úrkomu niður yfir vetrartímann. Þetta leiðir til mikils vatnsaga í hlákutíð, vatnsrof getur orðið mikið og vatn fyllt farvegi þar sem annars sést aldrei vatn (myndir 16.9–16.11). Rannsókn Zaqout o.fl. (2022) bendir til þess að það sama eigi við um lúpínubreiður.



Mynd 16.8. Mælingar á frostlyftingu á Geitasandi á Rangárvöllum í ógrónum viðmiðunarreit og 5 ára gömlum uppgræðslum með a) grasi og áburði og b) grasi, áburði og birkiplöntum ásamt c) ómeðhöndluðum ógrónum reitum (viðmið). Gögn: Berglind Orradóttir og ÓA.

16.6.2. Ísnálar

Ísnálar (e. needle-ice) eru sérstök tegund holklaka sem myndast efst í yfirborðinu (mynd 16.12). Áhrif ísnála á náttúru landsins verða seint ofmetin. Þær myndast víðast hvar í heiminum þar sem frost kemst að gróðursnauðu yfirborði. Rétt er að benda hér á yfirlitsgrein eftir Lawler frá 1988 um ísnálar sem og ágæta umfjöllun í BS-ritgerð Kathrine Schack Madsen (2013) en hún rannsakaði myndun ísnála á Hvanneyri. Ísnálar eru þráðlaga ískristallar sem tengjast hver öðrum og geta náð umtalsverðri lengd, jafnvel yfir 30 cm. Ísnálar myndast einkum á þurrum frostnóttum í rökum gróðurlausum sverði. Þetta geta verið afskaplega falleg náttúrufyrirbrigði. Oft hagar því þannig til að þær bráðna yfir daginn, t.d. í sólbráð, en myndast síðan aftur næstu nótt. Einnig kemur fyrir að þær lengjast nótt eftir nótt og verða þá nálarnar lagskiptar.

Ísnálar eru þó iðulega huldar sjónum undir örþunnu moldarlagi, en þegar stigið er niður á slíkt yfirborð brakar í moldinni og ísnálarnar koma í ljós þegar krakað er í yfirborðið. Ísnálar lyfta upp yfirborðinu af miklu afli sem veldur því að steinar sem eru nokkrir cm í þvermál lyftast upp og sitja síðan ofan á ísnálunum (myndir 16.13 og 16.14) uns ísinn bráðnar á ný.

Þessi kraftur hefur mjög neikvæð áhrif á stöðugleika yfirborðsins. Ísinn losar um

Mynd 16.9. Klaki í auðn á Vesturöræfum nálægt Kárahnúkum í apríl. Snjór hefur bráðnað í hláku en vatnið kemst ekki niður fyrir þéttum holklaka, og síðan myndast svellalög þegar frýs á ný. Veturinn hefur mikil áhrif á vistkerfi auðna.

Mynd 16.10. Bleyta á frosinni *sandjörð* á Geitasandi. Vatnið kemst ekki ofan í moldina. Á sumrin sést varla vatn á yfirborðinu, jafnvel í mikilli úrkomutíð, og jarðvegurinn er oft mjög þurr. Mynd: Berglind Orradóttir.

Mynd 16.11. Vatnsagi og bloti við snjóbráð á Heklusvæðinu. Veturinn mótar landslagið á þessum slóðum, en vatn sést alls ekki á yfirborðinu yfir sumartímann. Vatnið flytur til mikinn sand á staði þar sem hann getur fokið til á sumrin. Myndir: Elín Fjóla Þórarinsdóttir.

moldina í efsta laginu og litlar plöntur lyftast m.a. upp með rótum. Frostlyfting af þessu tagi er eitt helsta vandamálið við uppgræðslu á Íslandi og hefur áhrif á möguleika auðna til sjálfgræðslu (sjá t.d. Hrein Óskarsson og Sigríði Júlíu Brynleifsdóttur 2009). Fyrsta stig vistheimtar felst einmitt oft í því að mynda skán á yfirborðinu (sjá kafla um líf og lífræn efni), en skánin kemur í veg fyrir myndun ísnála. Eftir það getur framvinda gróðurs orðið hlutfallslega ör.

Ísnálar hafa áhrif á yfirborðsstöðugleika með margvíslegum hætti. Myndun þeirra getur rofið samloðun á milli korna þannig að moldinni verður ennþá hættara við rofi af völdum vinds og vatns en fyrir myndun ísnálanna. Til dæmis kom í ljós við mælingar á rofi á siltríkum jarðvegi á Hólsfjöllum (ÓA og Fanney Ósk Gísladóttir 2009) að þröskuldsvindhraði (vindhraði þegar vindrof hefst) lækkaði úr u.þ.b. 9 m/s í 6 m/s á einni frostnóttu. Þar sem gróðurhulu hefur verið raskað á

Mynd 16.12. Ísnálar í rofdíl í Skorradal. Þar sem moldin er ber á milli púfnanna myndast ísnálar. Þær eru ríkur þáttur í því að koma í veg fyrir að þessi rofdíll grói upp af sjálfu sér. Það á einnig við um auðnir almennt.

Mynd 16.13. Frost lyftir steinvölum sem eru nokkrir cm í þvermál, en einnig plöntum sem eru að nema land. Þegar þetta yfirborð bráðnar er því mjög hætt við vatns- og vindrofi. Stundum virðist sem þyngdarlögmálið virki ekki sem skyldi þegar ísnálar eru annars vegar.

Mynd 16.14. Frostið lyftir steinum og gróðurnál. Á myndinni hafa minni völurnar lyfst en ekki stærri hnullungar. Hægt er að nota þyngd og flatarmál steinanna til að reikna út þrýstinginn sem hefur þurft til að lyfta þeim (g/cm²) og þá jafnframt við hvaða þunga steinarnir verða stöðugir í þessum frostatburði. Hér hefur þrýstingurinn náð allt að 5 g á hvern cm².

árbökkum og við læki, t.d. vegna beitar, losa ísnálar um moldina sem eykur á setflutning í læki og önnur vatnsföll (sjá m.a. Yumoto o.fl. 2006).

Eftir að ísnálar hafa myndast í sverðinum (mynd 16.15) verða rofdílar fremur stöðugir að því leyti að gróður á erfitt með að ná fótfestu í þeim á ný. Því valda m.a. ísnálarnar en einnig virðist yfirborðið geta orðið mjög þétt og andsnúið fræplöntum á sumrin. Rofdílar í gróðurlendi geta því verið afar lengi að gróa saman aftur, jafnvel þar sem friðað hefur verið fyrir beit. Ísnálar eru mikilvægur þáttur í því þegar fjölfarnir göngustígar missa smám saman gróðurhuluna.

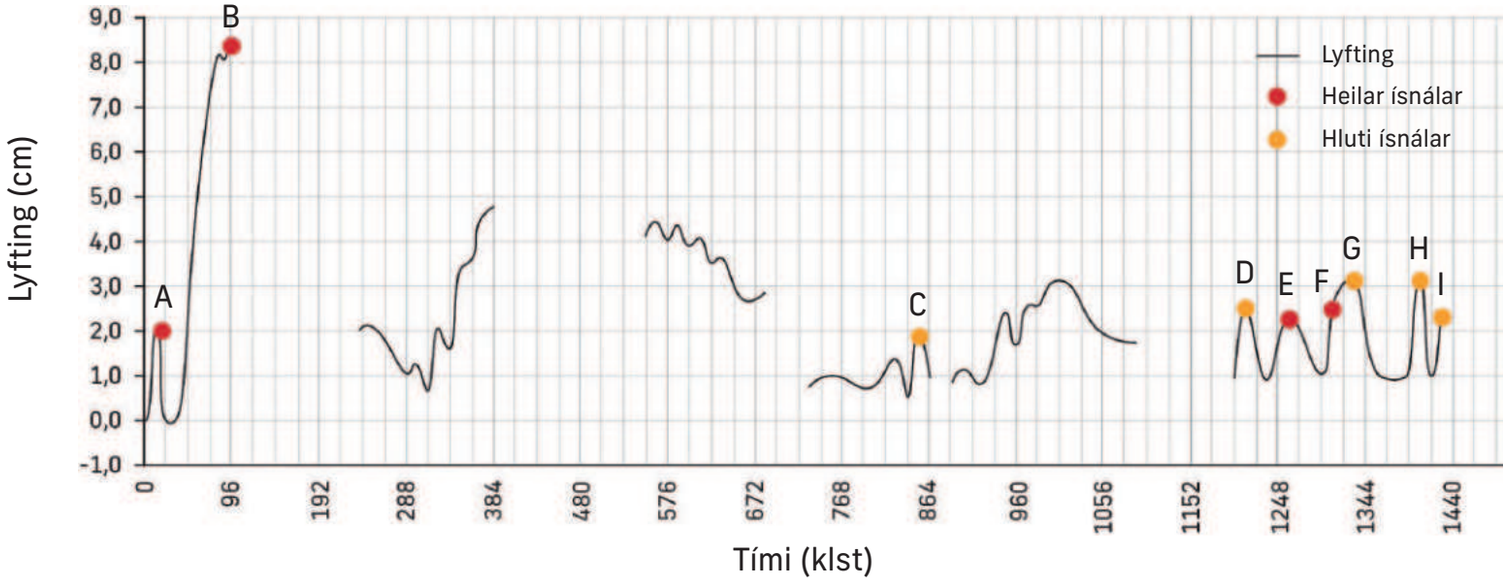
Rannsóknir sem gerðar voru á Hvanneyri sýna vel vöxt ísnála í frosti þegar ekki var snjóhula yfir jörð (Madsen 2013). Ísnálarnar urðu mest um 8 cm langar (mynd 16.16). Í lok tímabilsins mynduðust iðulega 2–3 cm langar ísnálar sem bráðnuðu á daginn. Æskilegt væri að auka rannsóknir á myndun ísnála á Íslandi vegna mikilvægis þessa þáttar fyrir náttúru landsins.

16.7. Þúfur

Þúfur eru áberandi hluti íslensks landslags – þær geta án vafa talist eitt megineinkenni íslenskrar náttúru. Þúfa gæti allt eins prýtt fána landsins eins og fiskflak, sem gerð var tillaga um í árdaga sjálfstæðisbaráttu þjóðarinnar (sjá mynd 16.1). Þær finnast nær alls staðar á landinu þar sem gróður er á yfirborði. Listamenn hafa sótt innblástur í þessi formfögru fyrirbrigði, svo sem Steinunn Marteinsdóttir sem gerði þúfur að meginviðfangsefni í mörgum verkum sínum (mynd 16.17).

En þrátt fyrir hversu einkennandi

Mynd 16.15. Ísnálar auka áhrif rasks. Á myndinni sést hvar traðk hefur opnað hluta svarðar á nýlegum göngustíg. Ísnálar myndast þar sem gróðurinn er horfinn og til verða varanlegar ógrónar skellur sem smám saman stækka. Tveimur árum eftir að þessar myndir voru teknar var stígurinn orðinn algjörlega ógróinn.



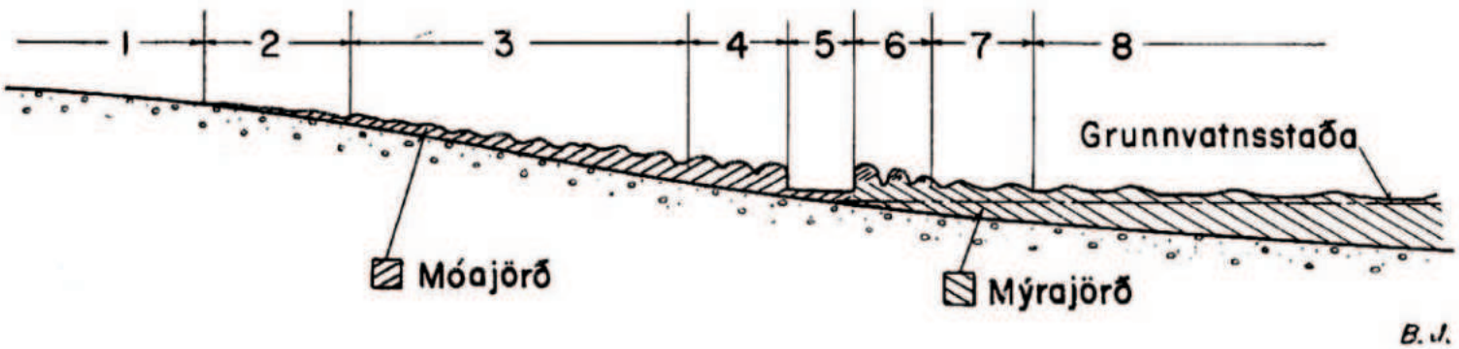
Mynd 16.16. Myndun ísnála um tveggja mánaða skeið 2012. Eyður eru í gögnum þegar snjór hylur yfirborðið. Unnið upp úr BS-verkefni Kathrine Schack Madsen (2013).

þúfurnar eru fyrir landslag á Íslandi eru rannsóknir á þeim ekki margar. Vert er að geta doktorsverkefnis Ekkehard Schunke, sem hefur síðan ritað nokkuð um þúfur á Íslandi (sjá Schunke 1977, Schunke og Zoltai 1988). Íslenska hugtakið „þúfa" er í æ ríkari mæli notað sem alþjóðlegt hugtak um þessi fyrirbrigði, oftast fleirtölumynd orðsins, þ.e. „thufur" og jafnvel „thufurs". Þar má nefna rannsóknir á hlíðum eldfjalls í Kóreu (Kim 2008) og í Suður-Afríku og Lesótó (t.d. Grab 1994, 2005). Svipuð fyrirbrigði finnast víða um heim og ganga undir ýmsum nöfnum eins og „hummocks" á ensku og „pounus" í Fennóskandíu – en þau fyrirbrigði myndast ekki síður sem vaxtarform plöntuhópa og ekki endilega vegna frosts.

Björn Jóhannesson (1960) veitti því athygli að þúfur voru alla jafna hæstar á Íslandi í jaðri votlenda og teiknaði meðfylgjandi skýringarmynd (mynd 16.18). Ástæðan er einmitt sú sem áður var skýrð, það dregst vatn upp að frostbylgjunni og þegar grunnvatn er skammt neðan yfirborðs eru aðstæðurnar ákjósanlegastar.

Gerrard (1992) birti svipaðar sviðsmyndir fyrir þúfnamyndun hérlendis.

Mynd 16.17. Málverk eftir Steinunni Marteinsdóttur af fugli í skjóli þúfna. Mynd í eigu ÓA, birt með leyfi listamannsins.

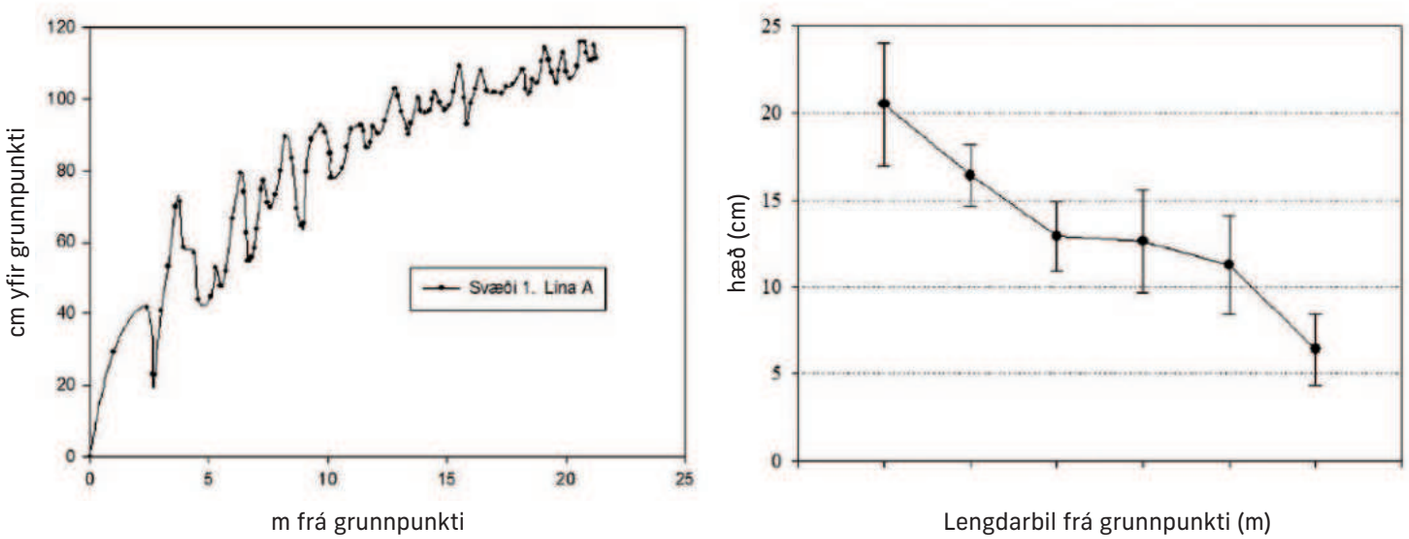


Mynd 16.18. Skýringarmynd af afstöðu hæstu þúfna í landslagi í bók Björns Jóhannessonar (1960). Þúfurnar eru hæstar þar sem hæfilega langt er niður á grunnvatn en minni á þurrlendi.

Matthildur Sigurjónsdóttir (ÓA og Matthildur Sigurjónsdóttir 2012 gerði könnun á hæð þúfna frá votlendisyfirborði upp á mólendi á nokkrum stöðum á Mosfellsheiði. Eitt sniðanna er sýnt til vinstri á mynd 16.19 en meðaltal þeirra til hægri ásamt staðalfráviki. Meðalhæðin er yfir 20 cm næst votlendinu á þessu svæði en lækkar niður í u.þ.b. 7 cm fjærst grunnpunkti (misjafnt hve það er langt frá). Niðurstöðurnar koma vel heim og saman við hugmyndir Björns Jóhannessonar.

Þúfur eru fljótar að myndast í framræstu votlendi sem tekið er til hrossabeitar í stað ræktunar, en við þær aðstæður er grunnt niður á vatnsborðið og þung beitardýr auka á þúfnamyndunina, eins og síðar er vikið að. Ástæður þúfnamyndunar þar sem stutt er niður á grunnvatn eru augljósar. En þúfur finnast víðar, m.a. á þurrlendi, og sem dæmi má nefna að þúfur eru algengar og jafnframt sérdeilis stórar í Kelduhverfi þar sem tugir metra geta verið niður á grunnvatn (mynd 16.19). Hvernig má það vera? Margar ástæður eru fyrir því: (Sjá textabox á næstu síðu).

Í yfirlitsgrein um þúfur lögðu Walker o.fl. (2008) áherslu á að mismunandi gróðurfar og mismikil snjóþekja skýrðu breytilega myndun þeirra. Einangrun á yfirborði er mikilvæg fyrir myndun þúfnanna, t.d. virðast brattari þúfur myndast þar sem beit er mikil og sina hefur verið fjarlægð. Í skóglendi safnast



Mynd 16.19. Hæð þúfna í sniðum frá grunnpunktum í votlendi upp á mólendi nærri votlendum. Dæmigert snið til vinstri en meðaltöl sniða til hægri, sem skipt er í 6 jöfn lengdarbil óháð lengd sniðanna (ÓA og Matthildur Sigurjónsdóttir 2012).

snjór fyrir í skjóli trjánna og veitir mun varanlegri einangrun en gengur og gerist á snjólausum berangri, auk þess sem gróðurhula skóglendisins er yfirleitt mun öflugri og hefur að geyma meira af lífrænum efnum sem auka á einangrun yfirborðsins. Hvað Ísland varðar þá er líklegt að kornastærð og tilvist grófra gjóskulaga sem rjúfa vatnsleiðni séu mikilvægir þættir sem skýra mismunandi þúfnamyndun milli landsvæða, eins og síðar er vikið að – bæði þar sem stutt er niður á grunnvatn og þar sem grunnvatnsborð er hvergi nærri.

Þung beitardýr hafa einnig mikil áhrif á ferlið, en hestar stíga t.a.m. nánast aldrei ofan á þúfur heldur alltaf á milli þeirra, sem veldur því að mold með litla samloðun ýtist æ meira upp í þúfuna (mynd 16.20b).

Mismunandi beitaraðstæður innan og utan girðingar geta veitt góða innsýn í áhrif beitarinnar, eins og sést á mynd 16.21 á næstu síðu frá Hítardal.

Það er athyglisvert að þúfur myndast á Asoreyjum þar sem aldrei frýs, en þar er einmitt *eldfjallajörð* með litla samloðun og feykilega mikla vatnsheldni (Hydric Andosol; >100% vatn við 15 bara togspennu, þ.e. þegar moldin er „þurr“). Landið er notað fyrir beit nautgripa (mynd 16.22). Almennt er talið að beit búfjár stuðli að myndun þýfis, jafnvel utan þeirra svæða þar sem frost er mikið (sjá Boot o.fl. 2014, þar sem íslenskar þúfur koma við sögu).

Þegar skoðaðar eru tilgáturnar hér að ofan um ástæður fyrir þúfnamyndun á Íslandi má ljóst vera að aðstæður sem draga úr uppdrætti vatns frá grunnvatnsborði ættu að minnka líkur á myndun þúfna. Það á m.a. við þar sem gróf gjóskulög eru skammt neðan yfirborðs, eins og víða á gosbeltinu. Þúfur eru t.d. ekki eins afgerandi hluti landslagsins á grónum heiðum

- **Moldin er *eldfjallajörð* með litla samloðun, sem gerir það að verkum að moldarefnin ýtast auðveldlega til. Moldin hefur jafnvel kvikueiginleika sem veldur því að hún nær flæðimarkinu þegar mikið er af vatni og hún verður fyrir raski (t.d. ef þiðnar eftir frost og búfé á leið um svæðið).**

- ***Eldfjallajörð* getur haldið í sér firnum af vatni sem að hluta koma í stað vatnsdælingar frá neðri lögum að frostbylgjunni.**

- **Leir í *eldfjallajörð* myndar stöðug samkorn af siltstærð. Vatnsleiðni er því mjög ör, nema að gróf gjóskulög rjúfi vatnsleiðnina. Mismunandi kornastærð og tilvist grófra gjóskulaga í jarðveginum skýrir iðulega mismun á milli landshluta hvað varðar þúfnamyndun.**

- **Tíðir frost-þýðu-hringir valda því að stöðugt bætist vatn í jarðveginn allan veturinn. Vatn berst bæði upp að frostbylgjunni og niður í moldina í umhleypingum á vetrum.**

- **Beit þungra dýra á borð við hross og nautgripi eykur mjög á myndun þúfna, en einnig beit sauðfjár.**

- **Eftir að þúfur taka að myndast þróast afar mismunandi aðstæður á þúfnakollum (áveðurs frýs hraðar en niðri á milli þúfna) og á milli þúfna (þar myndast skjól, stundum einangrandi snjóhula). Frostbylgja myndast hugsanlega fyrr í þúfunni, þangað berst vatn og hún bólgnar miðað við svæðið milli þúfna.**

Mynd 16.20a. Þúfur í Kelduhverfi þar sem tugir metra eru niður á grunnvatn. Þúfurnar ná iðulega yfir eins metra hæð (munur á hæsta og lægsta punkti) – kargaþýfi sem erfitt er að ganga um).

Mynd 16.20b. Þúfur í ofbeittu hrossahólfi. Brattar þúfur sem hafa myndast á fáum árum þar sem áður var tún eins og það sem ennþá sést handan girðingarinnar.

Mynd 16.21. Mikið beitt hrossabeitarhólf innan girðingar til hægri en minni beit, einkum af sauðfé, til vinstri. Munurinn er sláandi – hrossabeitin eykur á myndun þúfnanna.

í Vestur-Skaftafellssýslu og annars staðar, en þar er moldin gróf vegna tíðra gjóskufallsatburða auk þess sem gjóskulög skammt neðan yfirborðs rjúfa vatnsleiðnina. Grófleiki jarðvegsins og tilvist grófra gjóskulaga eru líklega meðal þeirra meginþátta sem skýra mun á milli landshluta hvað varðar myndun þúfna.

Moldin fjærst gosbeltinu er iðulega fremur fínkorna og með dæmigerða sortueiginleika á borð við mikla vatnsheldni, öra vatnsleiðni, kvikuhegðun o.s.frv. Þar vantar einnig gróf gjóskulög sem rjúfa vatnsleiðnina, enda er mörg stórfengleg þúfnasvæði að finna fjarri gosbeltinu, t.d. á nyrsta og austasta hluta Norðaustur- og Austurlands, m.a. í Kelduhverfi, austarlega í Jökulsárhlíð og á Víknaslóðum í nágrenni Borgarfjarðar eystri (mynd 16.23). Á þessum slóðum eru hafræn áhrif á veðurfarið einnig áberandi með tíða frost-þýðu-atburði sem auka á frosthreyfingar. Þúfur eru ennfremur afar háar í jöðrum mýrlenda á heiðum á Norðvesturlandi, t.d. á Auðkúluheiði við norðanverðan Kjalveg. Miklar umhverfisbreytingar áttu sér stað hérlendis í kjölfar landnáms.

Mynd 16.22. Þúfur á Asoreyjum, þar sem frýs sjaldan eða aldrei. Moldin er vatnsósa *eldfjallajörð* (Hydric Andosol) og landið er nýtt til beitar nautgripa.

Loftslag fór ennfremur kólnandi eftir því sem leið á aldirnar þaðan í frá og þúfnamyndun hefur væntanlega aukist með minni einangrun, meira beitarálagi og kólnandi veðurfari á litlu ísöld. Þessa sér víða stað í jarðvegssniðum þar sem þúfur taka ekki að myndast fyrr en eftir 1300 til 1500 (sjá m.a. Van Vliet-Lanoë 1998), eða í kjölfar útrýmingar skóga af stórum landsvæðum.

16.8. Jarðsil – jarðskrið

Frost hefur mikil áhrif á yfirborð hlíða á norðurslóðum. Mold og laus jarðefni frjósa og þiðna á víxl, mismikið eftir aðstæðum. Þegar vatnið frýs bólgnar það út – moldin eykur rúmmál sitt. Einnig leitar vatnið í átt til frostbylgjunnar, sem eykur á áhrifin eins og áður hefur verið lýst. Þegar vatnið í moldinni þiðnar aftur minnkar rúmmálið. En rúmmálsbreytingarnar sem verða með frosti og þýðu virka ekki jafnt í allar áttir; nú leggst þyngdaraflið einnig á árar og úr verður hægfara bylgjuhreyfing moldarinnar niður brekkurnar (sjá yfirlitsgrein Matsuoka 2001). Ferlið hefur verið nefnt jarðsil á íslensku en kallast „solifluction“ á ensku.

Ummerkin sem verða á yfirborðinu hafa fengið ýmis nöfn – en slíkar hlíðar hafa verið nefndar jarðsilsbrekkur og stallarnir paldrar eða jarðsilsstallar. Einnig er algengt annað form á jarðsili, jarðsilstungur, eins og síðar er vikið að, sem og svokallaðir rimar í rimamýrum. Benda má á grein Helga Hallgrímssonar (2016) þar sem fjallað er um þessi fyrirbrigði og skrif um þau á íslensku. Raunar telur Helgi að ekki þurfi frost

Mynd 16.23. Yfirborð mótað af kulferlum í nágrenni Borgarfjarðar eystri. Sauðféð á myndinni er mælikvarði á stærð fyrirbrigðanna. Þarna eru afar stórar þúfur, jarðsilsstallar (paldrar) og jarðsilstungur í bland.

til að koma bylgjuhreyfingunni af stað niður brekkurnar – en jarðsilsstallar eru m.a. áberandi í Vestur-Skaftafellssýslu (mynd 16.24) þar sem hann telur að jarðvegur frjósi sjaldan og lítið í einu.

Þessu til stuðnings má benda á að þúfur geta myndast í sams konar jarðvegi og hér um ræðir beit og þúfnamyndun í hlíðum gætu með öðrum orðum myndað bylgjuhreyfingu jarðvegsins. Að öðru leyti er ekki lagt mat á skoðun Helga hér, en rannsóknir skortir. Í alþjóðlegum fræðum er jarðsil tengt frosti og þýðu (sjá Matsuoka 2001). Fremst í stöllunum er iðulega grófara efni (sjá umfjöllun um myndun melatígla) sem verður ekki fyrir jafnmiklum áhrifum frosts og efnið innar í stallinum. Fínna efnið bólgnar út og ýtir á það grófara sem er fremst í tungunni þar sem geta jafnvel verið steinar. Þetta er víða áberandi þar sem gróðurhula er fremur lítil og ekki síst í jarðsilstungum.

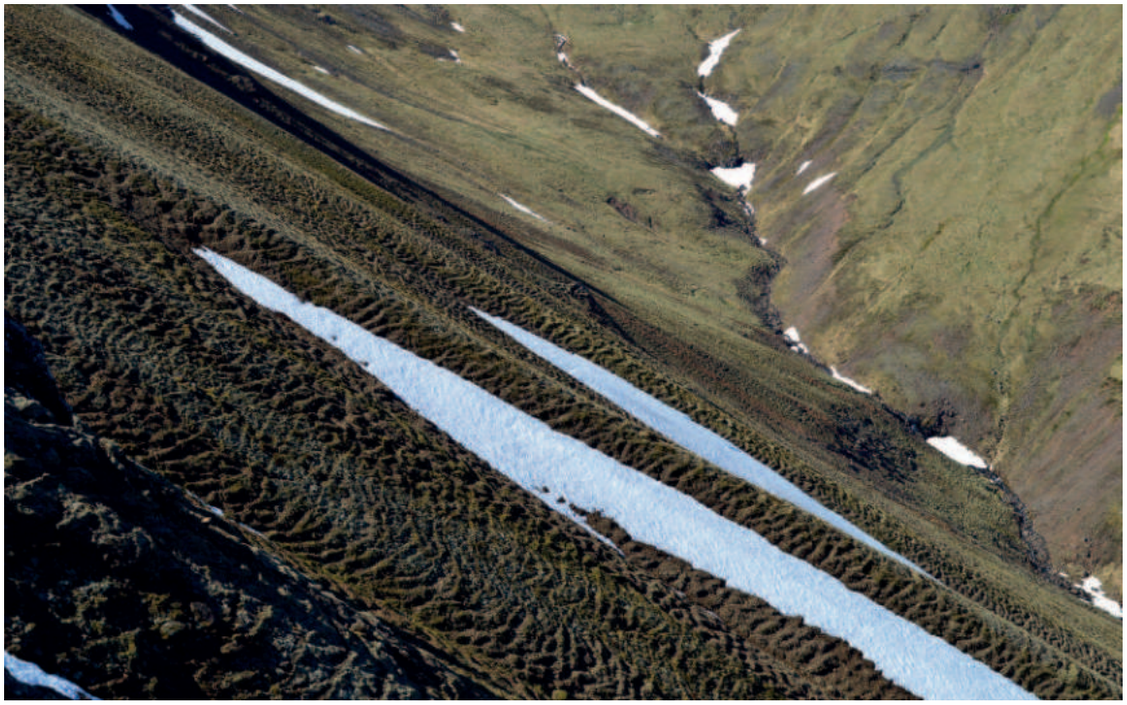
Jarðsilsstallar (paldrar) eru algengir um allt land, en þó er mismunandi hvað þeir eru áberandi í hlíðum. Þetta geta verið ákaflega tilkomumikil fyrirbrigði sem mynda samfelldar breiður af stöllum um fjallshlíðar, sbr. mynd 16.25 af Bjarnarhafnarfjalli.

Jarðsilstungur eru afar algengar um land allt. Í stað stalla myndast tungulaga bungur undan hallanum, sbr. mynd 16.26 hér að neðan. Myndin til hægri er tekin á Öxnadalsheiði þar sem tungurnar eru einmitt mjög áberandi.

Jarðsilstungur eru ekki síður virk yfirborðsmunstur í ógrónum hlíðum, og þá sést iðulega vel í grjóthrúgu framan í tungunum sem sporna á móti hreyfingunni niður á við. Rétt eins og þróun jarðsilsstalla á margt sameiginlegt með myndun þúfna eiga jarðsilstungur á illa grónu landi margt sameiginlegt með melatíglum, sem fjallað er um hér aftar.

Annað sem einkennir svæði þar sem jarðsilstungur og stallar fara saman með beitarálagi er að gróður á erfitt uppdráttar á „pallinum“ ofan á stöllunum og tungunum – þar myndast eins

Mynd 16.24. Jarðsilsstallar (paldrar) í Pétursey í Vestur-Skaftafellssýslu. Girðingarstaur neðarlega t.h. til viðmiðunar. Þessir paldrar hafa vakið mikla athygli og hluti brekkunnar er nú kominn á náttúruminjaskrá. Sigurður Þórarinsson (1981), Helgi Torfason (1984) og Helgi Hallgrímsson (2016) hafa allir ritað um paldra-brekkurnar í Pétursey.



Mynd 16.25. Tilkomumiklir jarðsilsstallar í Bjarnarhafnarfjalli á Snæfellsnesi. Hér snýr hlíðin í norður en svo virðist sem stallarnir séu algengari í hlíðum sem snúa í suður (Helgi Hallgrímsson 2016) þar sem væntanlega eru tíðari hringir frosts og þýðu og sólin nær að ylja yfirborðið.

konar rofdílar sem gróa illa upp – sbr. umfjöllun um rofdíla og ísnálar hér á undan. Slíkum svæðum er einstaklega hætt við vatnsrofi, enda eru þau í umtalsverðum halla. Oft og tíðum gefur það ranga mynd af svæðum að horfa aðeins upp eftir hlíðum þeirra, þær geta jafnvel virst algrónar frá því sjónarhorni (mynd 16.29 til vinstri). Ef aftur á móti er horft niður sömu hlíðar koma rofdílarnir í ljós (mynd 16.29 til hægri). Slíkar aðstæður eru afar algengar um landið allt – og því er mikilvægt að horfa niður hlíðarnar þegar ástand landsins er metið.

Undursamlegar rimamýrar

Á köldum og mjög blautum svæðum með lítinn halla (t.d. 1–2°) geta myndast afar sérstök fyrirbrigði sem hafa fengið heitið rimamýrar og er ein af vistgerðunum í vistgerðaflokkun Náttúrufræðistofnunar Íslands (Jón Gunnar Ottósson o.fl. 2016).

Jarðsil og skriðuföll

Jarðvegi í jarðsilsbrekkum er mjög hætt við vatnsrofi og skriðuföllum. Þegar mikið vatn hleðst upp í moldinni í miðjum jarðsilstungum getur hún náð flæðimarki þar sem hún situr í halla og valdið skriðuföllum.

Grófara efnið neðst í tungunni heldur á móti en getur þó gefið sig ef þrýstingurinn niður brekkuna verður of mikill þegar moldin er orðin þung og vatnsósa.

Skriðuföll eru algeng á svæðum þar sem jarðsilstungur sitja í hallanum.

Mynd 16.26. Jarðsilstungur. Til vinstri sést framan á tungu í Langadal í Austur-Húnavatnssýslu, stórgrýti er fremst í tungunni. Til hægri eru jarðsilstungur á Öxnadalsheiði. Svæðum sem þessum er hætt við skriðuföllum þegar fyrirstaðan fremst í tungunum gefur sig, t.d. við snjóbráð eða úrfelli þegar moldin er mettuð fyrir.

Mynd 16.27. Ógróin jarðsilstunga til vinstri (Hrútfell á Kili í um 800 m hæð), en göngustafur er til viðmiðunar. Gróf grjóturð er fremst í tungunni. Tungur af þessari gerð eru mjög algengar á ógrónu landi á heimskautasvæðunum. Til hægri er stór jarðsilsstallur í hlíð á Norðurlandi þar sem hver stallurinn tekur við af öðrum með 10–20 m millibili.

Þessi tegund mýra er útbreidd í Finnlandi (aapa mire) og víðar (Koutaniemi 1999). Í rimamýrum myndast bjúglaga garðar þvert á hallann sem nefndir eru rimar. Þeir hreyfast hægt undan hallanum, tugi cm á ári samkvæmt finnskum rannsóknum (Koutaniemi 1999), og hraðast í miðjunni sem gerir þá bogalaga. Iðulega eru tugir metra á milli rimanna og svæðin eru því röndótt og auðgreinanleg á gervihnatta- og loftmyndum. Samkvæmt rannsóknum Náttúrufræðistofnunar (Jón Gunnar Ottósson o.fl. 2016) er moldin á þessum svæðum djúp og afar rík af lífrænum efnum. Rimarnir eru í raun jarðsilsstallar – bylgjuhreyfing jarðvegs undan halla fyrir áhrif frosts og þýðu.

Mynd 16.28. Jarðsilsstallar sunnan Nýjadals á Sprengisandi, Tungnafellsjökull í baksýn. Sjá má 5–6 stalla. Lítill gróður sem iðulega er einkum við rót hvers þreps, framan við stallinn.

Stærstu rimamýrarnar eru Lauffellsmýrar á Síðumannaafrétti og Miklumýrar á Hrunamannaafrétti, en þær finnast víða um landið, m.a. á Norður- og Austurlandi. Borgþór Magnússon og Sigurður H. Magnússon (2021) fluttu afar fróðlegt yfirlitserindi um þessi fyrirbrigði sem er aðgengilegt á netinu (sjá heimildalista). Rimamýrar eru fremur fágætar á Íslandi og ættu að njóta sérstakrar verndar, rétt eins og freðmýrarústirnar sem hér er fjallað um.

Forn ummerki frosts í jarðvegi

Á jökulskeiðunum náðu áhrif frosts og þýðu á umhverfið mun sunnar en nú er, en ummerkin eru þó víða ennþá til staðar. Það er t.d. nauðsynlegt fyrir landmótunar- og forleifafræðinga nú á dögum að kunna skil á ummerkjum þessara ferla, sem mörg hver eru sjáanleg langt suður eftir Evrópu, rétt eins og þeim ummerkjum sem hafa orðið á norðurslóðum – ummerkin geta t.d. ranglega verið talin til fornleifa.

16.9. Rústir – freðmýrarústir og ísfell („pingos“)

Rústir eru afar áhugaverð fyrirbrigði í náttúru norðurslóða. Rúst er í grófum dráttum þúst með ískjarna, oft 1–4 m

Mynd 16.29. Jarðsil og rofdílar. Þegar horft er upp hlíðina virðist hún nokkuð vel gróin en þegar horft er niður sömu hlíð koma rofdílarnir ofan á jarðsils-pöllunum í ljós. Ástand landsins er slæmt og því er mjög hætt við vatnsrofi. Myndin er tekin við veginn um Fróðárheiði á Snæfellsnesi.

á hæð, sem rís upp úr votlendi vegna kulferla (sjá t.d. Seppala 1988, Pissart 2002). Ofan á hinum frosna ískjarna er misþykkt lag sem er ófrosið, a.m.k. yfir sumartímann, svokallað virkt moldarlag (e. active layer, sjá umfjöllun um *frerajörð*), oft 30–60 cm þykkt á Íslandi. Rústir finnast einnig á öðrum svæðum þar sem gróðurhula er lítil en slíkar rústir hafa ekki verið skjalfestar hérlendis.

Myndun sífrerarústa er háð veðurfari, vatnafari og þáttum sem hafa áhrif á hitaleiðni á yfirborði og í moldinni. Þessir þættir eru m.a. háðir landslagi, jarðvegi og gróðurfari. Áfok hefur væntanlega einnig áhrif á íslensku rústirnar, svo sem lífrænt innihald þeirra, sem er mikið lægra en í dæmigerðum rústum á Norðurlöndum (sjá Þorstein Sæmundsson o.fl. 2012 og Þóru Ellen Þórhallsdóttur 1994, 1996). Jarðvegseiginleikar á Íslandi eru um margt sérstæðir fyrir myndun rústa, ekki síst vegna þess hve moldin getur bundið mikið vatn og vatnsleiðnin er ör í siltríkri moldinni. Þessir þættir stuðla enn frekar að myndun rústanna séu önnur skilyrði á annað borð fyrir hendi.

Eldfjallajörðin hefur einnig mikið einangrunargildi, sem skiptir máli á yfirborðinu, ekki síst vegna þess að lífræna innihaldið er minna en í yfirborði rústa á norðurslóðum almennt. Á hinn bóginn geta gróf jarðvegslög rofið vatnsleiðni og þar með spornað við myndun rústa. Lágur sumarhiti kann að vera mikilvægur fyrir viðhald rústanna, sem fellur vel að hugmyndum Seppala

Mynd 16.30. Rimamýrar. Moldarrimar sem velta hægt og sígandi niður lítinn halla í votlendi. Mynd úr Jökulsárhlíð til vinstri en af Holtamannafrétti til hægri. Mynd til hægri: Sigurður H. Magnússon.

Mynd 16.31 a & b. Frá Orravatnsrústum á Hofsafrétti norðan Hofsjökuls. Rústirnar hér eru stórar um sig, háar og tilkomumiklar. Vistkerfið (rústamýravist) er einstaklega fjölbreytt.

(1988) og Pissart (2002) um myndun og viðhald rústasvæða. Luoto o.fl. (2004) notuðu líkön til að sýna fram á að bestu skilyrðin fyrir myndun rústa væru á frekar þurrum svæðum (<450 mm ársúrkoma) þar sem ársmeðalhiti er á milli -3 og -5 °C. Ársúrkoman er talsvert meiri en þetta á Hofsafrétti og víðar norðan og vestan Hofsjökuls þar sem eru merkileg rústasvæði, og hún er mikið meiri á hinu mikilfenglega rústasvæði í Þjórsárverum, sunnan Hofsjökuls.

Rannsóknir Þóru Ellenar Þórhallsdóttur (1994, 1996) í Þjórsárverum benda til þess að vatnafar árla vetrar sé mikilvægt fyrir myndun rústanna, sem og nægt aðgengi að grunnvatni (grunnvatnsrennsli) sem eykur á hæð þeirra. Ætla má að rennsli í gegnum Orravatnsrústalægðina norðan Hofsjökuls sé mikilvægt fyrir viðhald og myndun rústanna. Christof Kneisel hefur mælt ísþykkt með leiðnimælingum á svæðinu og sýna niðurstöðurnar að ísþykkt er um 5–7,5 m (Kneisel o.fl. 2007; Þorsteinn Sæmundsson o.fl. 2012).

Rústasvæði finnast víða á Íslandi en mörg þeirra hafa verið óstöðug í aldanna rás; rústir hafa myndast á köldum tímabilum, svo sem á litlu ísöld, en bráðnað þegar tíðarfar var hlýrra. Helstu rústasvæði landsins er að finna í Þjórsárverum og Orravatnsrústum norðan Hofsjökuls en einnig í Álfgeirstungum og víðar norðvestan og vestan við Hofsjökul. Einnig er afar myndarlegar rústir að finna á Jökuldalsheiði og í gróðurlendi Brúaröræfa.

Ljóst er að rústir á Íslandi láta nú undan síga vegna hlýnandi loftslags og t.d. hefur meðaltalsflatarmál Orravatnsrústa minnkað umtalsvert á örfáum árum (Þorsteinn Sæmundsson o.fl. 2012). Rústasvæði á heiðum á Norðurlandi, svo sem á Auðkúluheiði, hafa mörg hver horfið á undanförum áratugum. Sama má segja um rústasvæði sem voru á

Mynd 16.32. Þjórsárver. Hér er greiður aðgangur að grunnvatni og rústir ýmist rísa eða hníga og skilja þá eftir sig vötn. Svæðið er mjög dýnamískt en afar viðkvæmt fyrir raski, t.d. breytingum á vatnafari svæðisins. Mynd: Þóra Ellen Þórhallsdóttir.

Fljótsdalsheiði og Vesturöræfum við núverandi Hálslón.

Rústamýravist í vistgerðaflokkun Náttúrufræðistofnunar er talin hafa mjög hátt verndargildi og er á lista Bernarsamningsins frá 2014 yfir vistgerðir sem þarfnast verndar (Jón Gunnar Ottósson o.fl. 2016). Rústasvæðin í Guðlaugs- og Álfgeirstungum norðvestan Hofsjökuls eru nú friðlýst. Mikilvægt er að freðmýrarústir landsins njóti verndar eins og framast er kostur vegna mikilvægis þeirra með hliðsjón af vistfræði og sem sérstæðra landslagsfyrirbrigða.

„Pingo“ eru eins konar ísfell sem eru meðal mikilfenglegustu fyrirbrigða norðurhjarans – rústir með ískjarna sem geta náð allt að 70 m hæð og eru 500 m í þvermál þegar best lætur. Þær geta orðið árþúsunda gamlar (sjá Jones o.fl. 2010). Ísfell finnast í Síberíu, Kanada, á Grænlandi og í Alaska þar sem yfrið nóg er af grunnvatni en loftslag mjög kalt, ekki síst í óshólmum vatnsfalla eins og Mackenzie-fljóts þar sem nú er þjóðgarður helgaður umhverfi kulferla og menningu slíkra svæða (mynd 16.33).

Hrossum beitt á Orravatnsrústir

Rústasvæðin eru mikilvæg vistkerfi sem eru einstaklega viðkvæm fyrir raski. Í lok síðustu aldar tókum við, þáverandi starfsfólk Rannsóknastofnunar landbúnaðarins, eftir því að fjöldi hrossa var á sumarbeit í Orravatnsrústum. Bóndi neðan úr byggð hafði sumsé ákveðið að beita tugum hrossa á rústasvæðið vegna landleysis heima fyrir. Ekki þarf að fjölyrða um að slík landnýting getur haft afar afdrifaríkar afleiðingar fyrir stöðugleika rústanna. Efni bréfa til fjallskilanefndar og sveitarfélagsins voru nokkuð harðorð í kjölfarið, enda ljóst að bregðast þurfti við fljótt og fjarlægja hrossin áður en illa færi. Heimamenn tóku vel við sér og það tókst að koma í veg fyrir stórtjón á Orravatnsrústum.

Uppákomur sem þessar verða fyrst og fremst vegna þekkingarleysis – svæðið ætti að merkja sérstaklega til að fræða jafnt ferðamenn sem aðra um mikilvægi þessara einstæðu náttúrufyrirbrigða. Einnig koma hér undarleg lög um lausagöngu búfjár og fjallskil við sögu – en um þann þátt er rætt síðar í þessu riti.

Önnur ógn sem steðjar að svæðinu felst í virkjanahugmyndum og mögulegri myndun lóns nálægt rústasvæðinu með stíflun Austari-Jökulsár, en rústasvæðin eru afar viðkvæm fyrir breytingum á grunnvatnsrennsli sem fóðrar ísmyndun þeirra. Svipuð ógn steðjar að Þjórsárverum vegna virkjanahugmynda og áætlana um myndun uppistöðulóns á svæðinu. Vonandi er búið að blása þessar hugmyndir af.

16.10. Melatíglar

Tíglar og hringlaga mynstur (e. patterned ground) eru afar algeng fyrirbrigði sem verða til í moldaryfirborði á heimskautasvæðum og í jarði þeirra. Walker o.fl. (2008) birtu ágætt yfirlit yfir þessi mynstur og útskýrðu hvernig sprungumyndun (e. cracking), frostlyfting (e. differential heaving) og þróun gróðurs spila saman og mynda mismunandi mynstur í yfirborðið. Fyrirbrigðin eru áberandi á grónum svæðum norðurhjarans sem og á ógrónu landi.

Mynstrin eru einkum í melum hérlendis og nefnast þá melatíglar (e. sorted patterned ground). Melatíglar myndast smám saman fyrir ólík áhrif frosts á fín- og grófefni jarðvegsins. Nokkur líkön hafa verið lögð fram sem lýsa myndun þeirra (sjá Feuillet o.fl. 2014) og líklega eiga flest þeirra að einhverju leyti við hérlendis eftir aðstæðum. Þorsteinn Guðmundsson (2018) útlistaði módel Van Vliet-Lanoë (1991) en nú er oftast vitnað til líkans sem Kessler o.fl. settu fram 2001 og gerir ráð fyrir að grjót ýtist til hliðanna en fína efnið safnist fyrir í miðjunni (einnig Kessler o.fl. 2003). Líkan þeirra gerir ráð fyrir að rendur myndist í halla, sem er einmitt víða áberandi hérlendis. Mikið af heimildum er til um melatígla og má m.a. benda á yfirlitsgreinar Walkers o.fl. (2008) og Harris o.fl. (2009). Sigurður Þórarinsson ritaði talsvert um melatígla, svo sem grein í *Jökli* árið 1981 (sjá einnig Friedman o.fl. 1971).

Eftir að land kemur undan jökli eða jarðvegsrof hefur eytt moldarlaginu ofan á jökulurð tekur grófara efnið, möl og grjót, að ýtast út til hliðanna,

Mynd 16.33. Rústir í flá á Jökuldalsheiði. Sífrerarústir hafa minnkað og jafnvel horfið á þessu svæði vegna hlýnunar loftslags.

en fínefnin safnast fyrir í miðjunni. Fínefnin halda meiri raka í sér en grófu efnin svo að ferlið vindur upp á sig, æ meira vatn safnast fyrir í miðju kerfinu en í grófara efninu til hliðanna. Þar sem siltefnin í miðjunni eru mjög frostnæm (e. frost susceptible) bólgnar miðjan út í frosti og verður að hálfgerðu kviksyndi þegar hún þiðnar en jörð er frosin undir, eins og þeir þekkja sem halda á fjöll of snemma á vorin. Þetta miðjusvæði hefur stundum verið nefnt „frost boils" eða „mud boils" á ensku („frostpottar", „frost-suðupottar" eða „frostkýli") – mjög óstöðugir drullupottar – það er eins og að frostið komi af stað iðuhreyfingum sambærilegum þeim sem eiga sér stað við suðu í potti.

Melatíglar eru misjafnir að gerð, litlir sem stórir með margvíslega lögun, t.d. sexhyrndir eða hringlaga. Svo virðist sem þeir verði ekki eins áberandi í sendnu yfirborði auðna samanborið við mela, en þeir finnast þó t.d. á Sprengisandi. Ástæðan fyrir þessu er líklega fyrst og fremst sú að sandyfirborðið er óstöðugt og vindrof hefur áhrif á myndun tíglanna, auk þess sem sandur er ekki eins „frostnæmur" og silt í melunum vegna ólíkrar kornastærðar (myndir 16.35 og 16.36).

Frostlyfting hefur mikilvæg áhrif á yfirborð sendinna auðna því á vetrum þrýstast hnullungar sem liggja í yfirborðinu upp á við. Mörg auðnasvæði verða fyrir umtalsverðu áfoki á hverju sumri og ef ekki kæmi til frostlyfting myndi hið grýtta yfirborð smám saman grafast í áfokið. En það er öðru nær, grjótið þrýstist smám saman upp á hverjum vetri en fyrir neðan getur myndast sendið jarðvegslag. Bændur á akuryrkjusvæðum sem búa við grýtta mold reyna gjarna að tína burt grjótið, en oft er það heldur vonlaus starfi þar sem aðstæður haga því svo að frostlyfting bætir í sífellu við grjótið á yfirborðinu.

Mynd 16.34. Pingo. Risavaxnar rústir á norðurhjaranum. Þessar eru í óshólmum Mackenzie-fljótsins í Kanada. Myndin er fengin af Wikipedia.

Mynd 16.35. Fyrir ofan: melatíglar í þróun á yfirborði sem hefur nýlega misst moldarhuluna. Mynd tekin að morgni á sólardegi, yfirborðið er tekið að þorna. Innvolsið er úr fínna efni sem heldur í rakann en jaðarinn hefur þornað upp. Ekki er orðin fullkomin aðgreining, en tíglarnir eiga eftir að stækka. Mynd: Sigmar Metúsalemsson. Fyrir neðan: nærmynd sem sýnir vel aðgreiningu, jaðarinn með grófefni en „frostsuðupottur" í miðjunni með fínni jarðvegsefnum. Svart linsulok fyrir miðri mynd er til viðmiðunar.

16.11. Sífreri, frostveðrun og urðarjöklar

Svæði með **sífrera** þar sem frost fer aldrei úr jörðu eru talin útbreidd ofan 800–900 m hæðar, ekki síst þegar norðar dregur á landinu (Etzelmüller o.fl. 2020). Í raun er ekki mikið vitað um útbreiðslu sífrera á Íslandi út frá beinum mælingum en segja má að helstu rústasvæðin séu þekkt. Boranir í auðnum á hálendinu hafa sýnt fram á sífrera í jörðu (sjá t.d. Farbrot o.fl. 2007). Líkanagerð hefur verið notuð til að meta útbreiðslu sífrera hérlendis (Harris o.fl. 2009) og einnig hvernig hann hefur þróast í tímans rás (Etzelmüller o.fl. 2020). Sífreri á Íslandi sem annars staðar er viðkvæmur fyrir loftslagsbreytingum.

Gríðarlegt magn kolefnis er í jörðu sífrerasvæða og undanfarin ár hefur komið í ljós að það er oft vanmetið í útreikningum á kolefnisforða jarðvegs í heiminum. Talið er að jarðvegur norðurslóða geymi um 1672 Pg kolefnis (Tarnocai o.fl. 2009), sem er um þrisvar sinnum meira en allt kolefni í andrúmsloftinu. Mikið af þessu kolefni er á sífrerasvæðum Kanada, Síberíu og Alaska. Við hlýnun jarðar getur hin frosna jörð tekið að bráðna og þá losnar um hluta kolefnisins, sem aftur getur haft mikil áhrif á styrk gróðurhúsa-lofttegunda í andrúmsloftinu. Þannig getur hlýnun jarðar valdið eins konar snjóboltaáhrifum með bráðnun jarðvegs á heimskautasvæðum og aukinni losun gróðurhúsalofttegunda (sjá einnig Kuhry o.fl. 2009). Margt bendir til þess að slík þróun sé hafin nú þegar.

Þegar vatn kemst í sprungur og holrými bergs og frýs þar myndast gríðarlegur þrýstingur sem losar um bergið og mylur það niður. Þannig geta myndast bergefni sem leggjast til jarðvegs. **Frostveðrun** leggur til mikið af lausum efnum, einkum sandkornum, þar sem

réttar aðstæður eru fyrir hendi og er því meðal mikilvægra kulferla á Íslandi. Það á ekki síst við í fjalllendi eða þar sem mikið af berum klöppum standa upp úr annars grónum sverði, eins og víða á Vesturlandi.

Frostveðrun hefur m.a. áhrif á berghleðslur og veggi, svo sem grjótið í Alþingishúsinu við Austurvöll. Frostveðrun leggur til laus efni, einkum sandefni, fyrir jarðvegsmyndun þar sem þannig hagar til. Jöklar sjá hins vegar náttúru landsins fyrir megninu af siltefnunum sem fjúka og mynda áfoksteppið yfir landinu, eins og áður hefur komið fram.

Urðarjöklar (e. rock glaciers) eru mikilfengleg náttúrufyrirbrigði þar sem stórar spildur úr ís og grjóti síga hægt niður halla. Hraði sigsins er frá nokkrum millimetrum til nokkurra metra á ári eftir aðstæðum. Þeir eru algengir í fjalllendi um allan heim. Það er nokkuð víst að fjöldi slíkra fyrirbrigða eru virk í fjöllum Íslands, t.d. á Tröllaskaga, og enn fleiri urðarjöklar voru virkir í lok ísaldar (Ágúst Guðmundsson, 1995, 2005).

Þá eru tilgátur uppi um að mörg þeirra fyrirbrigða sem áður voru talin framhlaup á Íslandi séu í raun merki um urðarjökla. Þeir hafa þá verið virkir á síðjökultíma og við upphaf nútíma þegar loftslag var kaldara en nú er, en um þetta eru deildar meiningar í jarðfræði og í raun erfitt að skera úr um það í mörgum tilfellum. Það fer vel á því að ljúka þessum kafla með mynd af Stórurð við Dyrfjöll, sem er (líklega) einkar tilkomumikill urðarjökull (mynd 16.37)

Mynd 16.36. Melatíglar nálægt Nýjadal á Sprengisandi. Munstrið er hér ansi „gróft“ en gróður nær fótfestu í sprungunum.

Mynd 16.37. Stórurð við Dyrfjöll er mögulega gamall urðarjökull, þar sem ís og bergurðin mjökuðust smám saman niður hlíðina fyrir löngu þegar loftslag var mun kaldara en nú er.

Heimildir

Gefin eru út sérstök tímarit helguð kulferlum og frosti í náttúrunni á borð við Permafrost and Periglacial Processes og Frozen Ground á vegum „International Permafrost Association“, en tímaritið Arctic, Antarctic and Alpine Research stendur á gömlum merg og hefur birt margar lykilgreinar um framfarir á þessu sviði.

Þá eru einnig til bækur tileinkaðar frosti og áhrifum þess á jarðveg og landslag. Þar má sérstaklega nefna bókina Advances in Periglacial Geomorphology (Clark, 1988), en hún rekur skilmerkilega helstu ferli landmótunar sem tengjast frosti. Í formála stendur: „The project was born in a wooden hut on the Central Plateau of Iceland in the late summer of 1982.“ Er þar átt við Kerlingarfjöll þar sem safnaðist saman afar sterkur hópur vísindamanna þess tíma á sviði kulferla. Ekki er vitað til að Íslendingar hafi komið að þeim fundi. Geta má bókar Bockheim frá 2015, Cryopedology, sem þó er nokkuð gömul í grunninn (endurbætt útgáfa 2015).

Einnig er rétt að benda á góðan kafla um kulferli og norðurslóðir í kennslubók í landmótunarfræði eftir Ritter o.fl. (1996), Process Geomorphology. ÓA gaf út ritið Kulferli, frost og mold árið 2010 sem hér er stuðst við sem og sambærilegan kafla í The Soils of Iceland (2015). Það efni hefur einnig skilað sér í efni annarra höfunda hérlendis sem hafa ritað um þetta efni náttúrufræða – sem er auðvitað tilgangurinn.

Ágúst Guðmundsson 1995. Berghlaup eða urðarjöklar. Náttúrufræðingurinn 64:177–186.

Ágúst Guðmundsson 2005. Dreifing þykkra urðarbingja í fjalllendi á Íslandi. Vorráðstefna Jarðfræðafélags Íslands, ágrip erinda og veggspjalda. Bls. 10–11.

Berglind Orradóttir 2002. The influence of vegetation on frost dynamics, infiltration rate and surface stability in Icelandic rangelands. MSc-ritgerð, Texas A&M University, College Station, Texas, USA.

Berglind Orradóttir, S.R. Archer, Ólafur Arnalds, L.P. Wilding og T.L. Thurow 2008. Infiltration in Icelandic Andisols: The role of vegetation and soil frost. Arctic, Antarctic and Alpine Research 40:412–421.

Björn Jóhannesson 1960. The Soils of Iceland. Atvinnudeild Háskóla Íslands, Rit Atvinnudeildar B – No. 13, Reykjavík.

Bockheim, J.G. 2015. Cryopedology. Springer, Dordrecht, Holland.

Booth, D.T., S.E. Cox og J.C. Likens 2014. Fenceline contrasts: Grazing increases surface wetland roughness. Wetlands Ecological Management DOI 10.1007s 11273-014-9368-0.

Borgþór Magnússon, Sigurður H. Magnússon og Sigmar Metúsalemsson 2020. Rimamýrar. Einkenni, útbreiðsla og verndun. Fyrirlestur, Náttúrufræðistofnun Íslands, 4. nóvember 2020. https://www.ni.is/frettir/2020/10/hrafnathing-rimamyrar-a-islandi-utbreidsla-og-einkenni.

CAFF (Conservation of Arctic Flora and Fauna) 2001. Arctic Flora and Fauna: Status and Conservation. Edita, Helsinki, Finland.

Clark, M.J. (ritstj.) 1988. Advances in Periglacial Geomorphology. John Wiley, New York, USA.

Etzelmüller, B., H. Patton, A. Schomacker, J. Czekirda, L. Girod, A. Hubbard, K.S. Lilleøren og S. Westermann 2020. Icelandic permafrost dynamics since the Last Glacial Maximum – model results and geomorphological implications. Quaternary Science Reviews 233:106236.

Farbrot, H., B. Etzelmüller, T.V. Schuler, Ágúst Guðmundsson, T. Eiken, O. Humlum og Helgi Björnsson 2007. Thermal characteristics and impact of climate change on mountain permafrost in Iceland. Journal of Geophysical Research – Earth Surface 112:F03S90, doi:10.1029/2006JF000541.

Feuillet, T., G. Certini og F.C. Ugolini 2014. Sorted patterned ground. Encyclopedia of Planetary Landforms. DOI 10.1007/978-1-4614-9213-9_536-1

Friedman, J.D., C.E. Johansson, Níels Óskarsson, H. Svensson, Sigurður Þórarinsson og R.S. Williams Jr. 1971. Observations on Icelandic polygon surfaces and palsa areas. Photo interpretation and field studies. Geografiska Annaler 53A:115–145.

Gerrard, J. 1992. The nature and geomorphological relationships of earth hummocks (thufa) in Iceland. Zeitscrift für Geomorphologie 86:173–182.

Grab, S. 1994. Thufur in the Mohlesi Valley, Lesotho, Southern Africa. Permafrost and Periglacial Processes 5:111–118.

Grab, S. 2005. Aspects of the geomorphology, genesis and environmental significance of earth hummocks (thufur, pounus): miniature cryogenic mounds. Progress in Physical Geography 29:139–155.

Harris, C., L.U. Anderson og 22 fleiri höfundar 2009. Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modelling thermal geomorphological and geotechnical responses. Earth-Science Reviews 92:117–171.

Helgi Hallgrímsson 2016. Stallabrekkur (paldrar) – einkum í Vestur-Skaftafellssýslu. Náttúrufræðingurinn 86:144–148.

Helgi Torfason 1984. Jarðsil í Pétursey. Náttúrufræðingurinn 53:160.

Hreinn Óskarsson og Sigríður Júlía Brynleifsdóttir 2009. The interaction of fertilization in nursery and field on survival, growth and the frost heaving of birch and spruce. Icelandic Agricultural Sciences 22:59–68.

Jones, A., V. Stolbovoy, C. Tarnocai, G. Broll, O. Spaargaren og L. Montanarella (ritstj.) 2010. Soil Atlas of the Northern Circumpolar Region. European Commission, Publications Office of the EU, Luxemburg.

Jón Gunnar Ottósson, Anna Sveinsdóttir og María Harðardóttir 2016. Vistgerðir á Íslandi. Fjölrit Náttúrufræðistofnunar nr. 54, Garðabær.

Kessler, M.A. og B.T. Werner 2003. Self-organization of sorted patterned ground. Science 299:380–383.

Kessler, M.A., A.B. Murray, B.T. Werner og B. Hallet 2001. A model for sorted circles as self-organized patterns. Journal of Geophysical Research 106:B7:13287–13306.

Kim, T. 2008. Thufur and turf exfoliation in a subalpine grassland on Mt Halla, Jeju Island, Korea. Mountain Research and Development 28:272–278.

Kneisel, C., Þorsteinn Sæmundsson og A. Beylich 2007. Reconnaissance surveys of contemporary permafrost environments in central Iceland using geoelectrical methods: implications for permafrost degradation and sediment fluxes. Geografiska Annaler 89:41–50.

Koutaniemi, L. 1999. Twenty-one years of string movements on the Liippasou aapa mire, Finland. Boreas 28:521–530.

Kuhry, P., C-L. Ping, E.A.G. Schuur, C. Tarnocai og S. Zimov 2009. Report from the International Permafrost Association: carbon pools in permafrost regions. Permafrost and Periglacial Processes. 20:229–234.

Lawler, D.M. 1988. Environmental limits of needle ice: a global survey. Arctic and Alpine Research 20:137–259.

Luoto, M., R.K. Heikkinen og T.R. Carter 2004. Loss of palsa mires in Europe and biological consequences. Environmental Conservation 31:30–37.

Madsen, K.S. 2013. Needle ice in Icelandic Andosols: A field experiment in Hvanneyri, Iceland. Bachelor's Project. Landbúnaðarháskóli Íslands og Faculty of Science, University of Copenhagen, Danmörk.

Matsuoka, N. 2001. Solifluction rates, processes and landforms: a global review. Earth-Science Reviews 55: 07–134.

Ólafur Arnalds 2010. Kulferli, frost og mold. Rit LbhÍ nr. 26. Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.

Ólafur Arnalds 2015. The Soils of Iceland. World Soils Book Series. Springer, Dordrecht, Holland.

Ólafur Arnalds og Fanney Ósk Gísladóttir 2009. Mælingar á vindrofi á Hólsfjöllum. Rit LbhÍ nr. 25. Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.

Ólafur Arnalds og Matthildur Sigurjónsdóttir 2012. Þúfurnar á Mosfellsheiði. Rit LbhÍ nr. 39. Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.

Pissart, A. 2002. Palsas, lithalsas and remnants of these periglacial mounds. A progress report. Progress in Physical Geography 26:605–621.

Ritter, D.F., R.C. Kochel og J.R. Miller 1996. Process Geomorphology. 3. útg. WCB Publishers, Boston, USA.

Schunke, E. 1977. Zur Genese der Thufur Islands und Ost-Grönlands. Erdkunde 31:297–287.

Schunke, E. og S.C. Zoltai 1988. Earth hummocks (thufur). Í: M.J. Clark (ritstj.), Advances in Periglacial Geomorphology. John Wiley, New York, USA. Bls. 231–245.

Seppala, M. 1988. Palsas and related forms. Í: M.J. Clark (ritstj.), Advances in Periglacial Geomorphology. John Wiley, New York, USA. Bls. 247–297.

Sigurður Þórarinsson 1981. Sitthvað úr Suðurlandsferðum. Jökull 31:65–8.

Tarnocai, C., J.G. Canadell, E.A.G. Schuur, P. Kuhry, G. Mazhitova og S. Zimov 2009. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. Global Geochemical Cycles 23:GB2023, doi:10.1029/2008GB003327.

Van Vliet-Lanoë, B. 1991. Differential frost heave, load casting and convection: Converging mechanisms; a discussion of the origin of cryoturbations. Permafrost and Periglacial Processes 2:123–139.

Van Vliet-Lanoë, B., O. Bourgeois og O. Dauteuil 1998. Thufur formation in Northern Iceland and its relation to Holocene climate change. Permafrost and Periglacial Processes 9:347–365.

Walker, D.A., H.E. Epstein, V.E. Romanovsky, C-L. Ping, G.J. Michaleson og 16 aðrir höfundar 2008. Arctic patterned-ground ecosystems: a synthesis of field studies and models along a North American Arctic transect. Journal of Geophysical Research – Biogeosciences 113:GS3S01, doi:10.1028/2007JG000504.

Washburn, A.L. 1980. Geocryology. John Wiley, New York, USA.

Yumoto, M., T. Ogata, N. Matsuoka og E. Matsumoto 2006. Riverbank freeze-thaw erosion along a small mountain stream, Nikko volcanic area, Central Japan. Permafrost and Periglacial Processes 17:325–339.

Zaqout, T., Hrund Ólöf Andradóttir og Ólafur Arnalds 2022. Infiltration capacity in urban areas undergoing frequent snow and freeze-thaw cycles: Implications on sustainable urban drainage systems. Journal of Hydrology 607:127495.

Þorsteinn Guðmundsson 2018. Jarðvegsfræði. Myndun, vist og nýting. Háskólaútgáfan, Reykjavík.

Þorsteinn Sæmundsson, Ólafur Arnalds, C. Kneisel, Helgi Páll Jónsson og A. Decaulne 2012. The Orravatnsrustir palsa site in Central Iceland – Palsas in an aeolian sedimentation environment. Geomorphology 167-168:13–20.

Þóra Ellen Þórhallsdóttir 1994. Effects of changes in groundwater level on palsas in Central Iceland. Geografiska Annaler Series A – Physical Geography 76:161–167.

Þóra Ellen Þórhallsdóttir 1996. Seasonal and annual dynamics of frozen ground in the central highland of Iceland. Arctic and Alpine Research 28:237–243.

17 Sandur og ryk móta náttúru alls landsins

Mynd 17.1. Hin íslenska sandauðn. Svartir basaltsandar af þessu tagi eiga vart sína líka á jörðinni. Tungnaá í baksýn. Myndin er tekin í grennd við Jökulheima.

17.1. Hvað er sandur?

Hugtakið „sandur“ getur haft fleiri en eina merkingu. Í fyrsta lagi miðast skilgreining á sandi við ákveðna kornastærð sem er 0,05–2 mm í þvermál. En með sandi er líka átt við yfirborðsgerð – sendin svæði – þar sem eru laus jarðefni í yfirborði með háu hlutfalli af sandefnum, yfirborði þar sem vindrof getur átt sér stað. Kornastærðin er iðulega nokkuð breið, eitthvað er um leir, mikið um silt, auk efna sem flokkast undir sand og eru alla jafna ráðandi, en þó eru korn af stærðinni silt meginhluti efnis á sumum söndum. Hér er átt við umhverfi sem nefnt er „sandy deserts“ eða „aeolian environments“ („fokumhverfi“) á ensku. Sand- eða fokumhverfi er viðfangsefni sérstakrar fræðigreinar sem margt fagfólk hefur helgað krafta sína. Alþjóðlega er fokumhverfið einkum að finna á þurrkasvæðum jarðar, en einnig við strendur hafs og vatna sem og á heimskautasvæðunum.

Íslenska sandumhverfið er afar sérstætt á heimsvísu vegna þess að hérlendis er loftslagið fremur rakt og sums staðar ansi blautt, en einnig er basísk samsetning sandsins fremur óvenjuleg. Sandauðnir landsins eru stærstu basalt-sandauðnir veraldar. Annars staðar í heiminum er kvarssandur yfirleitt ráðandi en einnig finnast sandauðnir sem eru ríkar af gifsi o.fl. (mynd 17.2 til hægri; kalsíumsúlfat). Íslensku sandarnir eru einnig sérstæðir fyrir það hve yfirborðsferlin eru virk; sandfokið er mjög mikið og stöðugt, enda er veðurfar á Íslandi sértaklega vindasamt í miðri lægðabraut Norður-Atlantshafsins. Þá verður stöðugt til nýr sandur sem bætir efni í þær námur sem fyrir eru. Uppfok ryks á Íslandi er með því mesta sem þekkist í heiminum.

17.2. Flokkun sandauðna á Íslandi

Sandauðnir landsins eru samtals yfir 20 þúsund ferkílómetrar. Þær voru kortlagðar þegar unnið var að rannsóknum á jarðvegsrofi á Íslandi og niðurstöður þeirra birtar árið 1997 (ÓA o.fl. 1997). Síðar voru þær kortlagðar frekar með flokkun Nytjalands (Fanney Gísladóttir o.fl. 2014) og vistgerða-

Mynd 17.2. Svört íslensk sandauðn t.v. og mjallahvítur gifssandur í White Sands National Park í Nýju-Mexíkó í Bandaríkjunum t.h. Myndin til vinstri er frá Tungnaáröræfum. Mynd t.h.: Ása L. Aradóttir.

flokkun Náttúrufræðistofnunar Íslands (Jón Gunnar Ottósson o.fl. 2016). Sandauðnir falla undir lítt gróið land samkvæmt þeirri flokkun sem mótuð var við kortlagninguna á jarðvegsrofi og er skipt í þrjár yfirborðsgerðir: „sanda“, „sandmela“ og „sandhraun“. Að auki má nefna skeljasandsfjörur og meginuppsprettur ryks, sem fjallað er um hér á eftir. Yfirborðinu var jafnframt gefin einkunn eftir virkni rofs, 3 fyrir talsvert rof, 4 fyrir mikið rof og 5 fyrir mjög mikið rof.

Sandar hafa tiltölulega slétt yfirborð sem yfirleitt er mjög hætt við vindrofi (einkunn 4 og 5). Dæmi um sanda eru t.d. Dyngjusandur, Mýrdalssandur og fjörusandarnir meðfram suðurströndinni.

„Sandmelar“ (sendnir melar) eru svæði þar sem sandur hefur borist í mela en grjót er ennþá í yfirborðinu, sem vitaskuld minnkar hættu á vindrofi. Þetta er algengasta gerð sendins yfirborðs hérlendis, samtals um 13 000 km², að stórum hluta á hálendi landsins, t.d. við Sprengisandsleið. Frostlyfting á möl stuðlar að þróun svæðanna þar sem hún lyftist jafnharðan og meiri sandur berst út yfir sandmelana með áfoki.

Sandhraun eru svæði þar sem laus sandur hefur borist í hraun, og þá teljast þau sendin hraun – sandhraun. Þau eru algeng á eldvirka belti landsins, t.d. í nágrenni Heklu, sunnan og vestan Langjökuls og á Norðausturlandi, t.d. í Ódáðahrauni. Það er afar misjafnt hversu úfin hraunin eru, en þau geta safnað ókjörum af sandi á meðan þau eru að fyllast, ekki síst apalhraunin. Helluhraun veita minni viðspyrnu gegn ágangi sands. Dæmi um þessar mismunandi yfirborðsgerðir sendins yfirborðs eru sýnd á mynd 17.3 og einnig fylgir kort sem sýnir útbreiðslu þessara svæða (mynd 17.4). Eins og áður sagði finnast tvær sendnar yfirborðsgerðir hér til viðbótar auk sanda, sandmela og sandhrauna. Í fyrsta lagi skeljasandsfjörur sem er einkum að finna á Vesturlandi og Vestfjörðum. Þær geta haft umtalsverð áhrif töluvert út fyrir fjörusandinn vegna foks. Hins vegar eru það „ofuruppsprettur“ svifryks og áfoks (e. dust hotspots), eða „meginuppsprettur“ eins og þær eru nefndar í greinum í Náttúrufræðingnum (ÓA o.fl. 2019a,b). Þar hefur safnast fyrir mjög mikið af fínu seti, einkum silti, sem er einkar hætt við vindrofi.

Eiginlega dugir enginn rofskali til að lýsa ofurvirkni þessara svæða, enda eru þau meðal mikilvirkustu rofsvæða og uppspretta ryks í heiminum. Meginuppspretturnar eru merktar inn á kortið á mynd 17.4, en fjallað er um þær sérstaklega síðar í kaflanum, enda eru áhrif þeirra á náttúru landsins mikil.

Áhrifaríkar og einstakar íslenskar auðnir

Í riti um mold og þætti sem móta umhverfi landsins er full ástæða til að fjalla um sanda á Íslandi í sérstökum kafla. Áhrif þeirra á mótun vistkerfa eru afgerandi því þeir leggja til stærstan hluta þess áfoks sem hefur lagst eins og teppi yfir mestan hluta landsins.

Moldin hefur síðan þróast í þessa „ábreiðu“ allt frá upphafi nútíma þegar ísa leysti samtímis því sem yfirborð landsins hefur hækkað vegna áfoksins. En þetta er ekki eina ástæðan fyrir því að fjalla sérstaklega um sand – sandauðnir eru afskaplega útbreiddar á Íslandi en teljast um leið sérstæð landform sem eiga sér fáar hliðstæður annars staðar í heiminum. Áhrif foks frá auðnum landsins ná ekki aðeins til moldarinnar; þau eru raunar afar fjölbreytileg.

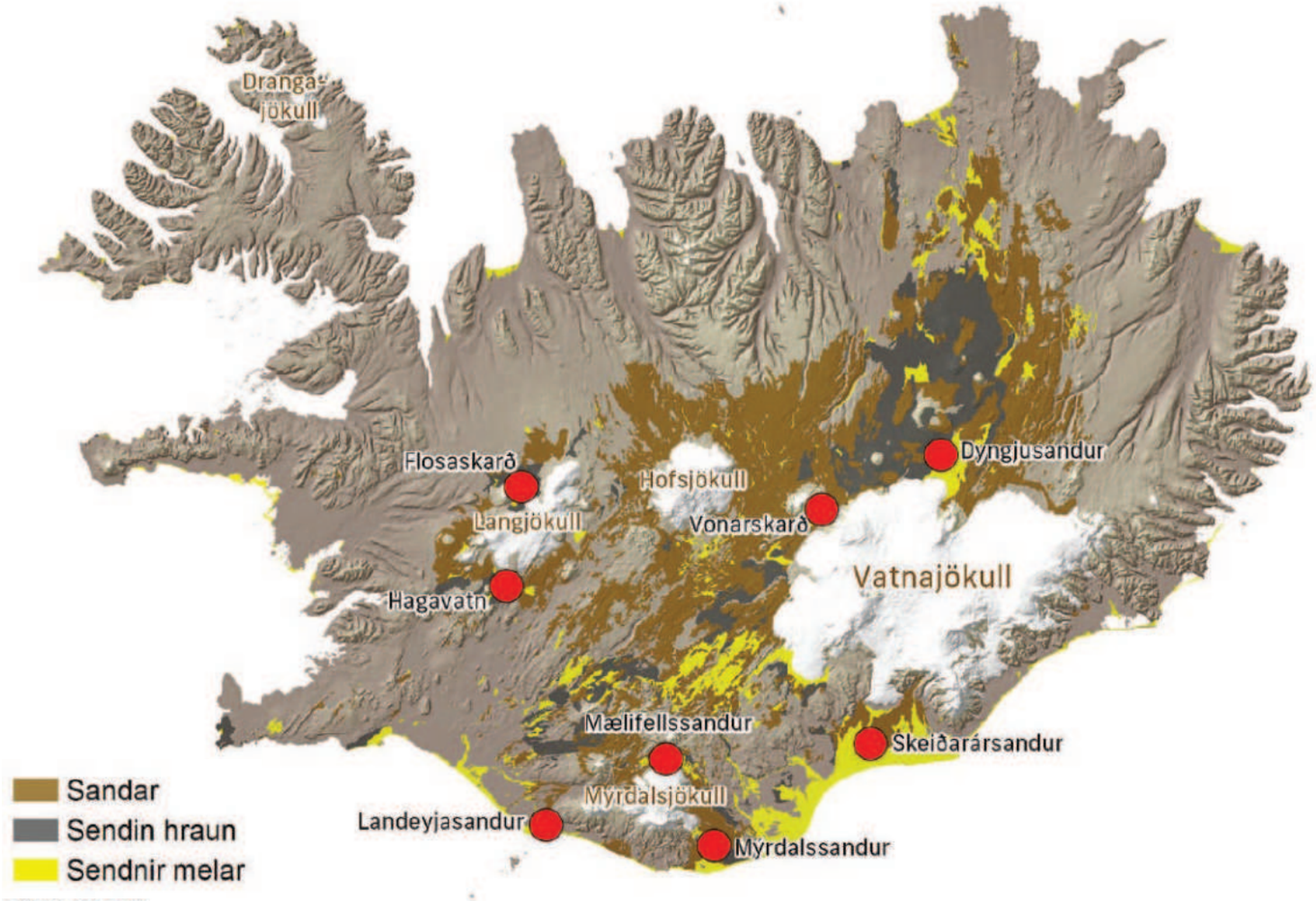
Rykið er líklegt til að hafa jákvæð áhrif á frjósemi hafsvæðanna í nágrenni landsins. Neikvæð áhrif ryks geta verið mikil; ryk er t.a.m. skaðlegt heilsu fólks. Dökk basísk rykkorn flýta fyrir bráðnun jökla, þau hafa áhrif á skýjamyndun í háloftunum og endurkast sólarljóss í andrúmsloftinu. Segja má að íslenskt ryk hafi áhrif á veðurfar vítt og breitt um norðurhvel jarðar. Nýlegar heimildir um rannsóknir á söndum og ryk á Íslandi er að finna á heimasíðu Rykrannsóknafélags Íslands (IceDust).

Mynd 17.3. A: Dæmigert sandyfirborð á Dyngjusandi norðan Vatnajökuls. Hér er skokkhreyfing korna áberandi og ekki þarf mikinn vind til að sandfok hefjist. Herðubreið í baksýn. **B**: Sandmelur á Kjalvegi. Hofsjökull í baksýn (t.v.) ásamt gróðurtorfum sem þrauka í auðninni (t.h.). **C**: Sandsorfinn steinn (e. ventifact) á sandmel. Svörfunin sýnir vel mátt sandfoksins. **D**: Sandhraun (sendið hraun). Skjaldbreiðarhraun, horft til Þórisjökuls. Hraunin geta safnað miklum sandi.

17.3. Hugtök og ferli

Sendin svæði eru ákaflega dýnamísk, yfirborðið breytist í sífellu. Þar eiga sér stað mörg ferli sem móta nærumhverfið og hafa áhrif á vistkerfi á landi og á sjó, á svæðum sem verða fyrir áfoki. Vindrof er ráðandi ferli á sandsvæðum, en vatnsrof getur einnig verið mjög mikið, ekki síst í snjóbráð og þegar úrkomuatburðir verða á frosinni jörð (sjá kaflann um kulferli). Að auki geta bæst við efni sem áfok eða sem set sem berst með vatni, t.d. í flóðum.

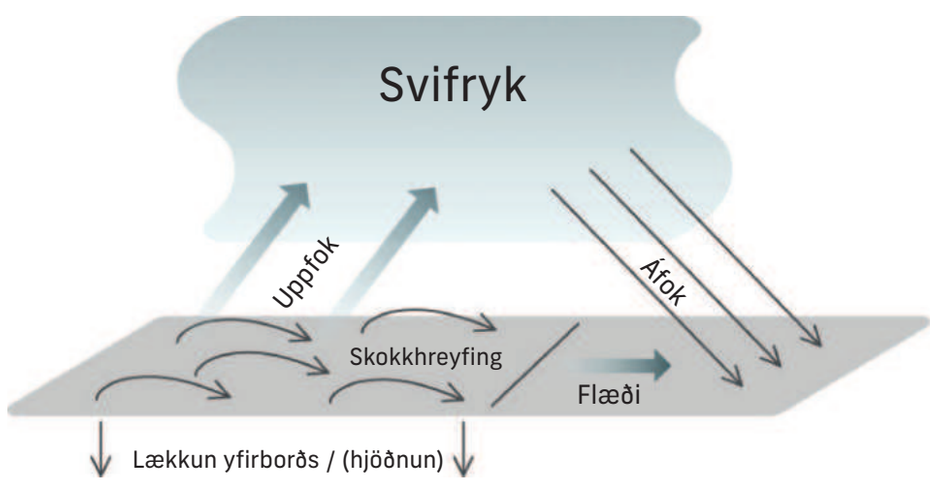
Korn hreyfast með þrenns konar hætti með vindi. Þau minnstu geta borist með lofti (loftborin) og mynda þá svifryk, en stærsti hluti kornanna hreyfist yfirleitt með þeim hætti að þau skoppa á yfirborðinu (stökkhreyfing, skokkhreyfing, e. saltation) vegna sífelldra árekstra þegar þau skella aftur niður á jörðina. Vindurinn ljær kornunum hreyfiorku sem síðan ýtir við mörgum þeirra þegar þau skella á jörðinni á ný. Þetta eru aðallega sandkorn og grófkorna silt. Stærri korn geta mjakast með jörðinni vegna



Mynd 17.4. Útbreiðsla mismunandi yfirborðsgerða sands á Íslandi og meginuppsprettur ryks.

sífelldra árekstra annarra korna, en í frekar litlu magni miðað við þau korn sem ferðast með skokkhreyfingu („skrið“, e. creep). Gerð er tilraun til þess að skýra helstu ferli og hugtök er varða sandumhverfið á mynd 17.5.

Eitt megineinkenni sandauðna í veröldinni eru sandöldur (mynd 17.6), sem eru í raun hægfara bylgjuhreyfing sands undan þurrum vindáttum þar sem mikill sandur er til staðar og hefur verið lengi. Þær eru fremur óalgengar á Íslandi en finnast þó t.d. á Hólsfjöllum, skammt austan við Dettifoss (við gíginn Kvensöðul), sem og á Hafnarsandi við Þorlákshöfn þar sem þær hafa verið græddar upp að mestu.



Mynd 17.5. Sandfok, helstu ferli og hugtök. Stærsti hluti kornanna hreyfist með skokkhreyfingu (e. saltation). Magn þess efnis sem berst með yfirborðinu í sandfoki er hægt að mæla sem flæði, t.d. sem magn sem berst yfir eins metra breiða línu (kg/m), jafnvel á tilteknum tíma (kg/m/klst). Við sandfok getur yfirborðið lækkað (hjöðnun, e. deflation).

Fínefnin berast upp í andrúmsloftið (e. suspension) sem uppfok (e. dust emission) og mynda þar svifryk (e. dust eða atmospheric dust) sem síðan verður að áfoki þegar það sest á yfirborðið. Myndin er fengin úr Náttúrufræðingnum (ÓA o.fl. 2019a).

Þröskuldsvindhraði

Vindrof hefst yfirleitt við tiltekinn vindhraða, svokallaðan þröskuldsvindhraða (e. threshold velocity), sem er ákaflega breytilegur eftir yfirborðsgerð. Lægstur er hann á svokölluðum meginuppfoksstöðum (e. dust hotspots) þar sem kornastærðin er að meginhluta fíngert silt, iðulega orðið til við 4–8 m/s vind sem er mældur í 2 m hæð. Á söndunum er þröskuldsvindhraði oft 5–9 m/s en á sandmelum 8–18 m/s eftir aðstæðum. Flæðið stigmagnast eftir því sem vindhraði eykst á hverjum stað (veldisvöxtur).

Með því að kunna skil á kornastærð og yfirborðshrjúfleika sandsvæða er hægt að nýta líkön sem gerð hafa verið fyrir vindrof til að reikna út áætlað sandfok miðað við tilteknar veðurfarsaðstæður. Einnig er hægt að spá fyrir um hugsanlegt magn svifryks, sem nú er einmitt reiknað á alþjóðlegum veðurstofum fyrir flest sandsvæði veraldar, m.a. Ísland, og viðvaranir birtar ef þörf krefur.

17.4. Sandflæði og áfoksgeirar – landið fer í sand

17.4.1. Hvað getur sandflæði verið mikið?

Rannsóknir undanfarna áratugi hafa varpað ljósi á eðli sandfoks í landinu – og það var margt sem kom á óvart. Mælingar víða um landið hafa m.a. sýnt að flæði sands á sandsvæðum nemur iðulega mörg hundruð kílóum yfir eins metra breiða línu á ári hverju.

Á óstöðugustu sandsvæðunum, eins og á Landeyjasandi og Dyngjusandi, nemur flæðið mörgum tonnum yfir eins metra breiða línu á ári (t/m á ári), og sem stundum verður jafnvel í einum stormi. Þetta er vitaskuld mjög háð yfirborðsgerð og aðgengi að fíngerðum sandefnum. Elín Fjóla Þórarinsdóttir og ÓA (2012) gerðu rannsóknir á Heklusvæðinu sem sýndu að flæðið gat numið frá fáum kílóum til nokkurra tonna yfir einn metra á ári og var einna mest þar sem vatn flutti að sandefni sem síðan fauk undan þurrum norðlægum áttum. Svo mikið magn fokefna í sandbyljum verður að teljast nokkurt undrunarefni og sýnir að yfirborð sanda hérlendis eru

Mynd 17.6. „The Great Sand Dunes" í Kólóradó í Bandaríkjunum. Öldurnar ná yfir 200 m hæð. Þær hafa myndast á þúsundum ára við uppblástur á sléttum með sendnum jarðvegi vestan við öldusvæðið og sandurinn safnast upp í dalsmynni þar sem Klettafjöllin taka að rísa austan við slétturnar. Sandöldurnar eru nú friðaðar og innan sérstaks þjóðgarðs.

meðal virkustu slíkra svæða á jörðinni. Mælingarnar varpa m.a. ljósi á það hve mikil eyðilegging getur orðið af sandbyljum og hvernig sandauðnir geta breiðst út smám saman með tímanum ef uppspretta sands er nægileg, t.d. í nágrenni við jökla, eldfjöll og jökulár.

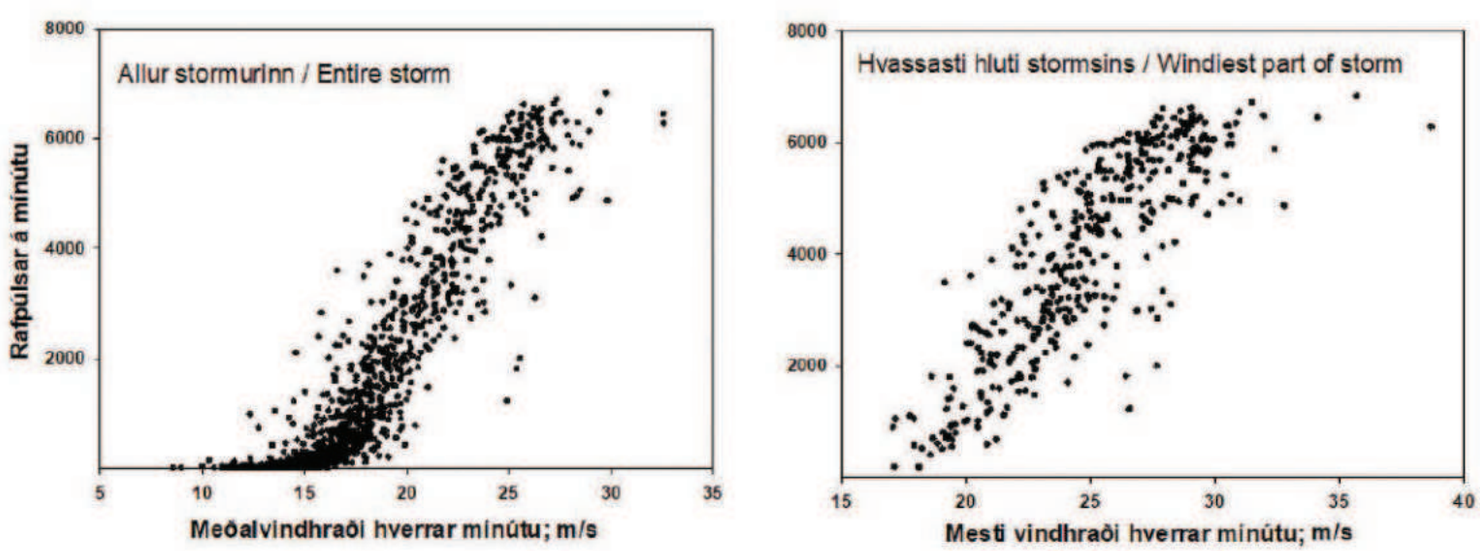
Gjóska sem fellur á ógróið yfirborð er óstöðug, rétt eins og fínkorna sandur á uppfoksstöðum. Einn öflugasti sandbylur sem mælst hefur á jörðinni átti sér stað á Skógaheiði í kjölfar eldgossins í Eyjafjallajökli (ÓA o.fl. 2013). Þar náði rokið 22,5 m/s meðalvindhraða og hviður voru allt að 38,7 m/s. Sandflæðið mældist um 6 000 kg/m/klst á meðan stormurinn var hvað ákafastur og sandflæðið virðist hafa mettast við u.þ.b. 30 m á sekúndu (þar sem grafið á mynd 17.7 beygir af). Afar sjaldgæft er að geta framkvæmt mælingar við náttúrulegar aðstæður sem sýna slíka mettun – en hún er í samræmi við líkanagerð fyrir vindrof. Heildarflutningur efnis var um 9 000 kg/m á 6 klukkutímum sem verður að teljast ógnarlega mikill setburður.

17.4.2. Áfoksgeirar – landið fer í sand

Öflugt sandfok sem berst inn yfir gróið land kæfir gróðurlendið sem fyrir er. Við það bætast jarðvegsefnin sem voru undir gróðurmottunni smám saman við mengi sandefnanna sem berst áfram undan ráðandi þurrum vindáttum. Yfirborðið lækkar sem nemur þykkt jarðvegsins, oft um 0,5–1,5 metra, þar til jökulurðin eða hraunið sem fyrir var á svæðinu blasir við. Sífellt bætist við meira af jarðvegsefnum eftir því sem braut sandefna og moldar lengist undan vindinum – það verða eins konar snjóboltaáhrif, ferlið vindur upp á sig.

Ferlið myndar svokallaða áfoksgeira, sem eru tungulaga sandsvæði eða auðn sem teygir sig inn í gróið land. Þar sem nóg er af sandefnum og grófum jarðvegsefnum geta þeir gengið ákaflega hratt fram, jafnvel svo nemur tugum eða hundruðum metra á ári þar sem áfoksgeirinn skerst inn í gróðurlendið. Eftir að ferlið hefur tekið sinn toll af vistkerfunum situr sandauðnin eftir.

Landgræðslan var stofnuð í upphafi sem Sandgræðslan árið 1907, einmitt til þess að sporna við ágangi sands, m.a. á Rangárvöllum og í Landsveit. Þar höfðu tugir sveitabæja grafist undir sand og farið í eyði í mögnuðum sandbyljum, ekki síst á ofanverðri 19. öld (mynd 17.8, rústir). Einnig er talað um áfoksgeira í 19. kafla þar sem fjallað er um jarðvegsrof á Íslandi.



Mynd 17.7. Sandbylurinn á Skógaheiði. Graf.

Mynd 17.8. Sandauðn í Landsveit, sunnarlega í megináfoksgeirunum frá Þjórsá. Landið er komið í sand en þó eru leifar moldar sem fyrir var ennþá eftir á svæðinu. Fremst sést bæjarstæðið á Tjörvastöðum. Skarðsfjall er fyrir miðri mynd og Búrfell t.h. Fjöldi bæja „fóru í sand". Unnin voru mikil afrek á þessum tíma við að stöðva framrás sandsins, m.a. með hleðslu sandvarnargarða, sáningu melgresis o.fl. Ferðamaður nútímans sem á leið um svæðið áttar sig ekki á þeim hamförum sem þarna áttu sér stað. Mikilvægt er að koma í veg fyrir áföll af þessu tagi með því að klæða sandsvæði sem þessi með birkiskógi. Ljósmynd G.E. Flensborg 1905. Birt með leyfi Skógræktarinnar.

Áfoksgeirarnir

Mikilvægi áfoksgeira við þróun vistkerfa á Íslandi síðasta árþúsundið verður seint ofmetið. Þetta ferli er ábyrgt fyrir stórum hluta þeirrar eyðingar vistkerfa á landinu sem leitt hefur til myndunar auðna.

Eyðing skóga og ofbeit stuðluðu að myndun og þróun áfoksgeiranna. Flestir áfoksgeirar landsins hafa nú verið stöðvaðir, sem verður að teljast meðal mikilvægustu verkefna landsmanna í náttúruvernd á umliðnum öldum. Það var áður gert með sáningu melgresis og fyrirhleðslum, oftast úr grjóti í upphafi en seinna með timbri og bárujárni og öðru því sem að gagni mátti koma. Ummerki þessara garða sjást ennþá víða þar sem nú er gróið land í Landsveit og á Rangárvöllum (mynd 17.9). Saga baráttunnar við sandinn hefur m.a. verið rakin í bókinni *Sáðmenn sandanna* (Friðgeir Olgeirsson 2007) og í mörgum greinum í árbókum sem Landgræðsla ríkisins gaf út um margra ára skeið í ritstjórn Andrésar Arnalds og nefnast *Græðum Ísland*.

Ummerki um áfoksgeira sjást vel á gervihnattamyndum, leifar þeirra eru iðulega tungulaga svæði með löngum beinum línum sem snúna undan þurru vindáttinni þar sem sandurinn hefur sorfið meðfram börðunum (mynd 17.9). Áfoksgeirar eiga sér yfirleitt uppruna í gjöfulum upptakasvæðum sands, svo sem í lægðum þar sem jökulár skila af sér seti í flóðum eða í lægðum þar sem jarðvegsefni hafa safnast fyrir vegna jarðvegsrofs í umhverfinu.

Íslenskan býr yfir ágætu hugtaki yfir afar mikilvægt ferli landhnignunar þegar land verður sandi að bráð – landið „fer í sand". Þetta hefur verið nefnt „sandification" á ensku og lýsir umhverfisbreytingum sem verða þegar gróf fokefni berast inn yfir svæði og breyta eða eyða þeim vistkerfum sem fyrir eru. Þetta getur líka gerst við tap á fínefnum á borð við leir vegna endurtekins vind- og vatnsrofs, þannig að sandur verður smám saman meginkornastærð tiltekins svæðis (sjá rammagrein: Að fara í sand).

Við það að landið fer í sand verða miklar breytingar á vistkerfum. Sandur hvorki bindur né miðlar vatni. Breytingum sem verða þegar land fer í sand má lýsa sem fullkomnu hruni vistkerfa (sjá einnig 20. kafla). Moldin missir hæfileika sinn til þess að miðla vatni og næringarefnum; aðstæður eru sannarlega aðrar en

Mynd 17.9. Gamlir sandvarnargarðar hlaðnir úr grjóti.

áður var. Slík svæði eru mjög viðkvæm fyrir raski enda þótt takist að koma á gróðurhulu ofan á sandinn og þau ættu tvímælalaust að njóta sérstakrar verndar fyrir landnýtingu.

Þar sem tekist hefur að stöðva sandinn, t.a.m. á Rangárvöllum, í Landsveit og víðar, er mikilvægt að endurheimta birkiskógana sem áður einkenndu flest þessara svæða. Birkiskógurinn þolir áföll á borð við gjóskufall sem er óhjákvæmilegt á þessum svæðum og hann hefur djúpstætt rótarkerfi sem breytir dreifingu og nýtingu vatns í vistkerfinu. Mikið kolefni safnast fyrir í mold birkiskóga og því breytast slík kerfi smám saman úr því að vera viðkvæm sendin kerfi í öflug vistkerfi með frjóa mold.

17.4.3. Sandleiðir

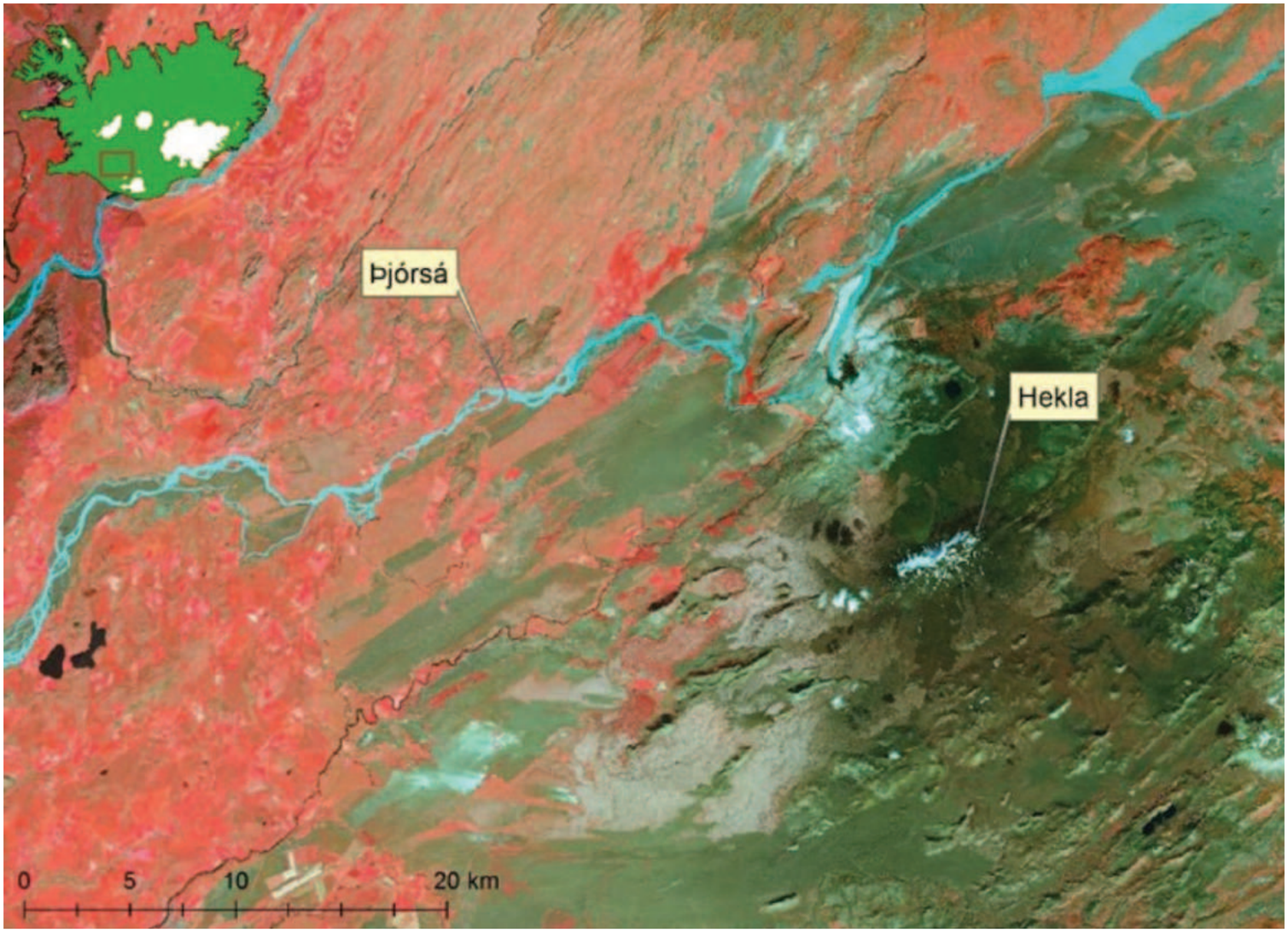
Þar sem sandur er afar óstöðugt efni á yfirborði landsins getur hann flætt langar leiðir undan þurrum vindáttum. Við það geta myndast eins konar farvegir sandflæðis, svokallaðar sandleiðir.

Að fara í sand

Orðalagið „að fara í sand“ er notað til að lýsa umhverfisbreytingum sem verða þegar fokefni (sandur og silt) eyða þeim vistkerfum sem fyrir voru. Yfirleitt beinist athygli manna fyrst að gróðurþáttum, svo sem þekju og tegundum gróðurs, þegar miklar vistkerfisbreytingar eiga sér stað. Moldarþættirnir eru þó ekki síður mikilvægir. Þegar sandur verður ráðandi hverfur nær öll næring og orka (kolefni) úr kerfinu og næringarhringrásir rofna.

Áhrifin á vatnshringrásina skipta líklega mestu máli, ekki síst þar sem úrkoma er alla jafna lítil. Sandur hefur ekki eiginleika til að binda vatn og miðla. Enda þótt úrkoma kunni að vera mikil að meðaltali eru kerfin ákaflega þurr – nokkurra daga þurrkur veldur fullkominni vatnsþurrð og plöntur visna.

Þegar þetta allt er lagt saman, skortur á gróðurþekju, tap á orku og næringarefnum og að ekki er lengur til staðar mold sem miðlar vatni, þá hrynur vistkerfið (sbr. skilgreiningar Blands o.fl. 2018 á vistkerfishruni). Því geta áhrif áfoksgeira verið örlagarík og hefur ferlið stundum verið nefnt „sandification“ á ensku.



Mynd 17.10. Útlínur áfoksgeira sjást vel á innrauðum gervihnattamyndum þar sem gróðurinn kemur fram með rauðum lit. Ummerki um nokkra mjög stóra áfoksgeira markast af hinum beinu línum bæði í Landsveit og á Rangárvöllum. Gervihnattamynd, NASA.

Þær geta orðið æði langar – sandurinn getur borist tugi km frá upprunastað. Þannig eru t.a.m. afar langar sandleiðir sem bera fokefni um Ódáðahraun til Mývatnssveitar.

Sums staðar er rennandi vatn, sem verður til við asahláku á frosinni jörð, hluti af ferlinu, en það skilar sandi niður dali og gilskorninga út á sléttlendi. Þetta kom m.a. vel í ljós í rannsóknum Elínar Fjólu Þórarinsdóttur og ÓA (2012) á Heklusvæðinu. Þar sem vatnið skilar af sér sandburðinum verður til ný uppspretta fokefna þaðan sem þau fjúka síðan áfram. Þannig hagar m.a. til við Dimmuborgir í Mývatnssveit (mynd 17.11) þar sem sandurinn er langt að kominn og vatnsrof er einnig virkur liður í ferlinu.

17.4.4. Kornastærðin breytist

Sem áður sagði hafa sandar ákaflega breytilega kornastærð. Á upprunastöðum sandfoks, t.d. á flæðum framan við jökla, er kornastærðin breið, eitthvað er af leirefnum (<0,002 mm), mikið af siltefnum (0,002–0,05 mm) og talsvert af sandi (0,05–2 mm). Við sandfok skokka stærri efnin (sandur og gróft silt) með jörðinni (e. saltation) en fínni efnin takast á loft og mynda ryk.

Eftir því sem lengra dregur frá upptökunum hefur stærri hlutdeild fínefna tapast úr kerfinu með uppfoki, en eftir situr æ stærri hlutdeild sands. Þegar komið er langt frá upptökum (margir km eða tugir km) er kornastærðin að mestu sandur. Þó berst eitthvað af

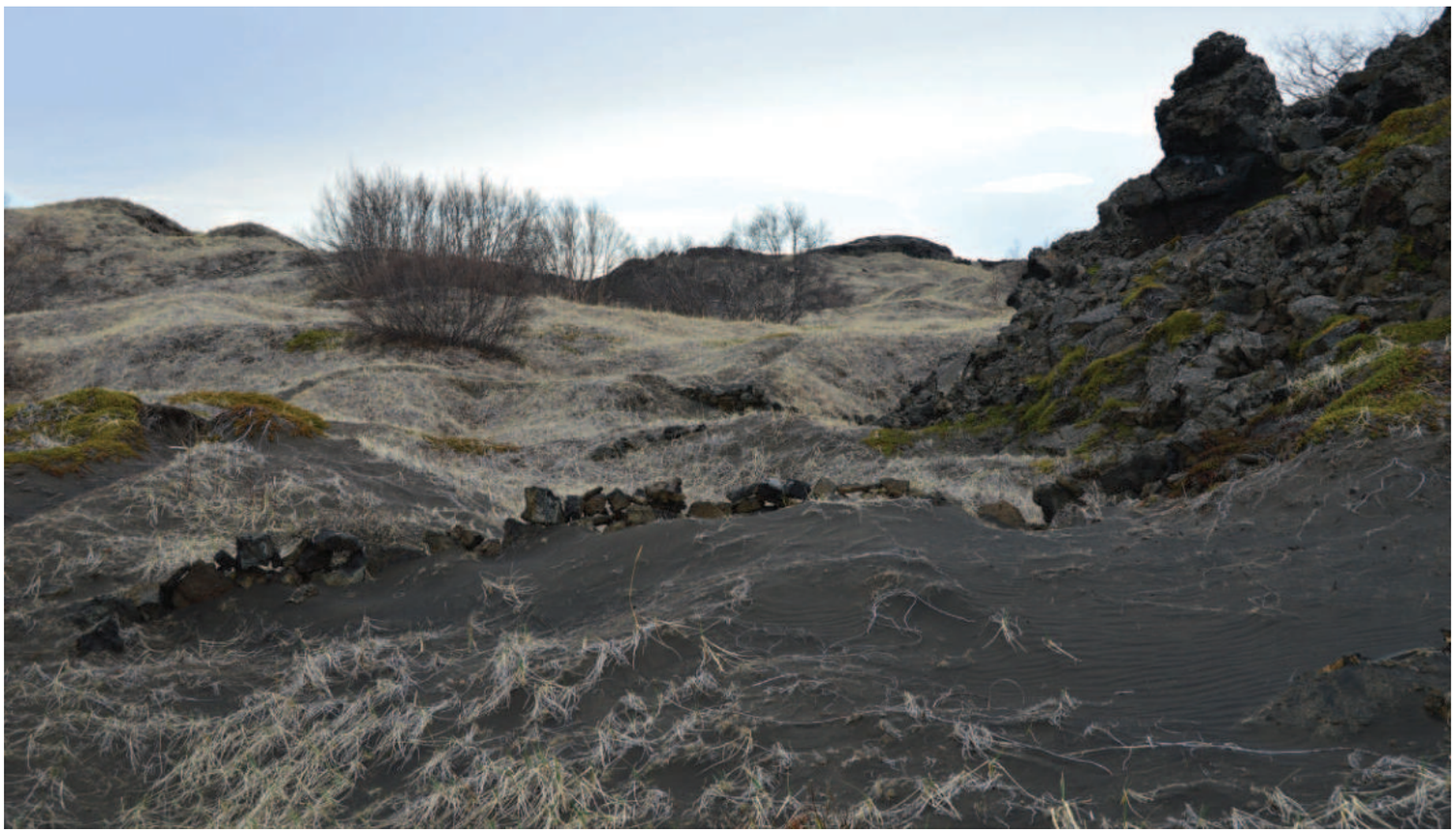
fínefnum sem áfok inn yfir sandsvæðin, þaðan sem þau geta fokið upp á ný.

Mikil svörfun á sér stað við sandfok, kornin rúnnast smám saman, sem einnig skilar einhverju af fínefnum í mengi fokefnanna. Rannsóknir hafa ennfremur sýnt að örefni sitja utan á silt- og sandkornum sem losna við núninginn sem verður við vindrof (Richards-Thomas o.fl. 2020). Því eru fínefni enn til staðar sem geta fokið upp sem ryk frá sandsvæðum sem eru fjarri upptökum sands, sérstaklega í mjög hvössum vindi, t.d. >25 m/s. En meginuppsprettur ryks eru þó yfirleitt á upprunastöðunum, eins og síðar er vikið að. Þessi breytta kornastærð, sem helgast af því að endurteknir fokatburðir gera sandinn sífellt grófari, gerir yfirborð sanda að ennþá erfiðara umhverfi fyrir gróður því kerfið er án þeirrar vatnsheldni sem aðeins fínefni geta veitt.

Eftir að land er komið í sand getur bæst við meira af sandefnum við eldgos og gjóskufall. Slíkir atburðir stuðla iðulega að viðhaldi sandauðna eftir að þær hafa myndast. Kornastærð gjóskunnar er afar mismunandi, en umhverfi með vikurkenndri gjósku (>2 mm) er alla jafna afar erfitt fyrir gróður, t.d. á Veiðivatnasvæðinu og í nágrenni Heklu. Fínni aska veldur aftur á móti meira vindrofi í kjölfar gosanna.

17.5. Uppfok og áfok

Þegar sandfok á sér stað lyftast minnstu efnin upp fyrir yfirborðið og geta síðan borist langa vegu í andrúmsloftinu, jafnvel þúsundir kílómetra þegar svo ber við. Uppfokið er nefnt ryk eða svifryk og hefur margþætt áhrif á umhverfið. Í fyrsta lagi má telja svifryksmengun sem getur haft afar neikvæð áhrif á lýðheilsu.



Mynd 17.11. Sandur í Dimmuborgum. Sandfok ógnaði þessum einstæðu náttúruminjum og gerir raunar enn, því ekki má mikið út af bregða í þurru tíðarfari til að sandurinn taki á rás á ný. Í forgrunni er gamall sandvarnargarður sem hlaðinn var úr hraunmolum til að hamla fokinu. Sandurinn er langt að kominn eftir sandleiðum. Mikilvægt er að efla gróður á mun stærra svæði en nú er unnið að í umhverfi Dimmuborga og m.a. ætti að breyta öllum Grænavatnsbruna sunnan Dimmuborga í birkiskóg, sem er tiltölulega auðvelt með friðun lands fyrir beit og sáningu birkifræs sem síðan stuðlar að frekari sjálfsáningu birkis.

Þar sem ryk fellur á snjó eða jökla flýtir það fyrir snjóbráð vegna þess að dökk kornin hitna mun örar en hvítt yfirborð snævar (mynd 17.12). Áhrif þessa geta verið afar neikvæð fyrir vatnshag heilu meginlandanna. Rykið hefur einnig áhrif á skýjafar og myndun skýja, inngeislun og útgeislun sólarljóss og er talið auka á hlýnun heimskautasvæðanna (sjá umfjöllun ÓA 2019b og Sanchez-Marroquin o.fl. 2020). Áfok getur á hinn bóginn haft jákvæð áhrif á frjósemi vistkerfa þegar rykið fellur aftur til jarðar.

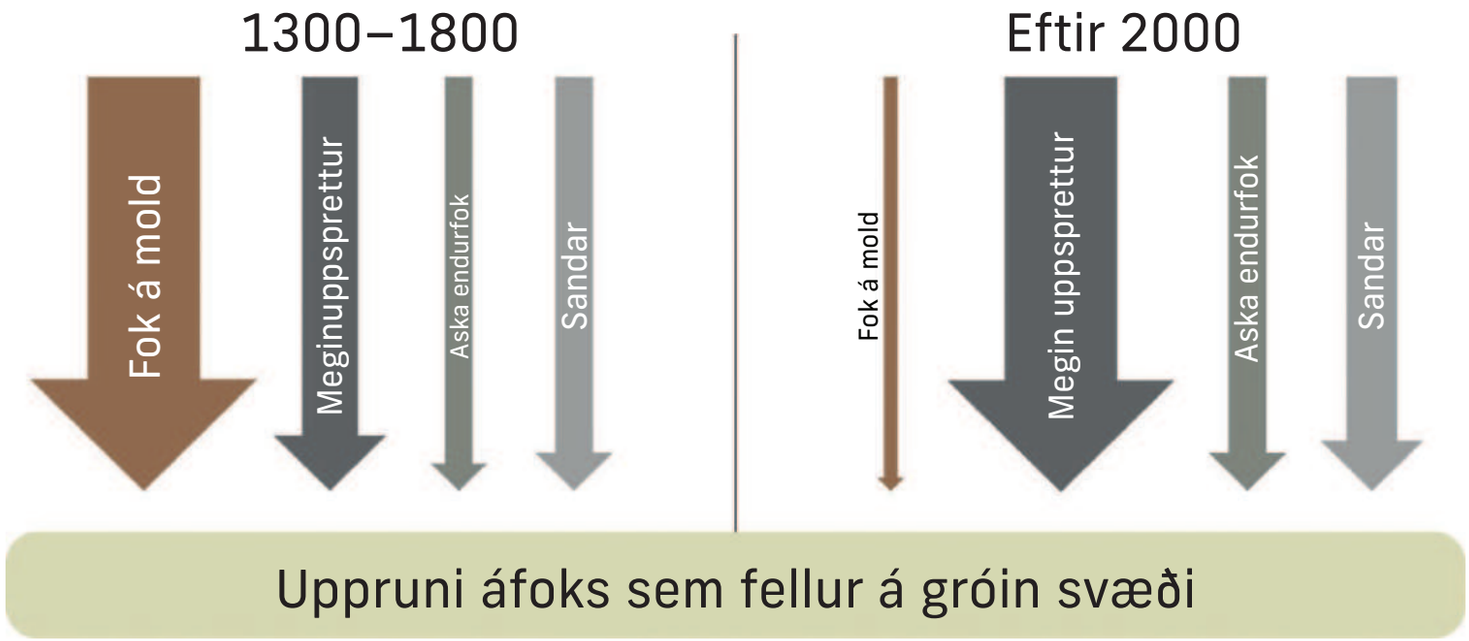
17.5.1. Hvaðan kemur áfokið – móðurefni moldar á Íslandi?

Náttúrufræðingar á borð við Sigurð Þórarinsson (1961), Guttorm Sigurbjarnarson (1969) og Grétar Guðbergsson (1975) gerðu sér glögga grein fyrir því hvernig íslensk mold verður að áfoksefni. Áfokið leiðir til þess að jarðvegurinn þykknar að jafnaði um 0,01–0,2 mm eftir aðstæðum. Rannsóknir á áfokskornum í mold staðfesta að stór hluti þeirra á rætur að rekja til uppfoks á jarðvegi. Í moldinni sem fýkur upp er gjarnan auðþekkjanleg ljós gjóska úr Heklu sem staðfestir uppruna áfoksins. Á síðustu árum hefur orðið ljóst að uppruni áfoks hefur breyst mikið á undanförnum áratugum þar sem sérstakar ryk-uppsprettur leggja nú til sífellt drýgri hluta þess. Þessar breytingar eru sýndar með tilgátulíkani á mynd 17.13.

Mynd 17.12. Ryk sem fallið hefur á snjó. Dökk basaltkornin endurkasta nær engu sólarljósi (e. albedo – Meinander o.fl. 2016) og hitna í sólskini, sem flýtir bráðnun jökla og snævar. Þessi bráðnun hefur veruleg áhrif á afkomu jökla á Íslandi sem annars staðar í heiminum (Andri Gunnarsson o.fl. 2020), en íslenska rykið hefur þó mun meiri áhrif á bráðnun en ljósleitari korn frá sanduppsprettum meginlandanna.

Myndin ber með sér að meginhluti uppfoksins er ættað frá svokölluðum meginuppsprettum (e. dust hotspots). Þessi upptakasvæði, sem „framleiða“ mest af rykinu, eru a.m.k. 10 talsins og flest sýnd á kortinu á mynd 17.4. Þó verður einnig uppfok frá öðrum smærri meginuppsprettum, t.d. við farveg Skaftár, Tungnár og víðar, og ennfremur frá öðrum sandauðnum í verstu veðrum sem bætist ofan á rykið frá meginstöðunum. Auk þess bætist við fok í kjölfar eldgosa sem leggja til fíngerða ösku á illa gróið land, eins og gerðist í kjölfar eldgossins í Eyjafjallajökli árið 2010. Enn fýkur þó mold frá svæðum þar sem vistkerfi eru að eyðast – eins og fjallað er um í kaflanum um jarðvegsrof á Íslandi – en ryk frá þessum svæðum er orðið minni hluti af heildarframleiðslu ryks á Íslandi. Ástæðurnar fyrir þessum breytingum liggja meðal annars í því að jöklar fóru vaxandi á síðustu 3 000 árum eða svo, þar með mestallan þann tíma sem liðinn er frá landnámi. En á síðustu öld hafa þeir aftur á móti hörfað og þar með opnast æ fleiri virk uppfokssvæði, t.d. hið virka Hagavatnssvæði og Dyngjusandur að hluta.

Flæður (sjá hér aftar) hafa aukist að flatarmáli eftir því sem jöklarnir hafa hörfað, en þær eru einkar mikilvirkar uppsprettur ryks. Að auki er svo önnur ansi athyglisverð orsök fyrir þeim breytingum sem orðið hafa: á stórum svæðum er sú mold sem fokið gat að mestu horfin, t.d. á mörgum afréttarsvæðum á Suður- og Norðausturlandi. Eftir situr mold í vistkerfum sem hafa meiri viðnámsþrótt gegn raski, t.d. í lægðum, votlendi og á

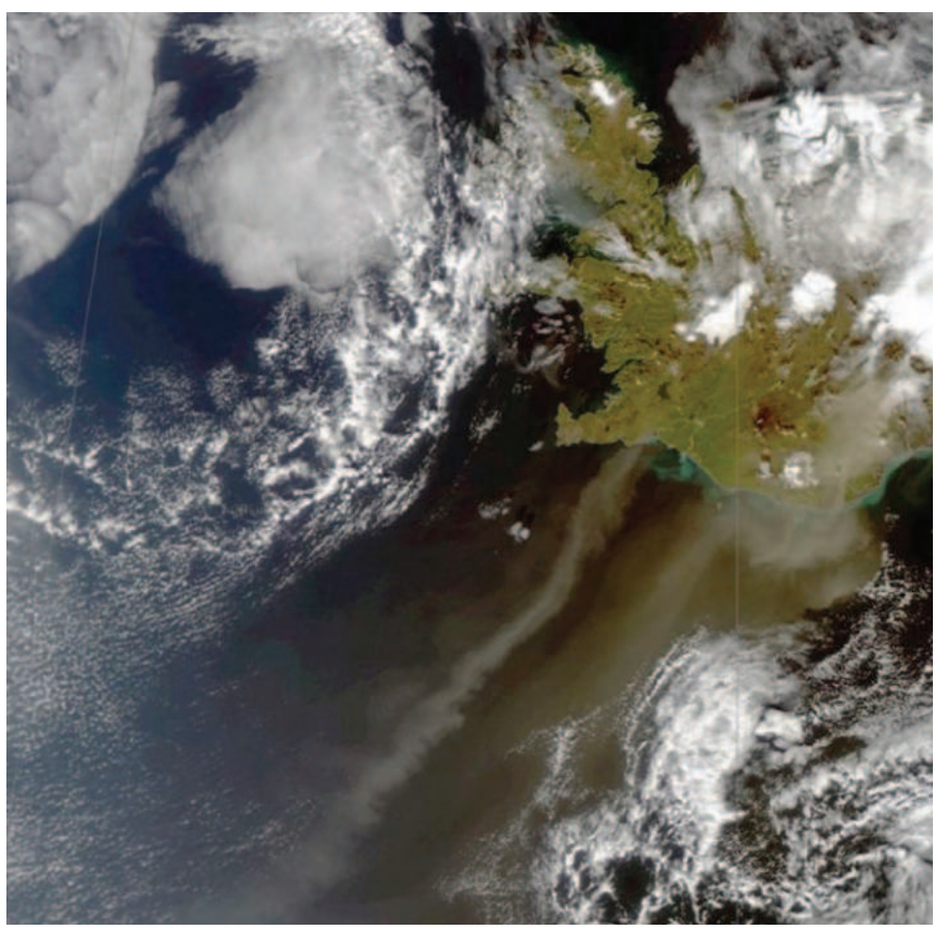


Mynd 17.13. Breytingar á áfoki í tímans rás. Eftir landnámið var uppfok á mold vegna hnignunar vistkerfa aðaluppspretta áfoks. Á síðustu árum eru „heitir reitir uppfoks" (e. dust hot-spots) – meginuppsprettur – upprunastaðir áfoksins á landsvísu að stórum hluta. Sandsvæðin, bæði heitu reitirnir og sandauðnir, hafa stækkað á síðustu 150 árum vegna uppblásturs og hörfunar jökla. Einnig má segja að meginhluti viðkvæmustu vistkerfanna hafi þegar orðið eyðingu að bráð og því er sú uppspretta áfoks ekki eins virk nú á dögum og áður var.

láglendissvæðum. Niðurstaðan verður því sú að þeir meginuppfoksstaðir sem áður var lýst eru helsta uppspretta ryks á landinu í dag.

En hvar eru þessir meginupprunastaðir uppfoks á Íslandi og hvert er eðli þeirra? Tilvist þeirra var ákvörðuð með kortlagningu á rofi á árunum eftir 1990 (formlega birt í grein ÓA 2010), en gervihnattamyndir (mynd 17.14) hafa staðfest rækilega hversu mikilvirkar þessar afmörkuðu uppsprettur eru. Hér er stutt samantekt um þessa staði sem hafa svo afgerandi áhrif á íslenska náttúru.

Flæður framan við jökla eru ákaflega virkir upprunastaðir ryks (myndir 17.15 og 17.16) eins og áður segir. Jökullænur flæmast vítt um flæðurnar og stór hluti vatnsins hripar niður í sandinn. Þessar lænur bera með sér kynstrin öll af framburði sem að stórum hluta er fíngert silt. Mjög lítinn vind þarf til að hreyfa við þessum efnum og frá þessum svæðum geta borist meira en 100 000 tonn af efni í mestu rykbyljunum (e. dust storms,



Mynd 17.14. Strókur frá Hagavatnssvæðinu, sem er ein meginuppspretta ryks á Íslandi, stendur mörg hundruð kílómetra á haf út. Einnig er fok frá tímabundnum uppsprettum á Suðurlandi, einkum aska úr Grímsvatnagosinu 2011 og Eyjafjallajökli 2010. Gervihnattamyndir sem þessar sýna glögglega að slíkar meginuppsprettur (e. dust hotspots) skila langmestu af rykinu sem fýkur upp á Íslandi nú á dögum. Myndin er tekin úr gervihnetti (Aqua) 9. september 2011. Höfundaréttur NASA, Bandaríkin.

Mynd 17.15. Flæður við Hagavatn. Þar flæmast um jökullænur og skilja eftir sig óhemjumagn framburðar sem einkennist af silti. Á svæðinu eru einnig þykkir mjög fínkorna setbunkar sem settust til í jökullóni sem þarna var áður en hefur nú þornað upp vegna þess að vatnsfarvegir breyttust þegar jökullinn hörfaði á síðasta árhundraði (sjá mynd 17.18). Siltefni á flæðunum og í setbunkunum fýkur mjög auðveldlega. Svæði sem þessi eru meðal helstu uppfoksstaða landsins. Þau myndast í auknum mæli þegar jöklar hörfa þar sem hallalítið land er aftan við fremstu jökulgarða eða aðrar landslagseiningar sem tefja frárennsli jökulvatns frá jöklinum.

Mynd 17.16. Flæður við Holuhraun á Dyngjusandi, horft til Kistufells en Dyngjujökull er til vinstri. Nýja hraunið breytti flæði vatnsins frá jöklinum. Hér má sjá vatnsflaum renna niður flæðurnar á hlýjum sumardegi sem síðan þornar upp í lok dags. Uppfok frá þessum flæðum hefur verið mælt og þær flokkast nú með afkastamestu rykuppsprettum veraldar.

dust events). Flæður af þessu tagi eru á Dyngjusandi, Mælifellssandi og Mýrdalssandi, í Vonarskarði, Flosaskarði við Eiríksjökul, framan við Vestari-Hagafellsjökul (sunnan við Langjökul) og víðar. Jökullænurnar sjá til þess að ný efni hlaðast upp á svæðunum jafnharðan þótt mikið fjúki frá þeim. Ef sandur fýkur burt frá flæðunum verður hann fljótt grófari, fínu efnin tapast sem ryk. Dyngjusandur telst meðal virkustu rykuppspretta veraldar og þaðan berst ryk út yfir stórt svæði sem nær allt frá Mið-Norðurlandi til Suðausturlands.

Strandsvæði. Nokkur af mikilvirkustu uppfokssvæðunum eru á strandlengju landsins, ekki síst á Suðurlandi. Jökulárnar bera fram gríðarlegan flaum af fíngerðum efnum sem verða síðan hluti af strandlengjunni sem nær langt út fyrir ósasvæði jökulvatnanna. Svæðið beggja vegna Markarfljóts (Landeyjasandur, Fornusandar o.fl.) er einstaklega mikilvirkt upptakasvæði ryks, sem m.a. berst inn yfir Suðurland og jafnvel inn yfir Reykjavíkursvæðið og veldur þar rykmengun í þurrum suðaustlægum áttum. Eldgosið í Eyjafjallajökli og jökulhlaupið í Markarfljóti sem því fylgdi jók mjög á fok frá ströndinni sem og mikill vatnsflaumur í ám suður frá jöklinum meðan á gosinu stóð.

Mynd 17.17. Fok frá bökkum jökulár.

Jökulár. Jökulárnar geta flæmst víða um flatlendi, ekki síst í stórflóðum og jökulhlaupum, og skila þá af sér gríðarlega miklu magni af fíngerðu seti sem getur verið að fjúka lengi í kjölfar flóðanna. Þannig hagar til með Jökulsá á Fjöllum þar sem jökulhlaup hafa skilað sandefnum á flatlendi sem síðar mynduðu áfoksgeira, m.a. niður Hólsfjöll. Skaftárhlaup hafa vaxið á undanförnum árum, sem hefur aukið á uppfok frá svæðinu og ekki síður frá strandsvæðinu beggja vegna ósa Kúðafljóts.

Mynd 17.18. Á myndinni sést hvar fýkur úr gömlum setbunkum (ljósleit svæði) sem urðu til þegar stórt jökullón var framan við Hagafellsjökla. Seinna þornaði lónið upp og eftir sátu þykkir setbunkar. Efnið er að mestu fíngert silt en þó með grófari efnum saman við. Þurrt fínkorna silt er oft ljósleitt þó að það sé gert úr basalti. Talsvert hefur gengið á setið með vind- og vatnsrofi undanfarinna áratuga. Þessir setbunkar ásamt flæðunum (nær á myndinni) eru meðal mikilvirkustu uppspretta ryks á landinu. Myndin sýnir einnig hvernig grunn lón framan við jökla geta fyllst smám saman og orðið að meginuppsprettum ryks í framtíðinni. Læmið (jökullæna sem myndar flæður) er í forgrunni.

Milljónir tonna af ryki

Reynt hefur verið að áætla hve mikið ryk fýkur upp af landinu ár hvert og niðurstaðan er á bilinu 5–40 milljónir tonna eftir því hvaða aðferð er beitt.

Miklar framfarir eiga sér nú stað á sviði „rykvísinda“ og þess er að vænta að unnt verði að reikna magnið mun nákvæmar út en áður var, sem og hve miklu ryki hver rykatburður fyrir sig skilar.

Drjúgur hluti ryksins lendir út á sjó, ekki síst frá söndum Suðurlands, og rykið er líklegt til að hafa áhrif á frjósemi hafsvæðanna allt í kringum landið (sjá ÓA o.fl. 2014). Ryk frá Íslandi er talið berast til Svalbarða, Grænlandsjökuls og Evrópu, eins og rakið er í yfirlitsgrein ÓA o.fl. (2019b).

Gamlir setbunkar – uppþornuð lón. Þar sem myndast lón framan við jökla safnast fyrir ókjörin öll af silti og sandi í lónbotninn. Breytingar á jöklum geta valdið því að þessi lón tæmast. Eftir sitja þykkir bunkar af fínkorna seti sem fýkur mjög auðveldlega (sjá mynd 17.18). Dæmi um þetta er fokið úr lónbotnum framan við Hagafellsjökla á Hagavatnssvæðinu sem skilar afar drjúgu magni áfoks út yfir Suður- og Vesturland. Smám saman gengur á þessa setbunka og þá mun fokið úr þeim minnka. Það getur tekið áratugi, en fer allt eftir því hvað þeir eru þykkir.

Uppþornuð vötn og lægðir sem set safnast fyrir í eru víða. Einnig finnast vötn og tjarnir sem þorna í þurrkatíð, t.d. víða á Tungnársvæðinu. Sé mikið af fínu seti í lægðunum getur myndast áfoksgeiri út frá þeim. Sandkluftavatn norðan Ármannsfells við Þingvelli er dæmi um afar virka uppsprettu ryks í þurrkatíð, t.d. árið 2019. Þar mældist styrkur ryks allt að 100 sinnum yfir heilsuverndarmörkum í einum „rykatburði“ (Pavla Dagsson-Waldhauserová, óbirt gögn).

Strendur uppistöðulóna. Þar sem um er að ræða uppistöðulón jökulvatns með breytilega vatnshæð getur orðið mikið fok úr strandlengjum þeirra áður en þau fyllast. Hálslón og Blöndulón eru dæmi um slík virkjanalón. Hætta er á myndun áfoksgeira út frá slíkum lónum, sem hefur raunar gerst bæði við Blöndu og Hálslón – umhverfisáhrif slíkra lóna eru afar mikil.

17.5.2. Dreifing áfoks yfir landið – og á haf út

Gerð hefur verið tilraun til þess að áætla magn ryks sem fýkur upp á landinu þar sem notaðar voru tiltækar upplýsingar um jarðvegssnið, staðsetningu auðna og meginuppsprettur foks, vitneskja um þurrar vindáttir o.fl. Niðurstöðurnar voru birtar á meðfylgjandi korti (mynd 17.20) þar sem áfokið var áætlað í grömmum á fermetra á ári. Þar sem áfokið er mest er það af stærðargráðu sem er sambærileg við það sem mest getur orðið og þekkist á eyðimerkursvæðum jarðar. Mesta áfokið fylgir gosbeltunum, söndunum og nálægðinni við meginuppfoks-

Mynd 17.19. Fok frá ströndum Blöndulóns.

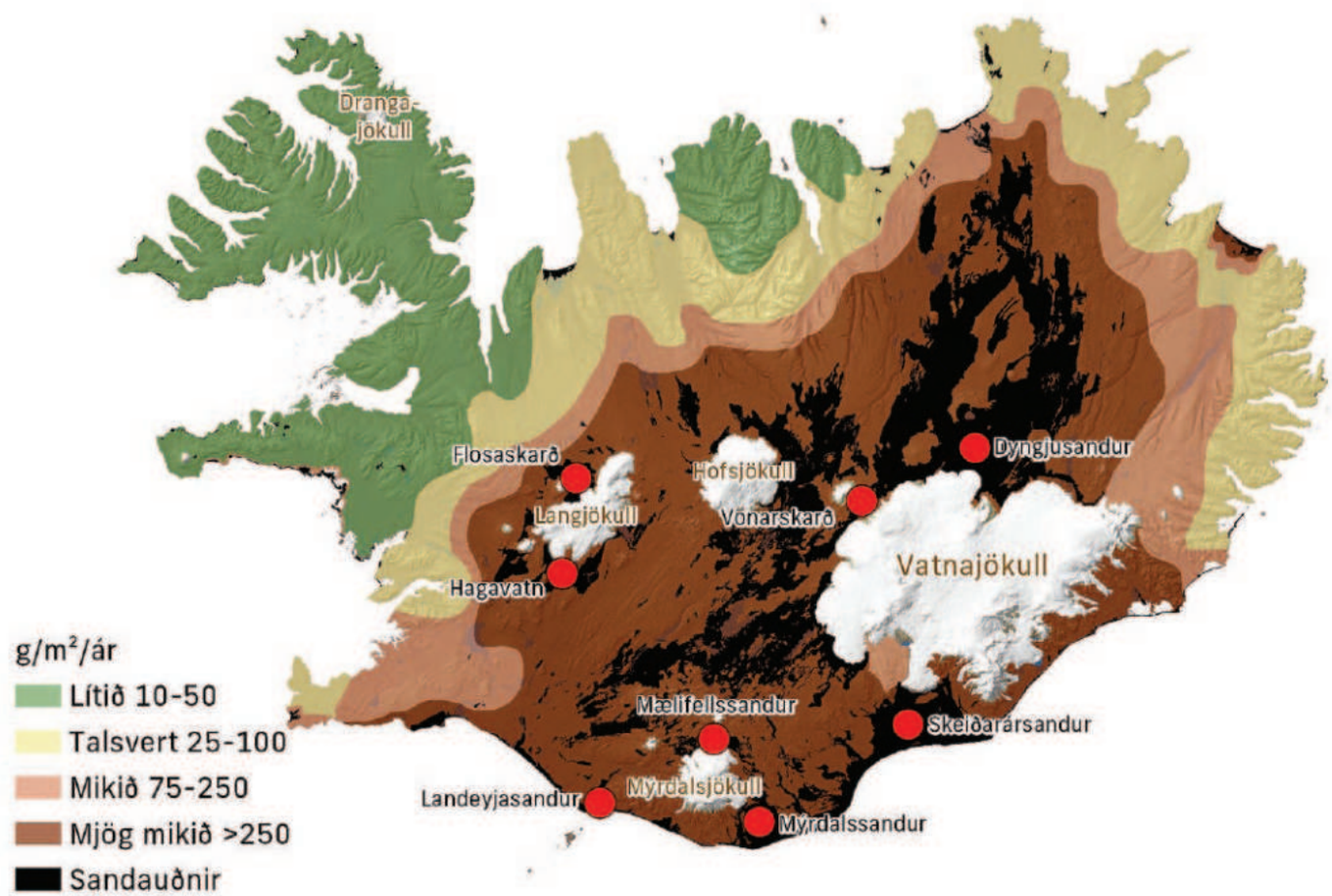
svæði, og þá sérstaklega svæðum sem snúa undan þurrum vindáttum frá meginstöðunum.

Minnst er áfokið fjærst þessum uppsprettum, einkanlega á hluta Vesturlands, Snæfellsnesi, Vestfjörðum og á ytri hluta Mið-Norðurlands. Fjallað er víða í þessu riti um þau áhrif sem mikið áfok sem fellur að jafnaði hefur á eiginleika jarðvegs, svo sem hvað varðar lífrænt innihald og leirmagn moldarinnar. Það verður því ekki endurtekið hér. Jákvæð áhrif áfoks staðfestast m.a. í meiri þéttleika fugla þar sem áfokið er mest samanborið við svæði þar sem áfokið er hvað minnst (Tómas Grétar Gunnarsson o.fl. 2015).

Tíðni fokatburða er ennfremur einhver sú mesta sem þekkist í heiminum samkvæmt rannsóknum Pövlu Dagsson-Waldhauserová og samstarfsfélaga (2014), eða fleiri en 135 dagar á ári, og þá eru dagar þegar fýkur af suðurströndinni beint á haf út ekki taldir með. Raunveruleg tíðni rykatburða á Íslandi er líklega >200 ár hvert, sem telst mjög mikið.

17.6. Lokaorð

Hér hefur verið stiklað á stóru um einn meginþátt íslenskrar náttúru: sandsvæðin, sandfok, ryk og áfok. Í umfjöllun um íslenskan jarðveg er víða vísað til þessa kafla, enda er áfokið undirstaða jarðvegsmyndunar á Íslandi. En sandarnir eru einnig heillandi viðfangsefni út af fyrir sig og þeir hylja æði stóran hluta landsins, eða um fimmtung þess. Það er mikilvægt að sum þessara svæða njóti verndar sem merkileg náttúrufyrirbrigði, sem þau gera að nokkru leyti innan núverandi þjóðgarða. Hins vegar er ljóst að koma



Mynd 17.20. Áfok á Íslandi í grömmum á hvern fermetra á ári. Minniháttar gjóskufall og endurfok á nýfallinni ösku eru einnig í þessum tölum, en ekki þykk gjóskulög. Punktarnir sýna stærstu meginuppfoksstaðina, sem skila stórum hluta áfoksins út yfir landið nú á tímum. Sjá ÓA 2010.

þarf í veg fyrir vistkerfishrun sem fylgir því ef land fer í sand þar sem gróður var fyrir. Mikilvægt er að efla gróðurfar í nágrenni sandsvæða, sérstaklega neðan hálendisbrúnarinnar.

Birki er langsamlega öflugasta náttúrulega gróðurfarið til að hindra útbreiðslu sanda og binda gjóskufall, en einnig víðikjarr og vitaskuld endurheimt votlenda á sandsvæðum. Birki breiðist ennfremur hratt út yfir svæði sem er raskað, t.d. vegna flóða, séu öflugir fræberandi skógar í nágrenninu, eins og nú sést glögglega á Skeiðarársandi (sjá Bryndísi Marteinsdóttur o.fl. 2017, Þóru Ellen Þórhallsdóttur 2015 og Þóru Ellen Þórhallsdóttur og Kristínu Svavarsdóttur 2022).

Þar sem vel hefur tekist til við uppgræðslu á sandsvæðum er víða komin samfelld gróðurþekja, oft grösug, svo sem í Landsveit og á Rangárvöllum (sjá 22. kafla). Margir gera sér enga grein fyrir því að stór samfelld svæði í nágrenni Hellu og Gunnarsholts á Rangárvöllum sem og í Landsveit (mynd 17.21) voru áður brunasandar eftir skefjalausa sandstorma á 18. og 19. öld.

Mikið er sóst eftir að fá slíkt land til beitarnytja. Það er mikilvægt að hafa í huga að rofni yfirborðið þannig að opnist fyrir sandinn á ný getur áfoksgeiri tekið á rás með litlum fyrirvara. Helst þarf að hylja öll svæði af þessu tagi með birkiskógi áður en litið er til annarra nytja. Mjög sendin þurr kerfi ætti ekki að nýta til beitar nema í mjög takmörkuðum mæli.

Mynd 17.21. Gamall áfoksgeiri í Landsveit (dökkleita svæðið). Skarðsfjall til vinstri. Til hægri sér móta fyrir hlöðnum sandvarnargörðum. Áfoksgeirinn er ekki gróinn saman og lítið þarf út af að bera til að fok hefjist á ný, t.d. með gjóskufalli úr Heklu. Svæði sem þessi þarf að hylja með kjarrlendi til að sandurinn verði stöðugur og ör jarðvegsmyndun eigi sér stað – sem býr til vistkerfi með þanþol gagnvart áföllum framtíðarinnar.
(Myndin er tekin 2020).

Heimildir

Þessi kafli byggist að stórum hluta á yfirlitsgreinum sem birtust í tímaritinu Aeolian Research (ÓA o.fl. 2016), í tvennu lagi í Náttúrufræðingnum (ÓA o.fl. 2019a,b) og á grein um heildaruppfok frá Íslandi (ÓA o.fl. 2014).

Þeim sem vilja fræðast meira um sandauðnir á Íslandi er bent á þessar greinar og þær heimildir sem þar eru tilgreindar, en þær verða ekki allar tilteknar hér. Rykrannsóknafélag Íslands (RykÍs – Icelandic Aerosol and Dust Association, IceDust) heldur utan um rannsóknir á sandi og ryki á Íslandi á heimasíðu sinni og hluti kaflans byggist á nýlegum greinum sem þar er getið.

Andri Gunnarsson, Sigurður M. Garðarsson, Finnur Pálsson, Tómas Jóhannesson og Óli G.B. Sveinsson 2020. Annual and interannual variability and trends of albedo for Icelandic glaciers. The Cryosphere 15:547–570.

Bland, L.M., J.A. Rowland, T.J. Regan, D.A. Keith, N.J. Murray, E.R. Lester, M. Linn, J.P. Rodríguez og E. Nicholson 2018. Developing a standardized definition of ecosystem collapse for risk assessment. Frontiers in Ecology and the Environment 16:29–36.

Bryndís Marteinsdóttir, Kristín Svavarsdóttir og Þóra Ellen Þórhallsdóttir 2017. Multiple mechanisms of early plant community assembly with stochasticity driving the process. Ecology 99:91–102.

Elín Fjóla Þórarinsdóttir og Ólafur Arnalds 2012. Wind erosion of volcanic materials in the Hekla area, South Iceland. Aeolian Research 4:39–50.

Fanney Ó. Gísladóttir, Sigmundur Helgi Brink og Ólafur Arnalds 2014. Nytjaland. Rit LbhÍ nr. 49. Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.

Friðgeir G. Olgeirsson 2007. Sáðmenn sandanna. Landgræðslan, Gunnarsholti.

Grétar Guðbergsson 1975. Myndun móajarðvegs í Skagafirði. Íslenskar landbúnaðarrannsóknir 7:20–45.

Guttormur Sigbjarnarson 1969. Áfok og uppblástur. Náttúrufræðingurinn 39:68–119.

Jón Gunnar Ottósson, Anna Sveinsdóttir og María Harðardóttir 2016. Vistgerðir á Íslandi. Fjölrit Náttúrufræðistofnunar nr. 54. Garðabær.

Meinander, O., Pavla Dagsson-Waldhauserová og Ólafur Arnalds 2016. Icelandic volcanic dust can have a significant influence on the cryosphere in Greenland and elsewhere. Polar Research 35:31313, http://dx.doi.org/10.3402/polar.v35.3131.

Ólafur Arnalds 2010. Dust sources and deposition of aeolian materials in Iceland. Icelandic Agricultural Sciences 23:3–21.

Ólafur Arnalds, Elín Fjóla Þórarinsdóttir og Fanney Ósk Gísladóttir 2019a. Sandauðnir, sandfok og ryk á Íslandi I. Sandar og fok. Náttúrufræðingurinn 89:35–47.

Ólafur Arnalds, Haraldur Ólafsson og Pavla Dagsson-Waldhauserová 2014. Quantification of iron-rich volcanogenic dust emissions and deposition over ocean from Icelandic dust sources. Biogeosciences 11:6623–6632.

Ólafur Arnalds, Pavla Dagsson-Waldhauserová og Haraldur Ólafsson 2016. The Icelandic volcanic aeolian environment: Processes and impacts – A review. Aeolian Research 20:176–195.

Ólafur Arnalds, Pavla Dagsson-Waldhauserová og Sigmundur Helgi Brink 2019b. Sandauðnir, sandfok og ryk á Íslandi II. Áfok og ryk. Náttúrufræðingurinn 89:132–145.

Ólafur Arnalds, Elín Fjóla Þórarinsdóttir, Jóhann Þórsson, Pavla Dagsson Waldhauserová og Anna María Ágústsdóttir 2013. An extreme wind erosion event of the fresh Eyjafjallajökull 2010 volcanic ash. Nature Scientific Reports 3:1257. DOI: 10.1038/srep01257.

Ólafur Arnalds, Elín Fjóla Þórarinsdóttir, Sigmar Metúsalemsson, Ásgeir Jónsson, Einar Grétarsson og Arnór Árnason 1997. Jarðvegsrof á Íslandi. Landgræðsla ríkisins og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, Reykjavík.

Pavla Dagsson-Waldhauserová, Ólafur Arnalds og Haraldur Ólafsson 2014. Long-term variability of dust events in Iceland. Atmospheric Chemistry and Physics 14:13411–13422.

Richards-Thomas, T., C. McKenna-Neuman og I.P. Power 2020. Particle-scale characterization of volcaniclastic dust sources within Iceland. Sedimentology 68:1137–1158.

Sanchez-Marroquin, A., Ólafur Arnalds, K.J. Bautistan-Dorsi, J. Browse, Pavla Dagsson-Waldhauserová, A.D. Harrison, E.C. Meters, K.J. Pringle, J. Vergara-Temprado, I.T. Burke, J.B. McQuaid, K.S. Carslaw, B.J. Murray 2020. Iceland is an episodic source of atmospheric ice-nucleating particles relevant for mixed-phase clouds. Science Advances 6:eaba8137.

Sigurður Þórarinsson 1961. Uppblástur á Íslandi í ljósi öskulagarannsókna. Ársrit Skógræktarfélags Íslands 1960–1961:17–54.

Tómas Grétar Gunnarsson, Ólafur Arnalds, G. Appleton, V. Méndez og J.A. Gill 2015. Ecosystem recharge by volcanic dust drives broad-scale variation in bird abundance. Ecology and Evolution 5:2386–2396.

Þóra Ellen Þórhallsdóttir 2015. Saga gróðurs og umhverfis á Brunasandi. Dynskógar: Héraðsrit Vestur-Skaftfellinga. Bls. 1–70.

Þóra Ellen Þórhallsdóttir og Kristín Svavarsdóttir 2022. The environmental history of Skeiðarársandur Outwash Plain, Iceland. Journal of North Atlantic 43(12): 1-21.

18 Jarðvegsrof og íslenskar rofmyndir

Mynd 18.1. Jarðvegsrof er alþjóðlegt umhverfisvandamál sem veldur alvarlegum skaða á vistkerfum. Rof hefur víða um heim fjarlægt moldarhuluna af yfirborði lands.

Jarðvegsrof – losun, flutningur og setmyndun

Jarðvegsrof er meginferli á yfirborði jarðar sem fjarlægir moldina frá sínum upprunastað.
Við það getur orðið stórfelld hnignun á vistkerfum eða jafnvel vistkerfishrun – jarðvegsrof er það ferli sem veldur hvað mestu tjóni á vistkerfum jarðar.

Hugtakið „rof“ (e. erosion) merkir að rjúfa úr einhverju, t.d. kroppa úr steini, og þannig er það oft notað í jarðfræði.
Í jarðvegsfræði og vistfræði er hugtakið aftur á móti víðtækara; verið er að fjalla um losun jarðvegsefna (e. detachment), flutning þeirra (e. transportation) og setmyndun þegar þau stöðvast aftur (e. sedimentation).

Aflið sem flytur jarðvegskornin er ýmist vatn eða vindur, en stundum er þyngdaraflið megindrifkrafturinn þegar skriður falla. Kraftur frosins vatns (holklaki og ísnálar) getur einnig verið mikilvægt rofafl.

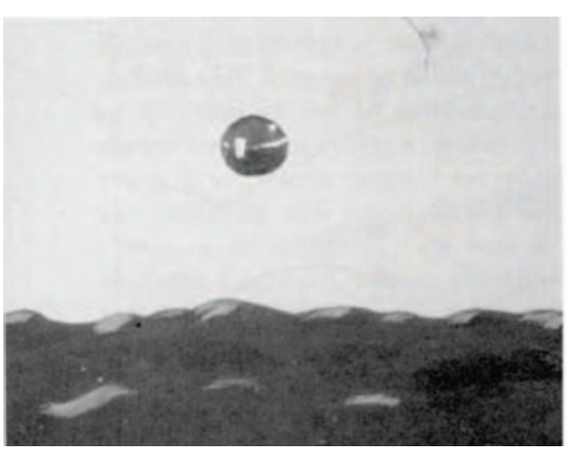
18.1. Hvað er jarðvegsrof?

Ástæður jarðvegsrofs má einkum rekja til misnotkunar á landinu: þar sem ástand þess er gott verður sjaldan mikið jarðvegsrof. Þó ber að hafa í huga að á svæðum þar sem gróður þrífst ekki af náttúrlegum orsökum, t.d. í mikilli hæð yfir sjó, í snarbröttum hlíðum og sendnum þurrkaeyðimörkum, getur rof af náttúrunnar völdum verið mikið. Því er nauðsynlegt að skilja á milli þess sem kalla mætti „náttúrlegt rof“, sem alltaf er til staðar í einhverjum mæli, og þess sem nefnt hefur verið „hraðað rof“ (e. accelerated erosion), sem er þá aukið rof af mannavöldum. Í flestum tilfellum er munurinn svo mikill að náttúrlegt rof skiptir engu máli miðað við hraðað rof. Oftast er því hraðað rof og náttúrlegt rof lagt saman og hvorutveggja kallað jarðvegsrof.

Á Íslandi getur verið álitaefni hvað kalla eigi jarðveg í samhenginu „jarðvegsrof“: á það t.d. við um sanda sem myndast í jökulhlaupum? Jú – samkvæmt jarðvegsfræðinni hefur slíkt yfirborð líka jarðveg (sjá kafla um jarðvegsflokka), en gróðurleysið og jarðvegsrofið er þó ekki af mannavöldum, a.m.k. ekki í upphafi. En landnýting getur hamlað náttúrlegri sjálfgræðslu á slíkum svæðum, m.a. komið í veg fyrir öfluga uppsprettu landnemaplantna, sem og hægt á sjálfgræðslu eftir flóð, gjóskufall og annað rask.

Þegar jarðvegsrof á sér stað glatast efsti hluti moldarinnar. Það er jafnframt sá hluti sem er auðugastur af lífrænum efnum (A-lag) og hefur þá eiginleika sem mestu skipta fyrir frjósemi vistkerfa, þá sem móta næringarframboð og vatnsheldni. Því getur lítið rof valdið miklu tjóni á mold og vistkerfum almennt. Áhrifa jarðvegsrofs gætir langt út fyrir upprunastaðinn. Vatnsborið set hefur áhrif á vatnsfarvegi langt niður vatnasviðin og á sjó út. Mengun frá jarðvegi, ekki síst ábornu landi, hefur slæm áhrif á lífríki í ám, vötnum og á grunnsævi. Nitur- og fosfórauðgun hafsvæða veldur víðfeðmum og alvarlegum vandamálum. Á undanförnum árum hefur náðst góður árangur við að minnka áburðarmengun í heiminum, m.a. með því að setja akuryrkju strangar reglur um áburðarnotkun, vatnsrof og afrennsli, ekki síst í Evrópu. Á öðrum stöðum hefur gengið illa að setja lög og reglur og sums staðar gerist það að slíkt regluverk er afturkallað vegna þrýstings frá hagsmunahópum, sem getur haft mjög alvarlegar afleiðingar í framtíðinni. Stjórnmál, lög, regluverk og jarðvegsvernd eru samofnir málaflokkar – eins og tæpt verður á í næsta kafla.

Hér á eftir verður fjallað almennt um ferli vatns- og vindrofs og miðast umfjöllunin ekki sérstaklega við íslenskar aðstæður:



Mynd 18.2. Regndropi skellur á yfirborðinu, spýtist síðan í allar áttir og losar um jarðvegskorn sem ýmist lyftast eða flytjast til. Mynd: USDA-NRCS.

undirstöðuatriðin eru þau sömu hvar sem er í heiminum. Áður hefur vindrof verið skýrt sérstaklega í tengslum við íslenska sandumhverfið, sem er óþarfi að endurtaka, en þó verður fjallað hér stuttlega um vindrofsjöfnuna. Síðan fylgja útskýringar á jarðvegsrofi á Íslandi.

18.1.1. Vatnsrof

Vatnsrof er margslungnara fyrirbrigði en ætla mætti í fyrstu. Það má skipta rofáhrifum vatns í tvennt: annars vegar er um að ræða árekstraráhrif vatnsdropans en hins vegar rennsli vatns á yfirborðinu. Fræðin sem skýra vatnsrof þróuðust fyrst og fremst í tengslum við akuryrkju þar sem land er brotið til ræktunar og er óvarið fyrir útrænum öflum langan tíma í senn. Bæði vatnsrof og vindrof eru einnig mikilvæg ferli sem hluti landmótunarfræða (e. geomorphology). Utan akuryrkjusvæða er mikilvægt að hafa í huga að vatnsrof verður lítið sem ekkert sé gróðurhula til staðar. Jarðvegsrof og ástand vistkerfa eru því náskyldir þættir.

Hinn máttugi regndropi

Á árunum fyrir aldamótin 1900 gerðu vísindamenn sér grein fyrir því að mikið rof átti sér stað án þess að þeir yrðu varir við rennandi vatn á yfirborðinu, og þetta var þeim allnokkur ráðgáta. Lausn þeirrar gátu birtist mönnum þegar unnt varð að taka háhraðaljósmyndir sem sýndu regndropa skella á bera mold (mynd 18.2). Við það losnar hreyfiorka dropans úr læðingi. Hluti kornanna sem fyrir verða kastast í loft upp en skella síðan niður aftur. Eftir því sem orka dropanna er meiri – þ.e. fleiri og stærri dropar – þeim mun meira verður rofið. Því eru skilyrði fyrir mikið rof af völdum regndropa þar sem mikil úrkoma fellur á stuttum tíma, t.d. í þrumuveðrum þegar rignir jafnvel tugi millimetra á skammri stund – og þá eru regndroparnir bæði stórir og þungir. Gríðarleg orka leysist úr læðingi við slíka veðuratburði.

Mynd 18.3. Lagrof á frosnu yfirborði á tilraunasvæði við Ás í Noregi.

Ekki þarf nema örlítinn halla til að heildarflutningur jarðvegsefna verði mikill undan brekku; jafnvel aðeins örfáar gráður.

Vatnið sem fellur til jarðar myndar oft eins konar filmu á yfirborðinu sem flýtur hægt undan halla og tekur með sér jarðvegskornin sem droparnir hafa losað um, sérstaklega ef mikil úrkoma fellur á skömmum tíma. Af þessu fyrirbrigði er dregið hugtakið „lagrof“ (e. sheet erosion). Ummerki um lagrof eru fyrst og fremst afleiðing mikilla setflutninga, t.d. í ám, en oft sjást líka ummerki um eldra yfirborð jarðvegs áður en rofið átti sér stað, t.d. þar sem mót róta og yfirborðshluta plantna eru komin langt upp fyrir yfirborðið.

Sytrur og skorningar

Ísig, sem segir til um hversu ört vatn sígur ofan í moldina, hefur áhrif á hvort vatnsrof verður eða ekki. Falli meira vatn til yfirborðsins en sem nemur hraða ísigs verður afrennsli. Það eru þó ekki aðeins eiginleikar moldarinnar sem móta ísigið, gróðurhulan er þar einnig lykilatriði. Þar sem mikið vatn fellur á bert yfirborð og halli er á landinu tekur vatn að safnast saman í rásir, fyrst litlar rásir sem hafa fengið heitið „sytrur“ (e.

Mynd 18.4. Sytrur (e. rills). Sytrur eru grunnar vatnsrásir í yfirborðinu sem geta valdið miklu jarðvegsrofi. Mynd: USDA-NRCS/South Dakota Conservation District.

rills). Vatnið í rásunum flytur vatn frá lagrofi, en einnig grafa sytrurnar niður í jarðveginn og auka styrk moldarefna í vatninu: þær auka á rofið (mynd 18.4). Þær eru því ummerki um mikið vatnsrof. Ef moldin er þykk eða ef laus setlög eru undir moldaryfirborðinu geta sytrurnar dýpkað og myndað djúpar „vatnsrásir" eða „vatnsskorninga" (e. gullies), sem eru í raun aðeins djúpar sytrur (mynd 18.5). Samkvæmt gamalli skilgreiningu á vatnsskorningum sem tekur mið af landbúnaði er um að ræða svo djúpa skorninga að traktor komist ekki yfir þá.

Djúpir skorningar myndast í löss-svæði jarðarinnar (þykk áfokslög, sjá 8. kafla um löss) sem valda gríðarlega miklum setflutningum í ám og á haf út. Þar má t.d. nefna Gulafljót í Kína (sjá bók Guðmundar Páls Ólafssonar 2011 um

Mynd 18.5. Vatnsskorningar í gegnum djúpa *eldfjallajörð* í Eþíópíu. Þegar laus mold er svo þykk veldur rofið miklum setflutningum sem hafa áhrif langt út fyrir upprunastað setsins. Eyðileggingin er algjör, líkt og gerist þegar mold tapast af yfirborði lands á Íslandi.

vatnið), sem m.a. á upptök sín í afar þykkum og mjög vatnsskornum lössetlögum. Djúpir skorningar geta einnig myndast á eldfjallasvæðum þar sem vatnsrof grefur í þykk en laus lög af gjósku, sbr. myndina frá Eþíópíu sem hér fylgir. Algengt er að lítið sem ekkert vatn streymi um vatnsskorninga á þurrari svæðum jarðar nema þegar verður úrfelli sem myndar tímabundið rennsli í farvegum og jafnvel „skyndiflóð" (e. flashfloods). Kirkby og Bracken birtu gott yfirlit um vatnsskorninga árið 2009.

18.1.2. Líkön fyrir vatnsrof

Vatnsrof í landbúnaðarhéruðum hefur skaðað stóran hluta ræktarlands á jörðinni. Mikilvægt er að geta metið hve vatnsrofið verður mikið miðað við nýtingu landsins hverju sinni, t.d. hvað varðar ræktunaraðferðir, jarðvegsgerð og hvaða sáðjurtir eru notaðar. Á fyrri hluta 20. aldar voru víðfeðm landsvæði brotin undir ræktun í Bandaríkjunum. Í kjölfarið fylgdi jarðvegsrof sem hafði afar neikvæð áhrif á bæði uppskeru og gæði vatns. Jafnframt jókst tíðni flóða í bandarískum stórám, svo sem Missouri- og Mississippi-fljótunum (mynd 18.6). Því hófu bandarískir vísindamenn viðamiklar rannsóknir á vatnsrofi frá ökrum og þróuðu síðan líkan sem var ætlað að áætla rofið. Líkanið eða jafnan fékk metnaðarfulla nafngift: „The Universal Soil Loss Equation", skammstafað USLE, en jafnan er oft kennd við Wishmeier (sjá Mutchler o.fl. 1994). Líkanið hefur reynst afar mikilvægt tæki til að meta vatnsrof á akuryrkjulandi í heiminum. Það hefur verið uppfært og aðlagað að breytilegum aðstæðum, t.d. þar sem frost er í jörðu mikinn hluta ársins.

Með líkaninu er unnt að áætla hvað mikið af jarðvegsefnum tapast af hverjum hektara lands á ári að meðaltali (t/ha/ár). Jafnan er víða notuð til að setja skilyrði fyrir tryggingu á uppskeru; bóndi getur ekki tryggt uppskeruna nema að hætta á rofi sé innan ásættanlegra marka. Jarðvegsverndarstofnanir nota jöfnuna til þess að vekja athygli á vandamálum og leiðbeina um skynsamlega nýtingu lands.

Jafnan í sinni einföldustu mynd er:

$$A = RKLSCP$$

þar sem **A** er magn rofs (t/ha/ár), **R** er regnþáttur, **K** er rofgirni jarðvegs, **L** er lengd brekku, **S** er halli og lögun brekkunnar, **C** er landnýtingarþáttur en **P** verndaraðgerðir. Hér á eftir verður farið lauslega yfir helstu þætti jöfnunnar, en þeir skýra vel eðli vatnsrofs og því er vert að gefa þeim góðan gaum.

R: Regnþátturinn
Eins og áður sagði skiptir máli með hvaða hætti regn fellur til jarðar. Mikið regn sem fellur á stuttum tíma er líklegra til að valda vatnsrofi en regnúði í langan tíma. Kraftur regndropans er meiri í snörpum skúrum, auk þess sem líklegra er að yfirborðsrennsli verði við slíkar aðstæður. Við notkun á USLE-jöfnunni er stuðst við líkindi á orkumiklu regni sem reiknuð eru út frá úrkomutölum

Mynd 18.6. Flóð í stórfljóti á meginlandinu. Erica Micheli/European Soil Bureau/Joint Research Center.

eða veðurfarsgögnum fyrir viðkomandi landsvæði.

Tengsl regns og vatnsrofs hafa verið könnuð víða um heim, m.a. með því að koma fyrir búnaði sem líkir eftir regni á vettvangi. Notaðir eru sturtuhausar sem hægt er að stilla, bæði hvað varðar stærð regndropa og vatnsmagn (t.d. lítrar/mín/m²). Oft er sérstakur búnaður notaður til að koma fyrir margvíslegum jarðvegsgerðum undir „regninu“ og jafnvel halla undirlaginu misjafnlega mikið. Þá eru sums staðar rannsóknasvæði við háskólastofnanir þar sem fylgst er náið allt árið með veðurfarsþáttum, afrennsli og jarðvegsrofi í mörgum tilraunareitum sem hafa mismunandi halla, gróðurhulu og ræktartegundir (mynd 18.7).

K: Rofgirni

Mold sem liggur óvarin fyrir roföflunum er misjafnlega rofgjörn. Einkorna silt og fínn sandur rofna t.d. auðveldlega, en leir með mikla samloðun rofnar mun síður. Stór og stöðug samkorn (e. aggregates) veita viðnám gegn jarðvegsrofi (bæði dropanum og rennandi vatni). Lífræn efni stuðla að samkornun og lífrænar trefjar binda jarðveginn saman. Af þeim sökum er frjósamur lífrænn jarðvegur oft stöðugri gagnvart roföflunum en margplægð mold og þar sem gengið hefur á lífrænan forða jarðvegsins. Algengt er að mæla stærð og styrkleika samkorna til að meta viðnám gegn vatnsrofi.

Miklu skiptir hversu auðveldlega úrkoman berst niður í moldina, eins og áður sagði (ísig). Leirjarðvegur erlendis hefur iðulega tregt ísig en sendinn jarðvegur ört ísig. Ef ísigið er ört er minni hætta á yfirborðsrennsli. Hrjúfleiki yfirborðsins er ennfremur mikilvægur hluti K-þáttarins; eftir því sem hann er meiri, þeim mun minni hætta er á yfirborðsrennsli, sérstaklega lagrofi. Stærð og styrkur samkorna er

Mynd 18.7. Tilraunasvæði við Landbúnaðarháskólann í Ási í Noregi þar sem könnuð eru tengsl halla, aðferða við jarðrækt, ræktartegunda og loftslags við jarðvegsrof. Til vinstri er yfirlitsmynd yfir svæðið en til hægri má sjá aðstöðu neðanjarðar þar sem afrennsli af reitunum er safnað saman og magn jarðvegsefna, efnainnihald vatnsins o.fl. er mælt. Tilraunasvæði sem þessi eru víða um heim og þau eru mikilvæg til að ákvarða gildi fyrir roflíkön.

einmitt mikilvægur þáttur í hrjúfleika yfirborðsins (mynd 18.8).

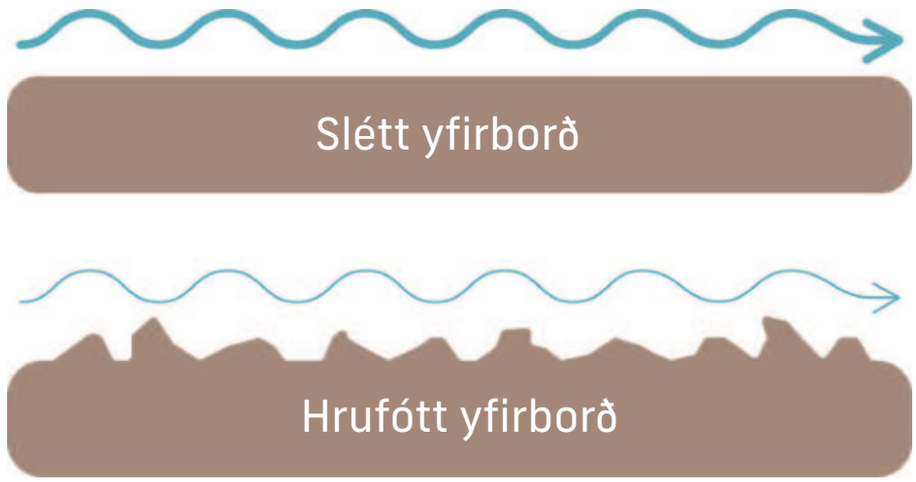
Íslenskum jarðvegi er víða hætt við vatnsrofi, einkum þar sem samkornun er lítil og moldin mjög siltblandin. Leir í íslenskum jarðvegi hefur litla samloðun sem eykur hættu á vatnsrofi. Á móti kemur hæfileiki til að safna lífrænum efnum í jarðveginn sem eykur á samloðun og minnkar rofgirni. Frjó mold með mikið af lífrænum efnum hefur töluverða mótstöðu gegn vatnsrofi. Landnýting sem minnkar lífrænt innihald minnkar mótstöðu gegn vatnsrofi. Vatnsrof getur orðið mjög mikið á illa grónu landi hérlendis, ekki síst á frosinni jörð (sjá síðar), m.a. vegna þess að þar sem gróðurhula hefur rofnað myndast iðulega nokkuð þéttur holklaki undir yfirborðinu sem dregur úr ísigi og stuðlar að vatnsrofi þegar frost er í jörðu (sjá Berglindi Orradóttur o.fl. 2008 og kafla um kulferli).

S: Halli

Það er augljóst að eftir því sem landinu hallar meira, þeim mun hraðar rennur vatn undan brekkunni og því verður vatnsrofið meira. Tengslin eru veldisvaxandi, rofið eykst sem fall af hallanum í öðru veldi. Víða erlendis er bannað að brjóta land til ræktunar ef því hallar mikið, t.d. land sem hallar umfram 8–10°. Það er gert m.a. til að koma í veg fyrir mikinn setburð frá akuryrkjulandi og vernda frjósaman jarðveg.

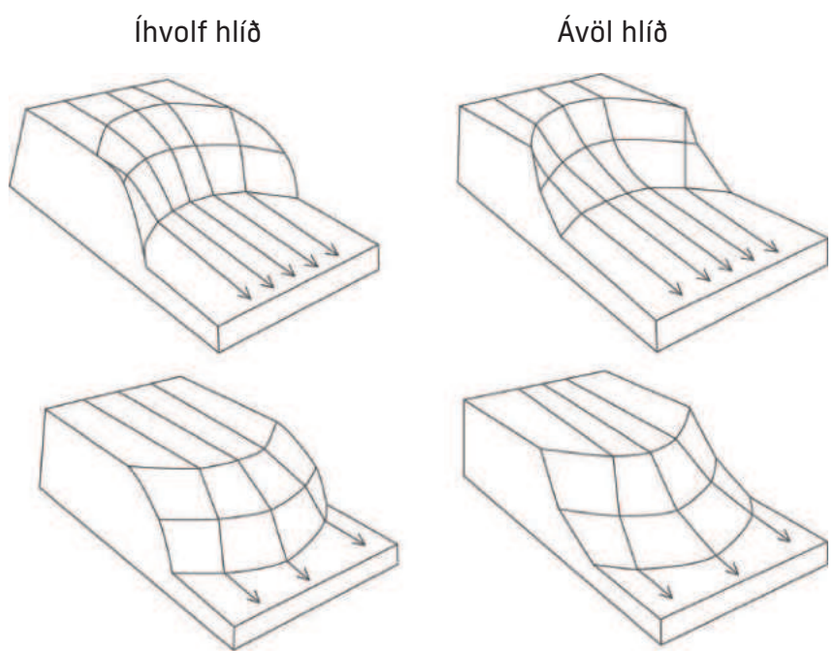
L: Lengd og lögun brekkunnar

Ef það gleymist að setja bíl í gír og handbremsu þegar hann er skilinn eftir í halla þá rennur hann vitaskuld af stað. Rennslið er hægt í byrjun en smám saman eykur hann ferðina eftir því sem brekkan lengist, og ef engin er fyrirstaðan getur hinn mannlausi bíll náð miklum hraða áður en ferðin stöðvast á einhverri fyrirstöðu með tilheyrandi tjóni. Eins er það með rennsli vatnsins, því lengri sem brekkan er, þeim mun meiri hraða nær vatnið. Um leið vex vatnsrofið því



Mynd 18.8. Yfirborðshrjúfleiki og samkornun hamla vatnsrofi. Þykkt bláu örvanna gefur til kynna vatnsrennsli frá jafnstórum úrkomuatburði. Mun minna yfirborðsrennsli verður á hrufóttu yfirborði. Sama lögmál gildir um vindrof, minni vindhraði verður á yfirborði þar sem yfirborðið er óslétt.

með meiri hraða nær vatnið að rífa upp fleiri og stærri korn. Lögun brekkunnar er mikilvæg. Ávöl form (e. concave) verða til þess að það dregur úr hallanum eftir því sem neðar dregur, sem dregur jafnframt úr rennslishraða. Íhvolf form (e. convex) leiða til vaxandi halla niður brekkuna, rennslishraðinn eykst í sífellu eftir því sem neðar dregur (myndir 18.9 ávöl og íhvolf landslagsform). Þar sem form brekkunnar er íhvolft margfaldast



Mynd 18.9. Ávöl og íhvolf landslagsform. Halli og þar með hraði vatnsrennslis eykst niður íhvolfan (e. convex) halla en minnkar ef formið er ávalt (e. concave). Þetta er mikilvægt atriði er varðar vatnsrof. Móbergshlíðar landsins hafa iðulega íhvolf form þar sem hallinn vex niður brekkuna.

hættan á alvarlegu jarðvegsrofi í samanburði við brekkur sem eru ávalar.

Á Íslandi sjást áhrif þessa þáttar USLE-jöfnunnar mjög vel. Þar sem brekkur eru stuttar, t.d. á milli basalthraunlaga í dölum tertíer-blágrýtismyndunarinnar, er lítið rof. Þessar brekkur hafa ávala lögun og eru yfirleitt vel grónar. Gott rakaástand hjálpar ennfremur til. Móbergshlíðar eru aftur á móti mjög gjarnan með íhvolfa lögun og brekkan því löng og samfelld, enda eru þær iðulega gróðurvana. Þetta er einn þeirra þátta sem hefur stuðlað að örri eyðingu gróðurs og jarðvegs á gosbeltum landsins (sjá ÓA o.fl. 2022). Auk þess er jarðvegi gosbeltisins almennt mjög hætt við rofi, eins og rætt er um síðar (mynd 18.10).

C: Landnýting

Þessi þáttur líkansins tekur til með hvaða hætti landið er nytjað, því landnýtingin, t.d. gróðurhula, aðferðir við plægingu, ræktartegundir o.fl., skipta miklu máli. Sáðtími er mikilvægur sem og hvort akrar eru berir yfir vetrartímann, eða hvort landið er plægt að vori en gróðurhula skilin eftir yfir vetrartímann. Eins og áður sagði er USLE-jafnan fyrst og fremst miðuð við akuryrkjuland en hér gildir vitaskuld almenn skynsemi: eftir því sem gróðurhulan er meiri og hylur landið lengur, þeim mun minni hætta er á rofi. Á síðustu árum hafa rutt sér til rúms aðferðir í akuryrkju þar sem leitast er við að plægja landið sem minnst upp, eða jafnvel alls ekki (e. no-till). Sumar þessara aðferða eru hluti af vistvænum eða lífrænum ræktunaraðferðum.

P: Jarðvegsvernd

Unnt er að haga nýtingu með þeim hætti að hún stuðli að verndun jarðvegsins. T.d. er mikilvægt að plægja ekki upp og niður brekkur, sem leiðir til margfalt meira rofs en ef leitast væri við að plægja þvert á hallann (mynd 18.11). Hér á einnig við að best er að skilja eftir

Mynd 18.10. Móbergshlíðar hafa víða tapað gróðurhulunni. Yfirborð þeirra er viðkvæmt fyrir raski, sem getur valdið miklu rofi því hlíðarnar hafa iðulega langan samfelldan halla með íhvolfa (e. convex) lögun. Myndin er tekin í Þingvallasveit (2020).

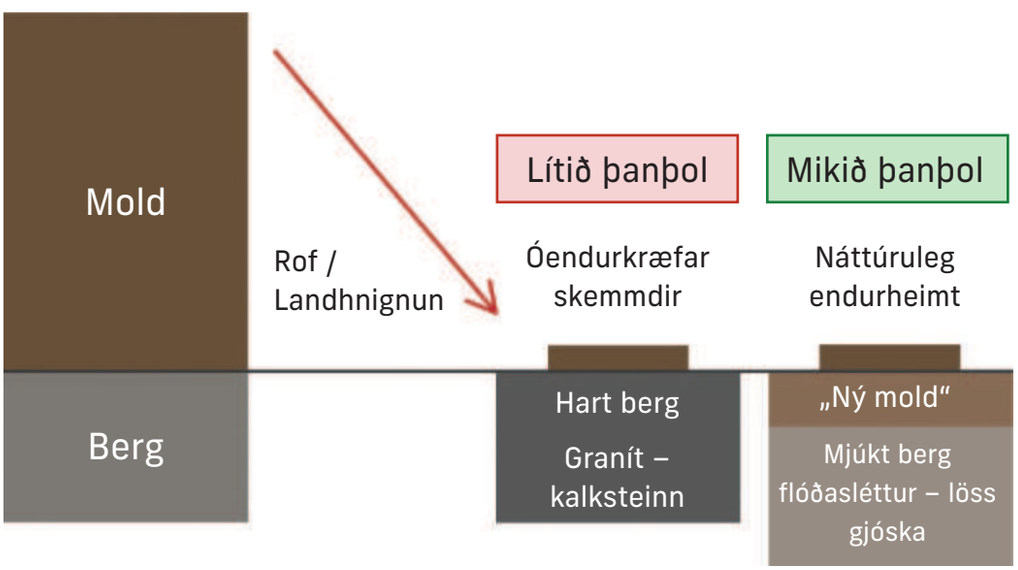
gróðurhulu sem lengst eftir því sem hægt er.

Ýmsir gallar USLE-líkansins

Það er engum vafa undirorpið að USLE-líkanið hjálpar til við að skýra vatnsrof. En vert er að hafa í huga að það er fyrst og fremst þróað fyrir akuryrkjuland sem er plægt reglulega. Það hentar því illa fyrir beitilönd með flókna samsetningu gróins og misvel gróins lands, en samt sem áður hefur líkanið verið notað fyrir slíkar aðstæður. Samtök úthagafræðinga í Bandaríkjunum sáu ástæðu til þess að álykta sérstaklega um að USLE-líkanið hentaði ekki fyrir beitilönd eða útjörð (SRM 1992; sjá einnig Pierson Jr. 2000). Jafnan er jafnframt ekki nothæf þar sem mörg roföfl eru að verki í einu, eins og við rofabörð á Íslandi. Upprunalegar útgáfur tóku ekki tillit til snjóbráðar og frosts í jörðu, en til eru aðrar nýrri jöfnur sem byggjast á USLE þar sem leitast er við að taka snjó og frost með í reikninginn.

Niðurstaða útreikninga með USLE og sambærilegum jöfnum er gefin upp sem tonn jarðvegs sem tapast af hverjum hektara ár hvert (t/ha/ár). Lítið rof, t.d. 2 t/ha/ár, hefur takmörkuð áhrif þar sem moldin er frjó, til þess að gera djúp og endurnýjun (jarðvegsmyndun) nokkuð ör. Setflutningar í ám við slíkt rof verða fremur litlir og viðráðanlegir. En sama rof (2 t/ha/ár) getur verið afar afdrifaríkt þar sem jarðvegur er mjög grunnur (fáir cm) ofan á hörðu bergi þar sem jarðvegsmyndun er hæg. Slíkt rof veldur u.þ.b. 0,1 mm lækkun jarðvegs (e. deflation) á ári, sem er vitaskuld umtalsvert, sérstaklega þar sem jarðvegur er grunnur (sjá mynd 18.12).

Mynd 18.11. Hér hefur verið plægt upp og niður halla, sem leiðir til alvarlegs jarðvegsrofs. Ef plægt er þvert á halla má minnka rofið til mikilla muna. Mynd: Soil Atlas of Europe/EU, RJ.



Mynd 18.12. Gerð undirlags hefur áhrif á hversu fljótt kerfi geta brugðist við raski. Þar sem laus setlög eru undir getur jarðvegur auðveldlega myndast aftur séu loftslagsskilyrði góð, t.d. í löss-lög (áfok frá jökultíma), árset á ársléttum og gjósku. Segja má að kerfið hafi þanþol gagnvart slíku raski (háð skilgreiningum á þanþoli). Öðru máli gegnir ef jarðvegur situr á hörðu undirlagi á borð við granít. Ef moldin tapast ofan af slíku bergi tekur afar langan tíma að mynda jarðveg að nýju (árhundruð), auðlindin er þá í raun óendurnýjanleg. Sjá frekari skýringar og dæmi í textanum.

Stallar

Íbúum fornra menningarríkja Asíu, Ameríku og við Miðjarðarhaf var ljóst að mikilvægt væri að sporna við vatnsrofi á ræktarlöndum. Á öllum þessum svæðum voru reist mannvirki þannig að brattar hlíðar urðu að einni samfelldri keðju stalla og vatnið leitt á milli þeirra af mikilli kunnáttusemi.

Mörg þessara mannvirkja eru meðal þeirra mikilfenglegustu og merkilegustu í byggingarsögu mannkyns. Þau eru einnig grunnur lífsviðurværis á bröttum eyjum, svo sem Majorka (mynd 18.14a) og Kanaríeyjum. Þessum ævafornu mannvirkum hefur verið haldið við í árþúsundir í fjalllendi, t.d. í Kína, Víetnam, Nepal og á Ítalíu, svo dæmi séu tekin. Í Evrópu eru þau víða friðuð og fjármunum veitt til viðhalds þeirra úr sameiginlegum sjóðum (umhverfistengdir dreifbýlis- og landbúnaðarstyrkir). Cinque Terre-stallarnir á Norður-Ítalíu eru á heimsminjaskrá UNESCO.

Mynd 18.13 og 18.14. Fornir stallar á Majorka (18.13) og suðurhluta Spánar (18.14) teljast til menningarverðmæta. Jarðrækt án þeirra væri ekki möguleg. Evrópusambandið styrkir viðhald stallanna sem eru afar mikilvægir fyrir fæðuframleiðslu á eyjunni, enda moldin gjöful. Stallar sem eru nýttir við Miðjarðarhafið geta verið mörg þúsund ára gamlir, m.a. frá tímum Rómverja. Mjög gamla stalla er einnig að finna í Asíu og Suður-Ameríku.

Aftur á móti er rof orðið mjög alvarlegt án tillits til jarðvegsdýptar þegar það nær 10–15 t/ha/ár. Lækkun yfirborðs er þá 1–2 mm á ári að meðaltali og setflutningar mjög miklir (1 000–1 500 tonn af ferkílómetra). Áhrif á moldina eru alltaf neikvæð, jafnvel þar sem aðstæður til jarðvegsmyndunar eru mjög góðar, því það eru efstu lögin, sem innihalda mesta lífræna virkni, sem tapast.

Frost og snjóbráð

Á norðlægum slóðum er frost í jörðu stóran hluta ársins. Frostið dregur úr ísigi vatns ofan í jarðveginn, ekki síst á illa grónu landi (sjá kafla um kulferli). Því getur yfirborðsrennsli verið mikið yfir vetrarmánuðina. Að auki einkennist íslenskt vetrarveður af þíðuköflum allan veturinn á láglendi en bæði vor og haust á hálendi. Ör þíða á frosinni jörð veldur miklu yfirborðsrennsli og vatnsrofi. Á sumrin er ísig yfirleitt ört án tillits til yfirborðsgerðar og því er vatnsrof mun minna að sumarlagi en á vetrum.

Áhrif vatnsrofs utan upprunastaðar

Þau jarðvegsefni sem flytjast með vatni geta valdið miklu tjóni neðan upprunastaðar (e. off-site effects). Í nærumhverfinu fyllir moldin vatnsveitulón og hefur áhrif á rennsli í ám og lækjum. Þar sem moldin sest til hækkar árbotninn og landslagið og flóðahætta eykst í kjölfarið. Árfarvegir geta smám

saman risið upp fyrir umhverfið og jafnvel stíflugarða sem reistir hafa verið til varnar flóðum. Þegar svo er komið verða afleiðingar flóða sem ná yfir varnargarðana geigvænlegar. Aurburðurinn hefur afar neikvæð áhrif á lífríki straum- og stöðuvatna með margvíslegum hætti – honum fylgir mengun, hann dempar orkunám (sólarljós), breytir búsvæðum og aðstæðum til hrygningar í vatninu og lífsafkomu fiska og annarra lífvera, svo dæmi séu nefnd.

Á grunnsævi eru mikilvægar vaxtarstöðvar nytjastofna fisks, m.a. á Íslandi, sem verða fyrir skaða þegar aurburður verður mikill í ám. Moldin stíflar einnig fráveitukerfi í stórum stíl þar sem akuryrkja er stunduð á þéttbýlum svæðum, t.d. í Evrópu. Þar sem gruggugt vatn berst í stöðuvötn og á grunnsævi getur það valdið þörungablóma sem lokar fyrir sólarljós og hefur alvarlegar afleiðingar fyrir lífríkið. Slík svæði við mynni stórfljóta (t.d. ármynni Mississippi í Mexíkóflóa) eru kölluð „dauðasvæði" (e. dead-zones). Stærð þeirra og áhrif eru í beinu samhengi við þá tegund landbúnaðar sem stunduð er á vatnasviði þessara fljóta (mynd 18.15).

18.1.3. Vindrof

Á stórum hluta lands á jörðinni fellur fremur lítil úrkoma og þurrkaeyðimerkur eru því afar víðfeðmar. Loftslag sem telst mjög þurrt í skilningi jarðvegsfræðinnar (e. aridic) hylur um 23% lands á jörðinni (Wilding og West 2012). Vindrof er algengt á þessum svæðum og er ráðandi ferli þar sem gróður er minnstur, t.d. í Sahara, Góbí og fleiri gróðursnauðum

Mynd 18.15. Dauðasvæði við ármynni Mississippi-fljóts í Mexíkóflóa. Mold sem losnar af ökrum á vatnasviðinu hefur gríðarleg áhrif á lífríki flóans. Mynd: NASA, USA.

eyðimörkum. Sérstök undirgrein vísinda fjallar um landmótun eyðimarka (e. desert geomorphology) og nefna má klassískar bækur um efnið eins og *Desert geomorphology* (Cooke o.fl. 1993) og *Aeolian sand and sand dunes* (Pye og Tsoar 1990). Vindrofsfræðin, þar með talin þróun jöfnu fyrir vindrof, mótuðust þó ekki síður með hliðsjón af akuryrkjulandi þar sem hætta er á vindrofi. Vindrof er einnig mikið rannsakað á sendnum strandsvæðum, m.a. í vestanverðri Evrópu svo sem í Danmörku, Hollandi og á Bretlandseyjum (Derese o.fl. 2010, Sevink o.fl. 2013, Clarke og Rendell 2015).

Vindrof er á fræðimáli kennt við eyjar á Miðjarðarhafi í grennd við Sikiley, Aeolian-eyjar, og ferli vindrofs eru kölluð „aeolian processes" á ensku (áður stundum líka „eolian"). Fjallað er um vindrof og sanda í sérstökum kafla um íslenska sandumhverfið (17. kafli) og einnig í tveimur yfirlitsgreinum í *Náttúrufræðingnum* (ÓA o.fl. 2019a,b). Rannsóknir á vindrofi eru vaxandi vísindagrein, m.a. vegna áhrifa ryks á vistkerfi, veðurfar, lýðheilsu o.fl. þætti (sjá ÓA o.fl. 2019b).

Vindrofsjafnan. Rannsóknir á vindrofi eiga sér uppruna í verkum bresks verkfræðings að nafni Bagnold sem tók þátt í hernaðarumsvifum þjóðar sinnar í Norður-Afríku á árunum kringum 1930. Í frítímanum og síðar eftir að heim var komið þróaði hann helstu jöfnurnar sem enn þann dag í dag eru notaðar til að lýsa vindrofi, m.a. í líkanagerð. Niðurstöðurnar birtust í hinu klassíska riti *The physics of blowing sand and desert dunes* (Bagnold 1941). Eftir gríðarlegt vindrof á ökrum í vesturríkjum Bandaríkjanna á millistríðsárunum, sem sannarlega má flokka sem hamfarir og olli mikilli fátækt og fólksflutningum, var tekið að þróa líkan fyrir vindrof á vegum Bandaríkjastjórnar.

Vindgöng (mynd 18.16) voru notuð í miklum mæli við að finna gildi og samhengi vinds og foks fyrir hið nýja líkan, sem fékk einfaldlega heitið „vindrofsjafnan" (e. Wind Erosion Equation). Í þeirri jöfnu koma fyrir svipaðir þættir og í vatnsrofsjöfnunni (USLE) sem áður var lýst, m.a. með tilliti til rofgirni jarðvegs og landnýtingar. Hér á eftir er lýst meginþáttum jöfnunnar því hún varpar ljósi á eðli vindrofs.

Mynd 18.16. Vindgöng í Big Spring í Texas sem notuð voru til að þróa áfram vindrofsjöfnuna. Þarna er verið að undirbúa tilraun með íslenska mold en niðurstöðurnar sýndu einstæða rofgirni íslenskra jarðvegsefna og gjósku.

Rofgirni. Kornum af silt-stærð er almennt hættast við vindrofi. Leir, og þá einkum lagsilíköt, bindur jarðveginn saman. Korn sem eru stærri en u.þ.b. 1 mm eru orðin of stór til að vindur (eða öllu heldur skokkhreyfing) nái að ýta við þeim samkvæmt þessum líkönum; reyndar er oft miðað við 0,84 mm í því samhengi. Þá hafa stöðug samkorn í jarðvegi mikla mótstöðu gegn vindrofi. Þess má geta að hérlendis fjúka mun stærri korn en sem nemur viðmiðinu 0,84 mm sökum þess að gjóska og glerkorn eru iðulega fremur eðlislétt. Kornin eru jafnframt hrjúfari, sem eykur á rof. Að auki er mikill vindstyrkur hér algengari en gengur og gerist erlendis. Rannsóknir sýna að korn yfir 10 mm í þvermál geta skokkað með vindi á Íslandi (sjá yfirlitsgreinar ÓA o.fl. 2016, 2019a,b) og hin léttu og óreglulega löguðu rykkorn eru líklegri til að berast lengra með vindi en afrúnnuð kvarskorn.

Yfirborðshrjúfleiki. Eftir því sem yfirborðið er hrjúfara minnkar vindstyrkur næst yfirborðinu, vindprófíllinn verður flatari (minni vindhraði við yfirborðið miðað við t.d. 2 eða 10 m hæð) og því minnkar vindrof (sjá mynd 18.8). Auka má hrjúfleika með plægingu o.fl. auk þess sem stór samkorn auka hrjúfleikann. Gróður myndar yfirborðshrjúfleika og það er iðulega tilgangurinn með skjólbeltum. Skjólbelti sem mynda samfelldar beinar línur geta þó verið til baga og valdið sterkum vindsveipum. Best er að mynda sem ójafnast yfirborð, m.a. með misháum og misdreifðum trjálundum sem geta lyft vindi upp fyrir yfirborðið. Þessi aðferð var m.a. notuð á sendnum strandsvæðum Hollands og Belgíu, og segja má að trjárækt á höfuðborgarsvæðinu og í öðrum bæjum landsins hafi einmitt minnkað meðalvindhraða innan þéttbýlis.

Vindþáttur. Í stað regnþáttar í jöfnunni fyrir vatnsrof kemur vindþáttur; tíðni þurra storma er höfuðatriði ásamt rofgirni jarðvegsins. Vindrof fer stigvaxandi með vindhraða og því geta fá en öflug óveður valdið langmestu um vindrof. Unnt er að beita tölfræðilegum aðferðum við að reikna líkindi fyrir tíðni mikils vindhraða í þurrum vindáttum út frá veðurfarsgögnum, sem var m.a. gert til að meta hættu á tíðni þurra storma á Hálslónssvæðinu. Fleiri veðurfarsþættir eru teknir inn í líkanið, t.d. rakastig í lofti og mold sem og uppgufun.

Lengd – fjarlægð frá hindrun. Vegna þess að skokkefnin valda mestu um vindrof er ljóst að rofmátturinn eykst smám saman undan vindinum eftir því sem meira af skokkefnum bætist í mengi fokefna uns flæðið mettast miðað við þann vindhraða sem veldur fokinu. Þessi þáttur er líkur lengdarþætti vatnsrofsjöfnunnar; því meira vindrof verður eftir því sem lengd akra er meiri undan vindstefnu. Þetta á einnig við náttúrlegar aðstæður og oft er breiddin mikil á söndum landsins (óendanleg í skilningi reiknifræða). En allt sem dregur úr þessari lengd, m.a. kjarrgróður, skjólbelti, stórgrýti o.fl., hefur mikil áhrif á hve vindrof getur orðið mikið. Eins og áður sagði geta löng bein belti, t.d. skjólbelti, valdið vindstrengjum, en óreglulegt yfirborð dregur úr vindrofi.

Gróðurhula. Gróðurhula hindrar vindrof. Þar sem hætt er við vindrofi á ökrum er mikilvægt að skilja eftir stöngulstubbana (e. stubble) að lokinni uppskeru eftir því sem hægt er. Þeim mun smærri sem ógrónir blettir eru, þeim mun minni hætta er á vindrofi; hættan á fokatburðum í ræktarlandi er mest á stórum samfelldum ökrum. Gróður sem hylur yfirborðið og eykur um leið hrjúfleika er mikilvægur þar sem draga þarf úr vindrofi og best er að styðjast við hávaxinn gróður á borð við kjarr og trjágróður. Þetta atriði er m.a. haft í huga við mótun hugmyndafræði

um uppgræðslu til að minnka hættu á sandfoki á Heklusvæðinu þar sem leitast er við að koma á legg trjágróðri.

18.2. Rofmyndir – flokkun rofs á Íslandi

Aðstæður eru um margt aðrar á víðfeðmri útjörð Íslands en t.d. á ökrum eða í úthaga á þurrum svæðum meginlandanna. Hér fylgir kafli sem tekur mið af aðstæðum og rannsóknum á jarðvegsrofi á Íslandi. Kynnt er flokkun og kortlagning sem gefur góða heildarmynd af rofi í landinu, en um leið eykst skilningur á því hvaða ferli eru virk á hverjum stað. Hér er m.a. byggt á bókinni *Jarðvegsrof á Íslandi* (ÓA o.fl. 1997). Rofi á auðnum er einnig gefinn sérstakur gaumur, enda er sérstaða íslenskra auðna mikil í alþjóðlegu tilliti, en þó er vísað til sérstaks kafla er varðar sandauðnir landsins.

Við mat á jarðvegsrofi á Íslandi upp úr 1990 var valin sú leið að skipta rofi í nokkra flokka eftir áhrifum þess á landið, í svokallaðar rofmyndir, og síðan virkninni eða hversu alvarlegt það er í 5 rofeinkunnir. Þessi aðferð hentar að mörgu leyti vel fyrir rannsóknir á rofi á beitilöndum, en svipaðri aðferð hefur m.a. verið beitt á Nýja-Sjálandi og víðar. Jarðvegsrofi á Íslandi er skipt í tvo meginflokka, rof tengt gróðurlendi og rof á auðnum (tafla 18.1). Áður fyrr var nánast einvörðungu litið til rofs sem tengdist gróðurlendi enda voru margir sem töldu að í raun væri ekki jarðvegur á auðnum, sem er vitaskuld fjarri lagi. En segja má að rof tengt gróðurlendi valdi tapi á virkum vistkerfum, þar glatast bæði gróðurhula og moldin undir niðri, full af lífi og lífrænum efnum, en auðnirnar hafa aftur á móti takmarkaða gróðurhulu og ófrjóa mold. En rof á auðnum er vissulega einnig alvarlegt vandamál – það gerir lífsskilyrði gróðurs þar mjög erfið og kemur í veg fyrir náttúrlega framvindu, auk þess sem rofinu fylgir rykmengun, flóð, setmyndun o.s.frv.

Mjög mikill munur er á ástandi lands eftir því hver rofeinkunn (mynd 18.17) þess er, og reynslan sýnir að fremur auðvelt er að ákvarða hana. Mismunandi teikn um rofeinkunn eru notuð fyrir hverja rofmynd fyrir sig (tafla 18.2).

18.3. Rof tengt gróðurlendi

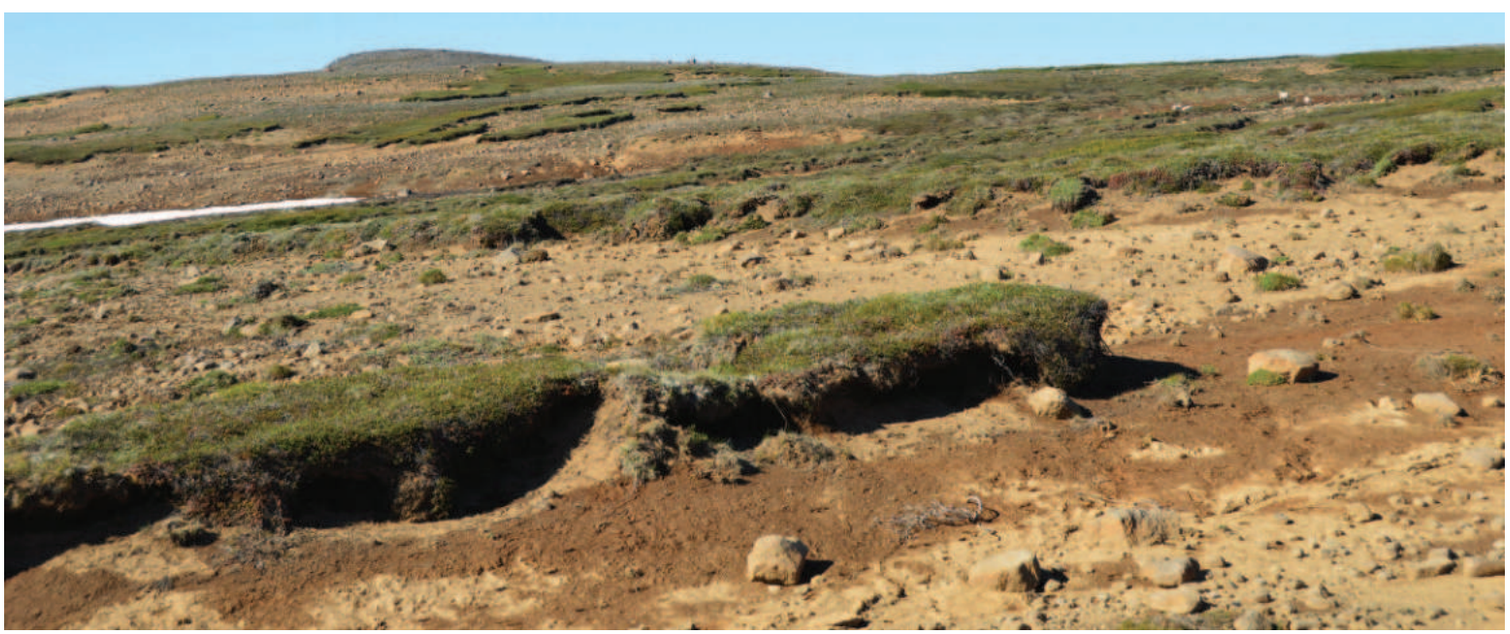
Rof sem tengist eyðingu á grónum vistkerfum var flokkað sérstaklega. Þar með teljast rofmyndir sem flestir hafa

Tafla 18.1. Rofmyndir sem voru grunnur að kortlagningu á jarðvegsrofi á Íslandi.

Rof sem veldur tapi á gróðurlendi	Auðnir
Áfoksgeirar	Melar
Rofabörð	Hraun
Rofdílar	Urðarhlíðar
Rofdílar í hlíðum / jarðsil	Sandar
Vatnsrásir	Sandmelar
Skriður	Sandhraun
	Moldir

Tafla 18.2. Rofeinkunnir fyrir kortlagningu á jarðvegsrofi á Íslandi.

Rofeinkunn		Almenn lýsing (hver rofmynd hefur sinn kvarða)
0	Ekkert	Engin ummerki um rof
1	Lítið	Óveruleg ummerki um rof, rofið ekki virkt
2	Nokkurt	Minniháttar rofsár
3	Umtalsvert	Virkt en hægfara rof, vaxandi eða minnkandi rof, melar
4	Mikið	Virkt rof eða laus sandur. Land ekki hæft til beitar
5	Mjög mikið	Mjög mikil eyðing, mjög virk rofsár eða laus sandur. Óbeitarhæft



Mynd 18.17. Land með mismunandi rofeinkunn. Mjög mikill munur er á landi eftir rofeinkunn. Efst: rofeinkunn 0, ekkert rof, gott skjól og land í mjög góðu ástandi. Mynd fyrir miðju: gott ástand næst en land með rofeinkunn 3–4 í hlíðinni. Neðsta myndin: rofeinkunn 5, land á lokastigi eyðingar.

tekið eftir, t.d. rofabörð, en einnig rof sem lætur minna yfir sér en er mikilvægt að taka tillit til við mat á ástandi lands, svo sem rofdílar. Rétt er að hafa í huga að ýmsar rofmyndir sem áður ollu rýrnun á gróðurhulu landsins voru mun útbreiddari þá og rofið alvarlegra, m.a. á síðustu öldum, enda hefur gengið mjög á gróðurhuluna – rofið er gengið um garð. Sterkari vistkerfi héldu velli sem og þau sem nutu verndar vegna legu sinnar í landslaginu. Síðan hefur landnýting víða minnkað (fé fækkað og beitartími styst), veðurfar verið tiltölulega hagstætt og ráðist hefur verið í miklar landgræðsluaðgerðir og friðun – allt þetta hefur skilað góðum árangri (mynd 18.18). Annars staðar er þó beit ennþá viðhaldið á svæðum sem alls ekki ætti að nýta til beitar vegna slæmrar stöðu vistkerfa.

18.3.1. Áfoksgeirar

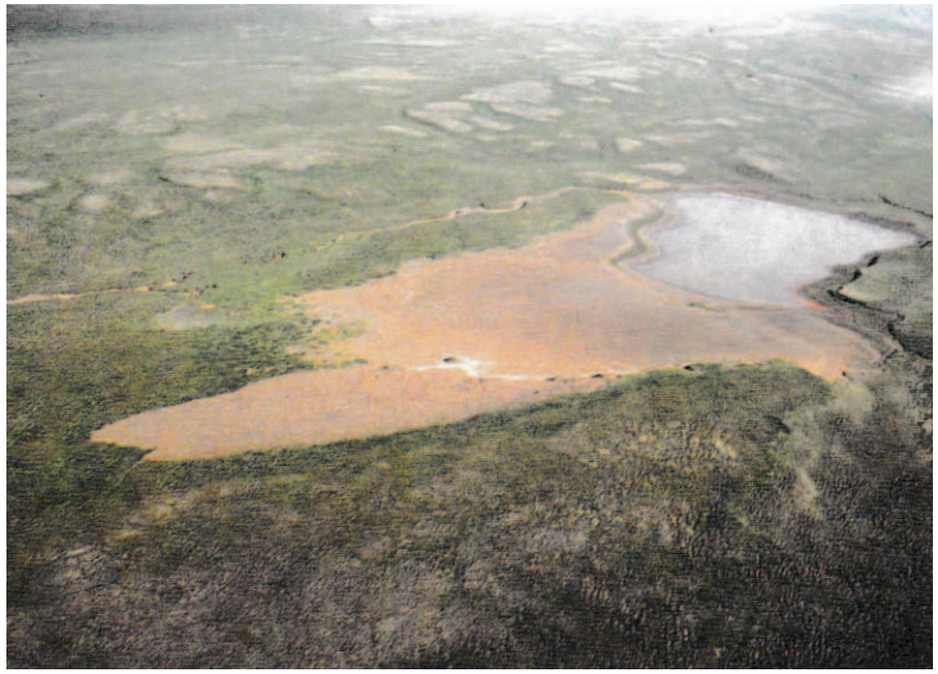
Það rofferli sem hefur mótað ásjónu landsins hvað mest er framrás áfoksgeira. Stór svæði á landinu, bæði á hálendi og láglendi, hafa „farið í sand“ (sjá rammagrein í kafla 17.4) eftir að áfoksgeirar veltust áfram og eirðu engu – yfir land sem áður var frjósamt og gróið. Við tók auðn og sandur. Áfoksgeiri er skilgreindur sem tungulaga sand- og/eða moldarsvæði sem gengur inn í gróið land (mynd 18.19).

Áfoksgeirar verða virkir þegar til staðar er „náma“ með miklum sandi (kornastærðirnar silt og sandur) – jafnvel uppspretta sem stöðugt bætist í, m.a. við jökuljaðra þar sem jökullænur skila sífellt meira af sandefnum vegna flóða í ám eða eldgosa. Sandurinn berst frá uppsprettunni undan ríkjandi þurrum vindáttum og inn á nærliggjandi gróðurlendi. Áfokið kæfir gróðurinn og við það losnar um jarðvegsefni undan gróðrinum og þau bætast við sandefnin sem berast að áfoksgeiranum. Fínefni (aðallega fínkorna silt) fjúka burt sem ryk svo að kornastærð þeirra verður smám saman grófari (grófkorna silt og sandur) og einsleitari eftir því sem efnin berast lengra frá upprunastað. Ferlið getur stigmagnast undan vindáttinni með stöðugt meira af lausum fokefnum,

Mynd 18.18. Land sem er að gróa saman. Héðinsfjörður.

sérstaklega þar sem moldin undir gróðrinum er gróf, eins og oft er innan gosbeltanna og í grennd þeirra. Þar er moldin jafnframt lausust í sér og því mest hætta á að áfoksgeirar vindi hratt upp á sig. Virkni áfoksgeira varð mikil þar sem bæði var til staðar virk sanduppspretta og þykk og gróf öskulög í jarðveginum, en dæmi um það má m.a. finna á Heklusvæðinu og afréttum sunnanlands þar sem ljósu öskulögin frá Heklu eru þykk (oft 3–10 cm). Þar eru nú víða auðnir sem áður var gróið land.

Áfoksgeirar valda því að „landið fer í sand", sem er nefnt „sandification" á ensku eins og rætt er um í næsta kafla. Geirarnir geta gengið fram tugi og jafnvel hundruð metra á ári og eira þá engu því sem fyrir verður (sjá ÓA o.fl. 1997, 2019a). Dæmi voru um slíka virkni á Mývatnsöræfum 1987–1989 þar sem afmarkaðir áfoksgeirar gengu 10 til meira en 100 m inn á gróið land á ári. Frægur áfoksgeiri gekk frá Hólsfjöllum og Hólssandi á síðustu öld, austan Jökulsár á Fjöllum og niður í Öxarfjörð. Landgræðslan girti áfoksgeirann af árið 1954 og skildi eftir um 300 m belti gróins lands innan girðingar. Um haustið hafði tekist að stöðva áfoksgeirann með sáningu og áburðargjöf, en sandurinn var kominn að girðingunni (Sveinn Þórarinsson landgræðsluvörður, munnleg heimild), þ.e. áfoksgeirinn gekk því fram um 300 m þetta ár. Segja má að þessi aðgerð hafi skipt miklu til að vernda byggð á mörgum bæjum í Öxarfirði.



Mynd 18.19. Áfoksgeiri. Kringlutjörn í Suður-Þingeyjarsýslu. Dæmigerður lítill áfoksgeiri sem á uppruna sinn í lítilli tjörn sem hefur þornað upp vegna þess hve mikil mold hefur borist í hana (Þröstur Eysteinsson 1994).

Mynd 18.20. Leifar áfoksgeira ofarlega í Landsveit. Land er vel gróið til beggja handa, sandgeirinn er tungulaga frá hægri til vinstri inn í gróðurlendið. Beinar línur á mörkum geirans og sandsins eru einkennandi. Hlaðnir voru garðar úr grjóti þvert á fokstefnu sandsins með frumstæðum áhöldum og melgresi sáð. Geirinn er tekinn að gróa vel upp, m.a. er birki að sá sér út, sem er afar mikilvægt á þessu svæði til að binda sandinn varanlega, enda hefur náðst að friða svæðið frá beit um nokkra hríð. Mikil saga er að baki görðum sem þessum; þeir voru oft endurhlaðnir og iðulega gekk illa að halda sauðfé frá svæðinu (sjá Robertson o.fl. 2008 og Svein Runólfsson og Örnu Björk Þorsteinsdóttur 2018).

Áfoksgeirar voru mun meira áberandi og virkari áður fyrr og segja má að í lok 19. aldar hafi ríkt skelfilegt ástand víða í Rangárvallasýslu þar sem áfoksgeirar gengu niður Landsveit (mynd 18.20) og Rangárvelli. Þessum atburðum hefur verið lýst vel í bókinni *Sandgræðslan* (Arnór Sigurjónsson 1958). Svo mikill var atgangurinn í verstu sandbyljunum að fólk komst vart út úr húsi og sandur gróf búpening lifandi í útihúsum. Fjöldi bæja lagðist í eyði í braut áfoksgeiranna. Það er afar erfitt að ímynda sér þessar aðstæður nú þegar verstu áfoksgeirarnir hafa verið stöðvaðir. Þeir sem aka þjóðbraut um Hellu eða ofanverða Landsveit gera sér sjaldan grein fyrir því að þarna voru áður víðfeðmir sandar sem nú hafa verið græddir upp.

Menjar áfoksgeira má oft lesa af tiltölulega löngum en beinum skilum í landslaginu á milli gróins og ógróins lands undan þurrum vindáttum. Ummerki áfoksgeira má hins vegar sjá víða á landinu, m.a. víða í Rangárvallasýslu, sunnan Langjökuls og á Skaftársvæðinu. Sár eftir áfoksgeira eru áberandi í Þingeyjarsýslum og á hálendinu (myndir 18.22 og 18.23 úr *Náttúrufræðingnum*). Áfoksgeiri gekk niður Hítardal og var mjög virkur á síðustu öld. Þeir hafa einnig myndast upp frá sandströndum á Vestfjörðum, t.d. í Breiðuvík á Látraströnd (mynd 18.21) og í Sauðlauksdal, en þar hóf einmitt Björn Halldórsson fyrstu skipulögðu baráttuna gegn ágangi sands í kringum 1760.

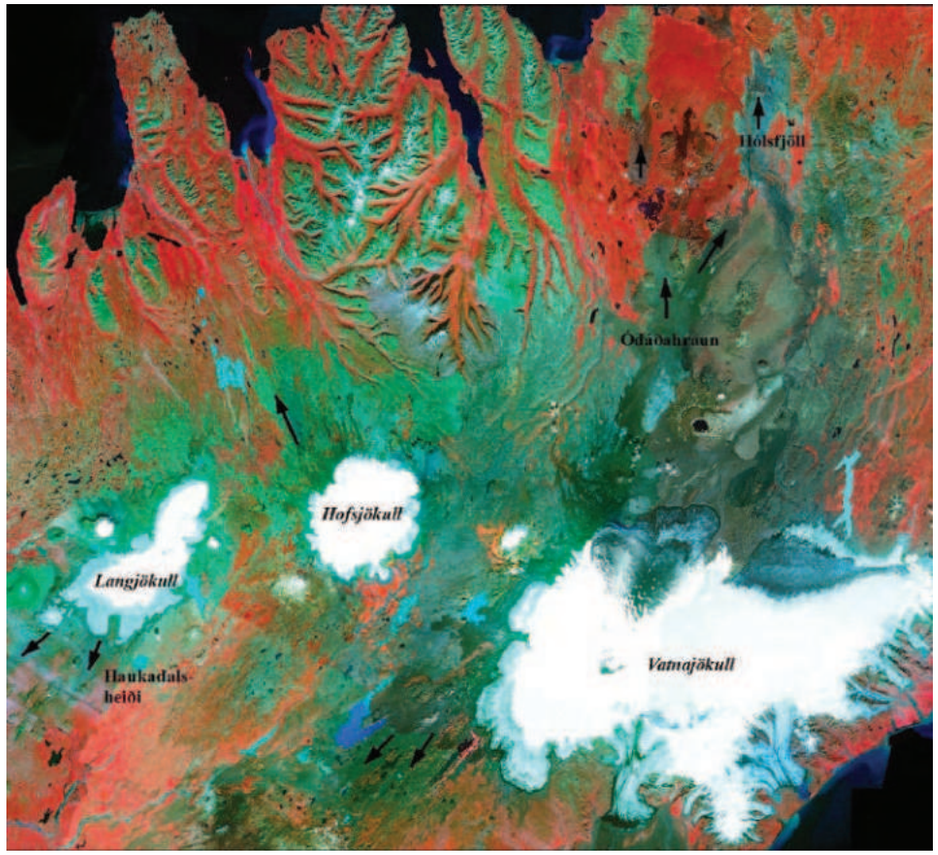
Sandgræðslan, sem síðar varð Landgræðsla ríkisins og nú Landgræðslan, var stofnuð til höfuðs sandinum á Rangárvöllum og í Landsveit árið 1907 (sjá m.a. *Sáðmenn sandanna*; Friðrik G. Olgeirsson 2007 og *Healing the Land*, Crofts 2011). Stofnunin hefur unnið mikilvæga sigra við að stöðva ágang sandsins á mörgum svæðum á landinu.

Mynd 18.21. Áfoksgeiri frá sandsvæði á Látraströnd.

Hvaðan kemur sandurinn? Af hverju verða áfoksgeirar virkir? Þegar tekist er á við áfoksgeira er mikilvægt að gera sér grein fyrir hvaðan sandurinn kemur. Sanduppspretturnar sem valda framgangi áfoksgeira eru afar margvíslegar. Stundum má greina eða gera sér í hugarlund sanduppsprettu á borð við sandfyllta tjörn eða áreyri sem jökulvatn hefur lónað um. Segja má að framburður undan jöklum sé að stórum hluta frumuppspretta sandsins, en jökulárnar bera fram mikinn sand.

Í flóðum, t.d. miklum vorflóðum og sumarflóðum, jökulhlaupum í kjölfar eldgosa eða þegar lón undir jöklum tæmast, flæmast árnar víða og leggja til sandefni. Líklegt má telja að upphaf áfoksgeiranna í Landsveit og á Rangárvöllum megi rekja til sands sem féll til þar sem Þjórsá náði að flæmast um í vorflóðum, en einnig barst aska og vikur úr Heklu undan norðanátt og með vatnsflóðum út yfir svæðin þar fyrir neðan. Jarðvegur á þessu svæði var mjög sendinn svo að ferlið vatt auðveldlega upp á sig. Mikil hlaup geta orðið í Jökulsá á Fjöllum við eldgos í norðanverðum Vatnajökli. Sandur sem berst út yfir flatlendið við ána á mjög líklega stóran þátt í myndun áfoksgeira á svæðinu, sérstaklega austan hennar og þá m.a. á Hólsfjöllum. Nokkuð er liðið frá síðasta stórhlaupi og því er minna af sandi á ferðinni nú en áður, en það gæti breyst eftir næsta stórhlaup. Fleiri jökulár mætti nefna þar sem hlaup valda myndun áfoksgeira, t.d. Skaftá.

Þar sem jökulár falla í vötn eða lón með breytilega vatnshæð er einnig mikil hætta á myndun áfoksgeira. Sandvatn sunnan Langjökuls hafði t.d. mjög óstöðuga vatnshæð í kjölfar breytinga á Hagafellsjöklum og vatnsflóða frá þeim (Fanney Ósk Gísladóttir o.fl. 2005, Sigurður Greipsson 2012) og þaðan barst sandur suður Haukadalsheiði í mjög breiðum áfoksgeira. Nú hefur verið



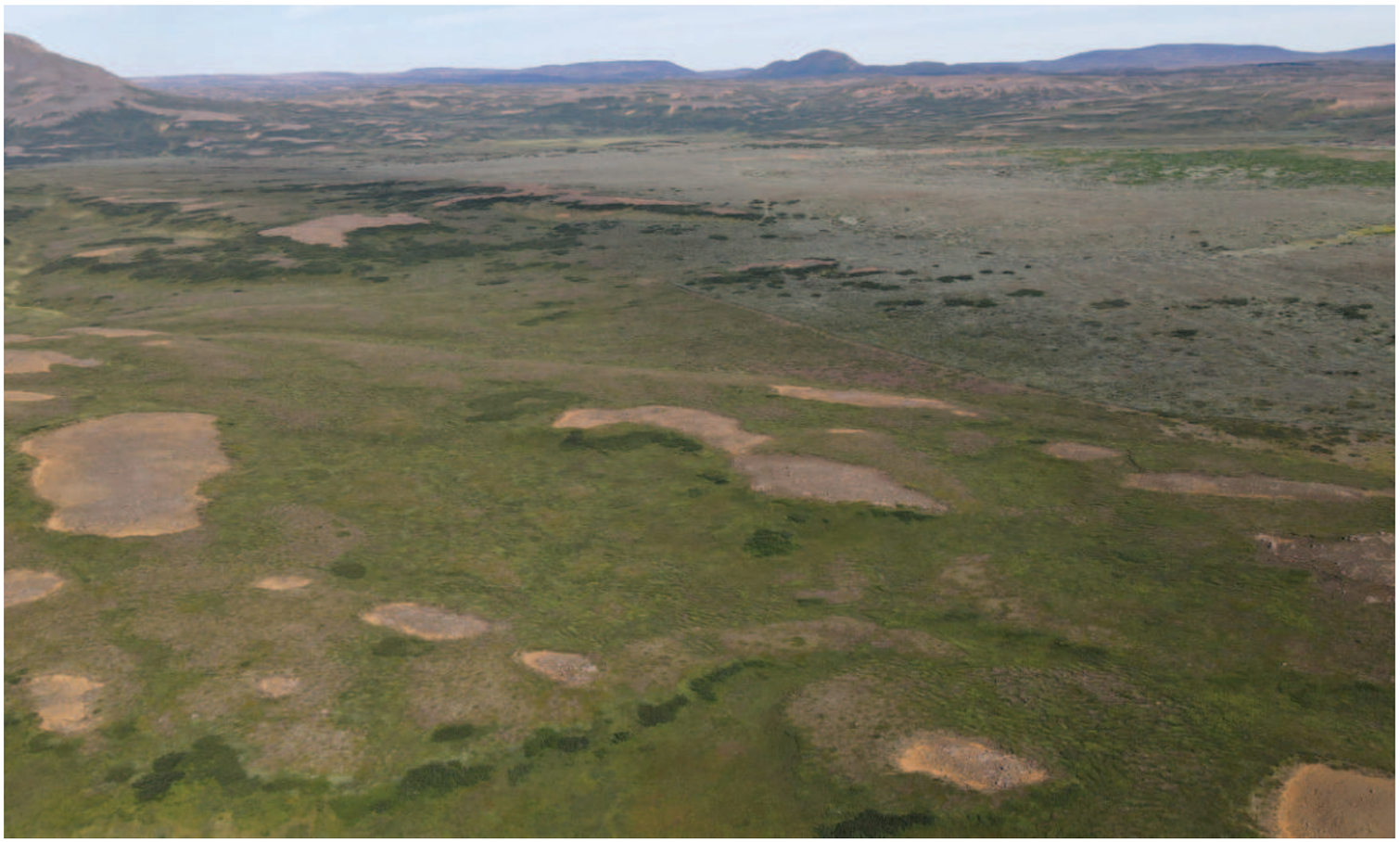
Mynd 18.22. Innrauð gervihnattamynd af hálendi Íslands. Gróður er rauður á myndinni en auðnir grá- eða grænleitar. Örvar sýna suma af þeim áfoksgeirum sem minnst er á í kaflanum (og einnig í 17. kafla), svo sem sunnan Langjökuls, á Eyvindarstaðaheiði, norðvestan Hofsjökuls, og í jöðrum Ódáðahrauns og Hólsfjalla. Gervihnattamynd, NASA.

Mynd 18.23. Áfoksgeirinn á Hólsfjöllum á innrauðri gervihnattamynd, en hann var stöðvaður í Öxarfirði 1954 (sjá mynd 18.24). Gervihnattamynd, NASA.

byggð stífla við útfall vatnsins þannig að vatnsborðið sveiflast ekki og þá er auðveldara að beisla sandinn. Sandur og sendin mold geta einnig borist með vatni undan halla við vatnsrof og myndað síðan uppsprettu áfoksefna. Þannig hagar oft til við tjarnir sem fyllast af seti. Áfoksgeiri í Hítardal myndaðist við mikið rof í móbergshlíðum dalsins sem skilaði sandi niður í dalbotninn sem síðan hóf framrás suður eftir dalnum. Móbergssandur hefur annað yfirbragð en sandur undan jöklum því hann er brúnn og grófur. Þá má nefna gjóskusvæði í nágrenni eldstöðva sem uppsprettur fyrir áfoksgeira.

Sterk gróðurhula er mikilvægasta vörnin gegn áfoksgeirum. Skóglendi og kjarr veita besta skjólið því hávaxinn gróður dregur mjög úr vindhraða við yfirborðið og hefur jafnframt víðtækasta rótarkerfið (mynd 18.25). Eldiviður og raftar voru verðmæti hér á árum áður (sjá Friðþór Sófus Sigurmundsson o.fl. 2014). Þekkt er að heimafólk hafi reynt að bjarga viði undan sandinum þegar áfoksgeirar gengu yfir skóglendi á Suðurlandi, sem vitaskuld hefur hraðað eyðingarferlinu til muna. Nú á dögum er aftur á móti reynt að rækta skóg á gömlu áfoksgeirasvæðunum á Suðurlandi, m.a. í verkefni sem nefnist Hekluskógar (sjá Elínu Fjólu Þórarinsdóttur o.fl. 2014). Með því er ætlað að binda öskuna sem fellur í eldgosum í Heklu í skóglendi framtíðarinnar svo að hún valdi ekki sandfoki. Raunar ætti að huga að því að auka hlut skóglendis sem mest í nágrenni eldstöðva á borð við Kötlu, Heklu og Eyjafjallajökul (Guðmundur Halldórsson o.fl. 2017, Anna María Ágústsdóttir 2015).

Mikið vantar upp á að landgræðslusvæði á Rangárvöllum og í Landsveit séu orðin nægjanlega stöðug til að hamla hamfarafoki falli yfir þau gjóska í



Mynd 18.24. Áfoksgeirinn í Öxarfirði þar sem framrás sandsins var stöðvuð árið 1954. Sandvæðið er ljóslitað þar sem melgresi ræður ríkjum. Mikilvægt er að varanlegri gróðurþekja festi þarna rætur, helst birkiskógur – sem er ríkjandi náttúrulegt gróðurfar á svæðinu. Mynd tekin árið 2021.

eldgosum (mynd 18.26). Það á einnig við um nágrenni jökulfljótanna sem flæmast um, því birki er fljótt að nema land eftir rask af völdum flóða sé sterk fræuppspretta til staðar, en það kemur í veg fyrir sandfok, ágang sands og frekari útbreiðslu auðna. Þróttmiklir birkilundir víða um land geta dreift miklu af fræi um nágrennið og þannig stuðlað að sjálfgræðslu birkis (Þóra Ellen Þórhallsdóttir 2015, Þóra Ellen Þórhallsdóttir og Kristín Svavarsdóttir 2022, Guðrún Óskarsdóttir o.fl. 2022).

Einnig ætti að hraða landgræðslu-aðgerðum á Hólsfjöllum meðfram Jökulsá með kjarrtegundum á borð við birki og víði. Ennþá skortir verulega skilning á nauðsyn þess að endurheimta landkosti á þessum svæðum, m.a. með beitarfriðun, og koma upp burðugum birkilundum sem gefa af sér fræ.

Melgresi er afar mikilvæg landgræðslu-jurt til að stöðva áfoksgeira, enda eina tegundin sem þolir mikið sandfok. Melur bindur ekki sandinn varanlega svo að annar gróður verður að fylgja í kjölfarið, helst birkiskógur og víðikjarr (sbr. myndir 18.25 og 18.26).

Mynd 18.25. Sandur gengur inn í Dimmuborgir. Birki hefur reynst öflug vörn gegn fokinu, en mikilvægt er að auka útbreiðslu þess á ógrónu landi austan og sunnan svæðisins. Á myndinni, sem tekin er að vorlagi áður en birkið laufgast, sést einnig gamall hlaðinn sandvarnargarður.

Mynd 18.26. Landgræðslusvæði kennt við Stóra-Klofa í Landsveit. Horft er til Búrfells í Þjórsárdal. Svæðið hafði áður orðið sandi að bráð en er nú óðum að gróa saman og kemur til með að verða að myndarlegum birkiskógi, svipaður þeim sem áður einkenndi svæðið og hafði staðið af sér síendurtekin áföll um þúsundir ára af völdum sandfoks frá Þjórsá og gjóskufalls frá Heklu. Mikilvægt er að skógurinn nái tryggilegri fótfestu á öllu svæðinu áður en það verður nytjað til beitar eða viðartekju á ný.

Mynd 18.27. Sandauðn í Landsveit, sunnarlega í meginá foksgeirunum frá Þjórsá, sem m.a. gengur í gegnum Stóra-Klofa-svæðið (sjá mynd 18.26 í dag). Landið er komið í sand en þó eru moldir ennþá eftir á svæðinu. Á myndinni sést bæjarstæðið á Tjörvastöðum. Skarðsfjall er fyrir miðri mynd og Búrfell sést t.h. Fjöldi bæja fór í sand. Unnin voru mikil afrek á þessum tíma við að stöðva framrás sandsins, m.a. með hleðslu sandvarnargarða vítt og breitt um hinar nýju sandauðnir, sáningu melgresis o.fl. Ferðamaður nútímans áttar sig ekki á þeim hamförum sem þarna áttu sér stað. Mikilvægt er að koma í veg fyrir áföll af þessu tagi með því að klæða slík sandsvæði með birkiskógi. Ljósmynd: G.E. Flensborg 1905. Birt með leyfi Skógræktarinnar.

18.3.2. Rofabörð

Rofabörð eru sú rofmynd sem flestir kannast við, enda geta þau verið afar áberandi í landslaginu (mynd 18.29). Margir hafa orðið til þess að rannsaka rofabörð sérstaklega, t.d. Sturla Friðriksson og Grétar Guðbergsson (1995). Sigurður Þórarinsson notaði gjarnan rofabörð við rannsóknir á gjóskulögum og uppblæstri í landinu (Sigurður Þórarinsson 1961). ÓA birti yfirlitsgrein um rofabörð á ensku árið 2000 sem m.a. byggist á rofkortlagningu Rannsóknastofnunar landbúnaðarins og Landgræðslunnar (ÓA o.fl. 1997).

Það sem einkennir rofabörð er að yfirborð gróðurlendisins hörfar ásamt moldinni sem er undir svo eftir verður auðn; það er annaðhvort „allt eða ekkert“ til staðar og stutt þar á milli. Rofabörð eru yfirleitt þykkari en 50 cm og oftlega >2 m að þykkt. Þau eru fremur sjaldséð utan Íslands, en það er vegna þess að aðstæður þar sem áfok er mikið eru fremur sérstakar – það myndast þykkur grófur áfoksjarðvegur.

Moldina skortir samloðun en efst er rótarlag sem hefur meira viðnám en moldin undir og heldur torfunni saman. Það grefst smám saman undan rótarlaginu – rofabarðið hörfar smám saman. Því valda mörg ferli rofs (mynd 18.30): 1. lárétt regn hamrar stál barðsins í hvassviðri; 2. vatn rennur niður barðið; 3. vindur ber með sér skokkefni undan rótum barðsins og lemur stálið; 4. ísnálar losa um moldina svo hún rennur niður í þíðu; 5. sauðfé raskar moldinni, enda leitar það skjóls við börðin; 6. hrun verður þegar grefst undan rótarmottunni; o.fl. Það er mjög breytilegt á milli ára og landshluta hvaða ferli eru virkust. Vatnsrof er líklega virkasta aflið víða á Suðurlandi þar sem úrkoma er mikil en vindrof á þeim svæðum sem eru þurrust, svo sem á Norðausturlandi.

Rofbakkinn hörfar yfirleitt hægt hvert ár, allt frá fáum mm til >10 cm. Virknin felst ekki síst í því að lengd rofabarða á flatarmálseiningu (t.d. km lengd á hverjum ferkílómetra) getur verið mikil; þau eru jafnvel >10 km löng á hverjum km² lands og ennþá lengri ef miðað er við km² gróins lands. Því getur heildartap verið mikið á virkum rofabarðasvæðum á tilteknum tíma enda þótt hörfun stálsins á hverjum stað telji aðeins fáa cm.

Rofabörð eru afar algeng í landinu, en dreifing þeirra er þó nátengd gosbeltinu og virku áfoki þar sem moldin verður nægjanlega þykk til að mynda stall neðan

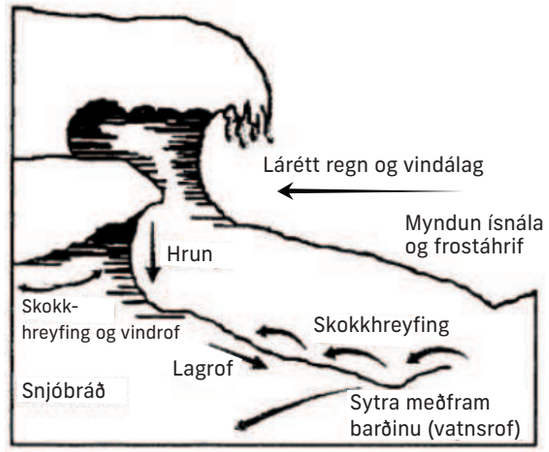
Kárahnúkavirkjun og hætta á áfoksgeirum við Hálslón

Mikil hætta getur verið á myndun áfoksgeira frá fjöruborði jökullóna með misháa lónhæð. Fíngert set sest til í fjöruborðinu og getur tekið á rás undan þurrum vindum þegar lágt er í lónum fyrri hluta sumars. Áfoksgeirar hafa t.d. myndast út frá fjöruborði Blöndulóns (Borgþór Magnússon o.fl. 2009). Jökulárnar sem renna í Hálslón eru meðal gruggugustu vatnsfalla landsins. Á vorin getur lónborð þess verið allt að 75 m lægra en þegar lónið er á yfirfalli síðla sumars.

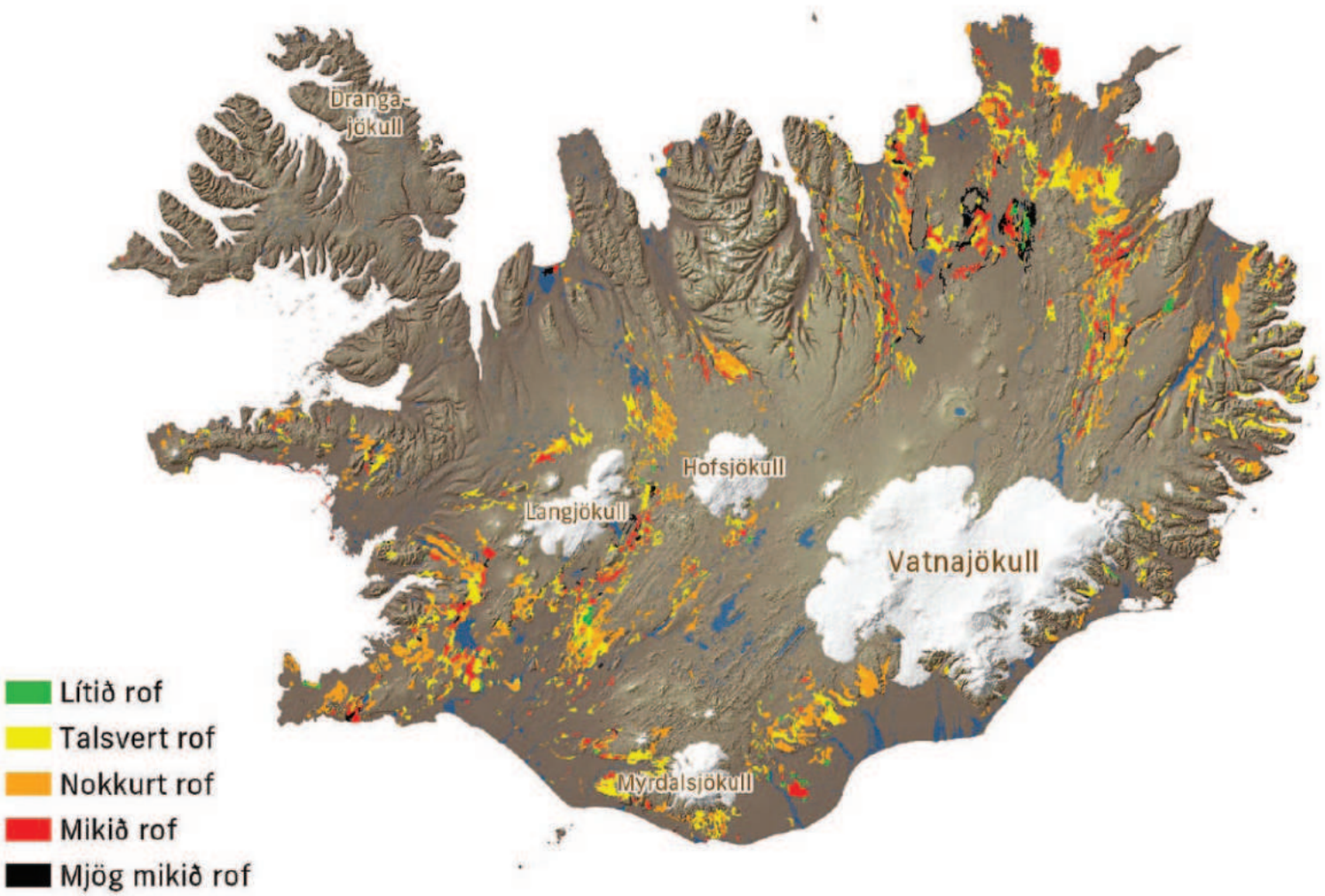
Talin var mikil hætta á myndun áfoksgeira með tilkomu Hálslóns og var það ein af ástæðunum sem Skipulagsstofnun tilgreindi þegar virkjuninni var hafnað í umhverfismati. Samkvæmt úrskurði umhverfisráðherra, sem heimilaði virkjunina, ber að koma í veg fyrir myndun áfoksgeira við Hálslón. Í þessu skyni hefur m.a. verið grafinn 5 m breiður skurður meðfram lóninu öllu að austanverðu og lagður vegur sem jafnframt er notaður til að varna foki (mynd 18.28)

Mynd 18.28. Skurður sem grafinn var meðfram Hálslóni til að taka við áfoki. Hér er skurðurinn fullur af vatni.

Mynd 18.29. Stakt rofabarð á fjallshnjúki á Suðurlandi gefur til kynna horfin landgæði. Dæmigert form stakra rofabarða. Mynd: Guðmundur Kr. Jóhannesson / Nærmynd.



Mynd 18.30. Ferli við rofabarð. Teikning úr PhD-ritgerð ÓA. Endurgerð teikning Ásu L. Aradóttur.



Mynd 18.31. Útbreiðsla rofabarða.

Mynd 18.32. Rofabarðasvæði í Þistilfirði í Norður-Þingeyjarsýslu. Rofabarðasvæði sem þessi voru mun útbreiddari hér áður fyrr og moldin hefur horfið að mestu af víðfeðmum svæðum, en einnig hafa rofabörð verið grædd upp og þau gróið í kjölfar fækkunar sauðfjár.

rótarmottunnar (mynd 18.31). Þau eru mjög áberandi á gosbeltunum, allt frá Krísuvík um Grafning í Þingvallasveit og á afréttum á gosbeltum sunnanlands og norðan. Þau eru jafnframt útbreidd í Þingeyjarsýslum, allt frá afréttum Bárðdæla, austur á Vopnafjarðarheiði og Jökuldalsheiði og út í sjó á Tjörnesi, í Öxarfirði, á Melrakkasléttu og þaðan suður, t.a.m. við norðanverðan Þistilfjörð (mynd 18.32).

Rofabörð voru líklega mun útbreiddari fyrr á öldum í samanburði við það sem nú er. Þar sem jarðvegi var hættast við rofi eru börðin, séu þau á annað borð til staðar, iðulega leifar af fyrri gróðurhulu, t.d. á afréttum sunnanlands, svo sem á Biskupstungnaafrétti og víða í Þingeyjarsýslum. Ætla má að áður fyrr hafi mikið rof átt sér stað um lengri eða skemmri tíma á hverju svæði, sem kalla mætti roftímabil. Á þeim tíma hefur lengd rofabarða verið mikil og jafnframt mikið af lausum moldarefnum í jaðri þeirra. Á roftímabilinu hafa gróf jarðvegsefni fokið upp í þann gróður sem enn tóði og því þykknaði jarðvegur mun örar en áður og varð jafnframt grófari og ennþá hættara við rofi, sem hefur haft þau áhrif að hraða rofinu. Það sem nú sést á þessum svæðum eru torfur þar sem aðstæður hamla gegn rofi, t.d. í lægðum, í skjóli í giljum eða þar sem jarðvegsraki er meiri. Þannig hagar einmitt til með gróðurtorfur á Biskupstungnaafrétti og víðar (mynd 18.33).

Á mörgum svæðum eru rofabörð að gróa upp í kjölfar minnkandi beitar, en einnig hefur víða verið unnið að því að græða þau upp, bæði í byggð og á afréttum.

18.3.3. Rofdílar

Rofdílar eru opin moldarsár í annars heilli gróðurhulu (mynd 18.34). Þeir eru oft 10–100 cm í þvermál en geta verið stærri. Rofdílar eru algengir um land allt. Myndunarsaga þeirra er oft flókin, en rannsóknir á rofdílum má m.a. finna í doktorsritgerð Jóhanns Þórssonar (2008) þar sem samspil gróðurhulu, beitar og frosts kemur við sögu.

Mynd 18.33. Rofabörð og gróðurlendi sem enn tóra. Sandsvæði sem varð til þegar áfoksgeiri gekk til suðurs frá Langjökulssvæðinu er handan hæðarinnar. Hæðin og áin hafa hjálpað til við að hægja á framrás sandsins hérna megin árinnar. En rofabörð hafa verið ráðandi rofmynd vestan árinnar (t.h.) og þær torfur sem eftir eru sitja þar sem rakaástand er betra eða skjóls hefur gætt fyrir vindi.

Rofdílar myndast gjarnan í þýfðu landi en það er þó ekki einhlítt. Það sem verður til þess að rofsárin opnast er t.d. traðk beitardýra, manna og umferð farartækja, en einnig er algengt að vindnúningur og skaraveður (ísfjúk á vetrum) opni þúfnakolla. Myndun ísnála er iðulega mikilvægur liður í að herða á myndun rofdíla eftir að rask hefur losað um yfirborðið (mynd 18.35). Eftir að rofdíll hefur myndast er hann fremur stöðugur, þ.e. rofsárið grær ekki svo auðveldlega saman á ný. Líklegt er að ísnálar valdi þar mestu um (sjá 16. kafla um kulferli) en einnig þéttur svörður og hugsanlega næringarþættir á borð við C/N-hlutfall.

Mynd 18.34. Rofdílar eru oft til merkis um ofbeit. Eftir að þeir myndast gróa þeir hægt saman því ísnálar, þéttur svörður o.fl. kemur í veg fyrir að þeir grói upp að nýju.

Aðstæður í rofdílum ýta undir myndun ísnála vegna rakaheldni og góðrar vatnsleiðni í siltríkri mold. Ísnálarnar lyfta upp nýgræðingi sem reynir að festa rætur í rofdílunum að sumri. Einnig má nefna að yfirborð rofdílanna er slétt og þétt sem er óhagstætt fyrir fræ margra plantna. Þá veldur frost því að vatn getur legið ofan á rofdílunum á vetrum þegar veður er umhleypingasamt; það getur jafnvel frosið og þiðnað á víxl, sem einnig drepur nýgræðing. Rofdílar lokast oft við það að gróður, t.d. lynggróður, vex smám saman út yfir rofdílinn, en síður við það að plöntur vaxi upp úr moldinni í miðju þeirra. Það getur tekið áratugi, ekki síst í nokkurri hæð yfir sjó.

Á láglendi eru rofdílar yfirleitt ummerki um ofbeit, og útbreiðsla þeirra er m.a. notuð til að meta ástand beitilands, svo sem hrossa og sauðfjár (Borgþór Magnússon o.fl. 1997, Sigþrúður Jónsdóttir 2010). Oft myndast rofdílar við tímabundna ofbeit, en landið getur

síðan verið áratugi að gróa saman aftur. Þannig eru rofdílar í beitilöndum, sem mynduðust þegar sauðfé var flest í landinu um 1970, ennþá mjög algengir. Víða má þó sjá ummerki um að rofdílar séu að lokast aftur þar sem fjárfjöldi hefur minnkað, en sú lokun er oft mjög hægfara.

18.3.4. Rofsár í hlíðum/jarðsil

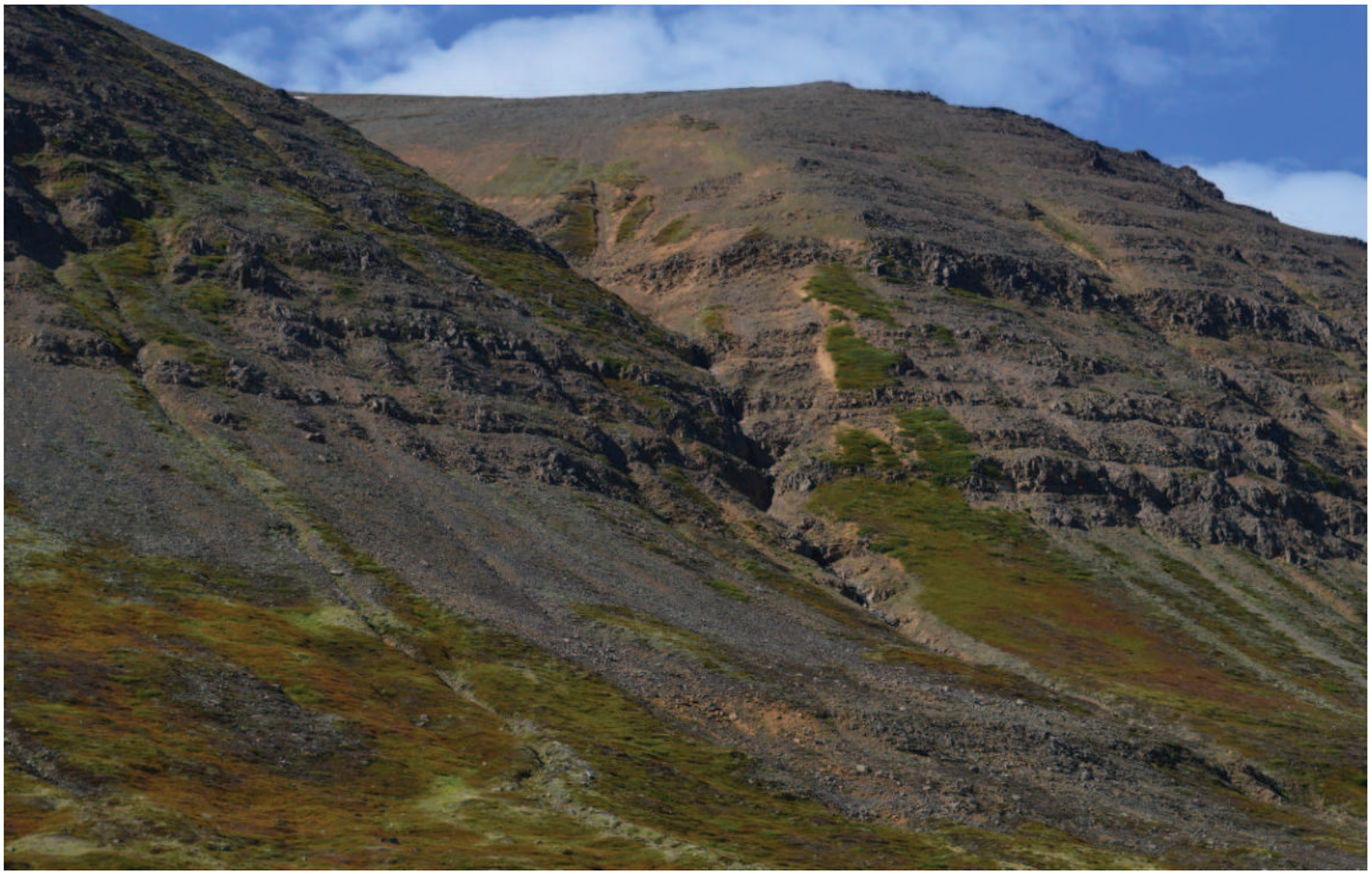
Við kortlagningu á rofi var ákveðið að leggja sérstaka áherslu á rofdíla sem myndast í hlíðum. Yfirborð í hlíðum landsins er jafnframt að skríða hægt og sígandi niður brekkuna – ferli sem er nefnt jarðsil (e. solifluction), en við það myndast ýmist stallar eða tungur í hlíðunum: paldrar og jarðsilstungur (sjá 16. kafla um kulferli). Þar sem opnast rofsár í hlíðum er jarðvegi mjög hætt við rofi því rennandi vatn kemst þá að sárinu. Við kortlagningu á rofi voru ummerki um jarðsil í hlíðum jafnframt kortlögð en rofeinkunn notuð til að merkja við ummerkin um rofið.

Ummerki um jarðsil eru afar algeng í landinu, en mikil einkenni um rofsár eru sem betur fer ekki eins algeng. Þá ber að hafa í huga að við þúsund ára búsetu í landinu hafa vistkerfi í hlíðum landsins látið undan síga, enda er einna mest hætta á rofi við þær aðstæður. Sums staðar má þó sjá stakar gróðurtorfur í hlíðum sem eru ummerki um horfin vistkerfi og vert að gefa þessum menjum ríkan gaum (mynd 18.36). Mikilvægt er að hafa í huga að rofsár í jarðsilshlíðum sjást iðulega ekki nema að horft sé niður eftir hlíðinni (mynd 18.37).

18.3.5. Vatnsrásir og skriður

Víða hafa myndast vatnsrásir í hlíðum landsins þar sem rennandi vatn kemst að moldinni. Þær geta síðan breikkað og orðið að rofabörðum beggja vegna. Hér

Mynd 18.35. Göngustígur þar sem rofdílar eru teknir að myndast, m.a. vegna þess að ísnálar hafa losað um yfirborðið.



Mynd 18.36. Jarðvegsleifar í hlíðum á Norðurlandi sem benda til þess að þær hafi áður verið mun betur grónar.

er rétt að hafa í huga, eins og á við um rofsár í hlíðum, að þar sem hlíðar eru brattar er moldin víða löngu horfin úr þeim og þar með ummerki um vatnsrásir. Það á ekki síst við um langar brekkur með löngum kúptum (e. convex) halla í hlíðum móbergsfjalla. Vatnsrásir eru því ekki eins algengar hér og vænta mætti þegar haft er í huga að moldin er víða þykk og laus í sér: aðstæður sem gjarna leiða til myndunar vatnsrása erlendis. Dýpstu vatnsrásirnar (e. gullies) er m.a. að finna í þykkum löss-jarðvegi, svo sem í Kína og Bandaríkjunum. Hérlendis er moldin einfaldlega runnin á braut frá viðkvæmustu svæðunum, eins og t.d. úr móbergshlíðum (mynd 18.38).

Moldarskriður eru afar algengar á Íslandi – ummerki þeirra finnast í flestum hlíðum ef vel er að gáð (mynd 18.39). Þær gróa gjarnan saman aftur á nokkrum árum, séu hlíðarnar grónar á annað borð. Íslenskum jarðvegi er almennt mjög hætt við skriðuföllum því hann skortir samloðun sem t.d. blaðsilíköt stuðla að í jarðvegi erlendis. Þá getur moldin tekið við afar miklu vatnsmagni, sem er eitt megineinkenni *eldfjallajarðar*.

Þegar vatnsmettaðri *eldfjallajörð* með sortueiginleika (e. andic soil properties) er raskað nær hún oft flæðimarki (e. liquid limit; sjá kafla um *eldfjallajörð*). Því eru skriðuföll afar algeng á eldfjallasvæðum jarðar. Hér á landi bætast kulferli við þær aðstæður sem stuðla að skriðuföllum. Jarðsilstungur velta gjarnan möl og grjóti á undan sér (sbr. melatígla með grjóti í jöðrunum) og hafa þannig rutt upp eins konar grjót-garði að framanverðu sem tefur skriðið en mold safnast saman aftan við. Í miklum vatnsveðrum getur þrýstingurinn orðið of mikill og þá verða skriðuföll. Landnýting hefur mikil áhrif á skriðuföll, hætta á þeim eykst hratt með vaxandi beit og svo er alls staðar í heiminum. Öflugur gróður bindur moldina saman, ekki síst skógur og kjarrgróður með víðtækt rótarkerfi. Snjóhula sem safnast að gróðri temprar einnig áhrif frosts og minnkar áhrif jarðsils. Umferð þungra beitardýra eykur hættu á skriðuföllum, t.d. þar sem hrossum eða nautgripum er beitt á brattar hlíðar. Mest eru áhrif slíkrar beitar þegar jarðvegurinn er vatnsmettaður, ekki síst á vorin og haustin.

18.4. Rof á auðnum

18.4.1. Aðstæður og útbreiðsla

Auðnir þekja um helming Íslands; þær mynda sum af útbreiddustu vistkerfum landsins. Á auðnum á sér stað mikið rof, en sandauðnir landsins teljast á meðal virkustu rofsvæða jarðar. Við flokkun

Mynd 18.37. Horft upp og niður sömu hlíðina. Jarðsilsstallar eru iðulega ógrónir að ofan og hlíðar eru metnar sem illa grónar sé horft niður eftir þeim. Sömu hlíðar geta virkað allvel grónar sé horft upp eftir þeim. Mikil losun CO_2 getur átt sér stað frá hlíðum sem þessum (sjá 22. kafla).

Mynd 18.38. Móbergshlíð í Hítardal. Löng samfelld brekka eykur á vatnsrof – móbergshlíðar eru iðulega illa grónar af þessum sökum.

á rofi á auðnum var annars vegar lagt upp með að greina í sundur helstu yfirborðsflokka auðna, en hins vegar að gefa þeim rofeinkunn. Auðnirnar eru raunar afar mismunandi að gerð, allt frá hraunum og urðarhlíðum til mela og sanda. Gjóskufall, áfok og ágangur sands hefur veruleg áhrif á þær. Þess vegna reyndist mikilvægt að greina á milli mela og sendinna mela (nefndir sandmelar) og einnig hrauna og sendinna hrauna (kölluð sandhraun). Við rofkortlagninguna (ÓA o.fl. 1997) kom í ljós að sendin svæði þekja afar stóran hluta lands (>20 000 km²). Útbreiðsla einstakra gerða auðna, þar sem einnig er greint á milli rofeinkunna, er sýnd á töflu 18.3.

Eins og sést á töflunni eru melar algengastir, en þar eru melasvæði með lítið rof (rofeinkunnir 1 og 2) með mesta útbreiðslu og eru þá innan svæða sem

Mynd 18.39. Á myndinni sjást ummerki eftir gamlar skriður, misvel grónar upp að nýju. Jarðsil er afar virkt í hlíðinni með vel formuðum tungum. Hér sést mikið í bera mold sem bæði andar frá sér CO_2 og hleypir miklu vatni inn í rigningatíð og leysingum.

eru að hluta eða mestu gróin en melar inn á milli. Hreinræktaðir melar, ef svo má að orði komast, eru tæpir 6 600 km² (rofeinkunn 3). Melar með sandi í (sandmelar) eru töluvert útbreiddari (>12 000 km² með rofeinkunn 3 eða hærri). Sendin hraun eru einnig mjög algeng. Hafa ber í huga að þessar tölur taka ekki til fjalllendis í kortlagningu á rofi, en það taldist vera um 9 794 km² og að mestu ógróið. Auðnir með rofeinkunn 3 eða hærri og fjalllendi þekja samtals yfir 40 000 km², sem er af svipaðri stærðargráðu og illa gróið og hálfgróið land samkvæmt kortlagningu Nytjalands (Fanney Gísladóttir o.fl. 2014).

Stór hluti íslenskra auðna hefur sendið yfirborð og því beinist athyglin fyrst og fremst að vindrofi þegar stöðugleiki sandauðna er metinn. Vindrof er þó aðeins hluti þeirra ferla sem eiga sér stað á auðnum. Hafa ber í huga að á vetrum myndast ógegndræpur holklaki á auðnum. Bæði geta safnast mikil snjóalög í auðnir, en einnig eru vatnsveður fremur tíð á Íslandi á vetrum og þá einnig asahláka. Þegar svo hagar til kemst vatnið ekki ofan í jörðina, heldur safnast fyrir á yfirborðinu og hefur í för með sér mikið yfirborðsrennsli.

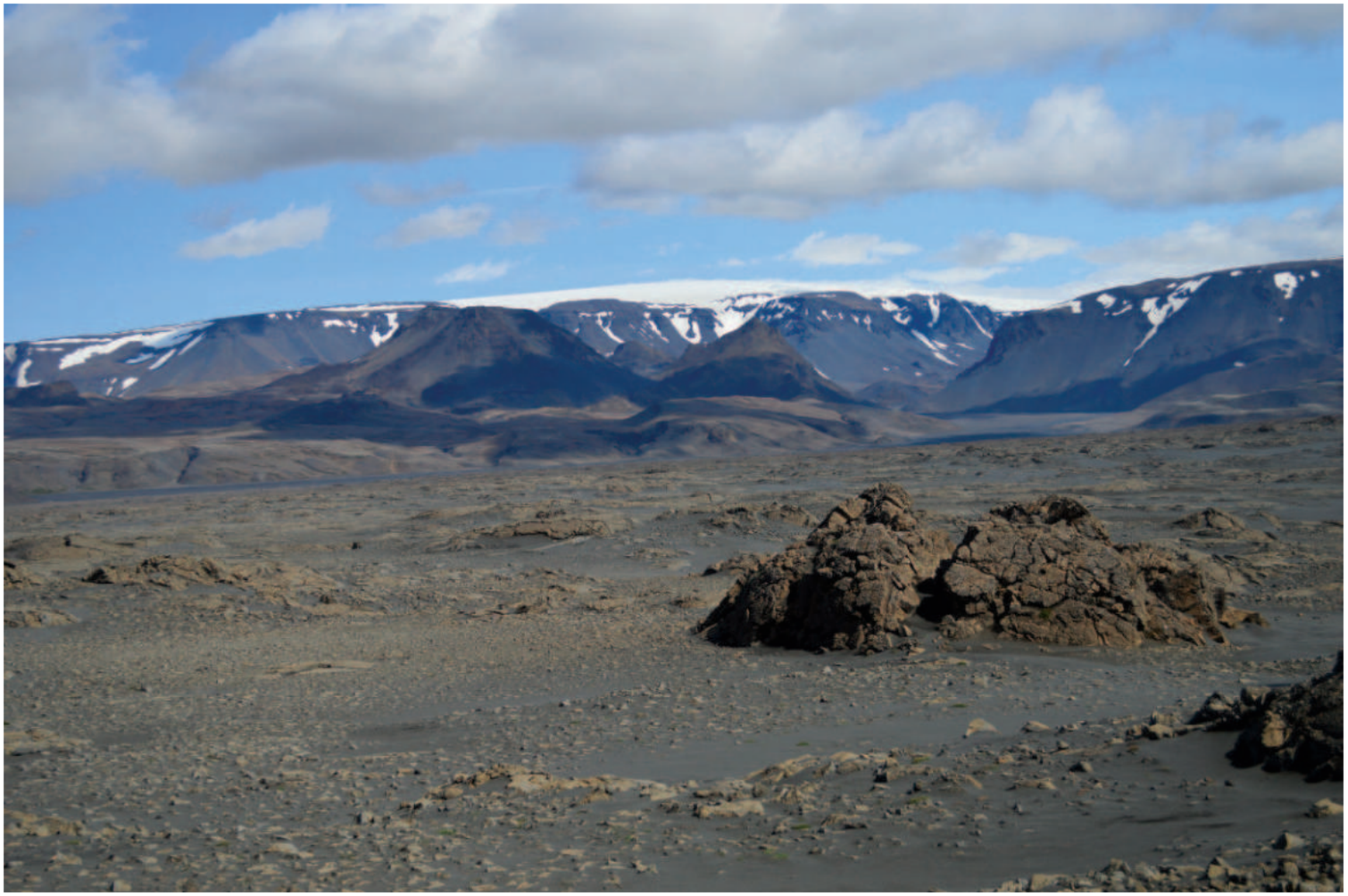
Á sendnum svæðum liggja laus efni á yfirborðinu sem berast með vatninu: vatnsrof getur verið gríðarlega mikið á sandauðnum. Það er vert að taka eftir því að jafnvel í sendnum hraunum, t.d. norðan í Skjaldbreið, þar sem langt er niður á grunnvatn og jarðgrunnurinn er afar gegndræpur, verður mjög mikið vatnsrof í vatnsveðrum á vetrum og í vorflóðum (mynd 18.40).

Áður hefur verið fjallað um myndun ísnála í yfirborði auðna og rofdíla, sem rétt er að hafa í huga varðandi yfirborðsferli á auðnum. Eitt meginmarkmið fyrstu uppgræðsluaðgerða á auðnum er einmitt að koma í veg fyrir myndun ísnála.

Hið svarta yfirborð íslenskra auðna hefur mikil áhrif á vistfræði þeirra, sem og sandfok. Þegar sólin skín getur yfirborðið auðveldlega náð >40 °C, og loftrakinn er þá iðulega ansi lítill. Þessir tveir þættir valda mjög örri uppgufun úr efstu lögum auðnanna í sólríku þurrviðri. Þær þorna því fljótt upp, sem stuðlar enn frekar að rofi. Þessi eiginleiki hefur

Tafla 18.3. Auðnir á Íslandi samkvæmt rofkortlagningu (ÓA o.fl. 1997), flokkaðar eftir rofmyndum og rofeinkunnum. Fleiri en ein rofmynd getur komið fyrir innan sama svæðis og því endurspegla flatarmálstölur ekki heildarflatarmál auðna.

	Rofeinkunn						
Rofmynd	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**Samtals**	**Samtals 3–5**
	km²						
Melar	9939	8456	6580			25.065	**6580**
Hraun	1832	228	25			2085	**25**
Sandar	195	337	318	1087	2828	4765	**4233**
Sandmelar	8	741	5407	6217	1286	13.659	**12.910**
Sandhraun	10	101	1366	1757	1620	4855	**4743**
Moldir	17	518	350	65	36	987	**451**
Urðarhlíðar	64	913	2378	1255	392	5002	**4025**
Samtals	1265	11.294	16.424	10.381	6162	56.326	**32.976**



Mynd 18.40. Sandauðn norðan Skjaldbreiðar þar sem vatnsrof er mikið á vetrum. Vindur flytur sand sem borist hefur suður frá jökullænum upp í fjallsræturnar en sem berst síðan aftur með vatni niður í móti.

vitaskuld einnig mikil áhrif á hvernig nýgræðingi reiðir af. Gróðurhulan sem verður til í upphafi landgræðsluaðgerða hefur m.a. þann tilgang að draga úr þessum hitasveiflum og varðveita vatnið með því að minnka uppgufun, auk þess sem komið er í veg fyrir myndun ísnála. Hér á eftir verður fjallað um einstakar rofmyndir auðna, en athygli er vakin á því að fjallað var um sendin yfirborð og sandfok í sérstökum kafla, enda eru íslenskir sandar mikilvægur þáttur í náttúru landsins.

18.4.2. Melar

Melar eru auðnir sem hafa grjót og möl í yfirborðinu sem verndar það að einhverju leyti fyrir vindrofi (mynd 18.41), og því var melum gefin rofeinkunn 3 við rofkortlagningu (sjá innskot hér aftar um rofeinkunnir og auðnir). Lægri einkunn var gefin þar sem melablettir komu fyrir innan um gróið land. Rannsóknir sýna að þrátt fyrir grjótyfirborðið getur töluvert vindrof átt sér stað á melum, ekki síst í aftakaveðrum. Yfirborðið er með öðrum orðum ekki stöðugt. Við vindrofið bætist vatnsrof og frosthreyfing. Á vetrum myndast ógegndræpur holklaki í melunum og í mikilli úrkomu eða við snjóbráð getur orðið mikið vatnsrof yfir vetrartímann því vatnið kemst ekki ofan í jörðina heldur rennur á yfirborðinu, jafnvel þar sem halli lands er lítill. Þá losa ísnálar um korn á yfirborðinu sem eykur hættu á vatns- og vindrofi. Ísnálarnar lækka m.a. þröskuldsvindhraða og því er mest hætta á vindrofi í kjölfar frosta. Þegar vindorf hefst á melum í aftakaveðrum (vindur >25 m/s) getur eyðingarmátturinn verið mikill; stór

korn takast á loft og lemja allt sem fyrir verður, eins og þekkt er á þeim stöðum þar sem þessar aðstæður ríkja meðfram vegum. Þá geta rúður brotnað undan grjótkasti og lakk á bílum gjöreyðilagst þegar verst lætur.

Melarnir telja margvíslegar yfirborðsgerðir, m.a. jökulurð, malarhjalla, áreyrar o.s.frv., sem vitaskuld er mishætt við rofi eftir því hve grjóthulan er mikil og hve mikið er af jarðvegsefnum í yfirborðinu.

18.4.3. Hraun

Lítil hætta er á rofi í hraunum þar sem lítið er af lausum jarðefnum. Sérstaklega er fjallað um þau svæði þar sem sandur hefur safnast saman í hraun – þ.e. sandhraun.

18.4.4. Urðarhlíðar

Víða á landinu eru brattar hlíðar þaktar grjótmulningi, svokallaðar urðarhlíðar (e. scree-slopes). Grjótið í hlíðunum er óstöðugt og skriður mjög algengar, þótt oftast séu þær litlar. Lítið er um jarðvegsefni (<2 mm) sem gerir þessar hlíðar afar ófrjósamar – jarðvegurinn telst til *bergjarðar*. Sérstaklega eru líparítskriður oft gróðursnauðar (mynd 18.42). Sem fyrr sagði má ætla að margar urðarhlíðar hafi verið mun gróðursælli áður fyrr.

18.4.5. Sandar

Sendin svæði landsins eru yfir 20 000 km² að flatarmáli. Sendin yfirborð eru flokkuð í þrjár megingerðir: **sanda**, **sandmela** og **sendin hraun**.

Mynd 18.41. Melur. Rofabörð í bakgrunninum á miðri mynd endurspegla horfin landgæði. Nokkur sandur er í yfirborðinu sem flokkast þó sem melur, en ef meira væri af sandi yrði yfirborðið „sandmelur“.

Mynd 18.42. Urðarhlíðar á Suðausturlandi, að mestu gerðar af súru bergi (líparíti).

Fjallað er ítarlegar um sandumhverfið og sandfok í 17. kafla og því er umfjöllun um sanda afar stutt hér (sjá einnig ÓA o.fl. 2019a,b).

Sandar hafa lítið af möl og grjóti í yfirborðinu sem hamla foki. Yfirborðið er alla jafna nokkuð slétt, sem einmitt stuðlar að brattri kúrfu hvað varðar vindhraða; vindhraði við yfirborðið er mikill. Þetta eru þau svæði sem hættast er við vindrofi. Þó er mikill munur á milli svæða, minnstan vind þarf til að hreyfa sand á svæðum þar sem mikið er af siltefnum í yfirborði (oft 4–8 m/s), m.a. þar sem jökulvatn lónar tímabundið á yfirborðinu. Sums staðar hafa sandar verið skilgreindir á gjóskufallssvæðum þar sem gjóskan er tiltölulega gróf (*vikurjörð*), t.d. á Veiðivatnasvæðinu og í nágrenni Heklu, og þá þarf meiri vind til að hreyfa yfirborðið (oft >10 m/s í 2 m hæð). Sökum óstöðugleika sandanna var þeim yfirleitt gefin einkunn 4 og 5 við rofkortlagningu en skikar með lægri einkunn áttu m.a. við um svæði þar sem sendin svæði komu fyrir innan um land af annarri yfirborðsgerð.

Svart yfirborð sandanna veldur því að þeir eru þurrir, eins og áður hefur komið fram, og ef þeir hitna geta myndast litlir skýstrokkar og rykstrókar (e. dust devils) auk annarra veðurfyrirbrigða.

18.4.6. Moldir

Þar sem gróður hefur rofist af einhverjum orsökum opnast moldarþekjan, t.d. í rofdílum. Stundum hagar því þannig til að stór svæði opnast í einu, t.d. sem stig í þróun áfoksgeira eða af einhverjum öðrum orsökum.

Vandamál einkunnagjafar við mat á rofi á auðnum

Rofkvarðinn sem hér var kynntur er barn síns tíma og ber það með sér að við mótun hans árið 1991 var m.a. lögð minni áhersla á jarðveg auðna meðal fagfólks.

Við mótun kvarðans var lögð höfuðáhersla á að ná utan um tap á gróðurlendi jafnframt því sem reynt var að hafa hann fremur einfaldan. Því voru gróin lönd og auðnir metnar á sama kvarða: melar fengu rofeinkunn 3, sandmelar 4 og sandar rofeinkunn 5. En í raun og veru er rof mun meira á auðnum en t.d. þar sem rofabörð fá sambærilega einkunn. Því hefði verið rétt að teygja mælikvarðann fyrir auðnir þannig að melar fengju einkunn 5 og sandar einkunn 7–10, sem dæmi.

Líklega yrði kvarðinn með þeim hætti ef hann væri þróaður í dag og þannig ætti að nota gögn af þessu tagi við mat á ástandi lands. Því þarf að gæta þess vel með hvaða hætti gögn um jarðvegsrof eru notuð, t.d. við mat á landi eða áætlun á magni rofefna, svo dæmi séu tekin.

18.5. Lokaorð

Jarðvegsrof er einn helsti umhverfisvandi veraldar. Það er fjölbreytilegt en alþjóðleg líkön eru iðulega notuð til að meta magn jarðvegsefna sem tapast með vatni og vindi. Röng landnýting er aðalástæða jarðvegsrofs á heimsvísu. Það er mikilvægur liður í almennri þekkingu á náttúrufræði landsins að kunna skil á einkennum jarðvegsrofs og gera sér grein fyrir því að virkt jarðvegsrof er ekki eðlilegt ástand landsins.

Jarðvegsrof var kortlagt á Íslandi á árunum 1991–1997 og niðurstöðurnar birtar í bókinni *Jarðvegsrof á Íslandi*. Það er ljóst að á fáum svæðum jarðar er jarðvegsrof jafnvirkt og á Íslandi og afleiðingarnar því mjög afdrifaríkar, eins og fjallað er um í köflunum hér á eftir. Aðferðafræðin sem hér var kynnt fyrir flokkun rofs og einkunnagjöf er ennþá notuð, m.a. af Landgræðslunni í ýmsum verkefnum (sjá m.a. verkefnið GróLind).

Upplýsingar um jarðvegsrof sem safnað var fyrir 1997 hafa enn gildi fyrir flokkun auðna á Íslandi; þær eru undirstaða fyrir líkanagerð um sandfok og rykmyndun á Íslandi, m.a. í alþjóðlegum spálíkönum. Þá hafa gögn um yfirborðsgerðir auðna verið notuð til að bæta grunngildi við gerð veðurspár fyrir landið í ofurtölvum. Sú þekking á jarðvegsrofi sem lagði grunninn að þessum kafla verður ennfremur undirstaðan í kaflanum um ástand lands almennt í heiminum og ástand vistkerfa á Íslandi.

Heimildir

Anderson, R.S. og S.P. Anderson 2011. Geomorphology. The Mechanics and Chemistry of Landscapes. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Anna María Ágústsdóttir 2015. Ecosystem approach for natural hazard mitigation of volcanic tephra in Iceland: building resilience and sustainability. Natural Hazards 78:1669–1691.

Arnór Sigurjónsson (ritstj.) 1958. Sandgræðslan. Minnzt 50 ára starfs Sandgræðslu Íslands. Búnaðarfélag Íslands og Sandgræðsla ríkisins, Reykjavík.

Bagnold, R.A. 1941. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes. William Morrow & Co, New York. Endurútg. Dover, London, UK.

Berglind Orradóttir, S.R. Archer, Ólafur Arnalds, L.P. Wilding og T.L. Thurow 2008. Infiltration in Icelandic Andisols: The role of vegetation and soil frost. Arctic, Antarctic and Alpine Research 40:412–421.

Borgþór Magnússon, Ásrún Elmarsdóttir og Björn H. Barkarson 1997. Hrossahagar. Aðferð til að meta ástand lands. Rannsóknastofnun landbúnaðarins og Landgræðsla ríkisins, Reykjavík.

Borgþór Magnússon, Olga Kolbrún Vilmundardóttir og Victor Helgason 2009. Vöktun á grunnvatni, gróðri og strönd við Blöndulón. Lokaskýrsla 1993–2009. Náttúrufræðistofnun NÍ-09017.

Clarke, M.L. og H.M. Rendell 2015. This restless enemy of all fertility: exploring paradigms of coastal dune management in Western Europe over the last 700 years. Transactions of the Institute of British Geographers 40:414–429.

Cooke, R., A. Warren og A. Gouide 1993. Desert Geomorphology. UCL Press, London, UK.

Crofts, R. 2011. Healing the Land. Landgræðsla ríkisins, Gunnarsholti.

Derese, C., D. Vandenberghe, N. Eggermont, J. Bastiaens, R. Annaert og P. Van Den Haute 2010. A medieval settlement caught in the sand: optical dating of sand-drifting at Pulle (N Belgium). Quaternary Geochronology 5: 336–341.

Elín Fjóla Þórarinsdóttir, Fanney Ósk Gísladóttir, Arna Björk Þorsteinsdóttir, Sigmundur Helgi Brink og Guðmundur Halldórsson 2014. Kortlagning á áfallaþoli vistkerfa í nágrenni Heklu með tilliti til öskufalls. Skýrsla til Ofanflóðasjóðs. Landgræðsla ríkisins og Landbúnaðarháskóli Íslands.

Guðrún Óskarsdóttir, Þóra Ellen Þórhallsdóttir, Anna Helga Jónsdóttir, Hulda Margrét Birkisdóttir og Kristín Svavarsdóttir 2022. Establishment of mountain birch (Betula pubescens ssp. tortuosa) on a glacial outwash plain: Spatial patterns and decadal processes. Ecology and Evolution 2022;12:e9430.

Fanney Ósk Gísladóttir, Ólafur Arnalds og Guðrún Gísladóttir 2005. The effect of landscape and retreating glaciers on wind erosion in South Iceland. Land Degradation and Development 17:177–187.

Fanney Ó. Gísladóttir, Sigmundur Helgi Brink og Ólafur Arnalds 2014. Nytjaland. Rit LbhÍ nr. 49. Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.

Friðþór Sófus Sigurmundsson, Guðrún Gísladóttir og Hreinn Óskarsson 2014. Decline of birch woodland cover in Þjórsárdalur Iceland from 1587 to 1938. Human Ecology 42:577–590.

Friðrik G. Olgeirsson 2007. Sáðmenn sandanna. Saga landgræðslu á Íslandi 1907–2007. Landgræðsla ríkisins, Gunnarsholti.

Guðmundur Halldórsson, Anna María Ágústsdóttir, Ása L. Aradóttir, Ólafur Arnalds, C. Nilsson, Hreinn Óskarsson, L. Mortensen, Emmanuel Pagneux, K. Pilli-Sihvola, K. Raulund-Rasmussen, Kristín Svavarsdóttir og A. Tolvanen 2017. Ecosystem Restoration for Mitigation of Natural Disasters. TemaNord 2017:546.

Guðmundur Páll Ólafsson 2011. Vatnið í náttúru Íslands. Mál og menning, Reykjavík.

Hudson, N. 1985. Soil Conservation. 3. útg. Badsford Ltd, UK.

Jóhann Þórsson 2008. Desertification of high latitude ecosystems: Conceptual models, time-series analyses and experiments. Doktorsritgerð, Texas A&M University, College Station, Texas, USA.

Kirkby, M.J. og L.J. Bracken 2009. Gully processes and gully dynamics. Earth Surface Processes and Landforms 34:1841–1851.

Kirkby, M.J. og R.P.C. Morgan 1980. Soil Erosion. Wiley, Chichester, UK.

Morgan, R.P.C. 2004. Soil Erosion and Conservation. 3. útg. Wiley-Blackwell, UK.

Mutchler, C.K., C.E. Murphree og K.C. McGregor 1994. Laboratory and field plots for erosion research. Í: R. Lal (ritstj.), Soil Erosion Research Methods 2. útg. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa, USA. Bls. 11–37.

Ólafur Arnalds 2000. The Icelandic rofabard soil erosion features. Earth Surface Processes and Landforms 25:17–28.

Ólafur Arnalds, Elín Fjóla Þórarinsdóttir og Fanney Ósk Gísladóttir 2019a. Sandauðnir, sandfok og ryk á Íslandi I. Sandar og fok. Náttúrufræðingurinn 89:34–47.

Ólafur Arnalds, Pavla Dagsson-Waldhauserová og Haraldur Ólafsson 2016. The Icelandic volcanic aeolian environment: Processes and impacts – A review. Aeolian Research 20:176–195.

Ólafur Arnalds, Pavla Dagsson-Waldhauserová og Sigmundur Helgi Brink 2019b. Sandauðnir, sandfok og ryk á Íslandi I. Áfok og ryk. Náttúrufræðingurinn 89:132–145.

Ólafur Arnalds, Bryndís Marteinsdóttir, Sigmundur Helgi Brink og Jóhann Þórsson 2022. A framework model for current land condition in Iceland. Grein í ritrýningu.

Ólafur Arnalds, Elín Fjóla Þórarinsdóttir, Sigmar Metúsalemsson, Ásgeir Jónsson, Einar Grétarsson og Arnór Árnason 1997. Jarðvegsrof á Íslandi. Landgræðsla ríkisins og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, Reykjavík.

Pierson Jr., F.B. 2000. Erosion models: use and misuse on rangelands. Í: Ólafur Arnalds og S. Archer (ritstj.), Rangeland desertification. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Holland. Bls. 67–87.

Pye, K. og H. Tsoar 1990. Aeolian Sand and Sand Dunes. Unwin Hyman Ltd, London, UK.

Ritter, D.F., R.C. Kochel og J.R. Miller 2011. Process Geomorphology. 5. útg. Waveland Press Inc, Long Grove, Illinois, USA.

Robertson, A., Sveinn Runólfsson og Ingvi Þorsteinsson 2008. Grjótgarðar í landgræðslu á Íslandi. Landgræðsla ríkisins, Gunnarsholti.

Sevink, J., E.A. Koster, B. van Geel og J. Wallinga 2013. Drift sands, lakes, and soils: the multiphase Holocene history of the Laarder Wasmeren area near Hilversum, the Netherlands. The Netherlands Journal of Geosciences-Geologie en Mijnbouw 92:243–266.

Sigurður Greipsson 2012. Catastrophic soil erosion in Iceland: Impact of long-term climate change, compounded natural disturbances and human driven land-use changes. Catena 98:41–54.

Sigurður Þórarinsson 1961. Uppblástur á Íslandi í ljósi öskulagarannsókna. Ársrit Skógræktarfélags Íslands 1960–1961:17–54.

Sigþrúður Jónsdóttir 2010. Sauðfjárhagar. Leiðbeiningar við mat á ástandi beitilanda. Landgræðsla ríkisins, Gunnarsholti.

SRM 1992. Society for Range Management Position Statements. Trailboss News, Desember 1992:5.

Stallings, J.H. 1957. Soil Conservation. Prentice-Hall, Engelwood Cliffs, New Jersey, USA.

Sturla Friðriksson og Grétar Guðbergsson 1995. Hraði gróðureyðingar við rofabörð. Freyr 1995(5):224–231.

Sveinn Runólfsson og Arna Björk Þorsteinsdóttir 2018. Saga sand- og landgræðslu í Skarði í Landsveit. Rit Landgræðslu ríkisins 2018/12.

Wilding, L.P. og L.T. West 2012. 33.1 Introduction: General characteristics of soil orders and global distributions. Í: P.M. Huang, L. Yuncong, M.E. Sumner (ritstj.), Handbook of Soil Sciences. Properties and Processes. 2. útg. CRC Press, Taylor Francis, New York, USA. Bls. 33.3–33.8.

Þóra Ellen Þórhallsdóttir 2015. Saga gróðurs og umhverfis á Brunasandi. Dynskógar: Héraðsrit Vestur-Skaftfellinga. Bls. 1–70.

Þóra Ellen Þórhallsdóttir og Kristín Svavarsdóttir 2022. The environmental history of Skeiðarársandur Outwash Plain, Iceland. Journal of North Atlantic 43(12): 1-21.

Þröstur Eysteinsson 1994. Áfoksgeiri við Kringlutjörn. Í: Andrés Arnalds (ritstj.), Græðum Ísland V. Landgræðsla ríkisins, Gunnarsholti. Bls. 135–141.

19 Umsátrið um landvistkerfi – hnignun og ástand lands

Mynd 19.1. Land í hnignuðu ástandi. Hér sjást gróðurtorfur þar sem áður var gróið land á Suðurlandi.

Lykilhugtök umhverfisfræða!

Segja má að hugtökin „**landhnignun**“ og „**ástand lands**“ séu núorðið meðal lykilhugtaka umhverfisfræða og innifeli einhver mikilvægustu viðfangsefni vísinda samtímans.

19.1. Landhnignun og ástand lands – lykilhugtök umhverfisfræðinnar

Það verður æ ljósara að vistkerfi jarðar hafa víða skaðast verulega og jafnvel hrunið vegna ofnýtingar mannsins. Barátta fyrir verndun umhverfisins verður sífellt fyrirferðarmeiri hluti umhverfisvísinda og tekur til æ fjölbreyttari viðfangsefna á borð við lög, félagsfræði og stjórnmál auk náttúruvísinda.

Þekkingaröflun og verkefni er lúta að landhnignun og ástandi lands krefjast vistfræðilegrar nálgunar á þverfaglegum grunni þar sem bæði vistfræði og jarðvegsfræði eru afar mikilvægar faggreinar, en einnig er þörf fyrir aðkomu samfélagsfræða af ýmsu tagi. Í raun eru „ástandsfræðin“ að verða á meðal mikilvægustu viðfangsefna jarðvegsfræða – á breiðum vistfræðilegum grunni – í ljósi bágs ástands vistkerfa jarðar.

Áhrif landnýtingar á íslensk vistkerfi eru meiri en víðast hvar annars staðar í heiminum, en samt hefur slæmu ástandi landsins verið tekið sem sjálfsögðum hlut. Það er alþjóðlegt vandamál. Skort hefur á aðgengilega umfjöllun um landhnignun og ástand lands á íslensku, sem og aðgengilegt yfirlit um ástand og hrun íslenskra vistkerfa, m.a. fyrir nemendur, kennara og fagfólk sem kemur að nýtingu lands. Að ekki sé talað um alla þá er láta sig náttúru landsins varða. Í þessum kafla er gerð tilraun til að bæta úr þessari þörf.

Í umfjölluninni hér á eftir verður víða komið við. Fyrst er rætt um landhnignun almennt og síðan ástand lands þar sem ýmsir þættir jarðvegs eru mikilvægir. Svokallaðar „undirliggjandi ástæður landhnignunar“ eru þýðingarmikill hluti umfjöllunarefnisins sem fá sérstaka athygli í 21. kafla þar sem m.a. er rætt um „rangsnúna hvata“ sem drífa skaðlega landnýtingu, landbúnaðarstyrki, „samdaunasýki“ og „stofnanayfirtöku“. Allt eru þetta þættir sem varpa ljósi á af hverju svo hægt miðar að taka á augljósum vanda vegna hruns vistkerfa, jafnt alþjóðlega sem og hérlendis.

Hrun íslenskra vistkerfa er síðan rætt í næsta kafla (20. kafli) á undan umfjöllun um drifkrafta hnignunar (21. kafli).

Landhnignun (e. land degradation) felur í sér skerta virkni og þjónustu vistkerfa. Hún tekur til moldar, gróðurhulu og lífríkisins í heild – þ.e. vistkerfa. Líffjölbreytileiki er meðal þeirra þátta sem skaðast þegar vistkerfum hnignar. Landhnignun getur jafnframt haft áhrif á veðurfar á breiðum grunni.

Landbúnaður aflar verðmæta sem metin eru á um 2 000–4 000 þúsund milljarða dollara á ári – afurða sem fæða og klæða jarðarbúa – en mat á verðmætasköpuninni er misjafnt eftir heimildum (sjá t.d. heimasíðu CropLife.org). Mikilvægi landbúnaðar sem starfsgreinar verður seint ofmetið. Umhverfiskostnaður framleiðslunnar er þó gríðarlegur og afleiðingin er hnignun landkosta víða um lönd í nútíð og fortíð. Yfirborð jarðar er orðið annað en áður var – áhrif mannsins eru svo gríðarleg og víðtæk. Landhnignun veldur vaxandi álagi á þær auðlindir sem eftir eru, sem á endanum getur orsakað hungur, fólksflutninga og jafnvel styrjaldir. Menning er háð frjórri mold og hnignun menningarríkja í sögu mannkyns er iðulega tengd ofnýtingu jarðvegs og rangri nýtingu áveituvatns (t.d. Juo og Wilding 1997). Í Mesópótamíu, á milli ánna Efrat og Tígrís, risu 11 menningarveldi á 7 000 árum sem hnigu til viðar í kjölfar skógarhöggs, ofbeitar og eyðingar jarðvegs. Menningarríki Maya í Mið-Ameríku, Grikkland til forna

og Rómarveldi eru einnig dæmi um ríki sem risu með auði moldar og hnignaði í kjölfar ofnýtingar sem hafði jarðvegsrof og önnur ferli landhnignunar í för með sér. Ástand þjóðfélaganna fyrir botni Miðjarðarhafs nú á dögum, með tilheyrandi stríðsrekstri og hörmungum, má að hluta til rekja til ofbeitar (t.d. Serra 2015). Líkur hafa verið færðar fyrir því að landhnignun hafi orsakað breytingar á loftslagi í norðanverðri Afríku – að sandauðnin mikla sé að hluta til orðin til vegna áhrifa mannsins (Wright 2017).

Ofnýting leiðir til vítahrings landhnignunar (mynd 19.2) sem Íslendingar þekkja mætavel af sögu sinni. Vítahringurinn getur hafist á svæðum þar sem dregur úr frjósemi og gróðurhulan rýrnar verulega vegna ósjálfbærrar landnýtingar. Afleiðingin er iðulega sú að minna vatn sígur ofan í moldina og meira vatn rennur burt á yfirborði, sem leiðir til jarðvegsrofs og takmarkaðs framboðs á vatni fyrir vöxt plantna og jafnvel til neyslu í samfélaginu. Það dregur úr framleiðni gróðurs og orkunámi kerfisins þannig að minna lífrænt efni leggst til moldarinnar en áður; orkuforði, frjósemi og vatnsheldni þverr. Með skertri gróðurþekju aukast einnig líkur á frostlyftingu, sem hindrar landnám gróðurs og stuðlar að rofi. Jafnframt eykst álag á þau vistkerfi sem ennþá eru heil því minna er til skiptanna. Þar sem vegferð innan víta hringsins er hafin verða afleiðingarnar hörmulegar nema gripið sé inn í atburðarásina í tíma.

Mynd 19.2. Vítahringur landhnignunar. (Mynd úr „Að lesa og lækna landið", bls. 82; ÓA og Ása L. Aradóttir 2015; byggt á Whisenant 1999).

19.2. Ferli – samantekt

Ferli landhnignunar eru margbreytileg (tafla 19.1). Tap á kolefni og næringarforða er eitt meginferlið. Þá geta orðið neikvæðar breytingar á ýmsum jarðvegseiginleikum, svo sem vatnsbindingu, ísigi, sýrustigi, jónrýmd o.fl. Mengun er vaxandi vandamál víða um heim, ekki síst af völdum þrávirkra lífrænna efna frá iðnaði og vegna notkunar eiturefna í landbúnaði, svo sem skordýraeiturs og illgresiseyðis. Allt eru þetta ferli sem raska eigindum og ferlum innan vistkerfa – og veldur landhnignun. Hér verður lögð áhersla á moldarþætti og m.a. rætt nánar um tap á frjósemi jarðvegs, uppsöfnun salta í jarðvegi („söltun" vistkerfa), „að fara í sand" og auðnamyndun (eyðimerkurmyndun). Fjallað er um jarðvegsrof og rask á votlendum í öðrum köflum ritsins.

19.2.1. Minnkuð frjósemi og framleiðni vistkerfa

Þegar gróður rýrnar vegna of mikils álags skerðist jafnframt frumframleiðni því orkunám og vinnsla á kolefni úr andrúmsloftinu fyrir tilstuðlan ljóstillífunar dregst saman. Minni orka berst í moldina (kolefni) sem skerðir örverustarfsemi og hringrás næringarefna. Það sama gerist þegar gróðurhulan minnkar. Ofnýting, hvort heldur sem er af völdum beitar eða akuryrkju, veldur því að kolefnis- og næringarforði minnkar smám saman.

Skert frjósemi vistkerfa er víðtækasta form landhnignunar á jörðinni, en það er afar misjafnt hve langt þessi hnignun hefur gengið. Yfirleitt er hún alvarlegust á jaðarsvæðum þar sem frumframleiðni er takmörkuð af náttúrunnar hendi, t.d. þar sem úrkoma eða kuldi skerða þanþol kerfanna (Cherlet o.fl. 2018). Með öðrum orðum: kerfi eru margbreytileg og þau bregðast misjafnlega við álagi og tegund landnýtingar (mynd 19.3). Víðtæk landhnignun á sér stað vegna búfjárbeitar á jörðinni. Í *World atlas of desertification* (Cherlet o.fl. 2018) segir:

> **Búfénaður hefur mest áhrif á vistkerfi jarðar**
>
> „Það er ólíklegt að nokkur önnur mannleg starfsemi hafi meiri umhverfisáhrif á land jarðarinnar þegar litið er til gríðarlegs umfangs búfjárframleiðslu á hnettinum.“ (lausleg þýðing ÓA)[1]

Öll kerfi má ofnýta – líka þau frjósömu – og það á sér einmitt stað um þessar mundir víða á frjósömustu svæðum Afríku (mynd 19.4), Asíu og Suður-Ameríku. Við stórfellda skógareyðingu minnkar frumframleiðnin og hrun vistkerfa getur fylgt í kjölfarið. Sums staðar er langt síðan kerfum hnignaði á núverandi stig, t.d. víða umhverfis Miðjarðarhafið, en styttra er síðan það gerðist á amerísku meginlöndunum. Ísland er iðulega tekið sem dæmi um land þar sem frjósöm vistkerfi hafa hrunið, m.a. vegna þess að öll moldin sem fyrir var hefur tapast á stórum svæðum (t.d. Imeson 2012, Cherlet o.fl. 2018, bls. 109, Diamond 2005).

Kolefnisforðinn er góður mælikvarði bæði fyrir ræktuð kerfi og óplægð beitilönd. Síðan geta önnur form landhnignunar bæst ofan á skerta frjósemi kerfisins, m.a. þegar gróðurhula minnkar eða breytist til hins verra (á við um stærsta hluta Íslands), landið fer í sand eða sölt safnast fyrir í kerfinu, svo dæmi séu tekin.

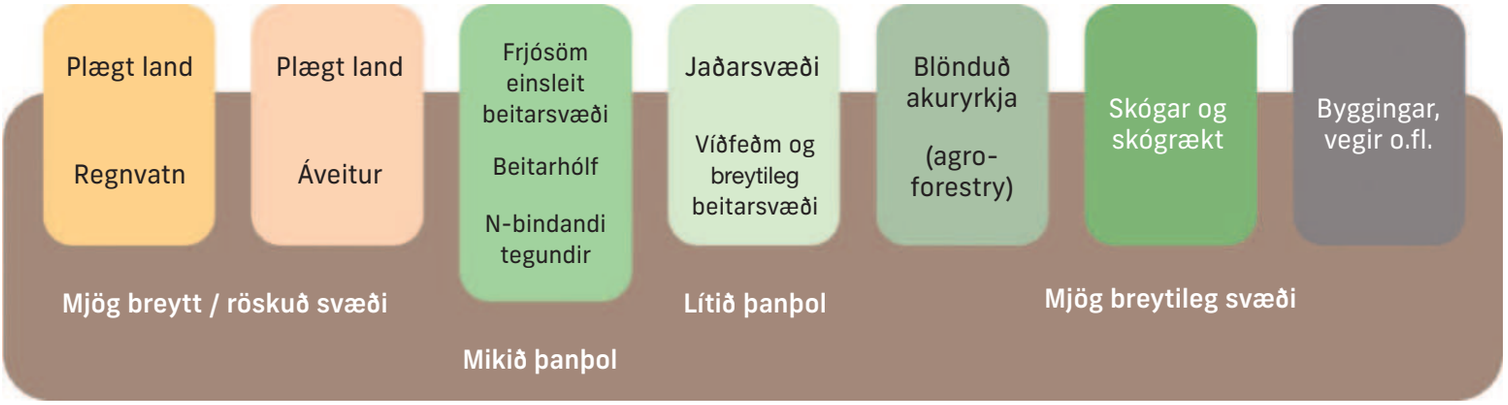
19.2.2. Seltuvandi

Alvarleg og útbreidd birtingarmynd landhnignunar er „söltun jarðvegs“ eða

1. „Given the massive scale of livestock production systems, it is unlikely that any other single human activity has a larger environmental impact on the terrestrial land mass of the planet“ (Cherlet o.fl. 2018, bls. 62).

Tafla 19.1. Helstu ferli landhnignunar.

Ferli eða tegund ferla	Áhrif	Athugasemdir
Minnkuð frjósemi og framleiðni vegna nýtingar	Næringarforði tapast og hæfileiki til að miðla næringu og vatni.	Mörg ferli, tapast lífræn efni o.fl.
Jarðvegsrof	Sá hluti moldar sem geymir og miðlar næringu og vatni tapast.	Vindrof, vatnsrof, setmyndun o.fl.
„Söltun“ – seltuvandi	Sölt safnast fyrir í mold. Gróður nær ekki upp vatni og skrælnar.	Na^+ meginvandamálið
„Fara í sand“	Sandur tekur yfir. Skortir leir og lífræn efni. Hæfileiki til að miðla næringu og vatni tapast.	E: sandification
Mengun	Áhrif háð tegund mengunar, mengun frá námum og verksmiðjum, eitri í landbúnaði, samgöngum, hernaðarumsvifum, súru regni o.fl.	Fjölbreytt ferli
Þéttbýli (mannvirki)	Mold fjarlægð eða þakin ógegndræpum efnum svo sem steypu og malbiki.	E: soil sealing
Þurrkun votlenda	Áhrif á vatnsmiðlun og dýralíf langt út fyrir svæði meginrasks. Oft lækkun yfirborðs.	Smám saman eyðist lífræni forði kerfanna
Tap á líffjölbreytileika	Öll ferli hnignunar hafa áhrif á líffræðilega fjölbreytni, ofanjarðar og í mold.	Einnig geta búsvæði og vistgerðir tapast
Auðnamyndun/ eyðimerkurmyndun	Framleiðni minnkar mikið, oft minni hlutdeild gróðurs í yfirborðinu, geta moldar til næringar og vatnsmiðlunar verulega skert.	E: desertification (eða severe land degradation)



Mynd 19.3. Ólíkar tegundir landnýtingar sem mótast af þeim kerfum sem eru notuð. Hnignun vistkerfa er með misjöfnum hætti eftir tegund landnýtingar. Álag, miðað við þanþol kerfanna, er iðulega mest við beitarnýtingu á víðfeðmum jaðarsvæðum sem hafa tiltölulega lítið þanþol. Miklu skiptir að mat á ástandi lands taki mið af lífheimi og tegund landnýtingar – ekki er hægt að nota óbreyttar aðferðir á milli svæða, enda þótt um þau gildi sömu grundvallaratriði.

„seltuvandi“ (e. salinization). Þegar jarðvegurinn verður saltur tekur Na^+-jónin stóran hluta jónrýmdarsæta[2] í moldinni. Sýrustig verður þá mjög hátt (pH >8,4). Plöntur geta yfirleitt ekki nýtt sér saltan jarðveg nema mjög sérhæfðar tegundir upp að vissu marki. Söltun á sér einkum stað með tveimur mismunandi ferlum: annars vegar vegna uppgufunar vatns á áveitusvæðum og hins vegar vegna útskolunar á söltum frá jarðvegi niður í lægðir. Þegar Na^+ er í vatninu tekur það að ryðja öðrum jónum úr jónrýmdarsætum sem skolast síðan út. Na^+ tekur þannig hægt og sígandi yfir kerfið.

Vitaskuld er áveitusvæði einkum að finna þar sem loftslag er þurrt og því er uppgufun alla jafna mikil. Þegar vatnið gufar upp verða söltin eftir í efsta lagi jarðvegsins og byggja þannig smám saman upp seltuvanda. Söltun verður ef mikið vatn af slæmum gæðum er látið standa uppi í moldinni í lengri tíma. Seltuvandi er tröllaukið vandamál þar sem áveitur eru notaðar í ræktun, t.d. í löndunum við Bengalflóa og víðar.

Á þurrum beitarsvæðum getur salt skolast úr mold á landi sem stendur hærra í landslaginu niður í lægðir og safnast þar fyrir í „saltpækla“, ekki síst þegar gerir orkumikið úrfelli á heitari svæðum jarðar. Þetta er algengt og vaxandi vandamál í Ástralíu og víðar þar sem þurr og viðkvæm svæði hafa verið ofbeitt og gróðurhulan skert.

Mjög erfitt er að endurheimta vistkerfi sem hafa orðið saltinu að bráð. Þá þarf að nota mikið af hreinu vatni til að skola söltunum niður úr moldinni, sem og að kalka til að skipta Na^+-jóninni út fyrir Ca^{++} í jónrýmdarsætum. Yfirleitt er hvorki hreint vatn né kalk fyrir hendi. Mikilvægt er að drena svæðin vel inn á milli og skola þannig söltum niður. Áveituvatn á iðulega uppruna sinn fjarri notkunarstað, vatnið rennur um langa vegu úr fjalllendi niður á láglendissvæði þar sem það er nýtt. Landnýting þar sem úrkoman fellur er lykilatriði fyrir gæði vatns sem þaðan kemur, en einnig landnýting á leið vatnsins niður eftir vatnasviðinu. Gróskumikil og stöðug vistkerfi sía vatnið og skila því hreinu niður á láglendið en hnignuð og hrunin vistkerfi skila menguðu vatni, sem getur haft mjög alvarlegar afleiðingar þar sem vatnið er notað til áveitu. Áveitur ofarlega á vatnasviðum geta einnig mengað vatnið og dregið úr gæðum þess til vökvunar neðar á vatnasviðunum.

19.2.3. „Að fara í sand“ (e. sandification)

Áður var minnst á að margir þættir í moldinni breytast hægt enda þótt ástand vistkerfisins versni til muna, t.d. kornastærð, leirinnihald og sýrustig.

Kolefnið: mælikvarði á ástand vistkerfa

Algengasti mælikvarðinn á hnignun í formi minnkaðrar frjósemi er kolefnisforði moldarinnar sem endurspeglar heildarmagn lífrænna efna.

Lífræn ferli vistkerfisins eru háð lífrænu efnunum í moldinni. Magn og hringrás helstu næringarefna, svo sem niturs, fosfórs og súlfúrs, er sömuleiðis nátengd magni kolefnis. Lífrænu efnin móta einnig aðra efnaþætti og eðliseiginleika sem móta frjósemi moldarinnar.

2. Jónrýmd er mælikvarði á hæfileika jarðvegs til að miðla katjónum á borð við Ca^{++}, Mg^{++}, Na^+ og K^+. Jónrýmdarsæti eru utan á neikvætt hlöðnum örefnum moldarinnar (leir og lífræn efni) þar sem jónirnar setjast en er síðan miðlað til róta plantna.

Mynd 19.4. Efri mynd: Dæmi um aukna landnýtingu í bröttum hlíðum frjósamra héraða í vesturhluta Úganda. Skógurinn er að hverfa en sums staðar hefur landið verið plægt upp og niður hallann – sem stóreykur á jarðvegsrof (sjá umfjöllun um vatnsrof í síðasta kafla). Rof og landhnignun vex nú almennt hröðum skrefum í þessu fjalllendi. Neðri mynd: þung búfjárbeit í vesturhluta Úganda hefur fjarlægt mest af gróðurhulunni – rof vex ört. Rofabarð í forgrunni.

Yfirleitt beinist athyglin fyrst að gróðurþáttum við mat á ástandi lands, t.d. þekju eða tegundasamsetningu. En moldarþættirnir eru ekki síður mikilvægir og áður var vikið að lífrænum efnum og næringarefnum. Miklar breytingar eiga sér stað þegar vistkerfi verða sandi að bráð með alvarlegum afleiðingum. Hér er átt við það þegar sandur gengur inn yfir landið eða þegar fínefni tapast smám saman úr vistkerfum við endurtekna rofferla, bæði af völdum vatns og vinda. Yfirleitt á hvorutveggja sér stað: áfok sands og tap á fínefnum með uppfoki (ryk).

Þetta ferli hefur verið nefnt „sandification" í erlendum heimildum, einkum frá Asíu (t.d. Shi o.fl. 2000) en við þekkjum ferlið af máltækinu „að fara í sand" (mynd 19.5). Vistkerfum, þar sem mikill sandur einkennir bergefni í umhverfinu, t.d. sandsteinn, er mjög hætt við þessu ferli. Við það að fara í sand tapast lífrænu efnin og leir úr kerfinu – kornastærðin breytist. Það hefur stórvægilegar breytingar á vatnsheldni kerfisins í för með sér, möguleikar til vatnsmiðlunar verða takmarkaðir. Þegar allir ferlarnir sem hér er lýst eru lagðir saman: skortur á gróðurþekju, tap á orku, næringarefnum og hæfileika moldarinnar til að miðla vatni, má telja að vistkerfið hafi hrunið algjörlega (sbr. skilgreiningar á vistkerfishruni, t.d. Bland o.fl. 2018). Þar sem úrkoma er takmörkuð, t.a.m. í suðvesturríkjum Bandaríkjanna, er nánast ógjörningur að endurheimta fyrri vistkerfi við slíkar aðstæður. Slíkt vistkerfishrun nær eiginlega út fyrir flest viðmið sem notuð eru til að ákvarða ástandsstig og hnignun vistkerfa og er líkt „seltuvanda" að þessu leyti.

Mörg íslensk vistkerfi hafa farið í sand, ekki síst vegna framrásar áfoksgeira[3], sem skýrir af hverju þeir hafa verið svo örlagaríkir fyrir íslensk vistkerfi sem raun ber vitni, og að hluta af hverju auðnirnar hafa ekki gróið að nýju þótt langt sé um liðið frá því að þær urðu fyrir ágangi sands. Á Íslandi er mikilvægt að hylja land sem fer í sand fullkomlega með gróðri og byggja upp rótarmottu og öfluga næringarumsetningu – helst kjarrlendi. Landgræðslusvæði sem einkennast af sandi ætti ekki að afhenda aftur til nýtingar nema landið sé hulið kjarrgróðri og með ströngum skilyrðum (Starfshópur LbhÍ 2016). Lífræn jarðvegsskán er oft forsenda þess að koma framvindu á rétta braut á ný. Hún gerir yfirborðið stöðugra og leggur til næringarefni, eins konar „startkapítal" fyrir landnám gróðurs.

3. Áfoksgeirar myndast þegar sandur gengur inn yfir gróið land og framkallar „snjóboltaáhrif" þannig að sífellt meira af lausum efnum berst undan þurri vindátt. Þeir eru iðulega tungulaga og ganga inn í gróna landið, en í kjölfarið myndast fremur beinar línur í landslaginu sem skilja á milli gróins lands og sandsvæða eða auðna. Sjá 18. kafla.

Mynd 19.5. Land sem er farið í sand. Myndin til vinstri er tekin á Jordana-rannsóknastöðinni í Nýju-Mexíkó en til hægri má sjá Monument Valley í landi Navahó-indíána í Arizona og Utah. Í báðum tilfellum er ofbeit um að kenna, en langt er um liðið síðan hrunið átti sér stað. Mikið rof einkennir svæðin og minnir um margt á aðstæður á Hólsfjöllum og víðar á Íslandi. Næsta ómögulegt er að koma landi sem þessu aftur í upprunalegt horf vegna lítillar úrkomu og skorts á vatnsheldni og lífrænum efnum í moldinni. Orkunám er afar takmarkað.

19.2.4. Auðnamyndun – eyðimerkurmyndun – alvarleg landhnignun

„Auðnasáttmálinn“ er einn af svokölluðum umhverfissamningum Sameinuðu þjóðanna. Hann er helgaður alvarlegri landeyðingu og í fyrri útgáfum var fyrst og fremst lögð áhersla á þurrkasvæði jarðar. Á ensku heitir hann „United Nations Convention to Combat Desertification“, skammstafað „UN-CCD“. Tilurð samningsins á rætur að rekja til mikilla þurrka sem herjuðu á Sahel-svæði Afríku, sunnan Sahara-eyðimerkurinnar, eftir miðja 20. öld. Þurrkarnir takmörkuðu framleiðni svæðanna meðan á þeim stóð, en hnignunin gekk að sumu leyti til baka þegar úrkoman jókst á ný. Það varð til þess að því var haldið fram að „auðnamyndun“ (e. desertification) eða alvarleg landhnignun ætti sér almennt ekki stað (Forse 1989, Pearce 1992) – að frekar væri um að ræða eðlilegan breytileika í veðurfari og viðbrögð vistkerfa við þeim sveiflum – sem er vitaskuld ekki rétt, en úrkoma og þurrkar hafa auðvitað áhrif á viðgang vistkerfa á þurrum svæðum jarðar. Þessi atburðarás varð tímabundið til þess að það fjölgaði í röðum þeirra sem afneituðu landnýtingarvanda og alvarlegu ástandi lands.

Hugtakið „**auðnamyndun**“ (eða „eyðimerkurmyndun“, e. desertification) er vandræðahugtak sem tók mið af úreltum viðmiðum og þekkingu áður en samningi Sameinuðu þjóðanna um auðnamyndun (UN-CCD) var náð árið 1994. Samningurinn varð til að hluta í tengslum við ráðstefnu Sameinuðu þjóðanna í Kenýa árið 1977 þar sem vistfræðileg viðhorf voru ekki áberandi í umræðum. Í upphafi var samningurinn og hugtakið „auðnamyndun“ einskorðað við þurrt loftslag. Aðstæður á Íslandi, þar sem auðnir verða sannarlega til í köldu og röku loftslagi, valda því að notkun hugtaksins er um margt þvælin. Satt best að segja hefur þessi skilgreining á auðnamyndun (eyðimerkurmyndun) sem sett var fram í samningnum háð framgangi hans allar götur síðan, en hún hefur þó tekið nokkrum breytingum. Á ensku er skilgreining samningsins nú þessi: „Land degradation in arid, semi-arid and dry sub-humid regions resulting from various factors, including climatic variations and human activities.“ Af hverju þessi loftslagsskilyrði fylgja skilgreiningunni er mörgum ráðgáta, en þau eiga rætur að rekja til misskilningsins frá 1977 þegar menn beindu augum fyrst og fremst að þurrum svæðum Afríku þar sem þurrkar herjuðu á landið. Höfundur þessara orða var viðstaddur „vísindafundinn“ í aðdraganda samningsgerðarinnar í Nærópí í Kenýa árið 1993, en þá hafði inntak samningsins í raun þegar verið ákveðið.

Upprunalega hugsunin var, sem fyrr sagði, að takmarka hugtakið við hnignun vistkerfa í þurru loftslagi – áherslan var á Afríku – í ljósi þurrkanna miklu á milli 1970 og 1980. Vert er að huga nánar að hugtökunum sem hér eru notuð. Hugakið „desert“ er ættað úr egypsku og grísku, en upprunaleg merking orðsins er „yfirgefinn“, þ.e. komið í auðn – eyðimörk. Hugtakið hefur nú margar merkingar og þar má nefna:

- **yfirgefin eða strjálbýl svæði samkvæmt upprunalegri merkingu;**
- **sérstakur lífheimur (vistfræðileg skilgreining; e. desert biome) sem er aðlagaður að lítilli úrkomu og þurrkum, t.d. kaktusar og aðrir þykkblöðungar;**
- **skortur á gróðurhulu; og**
- **veðurfarsleg skilgreining – svæði með litla ársúrkomu (t.d. <200 mm) eða litla úrkomu miðað við uppgufun, sem m.a. ræðst af hitastigi.**

Rétt er að hafa í huga að mörg eyðimerkurvistkerfi, t.d. í suðurhluta Bandaríkjanna og Mexíkó, eru nokkuð vel gróin en auðnir eru algengar þar sem rignir mun meira, t.d. á Íslandi (mynd 19.6). Ljóst má því vera að hugtakið eyðimörk er fremur óskýrt, nema að vistfræðilegi skilningurinn sé notaður, sem mælt er með hér. Þá væri gerður greinarmunur á:

- **eyðimörk** (e. desert) sem væri ákveðinn lífheimur sem einkenndist af takmörkuðu framboði á vatni en gæti haft umtalsverða og jafnvel samfellda gróðurhulu, og
- **auðn** (e. barren, en einnig desert) sem væri illa gróið land óháð skilgreiningu á lífheimi eða framboði á vatni.

Jákvæð þróun hefur orðið á skilgreiningum á auðnamyndun innan eyðimerkursamningsins (UN-CCD) – bæði hefur loftslagsskilgreiningin verið víkkuð út og hugtakið „drylands" verið tekið úr skilgreiningum („þurrlendi" á íslensku en erfitt er að skilgreina það hugtak nánar). Áherslan hefur færst yfir á alvarlega landhnignun, eins og vera ber (e. severe land degradation), og raunar sér þess merki að forðast er að hafa fókus á skilgreiningunni sem slíkri (sbr. bók Evrópusambandsins um auðnamyndun (Cherlet o.fl. 2018, sjá einnig UN-CCD 2017).

Í stórum rannsóknarverkefnum Evrópusambandsins, svo sem „Archaeomedes"-verkefninu, er skilgreiningu Auðnasamningsins í raun hafnað og notað hugtakið um alvarlega landhnignun hvar sem hún á sér stað, m.a. á Íslandi (van der Leeuw 1998 – bls. 6). Alvarleg landhnignun felur í sér mjög margvísleg ferli, ástæður og afleiðingar og jafnframt geta umhverfisaðstæður verið mjög mismunandi. Því er réttast að skilgreining á hugtakinu sé fremur breið. Auðnamyndun felur í sér mjög skerta þjónustu vistkerfa og oft og tíðum vistkerfishrun. Yfirleitt eiga viðkvæm vistkerfi hlut að máli – jaðarvistkerfi (e. marginal systems) sem hafa takmarkað þanþol og stöðugleika og verða auðnamyndun að bráð. Oft eru það skóglaus vistkerfi jarðarsvæðanna sem verða verst úti, svo sem innan lífheims eyðimarkanna, en einnig hér á ísa köldu landi. Iðulega verður alvarlegust landhnignun í kjölfar afgerandi breytinga á landnýtingu, m.a. þegar búpeningur er fluttur inn á viðkvæm jaðarsvæði, eins og gerðist í vesturríkjum Bandaríkjanna, Mexíkó, Ástralíu – og á Íslandi með landnámi og örri fólksfjölgun á 19. öld. Rangt er að tengja auðnamyndun fyrst og fremst við skógareyðingu eins og stundum er gert, en hún er iðulega þáttur í ferlinu, t.d. á Íslandi. Landhnignun á Íslandi er eins og áður sagði klassískt dæmi um alvarlega landhnignun og auðnamyndun (e. desertification).

19.3. Mat á ástandi lands

Nýting mannsins á náttúruauðlindum hefur gjörbreytt ásýnd jarðar. Segja má að þekking á ástandi lands – landlæsi – sé lykilatriði í allri umsýslu og nýtingu náttúruauðlinda, en til þess þarf skilning á vistkerfum. Æskilegt er að mat á ástandi lands styðjist við: 1. mikilvæga, 2. vel skilgreinda og 3. mælanlega og/eða auðgreinanlega þætti. Flestar aðferðir gera ráð fyrir að lagt sé mat á upprunalegt ástand eða „eðlilegt ástand landsins" – **vistgetu** – til viðmiðunar, eins og síðar er fjallað um (heimilda getið í lok kaflans).

Það er gagnlegt að skilgreina aðeins nánar hvað átt er við með „hruni vistkerfa" (e. ecosystem collapse) áður en lengra er haldið, enda kemur vistkerfishrun þar mjög við sögu. Skilgreining Bland o.fl. (2018) gefur góða

Vandræðahugtakið eyðimerkurmyndun (e. desertification)

Ónákvæm eða óheppileg notkun á orðinu „eyðimörk“ (e. desert) veldur enn meiri vanda þegar hugtakið „desertification“ (sjá ÓA 2000b) er annars vegar, sem samkvæmt orðanna hljóðan útleggst myndun eyðimarkar. En hvers konar eyðimörk samkvæmt þeim ólíku skilgreiningunum sem taldar voru upp hér að ofan? Alvarleg landeyðing breytir t.d. ekki loftslaginu eða lífheiminum (e. biome), alla vega ekki þegar hún er hlutfallslega lítil. Þá má spyrja sig: Á eyðimerkurmyndun sér stað í eyðimörk (innan lífheims eyðimarka)? Augljóst er að mörg vandamál fylgja hugtakinu „eyðimerkurmyndun“ („auðnamyndun“) og hafa margir orðið til þess að fjalla um þennan vanda (sjá Ólaf Arnalds 2000b, Imeson 2012 og færslu um „desertification“ á wikipedia).

Mynd 19.6. Hvor myndin sýnir eyðimörk? Á báðum stöðum hefur átt sér stað auðnamyndun (e. desertification). Myndin fyrir ofan er frá Organ Pipe-náttúruverndarsvæðinu í Arizona. Gróður hylur yfirborðið, sem er dæmi um lífheim eyðimarka (e. desert biome). Svæðið hefur þó orðið fyrir varanlegum skemmdum vegna búfjárbeitar fyrri tíma. Myndin fyrir neðan er frá Kili, milli Langjökuls og Hofsjökuls, þar sem gróðurhulan er fjarska lítil. Gróðurleysið stafar a.m.k. að hluta til af búfjárbeit fyrri tíma og rofi. Bæði svæðin eru dæmigerð fyrir viðkvæm jaðarsvæði sem þola (og þoldu) illa búfjárbeit. Eyðimörk (lífheimur) fyrir ofan en auðn (illa gróið land) fyrir neðan.

hugmynd um inntak hugtaksins, enda þótt hún sé nokkuð stirð. Eftirfarandi er aðeins einfölduð útgáfa:

> „Hrun vistkerfa felur í sér breytingar sem færa vistkerfisþætti, sem skilgreina eigind (e. identity), eðli og breytileika vistkerfa, yfir ákveðinn þröskuld eða þröskulda.
>
> Við hrun vistkerfa gjörbreytist eigind kerfisins og þættir sem skilgreina kerfið glatast og/eða annað vistkerfi tekur yfir. Það gerist þegar mikilvægir lífrænir og ólífrænir eiginleikar glatast úr öllum flákum kerfisins svo náttúrleg tegundasamsetning þess viðhelst ekki lengur.“[4]

19.3.1. Rask, þanþol og hnignun vistkerfa

Hugtökin „rask“ (e. disturbance) og „þanþol“ (e. resilience) eru meginhugtök í tengslum við umræðu um ástand og hnignun vistkerfa. Það er nokkuð mismunandi hvernig hugtakið þanþol er notað; hér hefur það tiltölulega víða skírskotun og inniheldur að hluta hugtakið „stöðugleika“ (e. stability) eins og algengt er (sjá UNEP 2016). Áhugafólki um þanþol er bent á bókina *Foundations of ecological resilience* (ritstýrð af Gunderson o.fl. 2010) en hér er byggt á texta eftir ÓA og Ásu L. Aradóttur (2015).

Í vistfræði eru afmarkaðir atburðir eða röð atburða sem leiða til breytinga á vistkerfum kallaðir rask (e. disturbance). Dæmi um náttúrlegt rask sem hefur áhrif á íslensk vistkerfi er öskufall vegna eldgosa og jökulhlaup. Margs konar landnýting leiðir til rasks á vistkerfum, til dæmis traðk manna og dýra, utanvegaakstur, vegaframkvæmdir, gerð uppistöðulóna, breytingar á vatnafari í tengslum við virkjanir, ræktun lands og síðast en ekki síst beit búfjár. Áhrif rasks – hversu miklum breytingum það veldur á viðkomandi vistkerfum – eru mismikil eftir því hvers eðlis það er, „ákefð“ þess (e. intensity), hversu lengi það varir sem og fjölda atburða (t.d. endurtekið gjóskufall). Einnig eru vistkerfi misvel í stakk búin til að bregðast við raski og fer það bæði eftir gerð þeirra en ekki síður ástandi. Rask á borð við skógarhögg eða mikla beit getur magnað upp neikvæð áhrif af annars konar raski á borð við öskufall eða loftslagsbreytingar, minna raskað kerfi hefur meira þanþol gagnvart slíkum atburðum.

Hugtakið þanþol lýsir því hversu vel starfsemi og eiginleikar vistkerfa viðhaldast eða ná fyrra horfi í kjölfar rasks. Flest vistkerfi eru síkvik, sem þýðir að starfsemi þeirra, til dæmis framleiðni, sveiflast að ákveðnu marki með veðurfarssveiflum og öðrum náttúrulegum breytingum á umhverfisaðstæðum (stig I á mynd 19.7).

Rask dregur gjarnan úr framleiðni vistkerfa, en ef þanþol þeirra er mikið nær landið fyrri getu tiltölulega fljótt aftur (lína frá stigi II aftur upp á stig I á grafinu), t.d. þar sem rætur eru til staðar og hringrásir vatns og næringar eru enn öflugar. Ef raskið verður hins vegar meira en sem nemur þanþoli vistkerfisins leiðir það til hruns. Kerfið nær þá ekki fyrri eiginleikum á borð við framleiðslugetu (sbr. skilgreiningu á hruni hér á undan) heldur færist niður á lægra **ástandsstig** eða **vistþrep** (stig II eða III). Það er ekki aðeins gerð kerfisins eða ákefð viðkomandi rasks sem hér skipta máli, heldur getur ein tegund rasks (t.d. beit) dregið úr þanþoli vistkerfa gagnvart annars konar raski (t.d. gjóskufalli, þurrki eða kuldakasti). Kjarrlendi og votlendi á Íslandi eru dæmi um kerfi á stigi I, mólendi er dæmi um stig II en auðnir og illa gróið land dæmi um stig III á myndinni. Þanþol vistkerfa er yfirleitt

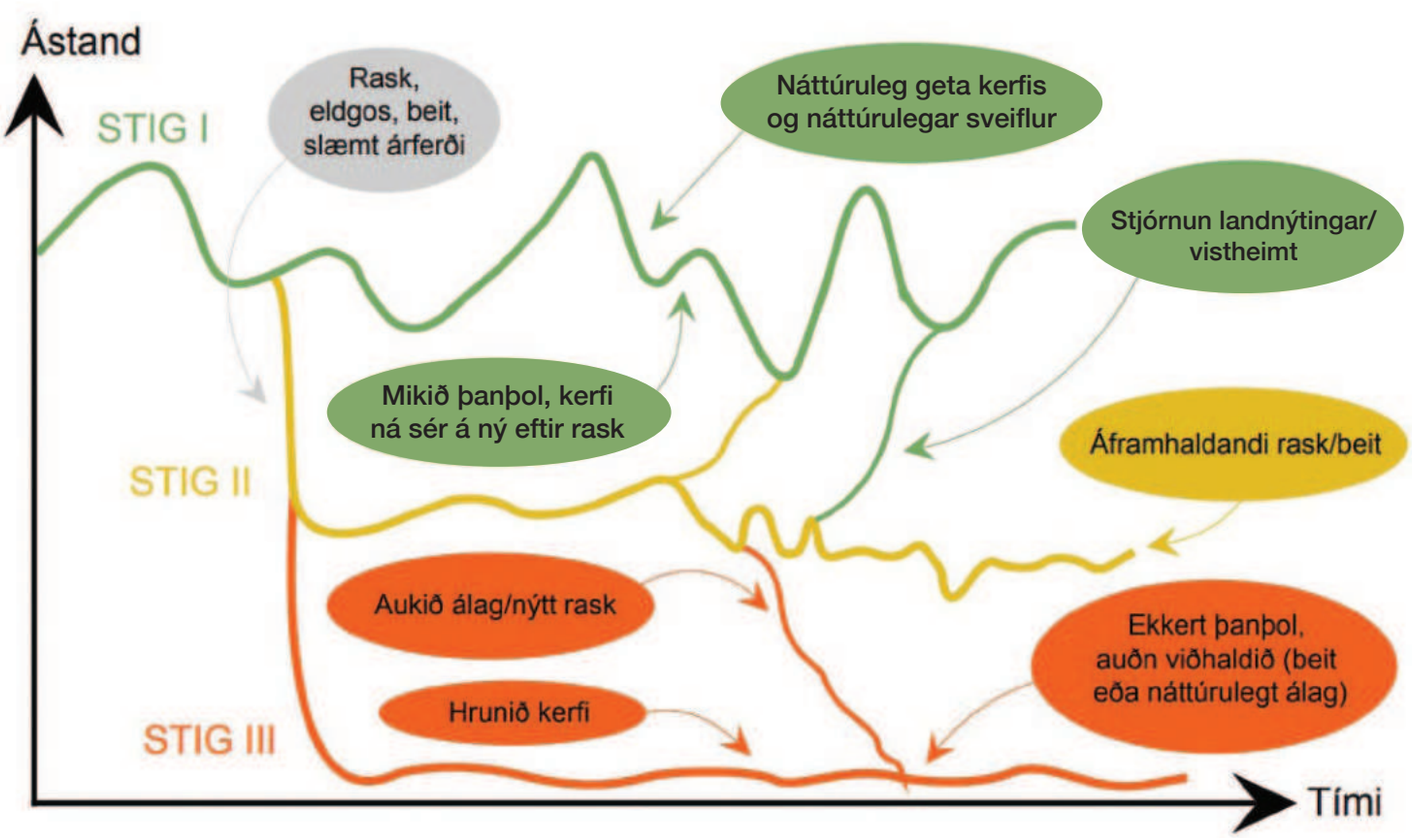
4. „Ecosystem collapse: indicates a transition beyond a bounded threshold in one or more indicators that define the identity and natural variability of the ecosystem.

Collapse involves a transformation of identity, loss of defining features, and/or replacement by a novel ecosystem. It occurs when all ecosystem occurrences (i.e. patches) lose defining biotic and abiotic features, and characteristic native biota are no longer sustained“ (Bland o.fl. 2018).

því meira sem þau eru frjósamari og öflugri. Tegundasamsetning gróðurs, jarðvegsgerð sem og ytri þættir móta þanþolið. Jaðarsvæði, t.d. þurr eða köld landsvæði og kerfi með sendnum jarðvegi sem hafa litla vatnsmiðlun, hafa oft lítið þanþol. Tiltölulega lítið rask getur því valdið miklum og varanlegum skemmdum á slíku landi.

Með því að hvíla akuryrkjuland, minnka beitarálag og friða fyrir beit má lyfta vistkerfum aftur upp á fyrri stig – upp á hærra þrep. Kerfi á lægri þrepum eru þó iðulega það stöðug að þau þurfa gjarnan á inngripi að halda til að ná árangri, t.d. áburðargjöf, sáningu o.fl. Víða erlendis hefur verið gripið til stórfelldra breytinga á landnýtingu til að koma í veg fyrir frekari skaða og bæta ástand lands, m.a. með banni við akuryrkju á sendnum og þurrum svæðum og friðun fyrir beit á illa förnu landi með lítið þanþol (t.d. í Bandaríkjunum og Kína). Annars staðar hafa búháttabreytingar stuðlað að aukinni útbreiðslu vistkerfa sem fyrir voru, t.d. skóglendis í stað graslendis, ekki síst í Evrópu. Víða var landið einmitt þakið skógi áður en það var brotið til ræktunar og því er skógurinn náttúrulegt stig og viðmið. Þar sem skógurinn sækir á getur talist mikilvægt að viðhalda nýtingu til að auka fjölbreytni í landslagi, m.a. til að vernda svonefnt búsetulandslag og líffræðilegan fjölbreytileika. Það á vitaskuld aðeins við þar sem ástand vistkerfa telst viðunandi – það má hins vegar telja rangsnúna og siðlausa notkun á hugmyndum um búsetulandslag (e. perverse arguments) þegar mjög hnignað land er verndað sem slíkt og viðhaldið með ofnýtingu, eins og síðar verður vikið að.

Bati innan hvers þreps eftir að aukið hefur verið á þanþol þess tekur tiltölulega skamman tíma (ár, fáir áratugir). Bati frá einu ástandsstigi eða vistþrepi til annars tekur aftur á móti oft mun lengri tíma (áratugir, árhundruð hérlendis) og oft þarf inngrip



Mynd 19.7. Þanþol. Hér er gert ráð fyrir þremur stigum til einföldunar. Efsta stigið er óraskað náttúrulegt ástand en á því neðsta hefur algjört vistkerfishrun átt sér stað. Ástandið er sveiflukennt innan hvers stigs en við rask verður álag á kerfið og það hrynur niður á næsta stig ef það er meira en sem nemur þanþolinu. Neðsta stigið er dæmi um illa gróið land og auðnir á Íslandi. Mynd: ÓA og J. Herrick, birt í UNEP 2016.

á borð við plöntun, áburðargjöf og sáningu til að koma bataferlinu af stað. Berar klappir gróa seint, en þar sem mold eða laus setlög eru á yfirborði, t.d. jökulurð og eldfjallagjóska, geta kerfin frekar gróið sára sinna. Því eru möguleikar á bata afar misjafnir.

19.3.2. Ástandsmat

Mat á ástandi lands er æ mikilvægari þáttur umhverfisvísinda og grundvöllur fyrir skynsamlegar ákvarðanir um nýtingu vistkerfa, verndun þeirra og uppbyggingu. Ástandsmat felur m.a. í sér að vega og meta virkni og stöðu einstakra þátta vistkerfisins og ferla þess, m.a. til að ákvarða hvort færsla niður á lægra ástandsþrep hefur átt sér stað eða jafnvel vistkerfishrun, sbr. umræðuna hér að ofan. Fjölmargar aðferðir hafa verið þróaðar fyrir ástandsmat á útjörð[5], eins og vistkerfin sem einkenna Ísland nefnast. Þar má nefna klassískar aðferðir Bandaríkjamanna frá því um miðja 20. öld (e. range condition, Stoddart o.fl. 1975, Holechek o.fl. 2010) sem einkum studdust við tegundasamsetningu gróðurs miðað við upprunalegt eða æskilegt ástand.

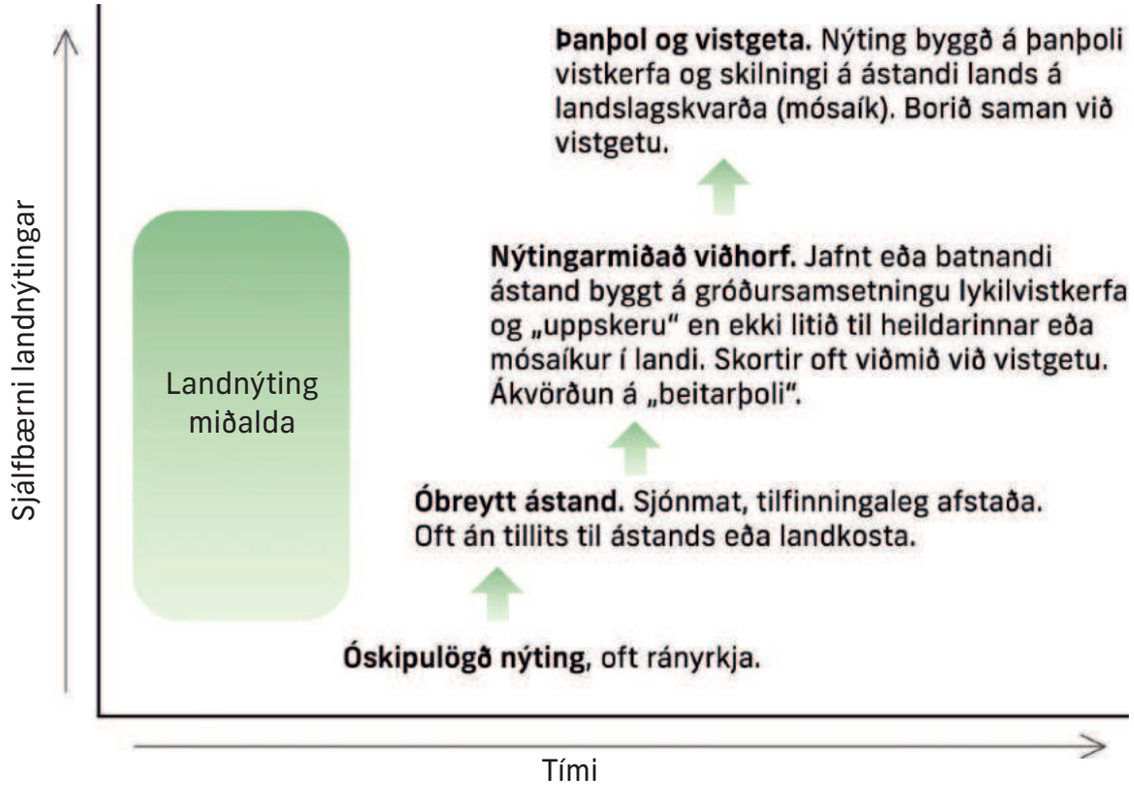
Á árunum frá 1970–1980 var beitt fremur flóknum aðferðum til að reikna út beitarþol afréttarsvæða á Íslandi, sem byggðust m.a. á gróðurkortum, uppskeru helstu gróðurlenda og meltanleika-rannsóknum (Ingvi Þorsteinsson 1980). Niðurstöðurnar gáfu klárlega alltof háar niðurstöður sem má rekja til þess að sá hluti uppskeru sem óhætt var talið að fjarlægja var ofmetinn sem og þess að rannsóknir á uppskeru helstu gróðurlenda höfðu leitt til ofmats á þekju góðra beitartegunda (sjá ÓA 2020).

Reynt var að bæta aðferðirnar við mat á beitilöndum, sem Rannsóknastofnun landbúnaðarins stóð fyrir á árunum milli 1980 og 1990 (t.d. Ingvi Þorsteinsson o.fl. 1984). Þar var gerð fyrsta tilraunin til að taka jarðvegsrof með í reikninginn. Öll þessi kerfi, innlend sem erlend, hafa nú gengið sér til húðar enda þótt hin mikilsverða þekking sem aflað var í tengslum við þróun þeirra sé ennþá í fullu gildi (sjá mynd 19.9).

Á undanförnum áratugum hefur vistfræðileg nálgun við mat á ástandi lands orðið meira áberandi þar sem jarðvegsþættir hljóta sama vægi og

5. Hugtakið „útjörð“ er notað hér um opin lönd utan heimalanda næst bæjum sem í sumum tilfellum eru nýtt til beitar en stundum ekki. Það á einnig við um land sem nú er beitt en ætti ekki að vera beitt vegna viðkvæmrar náttúru eða slæms ástands landsins. Hugtakið er því í mörgum tilfellum mun heppilegra en „úthagi“ – sem vísar til þess að landið sé beitt eða það sé ætlað til beitar þótt það kunni engan veginn að henta til þess.

Mynd 19.8. Til vinstri er votlendissvæði á Suðurlandi, sem hefur búið yfir miklu þanþoli gagnvart nýtingu í aldanna rás. Til hægri er svæði á Snæfellsnesi þar sem vistkerfið er hrunið vegna sauðfjárbeitar og hugsanlega skógareyðingar áður fyrr – þanþolið nægði ekki. Mörg þurrlendisvistkerfi á Vesturlandi þola illa að missa skógarhuluna.



Mynd 19.9. Þróun hugmyndafræði og aðferða við mat á landi og skipulag landnýtingar frá óskipulagðri nýtingu (oft rányrkju) til mats sem byggist á þanþoli vistkerfa og samanburði við vistgetu einstakra landeininga. Teikningin er þýðing og staðfærsla á mynd Briske (2016) í inngangskafla bókarinnar „Rangeland systems". Sjálfbærni nýtingar er ekki tryggð með því að miða við óbreytt ástand því aðstæður á borð við þurrk eða gjóskufall kunna að færa svæðin skyndilega á annað stig. Slík sýn tekur heldur ekki tillit til fjölbreyttrar mósaíkur vistgerða í landslagi; sum kerfin geta verið ofnýtt eða hafa hrunið á meðan önnur viðhéldust eða komust af.

Nýtingarmiðuð viðhorf byggjast m.a. á því að nota gróðursamsetningu og uppskeru til að meta svokallað „beitarþol" en þess háttar aðferðir eru gengnar sér til húðar af mörgum orsökum. Nýtingarmiðuð viðhorf taka ekki jarðvegsþætti, fjölbreytta mósaík eða þanþol gagnvart áföllum með í reikninginn. Þau miða ekki við getu landsins eða eðlilegt ástand þess (vistgetu). Mestar líkur á sjálfbærri landnýtingu eru þegar tekið er tillit til þanþols gagnvart breytilegum náttúruaðstæðum og fjölbreyttrar mósaíkur samfélaga í útjörð, og er þá miðað við vistgetu hverrar einingar í landslaginu og endurheimt landgæða þar sem það á við.

yfirborðsþættir. Bókin *Methods for assessing soil quality* (ritstýrð af Doran og Jones 1996) var gefin út af Jarðvegsfræðifélagi Bandaríkjanna í þessum tilgangi og síðan hafa fjölmargar aðferðir verið þróaðar sem flestar taka tillit til ástands jarðvegsins. Hugtakið „gæði jarðvegs" (e. soil quality) er oft nefnt til sögunnar í þessu samhengi (sjá Doran og Jones 1996, Herrick 2000, UNEP 2016). Lífræn efni og næringarhringrásir eru meðal mikilvægustu mælikvarðanna á „moldargæði". Á síðustu árum hefur vistkerfanálgun við mat á ástandi úthaga (mynd 19.9) verið þróuð og notuð í Bandaríkjunum (Pellant o.fl. 2019, Herrick o.fl. 2018) (mynd 19.10), en þær aðferðir eiga sér samsvörun víðar, svo sem í Eyjaálfu (Tongway 1994, Tongway og Hindley 2000) og í kerfi Ásu L. Aradóttur o.fl. frá 1992 fyrir Ísland. Þessar aðferðir leggja grunninn að umfjölluninni hér á eftir og hinu einfalda skema fyrir ástandsmat sem sett er fram sem dæmi. Aðferðirnar tengjast yfirleitt svokölluðum „vistþrepa-líkönum" (e. state-and-transition), líkönum um ástand, hnignun og endurbætur á beitarkerfum sem hafa orðið áberandi á undanförnum árum (sjá Briske o.fl. 2017a,b, Bestelmeyer o.fl. 2017). Þær hafa einnig verið nefndar „stöðu og tilfærslu-líkön", með sömu skammstöfun og á ensku: S&T-líkön. Aðferðirnar eru sama eðlis og þær sem notaðar eru til að kynna ástandsstig fyrir Ísland. Kerfi Ásu L. Aradóttur o.fl. (1992) er angi af slíkri hugmyndafræði og var

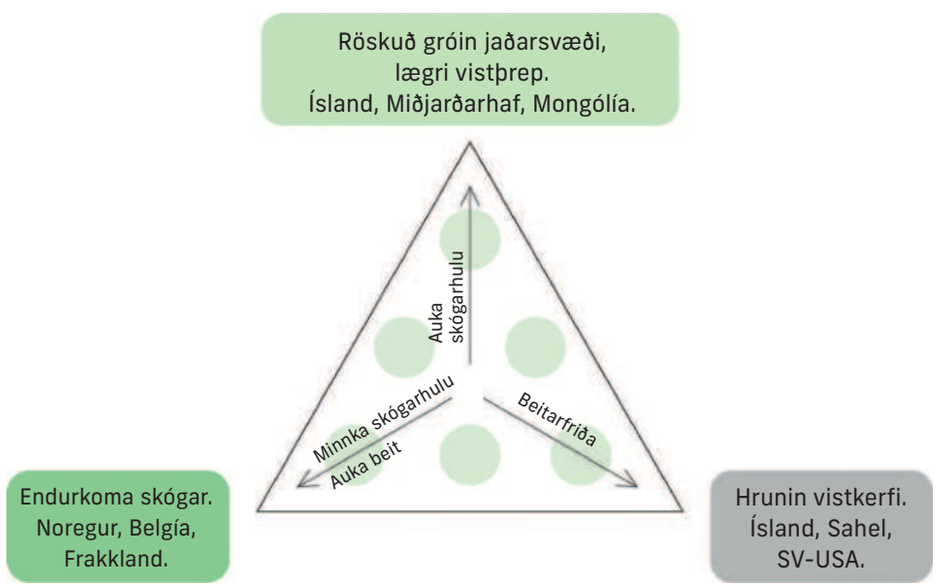
í raun sett fram áður en matskerfin í Bandaríkjunum voru þróuð og þeim breytt. Jóhann Þórsson (2008) og Isabel C. Barrio o.fl. (2018) þróuðu áfram aðferðir sem byggjast á vistþrepa-líkönum fyrir ástandsstig og færslu á milli þeirra á Íslandi.

Það er mikilvægt að þær aðferðir sem notaðar eru til að meta ástand lands taki mið af vistfræðilegum aðstæðum á hverjum stað. Eðli vistkerfa er mismunandi, t.d. á milli jaðarsvæða sem einkennast af þurrki og arktískra svæða; eða á milli skóglendis, akurlendis, frjósams graslendis eða opinna beitilanda, svo dæmi séu tekin (mynd 19.11).

Valdir eru þættir vistkerfisins sem eru mikilvægir fyrir virkni þess og breytast við hnignun. Oftast eru það yfirborðsþættir eins og gróðurhula og samsetning gróðurs sem eru góðir mælikvarðar og auðgreinanlegir. Margir þættir sem einkenna mold breytast hægt (áratugir eða árhundruð), t.d. leirinnihald, jónrýmd og sýrustig, nema stórvægilegt rask á borð við rof eigi sér stað eða ef land „fer í sand". Síendurtekið jarðvegsrof leiðir yfirleitt til hruns vistkerfa. Lífrænt innihald breytist fremur hratt við mikið álag; það telst í árum ef rof fjarlægir mold en áratugum ef ofnýting lækkar kolefnisinnihald án jarðvegsrofs. Lífrænt innihald er almennt mikilvægur mælikvarði á stöðu, hrun og uppbyggingu vistkerfa (sjá Doran og Jones 1996). Fleiri þættir verða nefndir hér á eftir í töflu 19.2.

Ástand lands er yfirleitt metið með hliðsjón af tilteknum viðmiðum (e. reference condition) sem gefa til kynna „eðlilegt ástand" landsins miðað við umhverfisaðstæður. Viðmiðunarástandið hefur verið nefnt „vistgeta" (eða „landgeta") sem er þýðing á „land potential" eða „ecological potential" tiltekins fláka eða landslagseiningar. Miðað er við upprunalegt ástand landsins áður en landnýting spillti því, ef það er þekkt, en það ástand hefur eigi að síður verið nokkuð breytilegt. Einnig er horft til mögulegrar framleiðslugetu þegar ástand akuryrkjulands er metið. Rétt er að árétta að sjaldnast er hægt að endurheimta „sama" kerfi og fyrir var á hverju svæði, en miðað er við að ná

Mynd 19.10. Frá námskeiði höfunda bandaríska kerfisins þar sem ástand lands á Jordana-rannsóknastöðinni í Nýju-Mexíkó í Bandaríkjunum var metið í apríl 2019. Námskeiðið sótti fagfólk frá margvíslegum stofnunum sem hafa forráð fyrir þjóðlendum (e. public lands), ráðgjafastofnunum í landbúnaði, fólk í háskólanámi o.fl. Ástand landsins á rannsóknastöðinni, miðað við vistgetu, er ekki gott. Á myndinni sjást Jeffrey Herrick, sitjandi á stól, Patrick Shaver, standandi til hægri, og Mike Pellant, efst lengst til hægri. Tveir þeir fyrrnefndu hafa kennt við Landgræðsluskóla UNEP/GRÓ á Íslandi. Mynd: Ása L. Aradóttir.

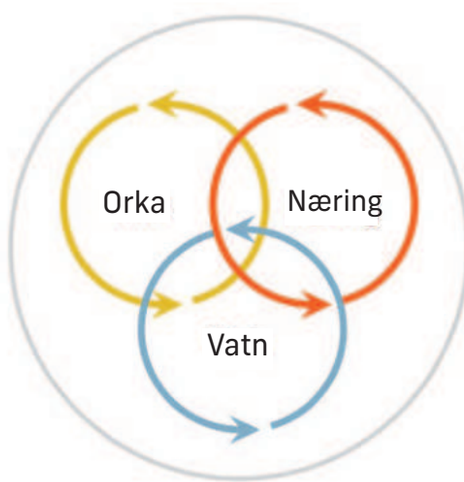


Mynd 19.11. Ákvarðanir um nýtingu lands þurfa að byggjast á eðli og ástandi vistkerfa. Sums staðar getur verið æskilegt að auka beit til að minnka skógarhulu og opna land, annars staðar getur þurft að minnka beit og jafnvel beitarfriða þar sem land er ekki talið beitarhæft eða þar sem vistkerfi eru hrunin. Punktar í þríhyrningi merkja mismunandi ástand lands.

svipaðri vistfræðilegri virkni: vistgetu svæðisins.

Kerfi sem einkennist af bersvæðagróðri getur ekki talist í góðu eða æskilegu ástandi ef viðmiðið er t.d. kjarrlendi – kerfið er þá einfaldlega á lægra ástandsstigi eða vistþrepi – jafnvel hrunið. Stundum er höfðað til líffjölbreytileika til að verja tilvist hins illa gróna lands, en þá er um að ræða rangsnúna notkun á hugtakinu (e. perverse arguments), sem rímar illa við önnur sjónarmið umhverfissáttmála Sameinuðu þjóðanna og heimsmarkmið samtakanna sem Ísland hefur skuldbundið sig til að reyna að ná.

ÓA og Ása L. Aradóttir (2015) notuðu þrjár grunnhringrásir vistkerfa til að fjalla um ástand vistkerfa: hringrásir orku (og orkunám inn í kerfið), hringrás vatns og næringarhringrásir (mynd 19.12). Kerfið á sér samsvörun í bandarísku og áströlsku kerfunum sem áður gat um (Tongway 1994, Ludwig o.fl. 1997, Tongway og Hindley 2000, Pellant o.fl. 2019, Herrick o.fl. 2018). Rétt er að árétta að hringrásirnar eru sannarlega tengdar og háðar hver annarri.



Mynd 19.12. Versnandi ástand vistkerfa felur í sér skerðingu á hringrásum orku, vatns og næringar. Grái hringurinn táknar hið eðlisræna umhverfi, svo sem rof, nærveður o.fl. þætti sem hafa áhrif á virkni kerfanna. Jarðvegsrof veldur alvarlegri skerðingu á öllum hringrásunum þremur.

Gróður sér vistkerfunum fyrir orku með ljóstillífun plantna og þessari orku er miðlað ofan í moldina þar sem lífríkið sér um niðurbrot og endurmiðlun orku og næringar. Því er nauðsynlegt að nægjanlega öflug gróðurþekja sé á yfirborðinu til að sjá kerfinu fyrir orku og til að byggja upp lífrænan forða í moldinni.

Virk vatnshringrás er nauðsynleg. Ísig þarf að tryggja að regnvatn komist ofan í moldina, vatnið þarf að leiða um moldina og jarðvegurinn þarf að geta bundið og miðlað vatni. Þar skipta leiragnir og lífræn efni mestu.

Næringarhringrás er drifin áfram af lífverum í moldinni og líffjölbreytileiki örvera í jarðvegi er mikilvægur í því samhengi. Nauðsynlegt er að hafa nægan forða lífræns efnis (orku) og næringar. Oft er það nitur (N) sem er mest takmarkandi, en talað er um að það þurfi að lágmarki um 1 000 kg N á ha – sem gefur til kynna stærðargráðuna – til að viðhalda eðlilegri virkni, en magnið er þó háð aðstæðum, m.a. er það misjafnt á milli lífheima (e. biomes). Það tekur langan tíma að byggja upp nægjanlegan forða lífræns efnis og niturs glatist hann við hrun vistkerfa. Mörg önnur næringarefni eru til staðar sem hlutfall af kolefnis- og niturinnihaldi, því meira sem er af kolefni og nitri, þeim mun líklegra er að nóg sé af öðrum efnum á borð við súlfúr (brennistein, S) og fosfór (P). Þættir sem eru mælikvarðar á virkni þessara þriggja hringrása – orku, næringar og vatns – henta vel til að gefa til kynna ástand lands, og þá er miðað við óröskuð kerfi til samanburðar (vistgeta landeiningarinnar).

Að auki koma til þættir sem gefa til kynna stöðugleika umhverfisins (táknaður með gráum hring á mynd 19.12), t.a.m. rof, nærveður o.fl. Þar sem mikið jarðvegsrof á sér stað telst ástand vistkerfis ávallt slæmt, því við það tapast grunneiningar kerfanna sem getur tekið óratíma að byggja upp að nýju.

Í töflu 19.2 eru kynntir þættir sem algengt er að nota til að meta ástand lands (t.d. Ludwig o.fl. 1997, Tongway og Hindley 2000, Pellant o.fl. 2019, Herrick o.fl. 2018). Allt eru þetta þættir sem eru nauðsynlegir fyrir hringrásirnar sem skýrðar voru hér að ofan. Bandaríkjamenn nota m.a. þá aðferð að telja saman frávik á metnum þáttum frá viðmiðinu (vistgetu) til að sýna ástand landsins en einnig er hægt að leggja saman, gefa meðaleinkunn o.s.frv. út frá mælingum eða mati á þessum þáttum.

Tafla 19.2. Þættir sem oft eru notaðir til að meta ástand lands. Miðað er við óraskað ástand landsins („vistgetu" þess). Unnt er að mæla eða leggja tölulegt mat á þættina, sem er mikilvægt fyrir hvers kyns úrvinnslu á gögnum.

Þáttur	Dæmi um hlutverk og mikilvægi	Mælingar
Gróðurhula	Nauðsynleg til að hlífa fyrir rofi, til orkunáms og til að skapa hagfellt nærveður, bætir ísig vatns	Mæld á línum, í römmum, með myndum (oft stafrænt), með sjónmati, með skema o.fl.
Gróðursamsetning	Mótar framleiðni, orkunám, ástand, rask og framvindu – ágengar tegundir o.fl. Endurspeglar jarðvegsþætti	Oftast gróðurgreiningar, margar aðferðir. Oft kortlögð fyrir samfelld svæði, fláka, vistgerðir
Lífræn efni í mold	Næmur mælikvarði á frjósemi jarðvegs, áhrif á næringarhringrás, orkuforði, áhrif á vatnsmiðlun	Greind í mælitækjum (% C). Nitur oftast líka mældur. Einnig hægt að mæla glæðitap (OM%)
Sina	Gefur til kynna að ekki sé gengið of nærri landi, hlífir landi, eykur einangrun, hindrar afrennsli	Oftast metin í magni og/eða þekju
Jarðvegsskán	Mikilvæg fyrir endurheimt vistkerfa, kemur N inn í kerfið, býr til örugg set og minnkar frostáhrif/ísnálar. Mikilvægur þáttur á illa grónum svæðum í heiminum	Þekja, tegundahópar, þykkt, byggingareinkenni o.fl.
Rof	Jarðvegsrof raskar hringrásum orku, næringar og vatns og getur komið í veg fyrir að vistkerfi nái sér aftur	Mælingar á rofi, mat á ummerkjum um rof, roflíkön, hlutdeild ógróins lands
Uppskera	Gefur til kynna framleiðni, álag, orkunám og orkugjöf til moldarinnar, sem og beitargildi (o.m.fl.)	Uppskorin tilviljanakennd úrtök af helstu gróðurlendum, tekið tillit til beitar og árstíma
Fræbærni	Mikilvæg til að helstu tegundir endurnýi sig eða lykiltegundir breiðist út, t.d. þar sem ástand er slæmt	Metin síðla sumars eða að hausti
Ísig	Mikilvægt til að regnvatn nýtist án yfirborðsrennslis (vatnsrof). Gróður minnkar afrennsli og örvar ísig	Mælt fyrir helstu landgerðir svæðis. Háð árstíð. Lítt gróið land hefur lítið ísig á vetrum
Kornastærð	Leir hefur mikla vatnsheldni, silt leiðir vatn greiðlega, sandur heldur litlu vatni og rýfur leiðni vatns til róta	Tekin sýni til kornastærðargreiningar. Hægt að meta á vettvangi með töluverðri nákvæmni
Örveruvirkni í mold	Nauðsynleg fyrir umsetningu næringarefna og gefur til kynna frjósemi landsins sem og líffjölbreytileika	Mæla örverumassa, en einnig hægt að meta virkni með efnafræðilegum aðferðum
Samfella gróðurs	Ef gróðurlendi eru mjög dreifð um land í slæmu ástandi er ástand slæmt fyrir heildina	Kortlagning, oft gervihnattamyndir. Tölfræðilegar greiningaraðferðir á samfellu
Ógróið yfirborð	Ástand versnar með aukinni hlutdeild ógróins lands. Rýfur hringrásir orku, næringar og vatns	Kortlagning, oft unnt að nota gervihnattamyndir.
Nærveðurþættir	Skjól minnkar yfirborðsvind, eykur snjósöfnun, minnkar uppgufun og bætir vatnshringrás	Mæla veðurþætti yfir og undir yfirborði, svo sem meðalhita, vind, uppgufun o.fl.
Byggingareinkenni gróðurs	Kjarrgróður hefur mikil áhrif á nærveður, hefur mikið þanþol og er merki um óraskað gróðurlendi víða á Íslandi. Smávaxinn gróður veitir lítið skjól	Mælingar og kortlagning með ýmsum aðferðum, vistgerðir o.fl. Felur í sér mælingu á lagskiptingu
Ágengar tegundir	Þær geta verið mjög stöðugar og komið í veg fyrir framvindu í átt að náttúrulegu óröskuðu ástandi	Athugað hvort þær séu fyrir hendi og/eða mæld hlutdeild þeirra o.s.frv.

19.3.3. Einfalt kerfi sem dæmi

Hér verður sýnt dæmi um einfalt skema til að mæla ástand lands. Teknir eru þættir sem hafa ótvírætt mikilvægi með hliðsjón af hringrásum orku, næringar og vatns. Kvarði er gerður fyrir hvern þátt út af fyrir sig á mælikvarðanum 0–4 nema fyrir jarðvegsrof, sem fær aukið vægi í þessu skema með því að notaður er mælikvarðinn 0–10 sem gefur aukið vægi í meðaltalinu. Oft er rétt að nota stiglækkandi kvarða fyrir sérhvern þátt þar sem einkunnir falla hratt í fyrstu, sem er lýsandi fyrir hnignun vistkerfa. T.d. er mikill munur á 95% og 100% gróðurþekju en minni á milli 20 og 25% í samhengi við ástand lands.

Stuðst er við sjö þætti í þessu kerfi sem allir eru mjög mikilvægir og lýsandi fyrir ástand útjarðar eða úthaga. Þeir eru um margt sambærilegir við þættina sem notaðir eru í verkefninu „GróLind“ til að meta ástand og virkni beitilanda (sjá umfjöllun aftast í þessum kafla). Annars vegar eru það moldarþættir: lífræn efni, kornastærð og ísig, sem gefa upplýsingar um virkni hringrása vatns, orku og næringar. Kornastærð varpar ljósi á stöðugleika kerfisins, og land sem er „komið í sand“ fær lægstu einkunn. Hins vegar eru það gróðurþættir: gróðurhula, gróðurhæð, uppskera, sina, samsetning og ágengar tegundir þegar við á. Gróðurþættirnir endurspegla orkunám og frjósemi kerfisins, en samsetning gróðurs o.fl. þættir varpa einnig ljósi á stöðugleika þess. Nærveður endurspeglast í gróðurhæð. Jarðvegsrof er síðan haft sem sérstakur þáttur. Dæmi um niðurstöður fyrir mat á landi samkvæmt þessu einfalda kerfi er í töflu 19.3 þar sem viðmiðið fær bestu einkunnina, en síðan eru dæmi um land í æ verra ástandi. Sjá einnig mynd 19.13.

Varðandi ágengar tegundir má benda á að víða í vesturhluta Bandaríkjanna, þar sem fræði til að meta ástand lands hafa þróast umtalsvert, hefur hlutur erlendra ágengra tegunda vaxið hröðum skrefum í útjörð undanfarið árhundrað eða svo, sem hefur haft mikil og neikvæð áhrif á ástand kerfanna. Sumar þessara tegunda voru notaðar í upphafi til að reyna að minnka rof og endurheimta hrunin vistkerfi eftir ofbeit

Tafla 19.3. Dæmi um einfalt kerfi fyrir mat á ástandi lands. Það byggist á sjö þáttum þar sem jarðvegsrofi er gefið aukið vægi með því að nota breiðari kvarða. Að baki hverrar einkunnar eru töluleg gildi (t.d. % þekja o.s.frv.) í samræmi við aðstæður og markmið ástandsmats hverju sinni. Viðmið fær fulla einkunn fyrir hvern þátt og heildareinkunn er reiknuð sem hlutfall af einkunn fyrir viðmið. Einnig væri hægt að snúa kvarðanum við þannig að slæmt ástand fengi hæstu gildin, sem er eðlilegra þegar gefa þarf ákveðnum þáttum meira vægi (auðveldara að auka vægi með háum gildum en að lækka mjög lágar tölur).

Kvarði	Þáttur	Viðmið – kjarrlendi	Ríkt mólendi	Rýrt mólendi	Illa gróið land
0–4	Lífræn efni í mold	4	3	2	0
0–4	Vatnsheldni	4	4	2	1
0–4	Ísig vatns í mold	4	4	2	0
0–4	Gróðurþekja %	4	4	3	0
0–4	Hæð og uppskera	4	3	1	0
0–4	Samsetning/sina/ág.teg.[$]	4	3	1	0
0–10	Jarðvegsrof	10	9	6	0
	Samtals	**34**	**30**	**17**	**1**
	Heildareinkunn (%)	**100**	**88**	**50**	**3**

$: ágengar tegundir

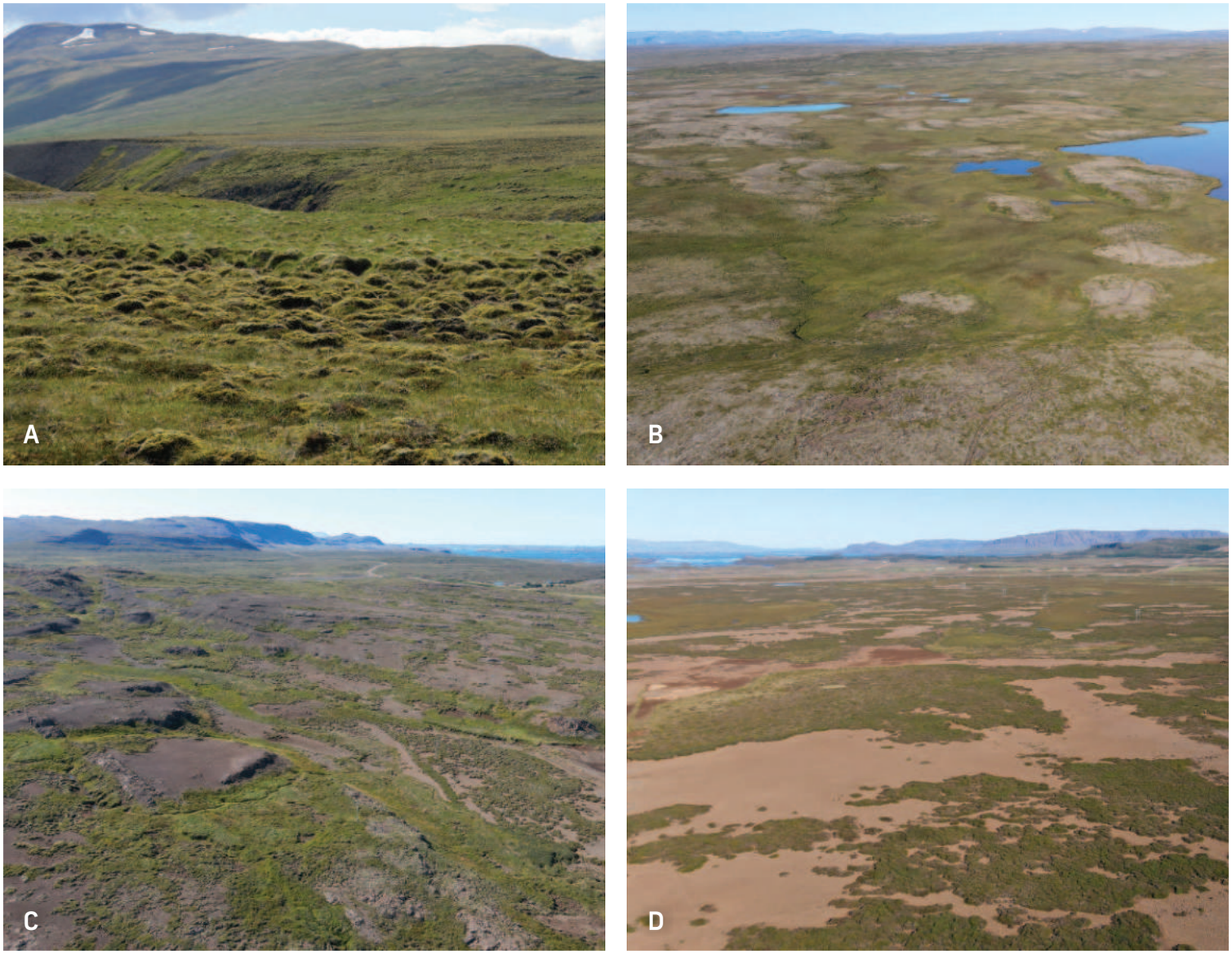
Mynd 19.13. Land á mismunandi ástandsstigi í dæminu sem getur um í töflu 19.3. Gríðarlega mikill munur er á milli þessara ástandsstiga. Svæðin þrjú á lægri ástandsstigum voru áður vaxin birkiskógum.

og þurrka fyrir meira en hundrað árum. Tegundirnar, t.d. „lovegrass“ frá Suður-Afríku – *Eragrostis plana*, hafa síðan lagt undir sig víðfeðm svæði. Þeim hafa fylgt margs kyns vandamál, svo sem minni frjósemi, minni líffjölbreytileiki með tapi á lykiltegundum í flóru og fánu, erfiðari og afdrifaríkari gróðureldar, minni framleiðni og verri nýting úrkomu.

Svipaðar sögur má rekja frá öðrum svæðum heimsins, m.a. er varðar fyrrgreinda tegund í Ástralíu. Hérlendis er umræða um ágengar tegundir á borð við lúpínu með nokkuð öðrum og sérstakari hætti en víðast erlendis enn sem komið er.

Lág einkunn fyrir ísig í rýru mólendi og illa grónu landi er vegna holklaka sem myndast á vetrum og takmarkar ísig – vatnsrof verður þar af leiðandi mikið. Vatnsheldni minnkar vegna lækkandi forða lífrænna efna, en jarðvegur illa gróins lands er yfirleitt sendinn með skerta vatnsheldni. Ef land er „komið í sand“ fær þátturinn fyrir vatnsheldni einkunnina núll og þá væri heildareinkunnin sömuleiðis núll. Auðvelt er að þróa tölulegan kvarða fyrir hvern þessara þátta (t.d. að einkunn fyrir gróðurþekju sé 4 fyrir >98% þekju).

Hér er aðeins um að ræða dæmi til að sýna hvernig unnt er að standa að mati á ástandi lands með því að nota nokkra



Mynd 19.14. Land í misjöfnu ástandi (sjá skilgreiningar á ástandsstigum í texta). A: vel gróin beitilönd en þó eru rofdílar fremst á myndinni (II og III, skert fjær, spillt nær). B: Afréttarlönd í fremur lélegu ástandi, lítið rof en þurrlendisvistkerfin eru mjög hnignuð (mosaþembur og ógrónar hæðir) – votlendiskerfin hafa lifað af (III, spillt). C: Land í slæmu ástandi, mikið af ógrónu landi og rofið virkt, en landið er smám saman að taka við sér vegna minni beitar (IV, rofsvæði). D: Land í mjög slæmu ástandi, einkennist af hnignuðum móum og ógrónu landi (rofsvæði – gróðurtorfur, IV og V).

lykilþætti vistkerfisins. Síðan er hægt að setja viðmið um lágmarkseinkunn fyrir tiltekna landnotkun á borð við beit sauðfjár, hrossa eða nautgripa. Hér er þó ekki tekið á þeim aðstæðum þegar landið er mjög fjölbreytilegt (fjölbreytt mósaík), allt frá vel grónum blettum til ógróins lands. Þá þarf að setja viðmið um hve stór hluti landsins má vera með einkunn undir tilteknum viðmiðunarmörkum, t.d. að ekki sé meira en 15% landsins (þ.e. mikill minnihluti þess) sem fær lægri einkunn en 66% eða 75%, svo dæmi séu tekin. Viðmið færu m.a. eftir markmiðum landnýtingar og stefnumörkun um að bæta ástand landsins. Samkvæmt lögum um landgræðslu hérlendis ber að setja viðmið um sjálfbæra landnýtingu þar sem aðferðafræði af þessu tagi kemur við sögu.

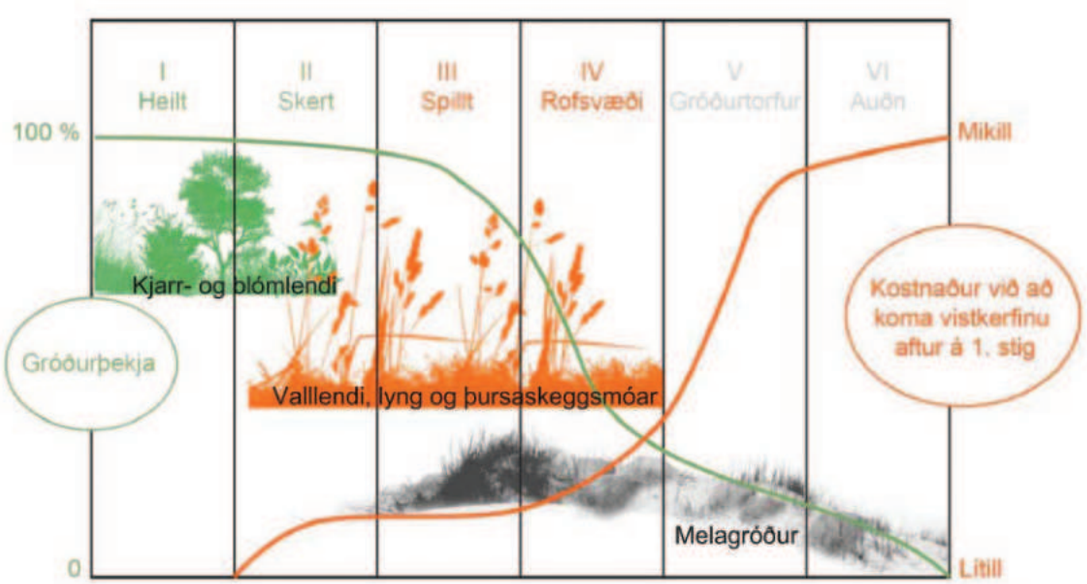
19.4. Ísland – ástandsstig og landlæsi

Náttúra landsins er sannarlega heillandi. Ferðamaðurinn, erlendur sem innlendur, er gjarnan í þeirri góðu trú að landið sé óraskað og náttúrulegt – eins fallegt og það er; að hina óspilltu náttúru beri fyrir augu. Það kemur raunar vel fram í auglýsingum fyrir ferðamenn. Fagurt er landið en óraskað er það ekki – það er oft fjarri öllum sanni, því er miður –

„heilkenni breyttra grunnviðmiða“ hefur þá tekið yfir (21. kafli). Fólk sem telur landið vera óraskað hefur ekki skilning á því sem fyrir augu ber – það er í raun ólæst á náttúru landsins. Það er jafnmikilvægt að vera læs á ástand landsins eins og að skilja jarðfræði þess, þekkja plöntur og fugla eða skynja atferli dýra. Til þess þarf að lesa í svipmót landsins.

Í kafla 19.3.2 var fjallað um hvernig nota má mælanlega þætti til mats á ástandi lands þar sem vistgeta hverrar landeiningar er höfð til samanburðar. Hér er hins vegar notast við landslagsskala með fremur almennum hætti – en sömu grundvallaratriðin gilda. Aðferðirnar voru fyrst kynntar í grein Ásu L. Aradóttur o.fl. árið 1992. Svipaðar aðferðir hafa verið notaðar erlendis, m.a. af Archer og Stokes (2000). Bestelmeyer o.fl. (2011) notuðu sambærilegt kerfi fyrir opna úthaga sem og Jóhann Þórsson við rannsóknir á landhnignun á Íslandi (2008). Ítarleg samantekt á slíkum kerfum, stundum kölluð „state-and-transition models“ eða „S&T-líkön“ (vistþrepa-líkön eða stöðu og tilfærslulíkön), var birt af alþjóðlegum hópi árið 2017 (Bestelmeyer o.fl.). Þau byggjast m.a. á mismunandi ástandsstigum eða vistþrepum, þröskuldum og þróun kerfa á milli vistþrepa. Isabel Barrio og félagar (2018) birtu athyglisverða tilraun til þess að tengja betur ástand lands á Íslandi við slík kerfi, en með mun flóknari hætti en hér er gert. Líkanið þeirra gefur ítarlegri mynd af því hvernig mismunandi staða vistkerfa endurspeglar ástand sem hlýst af nýtingu og öðru raski, auk þess sem ferlum sem einkenna færslu á milli vistþrepa er lýst. Hafa skal í huga að aðferðir af þessu tagi taka ekki til allra aðstæðna; þær þarf að aðlaga að eðli þeirra vistkerfa sem unnið er með.

Samkvæmt kerfi Ásu L. Aradóttur o.fl. (1992) er ástandinu deilt í sex stig frá „heilu stigi“ (I) til „auðnastigs“ (VI) (sjá mynd 19.15). Það lýsir t.d. aðstæðum á afréttarsvæðum sunnanlands, neðan hálendisbrúnarinnar, nokkuð vel og náttúrufari sem einkennist af þurrlendi; ekki síst þar sem hnignunin hefur verið hvað mest, en auðvelt er að heimfæra það upp á önnur svæði landsins. Gríðarlega mikill munur er á milli stigs I og þeirra stiga sem eru mjög hnignuð hvað varðar flesta þætti vistkerfa. Í töflu 19.4 er listi sem sýnir hvernig mikilvægir vistkerfisþættir breytast á milli stiganna.



Mynd 19.15. Ástandsstig frá heilu stigi til auðnastigs. Gróðurhulan og frjósemi vistkerfa minnka hratt á rofstiginu. Eftir því sem gróðurhulan er minni og gróðurfar rýrara hefur gengið meira á orku- og næringarforða kerfisins og æ erfiðara verður að koma því aftur á fyrra stig (Ása L. Aradóttir o.fl. 1992, endurunnið fyrir ÓA og Ásu L. Aradóttur 2015).

Gildin sem gefin eru í töflu 19.4 endurspegla stærðargráðu, en þau eru breytileg eftir aðstæðum og því er mörgum þeirra aðeins lýst sem „mikið“ eða „engin“ o.s.frv.

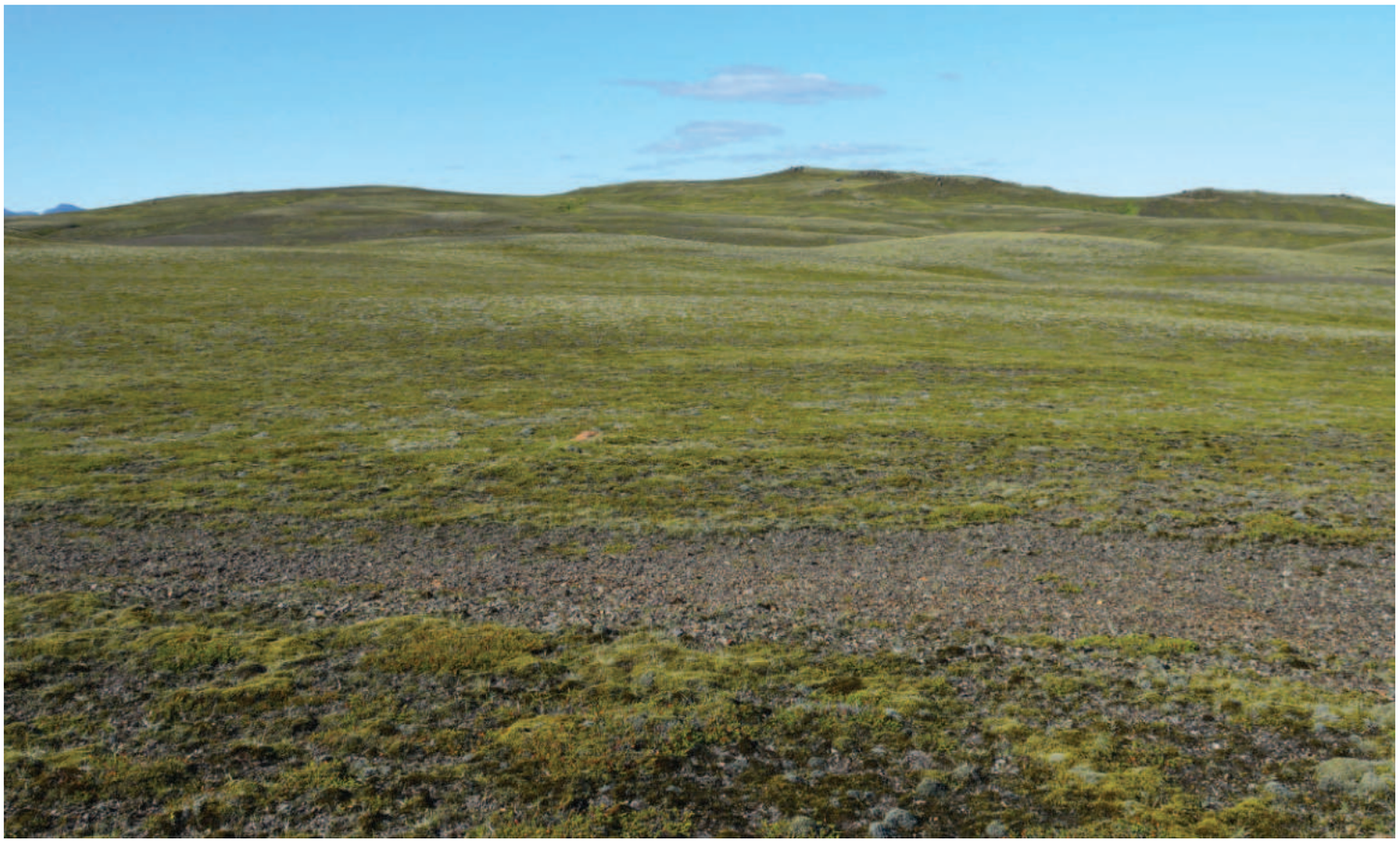
I. Heilt vistkerfi. Þetta stig endurspeglar vistgetu hvers svæðis (e. ecological potential, land potential). Á láglendi hafa óröskuð vistkerfi heila gróðurhulu sem er kröftug og hávaxin, jafnvel kjarrgróður (mynd 19.16), skógur eða öflug óröskuð votlendi. Nærveður er hagstætt; það er fremur skýlt við yfirborðið og snjór safnast fyrir í skjóli gróðursins sem bætir einangrun við yfirborðið og skilar snjóbráð ofan í moldina. Ekkert rof á sér stað, hvorki af völdum vatns eða vinda. Regnvatn berst ofan í moldina sumar sem vetur. Hitasveiflur eru hægar í moldinni og ísnálar myndast ekki. Kolefnishlutfall er >6% (jafnvel >12%) á þurrlendi og magn niturs >10 000 kg/ha, sem endurspeglar frjósemi kerfanna og öra umsetningu næringarefna. Kolefnisinnihaldið getur

Tafla 19.4. Mismunur á yfirborðsaðstæðum og moldarþáttum eftir ástandsstigum. Gildi geta verið mjög breytileg frá einum stað til annars innan hvers ástandsstigs. Hér er miðað við aðstæður á láglendi.

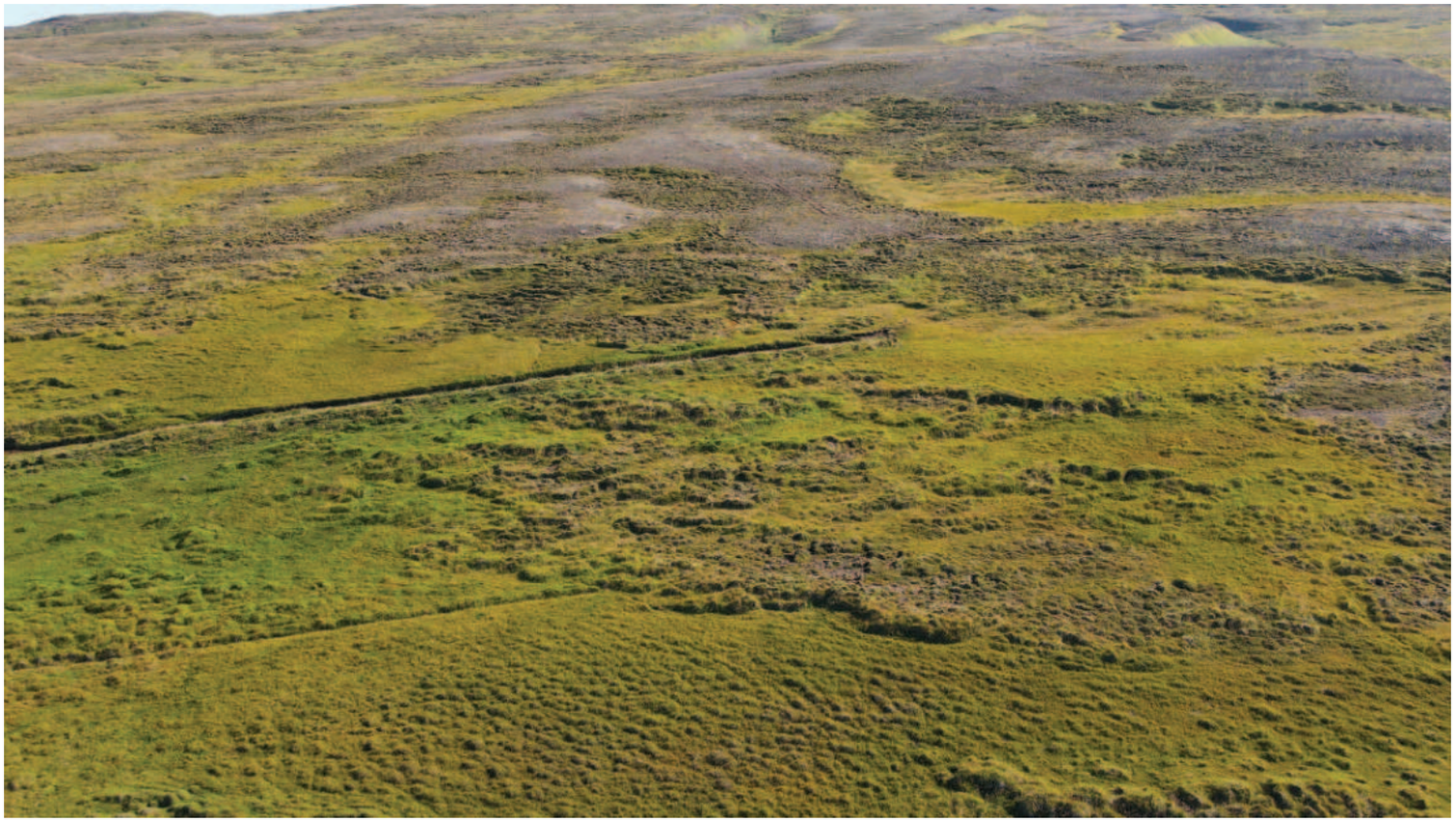
	I Heilt	II Skert	III Spillt	IV Rofsvæði	V Gróðurtorfur	VI Auðn
Yfirborðið						
Gróðurhula (%)	100	90 – 100	75 – 95	40 – 80	5 – 40	<20
Gróðurhæð (cm)	20 – 200+	5 – 15	3 – 10	0 – 10	0 – 10	0
Hámarksvindhraði (m/s)[$]	<2	>5	>15	>20	>20	>25
Sina	Mikil	Nokkur	Lítil	Lítil	Lítil	Engin
Snjósöfnun	Mikil	Nokkur	Takmörkuð	Takmörkuð	Engin	Engin
Vindrof	Ekkert	Ekkert	Lítið – mikið	Mikið	Mikið +	Mikið +
Vatnsrof	Ekkert	Ekkert	Lítið – mikið	Mikið	Mikið +	Mikið +
Myndun ísnála	Engin	Lítil	Nokkur	Mikil	Mikil +	Mikil +
Hitaöfgar á 2 cm dýpi (°C)[#]	1 – 5	3 – 6	5 – 10	10 – 30	>30	>30
Uppgufun úr mold	Lítil	Tempruð	Tempruð	Nokkur	Mikil	Mikil +
Ísig að vetri (mm/klst)[&]	>10	>10	2 – >10	<2 – 10	<2 – 10	<2
Yfirborðsmold						
C % í efstu 30 cm[€,Y]	6 – 15	3 – 7	1,5 – 4	0,5 – 3	0,2 – 2	0 – 0,5
N í efstu 30 cm (kg/ha)[€]	>10 000	>5 000	>2 500	<1 000	<500	<250
Leir (%)[Y]	15 – 30	10 – 25	10 – 20	3 – 15	3 – 10	1 – 5
Vatnsheldni (%)[Z]	50 – 100	30 – 70	20 – 50	10 – 40	5 – 15	1 – 10

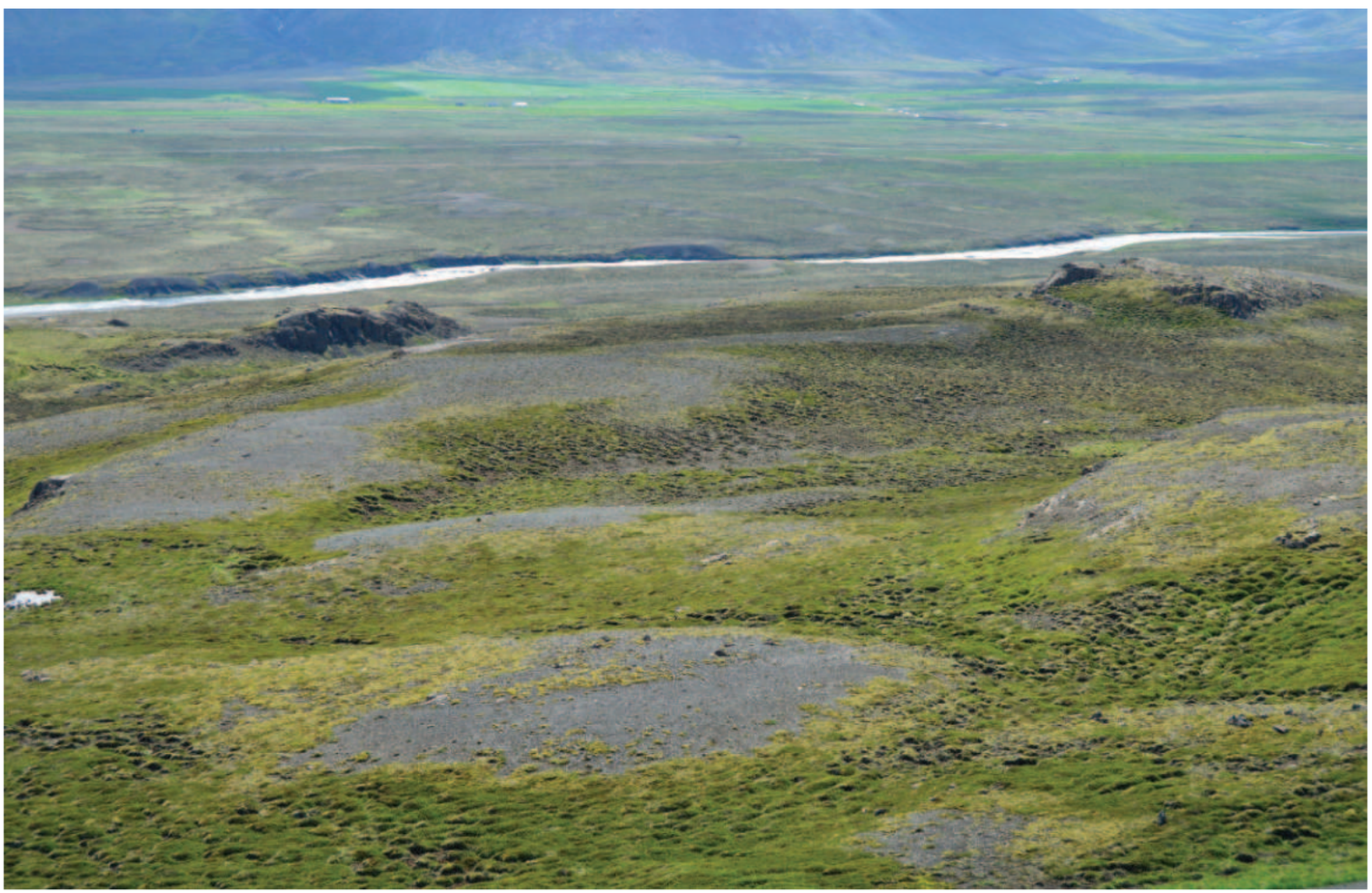
$: Í 20 cm hæð í stormum. Byggt á óbirtum samanburðargögnum LbhÍ og Lr (Ólafur Arnalds og Guðmundur Halldórsson).
#: Mögulegar breytingar á hitastigi (°C) á 1–2 cm jarðvegsdýpi á einum sólarhring.
&: Miðað við frost í jörðu. Byggist fyrst og fremst á gögnum Berglindar Orradóttur og mælingum LbhÍ/Lr (Ermond-verkefnið – óbirt). Sjá 16. kafla um kulferli.
€: Byggt á gögnum LULUCF-verkefnis (LbhÍ).
Y: Byggt á gagnagrunni LbhÍ (Ýmir, COST 622) og birtum greinum ÓA (sjá Ólaf Arnalds 2015).
Z: E: water holding capacity. Miðað við þurrvigt moldar, meðaltal í landslaginu. Gögn úr Ými (LbhÍ) og frá Ólafi Arnalds 2015.

Mynd 19.16. Heilt vistkerfi. Meiðavallaskógur í Kelduhverfi. Skógurinn er töluvert beittur en heldur helstu einkunnum vistkerfisins sem og framleiðni.



Mynd 19.17. Skert vistkerfi (stig II) á Suðurlandi. Gróðurhula er enn til staðar og lítið rof, sem réttlætir stig II, en lítið vantar upp á að svæðið flokkist sem spillt vistkerfi (stig III) því að gróðurhulan er afskaplega rýr miðað við vistgetu (kjarrlendi).





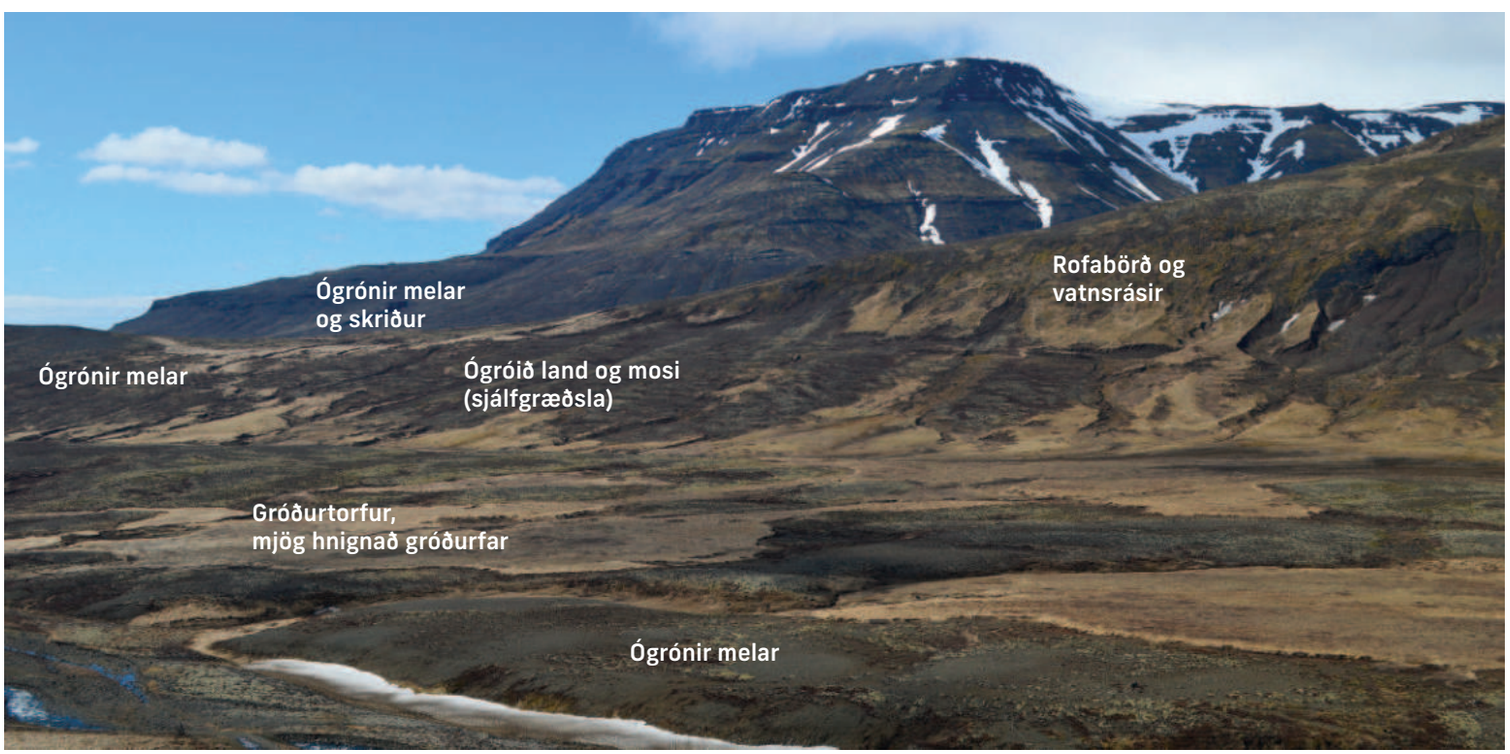
Mynd 19.18. Spillt kerfi (stig III) á Norðvesturlandi (báðar myndirnar). Talsvert hefur gengið á gróðurþekjuna og hún er víða opin. Svæðin hafa verið mikið beitt. Ástand lands telst ekki gott en svæði sem þessi eru þó iðulega metin sem svo að þau séu í ásættanlegu ástandi. Mikilvægt er að nýjar aðferðir til að meta ástand lands nái utan um landhnignun af þessu tagi. Votlendi á efri myndinni virðist hafa verið raskað að nauðsynjalausu með skurði. Sjá einnig mynd 19.19 sem dæmi um land á stigum III og IV.

auðveldlega verið 10–14% í A-lögum (yfirborðslögum) í óröskuðum birkiskógi. Hér er yfrið nóg af næringu og orku fyrir kröftug vistkerfi. Auk þess er nóg af leir og lífrænum efnum til að halda í vatn og miðla því yfir þurrkatíma – þanþolið gagnvart áföllum er mikið.

II. Skert vistkerfi. Landnýting í nokkurn tíma hefur skert eða eytt kjarrinu sem fyrir var og gróðurfarið er tekið að einkennast af tegundum sem þola beit eða eru lítt bitnar (t.d. lyngtegundir) þar sem er þurrt, en grastegundum, störum o.fl. þar sem er rakara (mynd 19.17). Gróðurhæð er lægri og því er skjólið minna; vindhraði við yfirborð eykst sem dregur úr snjósöfnun samanborið við stig I. Þúfnamyndun er oft áberandi.

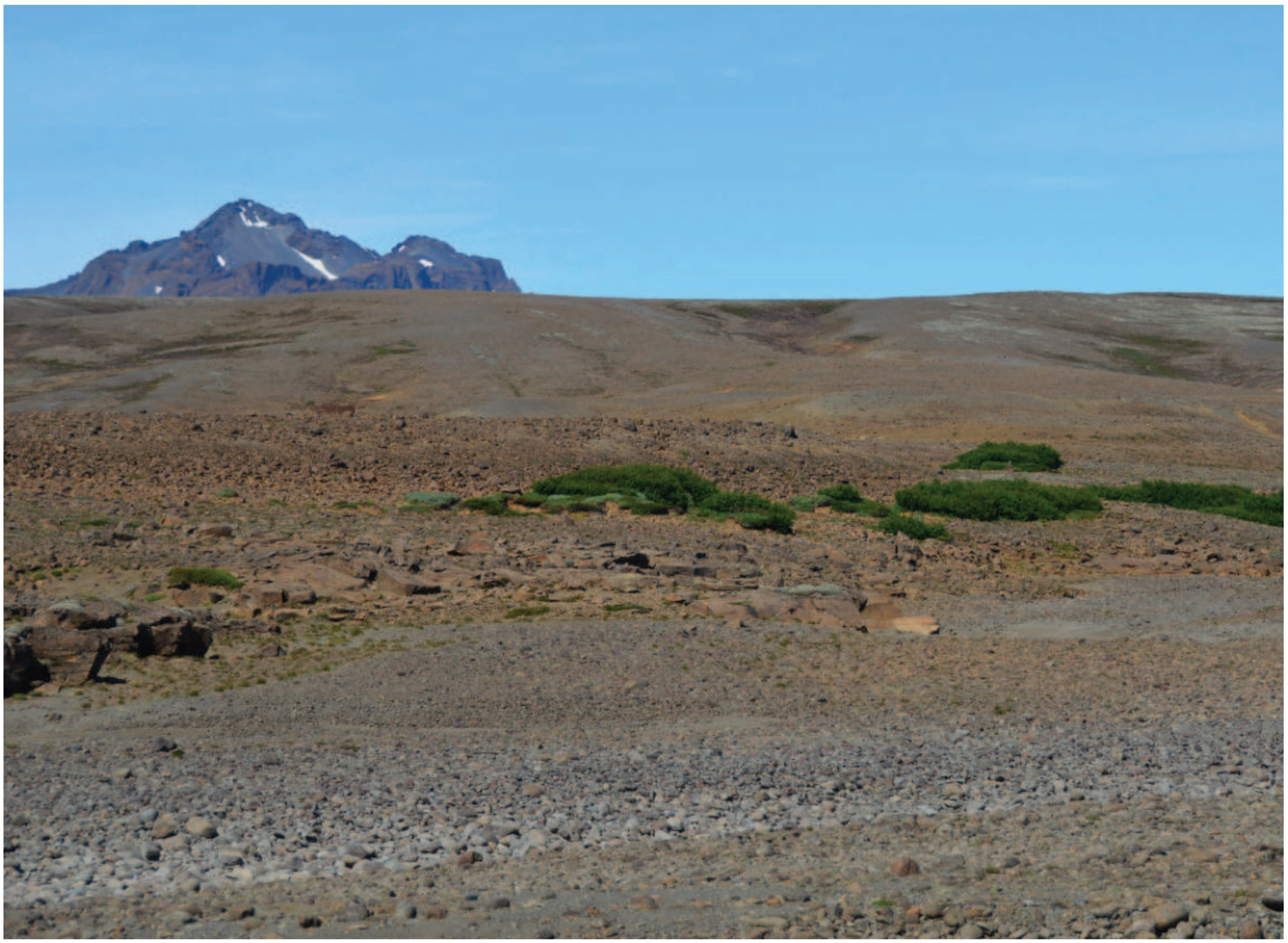
Hitasveiflur í jarðveginum hafa aukist en vatn kemst enn ofan í moldina að vetri. Frjósemi er umtalsverð en þó er mun minni lífrænn forði en í heilu vistkerfi. Rofdílar eru teknir að sjást í gróðurhulinni. Vistkerfi geta haldist stöðug á þessu stigi á sléttlendi og hafa umtalsvert þanþol. Í kjölfar eyðingar birkiskóga hefur næringarforði moldarinnar verið mjög mikill til að byrja með og þanþolið samkvæmt því, en með langvarandi nýtingu gengur á þennan forða. Kólnandi veðurfar eða náttúruleg áföll á borð við gjóskugos geta í sumum tilfellum skilað vistkerfum niður á þetta stig, sem er síðan viðhaldið sem slíku ef landnýting er til staðar (sbr. rannsóknir Sigrúnar Daggar Eddudóttur o.fl. 2015, 2016, 2017).

III. Spillt vistkerfi. Gróðurhæð er fremur lítil og einkennist af tegundum sem þola beit sem og af beitarfælnum plöntum (oft rýrt mólendi og mosaþemba, sjá ÓA og Ásu L. Aradóttur 2015 og Sigþrúði Jónsdóttur 2010). Þúfur eru áberandi og rofdílar víða í þekjunni (mynd 19.18). Melar og ógróið land er komið til sögunnar á milli gróinna svæða á landslagsskala – mósaík sem einkennist af miklum andstæðum. Mjög hefur gengið á lífrænan forða moldarinnar og umsetning næringarefna er hægari en í landi á stigum I og II.



Mynd 19.19. Land sem telst rofsvæði (IV). Rofið hefur verið mun meira áður fyrr. Stór hluti landsins er ógróinn vegna ofnýtingar og hnignunar vistkerfa. Margir álíta að land sem þetta sé í eðlilegu ástandi. Það er fjarri lagi. Hér hefur skógur verið ráðandi áður fyrr ásamt votlendi, en nú er landið í tötrum. Gróðurinn tórir þar sem þanþol var mest, t.d. í brekkurótum og hálfdeigju úti á flatlendinu. Landið er heldur að gróa saman aftur, enda lægra nýtingarstig en áður var, m.a. hefur sums staðar myndast mosaþemba á ógrónum melum. Á myndinni, sem er tekin árið 2018, sést á Þverárkotsháls, sunnan Esju.

Mynd 19.20. Gróðurleifar í hlíðum. Það er afar misjafnt hvernig gróðri í hlíðum landsins hefur reitt af. Mest hefur rofið verið þar sem eru langar samfelldar hlíðar. Myndin til vinstri er frá Miðnorðurlandi en sú til hægri frá Vestfjörðum.



Mynd 19.21. Gróðurtorfur við Grjótá á Biskupstungnaafrétti. Þær eru vitnisburður um horfinn náttúruauð. Svæðið var áður að mestu hulið birkiskógi og þarna hafa fundist ummerki um kolagerð.

Framþróun lands við friðun, sem og uppsöfnun kolefnis, niturs og annarra næringarefna, gengur hægt fyrir sig og því tekur langan tíma að ná fyrra stigi (oft nokkrir áratugir, hægast fyrst). Víða myndast ógegndræpur holklaki vegna skorts á einangrun, sem leiðir til yfirborðsrennslis, vatnsrofs og taps á vetrarvatni úr kerfinu. Slíkt ástand getur einnig valdið mengun vatnsbóla þegar moldarmengað vatn sígur til grunnvatns í vatnsveðrum (einnig stig IV–VI). Sinumyndun er lítil og hún veitir því ekki einangrun, sem eykur enn á hitastigssveiflur. Jarðvegsrof er nokkuð, m.a. frá rofdílum og ógrónum svæðum, en einnig eru rofabörð algeng þar sem moldin er nægjanlega djúp. Vatnsrásir eru teknar að einkenna hlíðar. Losun kolefnis sem CO_2 getur verið umtalsverð um leið og kolefnisforði kerfisins fer minnkandi (sjá ÓA og Jón Guðmundsson 2020).

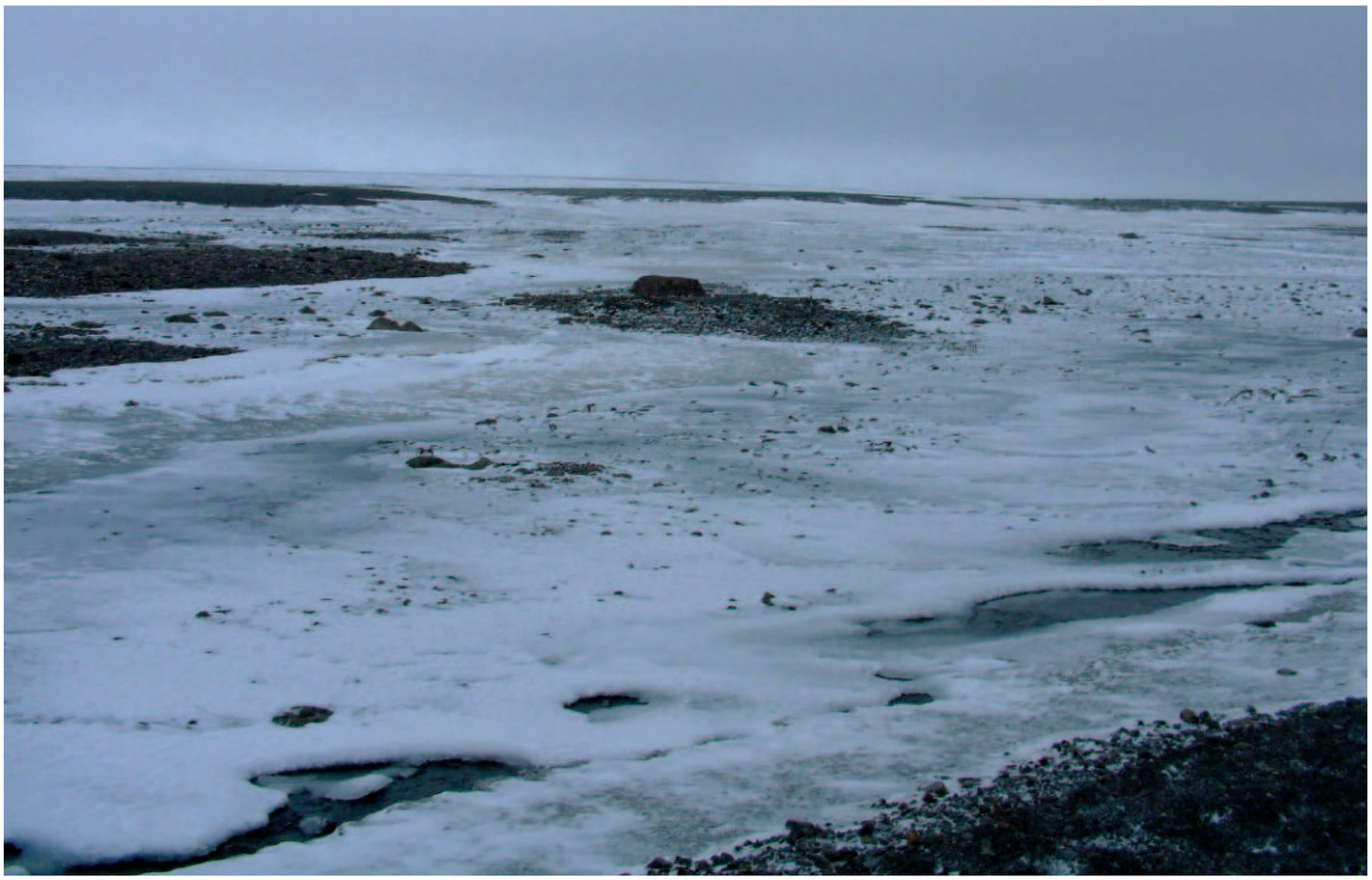
IV. Rofsvæði. Land á þessu stigi einkennist af ummerkjum um tap á mold vegna jarðvegsrofs (mynd 19.19). Landgerðin er oft tvískipt: annars vegar gróin kerfi en hins vegar illa gróið land. Grónu blettirnir eru þar sem meira þanþol hefur tafið eyðinguna, t.d. þar sem rakastig er hagstætt miðað við aðstæður á svæðunum sem eru orðin illa gróin. Moldin sem fyrir var er hins vegar horfin af þeim stöðum þar sem kerfin voru viðkvæmari, t.d. í halla, á hæðum eða þar sem rakaskilyrði voru hlutfallslega lakari. Þegar hér er komið sögu hefur orðið vistkerfishrun og slíkt land ætti ekki að nýta til beitar (né svæði á stigum V og VI), jafnvel þótt vel grónir blettir séu til staðar. Auðnasvæðin hafa mjög skert gildi fyrir þættina sem sýndir eru í töflu 19.4. Það er háð jarðvegsþykkt og fleiri þáttum hver ásýnd landsins er.

Rofabarðasvæði eru táknræn fyrir þetta stig við gosbelti landsins þar sem moldin er nægjanlega djúp. En mörg svæði eru hálfgróin og í slæmu ástandi þótt þau séu án rofabarða og er því oft ekki veitt athygli (mynd 19.19). Þetta stig varir mislengi; í stuttan tíma þar sem moldin er viðkvæm, þar sem moldin er gróf og þar sem lítið er um votlendi og hálfdeigur. Annars staðar er þetta stig nokkuð stöðugt þar sem eftir sitja gróðurleifar á stöðum með mikið þanþol gagnvart raski og rofi (mynd 19.19), sem er trúlega algengara nú til dags en t.d. fyrir tveimur öldum.

V. Gróðurtorfur. Víða eru svæði sem einkennast af illa grónu landi en eftir standa stakar gróðureyjar sem eru til vitnis um þau vistkerfi sem áður voru til staðar. Torfurnar hafa því „heimildagildi“, og raunar er það svo að stakar torfur í auðnalandi vekja undrun, t.d. í bröttum hlíðum þar sem annars er lítið um gróður (mynd 19.20). Þessar eyjur geta líka verið gróður í giljadrögum og annars staðar þar sem þanþolið var meira, en almennt er landið fremur illa gróið á þessu ástandsstigi. Dæmi um land á stigi V er víða á afréttum sunnanlands þar sem fátt bendir annars til að landið hafi verið gróið (mynd 19.21). Á þessum svæðum má jafnvel finna kolagrafir – þar sem nú er auðn var gert til kola í birkiskógi fyrr á öldum (t.d. Sturla Friðriksson 1991, Sturla Friðriksson og Grétar Guðbergsson 1995). Eyjurnar og kolagrafirnar eru vitnisburður um algjört vistkerfishrun. Slíkt land ætti vitaskuld skilyrðislaust að vera friðað fyrir beit. Gróðurtorfur í auðnum eru mikilvægar fræuppsprettur þegar landið fær frið og tekur að gróa upp að nýju. Land á þessu ástandsstigi er mikilvægt til kolefnisbindingar samhliða endurheimt landgæða á landslagsskala.

VI. Auðnir. Auðnir eru lokastig hruns vistkerfa (mynd 19.22). Þær telja land þar sem hin lífræna *sortujörð* (*brúnjörð*, *votjörð*, *svartjörð*) er ekki lengur til staðar. Stundum hafa jafnvel votlendi eyðst. Lífræn efni og næringarefni eru aðeins í takmörkuðum mæli og nægja ekki fyrir samfelldan gróður; það er jafnvel 100 sinnum minna kolefni og

Mynd 19.22. Auðn. Hér er orka ekki numin inn í kerfið (ljóstillífun), vatnsheldni er takmörkuð og yfirborðið afar óstöðugt.



Mynd 19.23. Klaki á yfirborði auðnar. Ísig er takmarkað á vetrum og því geta myndast mikil svellalög sem hafa neikvæð áhrif á umhverfið. Úrfelli á freðna jörð auðna geta orsakað mikil flóð í ám.

nitur í mold auðnarinnar en í óraskaðri mold á stigi I (tafla 19.4). Plöntur sem þrífast í jarðvegi auðna (að mestu *glerjörð*) þurfa víðtækt rótarkerfi til að nema næringu og vatn úr moldinni. Til þess þarf að verja stórum hluta orkunámsins (með ljóstillífun), og þessar plöntur eru einstaklega viðkvæmar fyrir því að ofanjarðarhluti þeirra skerðist af völdum beitar.

Segja má að auðnastigið sé nokkuð stöðugt – landið grær ekki svo auðveldlega upp að nýju – en því valda margir þættir. Ísnálar koma í veg fyrir að fræplöntur festi rætur. Þéttur holklaki undir yfirborðinu á vetrum hamlar ísigi, sem veldur miklu afrennsli og vatnsrofi. Flóð á vetrum, í kjölfar snöggrar þíðu og mikillar úrkomu, eru vel þekkt á svæðum sem þessum. Á öðrum tímum geta myndast ísalög vegna skorts á ísigi (mynd 19.23). Á sumrin er oft skortur á vatni, jafnvel í stuttum þurrkaköflum, því hæfileikinn til að miðla vatni hefur glatast. Hitabreytingar eru afar miklar og uppgufun getur orðið mjög ör þegar dökkt yfirborðið hitnar í sólskini. Auk þess er ekkert sem hamlar miklum vindi við yfirborðið, snjósöfnun er lítil – nærveður er óhagstætt.

Skortur á stöðugleika er mikið vandamál, ekki síst þar sem sandur er í yfirborðinu. Oft þarf lífræna jarðvegsskán til að koma af stað framvindu, en hún dregur úr uppgufun sem og myndun holklaka og ísnála, en jafnframt nemur hún nitur úr andrúmsloftinu og býr til fræbeð („örugg set") fyrir fræ háplantna. Skánin er afar viðkvæm fyrir traðki búfjár og vindrofi, ekki síst þar sem sandur er í yfirborði. Þar sem langt er í uppsprettur fræs frá gróðureyjum er fræskortur einn þeirra þátta sem hamla endurgræðslu, jafnvel þar sem svæði hafa verið friðuð fyrir beit. Mjög mikil fræframleiðsla, t.d. þar sem öflugir birkiskógar eru í nánd, hefur hins vegar mjög jákvæð áhrif á framvindu, eins og rannsóknir á Skeiðarársandi og víðar sýna ljóslega (Þóra Ellen Þórhallsdóttir 2015, Bryndís Marteinsdóttir o.fl. 2017, Þóra Ellen Þórhallsdóttir og Kristín Svavarsdóttir 2022).

Oft kemur upp sú spurning hvort auðnir séu náttúrulegt ástand landsins (mynd 19.22). Þær eru gjarnan settar í samhengi við óspillt víðerni eða ósnerta náttúru. Vissulega eru margar auðnir landsins náttúrulegar, t.d. auðnir sem liggja mjög hátt yfir sjávarmáli,

Mynd 19.24. Auðn vestan upptaka Köldukvíslar við vestanverðan Vatnajökul. Svæðið stendur hátt en gróður lifir í lægðum þar sem rakaástand er gott. Skil á milli svæða sem eru auðnir frá náttúrunnar hendi eða að hluta myndaðar vegna nýtingar á afar viðkvæmum kerfum eru iðulega óljós. Myndin er tekin árið 2020.

gjóskusvæði (t.d. Veiðivatnasvæðið, a.m.k. að hluta) og flóðasléttur eftir hamfarahlaup (t.d. Krepputunga). Sumar auðnir hafa myndast vegna margra samverkandi þátta. Það eru þó afar sterkar vísbendingar um að mörg auðnasvæði landsins hafi áður verið gróin en síðar orðið fyrir eyðingu. Þetta á t.d. við um víðáttur Ódáðahrauns þar sem moldarleifar finnast undir sandinum sem nú hylur svæðið (ÓA 1992). Þá er líklegt að margar flóðasléttur á láglendi væru betur grónar, þrátt fyrir hamfarahlaup í jökulám, ef sterkur gróður myndi þekja svæðin umhverfis, m.a. víðáttumiklir fræberandi birkiskógar, eins og reynslan á Skeiðarársandi bendir sterklega til, og einnig þar sem víðitegundir eru til staðar í sverði (sjá Þóru Ellen Þórhallsdóttur 2015). Sums staðar er enginn vafi á að auðnir eru afleiðing eyðingar vegna nýtingar; þess sér m.a. mjög víða stað í afréttarlöndum sem eru neðan 5–600 m hæðar.

Rétt er að hafa í huga að kerfið til að meta ástand lands sem hér var lýst er almennt og nær í raun aðeins upp að hálendisbrúninni, en eðli landsins er ákaflega mismunandi og því er ekki hægt að heimfæra kerfið að öllu leyti upp á allar aðstæður. Því er ætlað að hjálpa til við mat á landi; að gefa viðmið sem hægt er að styðjast við – „stafróf fyrir lestur landsins“ – til að lækna „samdaunasýki“ (sjá 21. kafla). Aftur má benda á kerfi Isabel C. Barrio o.fl. (2018), sem byggist á vistþrepa-líkönum, til að fá gleggri mynd af ástandsstigum og færslum á milli þeirra (einnig „stöðu- og færslulíkön“, e. „state and transition models“).

19.5. Stöðumat á íslenskum vistkerfum – verkefnið „GróLind“

Á undanförnum árum hefur verið unnið að verkefninu „GróLind“ sem hefur það að markmiði að „(a) meta með reglubundnum hætti ástand gróður- og jarðvegsauðlinda landsins og (b) þróa sjálfbærnivísa fyrir nýtingu gróður- og jarðvegsauðlinda landsins“ (Bryndís Marteinsdóttir o.fl. 2020). Landgræðslan fer með framkvæmdina fyrir hönd samstarfsaðila, sem eru Bændasamtök Íslands, Landssamtök sauðfjárbænda og Matvælaráðuneytið (stjórnskipan 2022), sem fer með fjármögnun í tengslum við búvörusamninga (auk fjármagns frá Landgræðslunni).

Tafla 19.5. Virknieinkunn fyrir mælibreytur úr vistgerðaflokkun NÍ og kortlagningu á rofi (Rala/Lr) við stöðumat GróLindar.

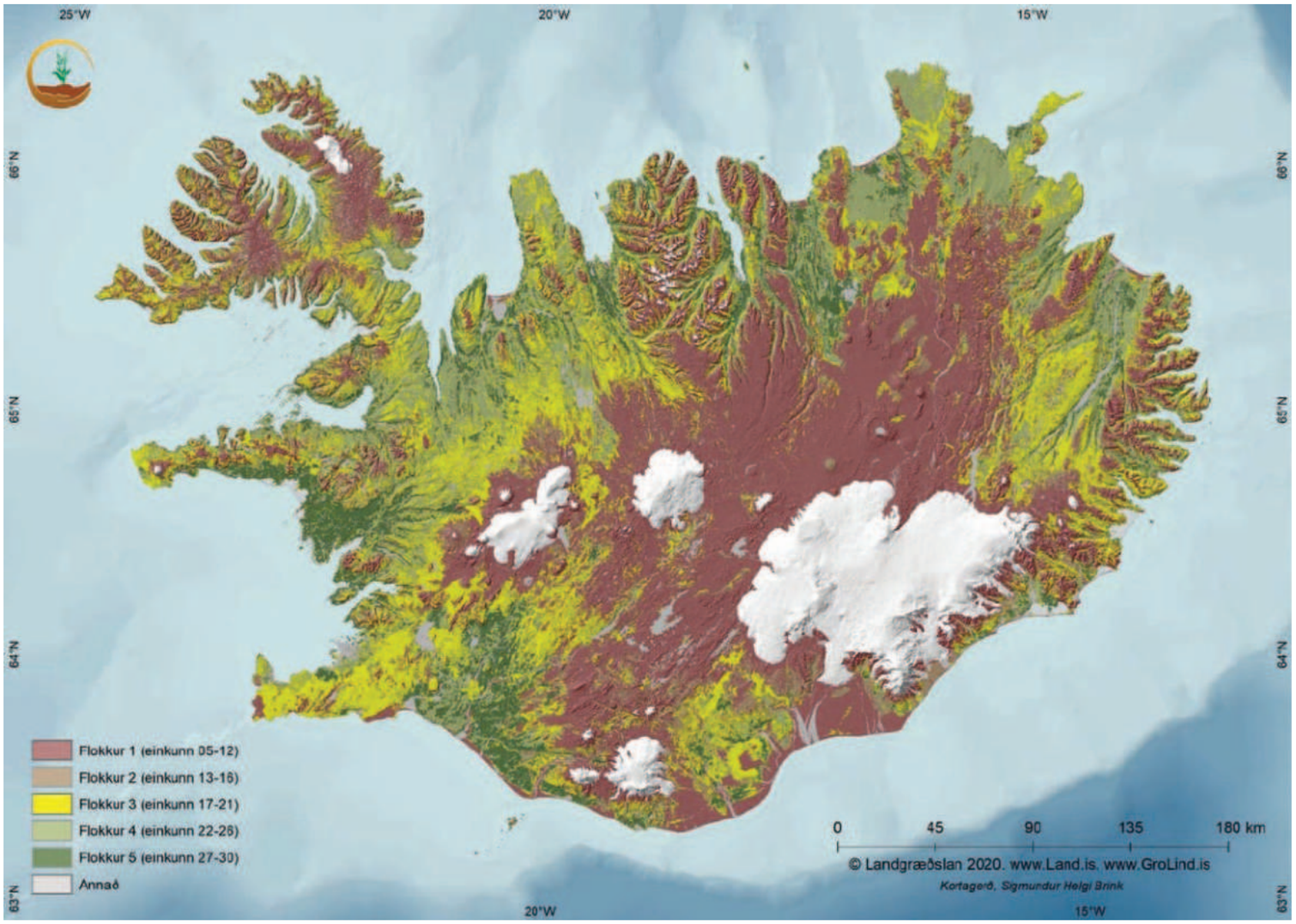
	Virknieinkunn				
Mælibreyta fyrir vistgerðir	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Gróðurhæð (cm)	<5	5–9	10–14	15–39	>40
Óvarinn jarðvegur (%)	50–100	30–49	20–29	10–19	<10
Þekja æðplantna (%)	<10	10–19	20–39	40–59	60–100
Kolefni í jarðvegi (%)	<1	1–3,4	3,5–5,9	6–11,9	>12

Rofeinkunn GróLind	**1**	**3**	**5**	**7**	**9**	**10**
Rofeinkunn rofkort Rala/Lr	5	4	3	2	1	0
Lýsing rofs	Mjög mikið	Mikið	Talvert	Nokkurt	Lítið	Ekkert

Verkefnið hefur að leiðarljósi svipuð sjónarmið og aðferðafræði og lýst var hér á undan þar sem vistgeta er höfð sem viðmið. Eldri íslenskar aðferðir eru hafðar til hliðsjónar, m.a. ákvörðun jarðvegsrofs (ÓA o.fl. 1997), mat á hrossahögum (Borgþór Magnússon o.fl. 1997), mat á sauðfjárhögum (Sigþrúður Jónsdóttir 2010), ástandsflokkar Ásu L. Aradóttur o.fl. (1992; einnig ÓA og Ása L. Aradóttir 2015), sem og aðferðir til að meta áfallaþol vistkerfa umhverfis Heklu vegna mögulegs öskufalls (Elín Fjóla Þórarinsdóttir o.fl. 2017). Við verkefnið er einkum ofin saman kortlagning á vistgerðum á vegum Náttúrufræðistofnunar Íslands (Jón Gunnar Ottósson o.fl. 2016) og kortlagning á jarðvegsrofi á vegum Landgræðslu ríkisins og Rannsóknastofnunar landbúnaðarins (Ólafur Arnalds o.fl. 1997). Vistgerðum eru gefnar einkunnir byggðar á gróðurhæð, þekju óvarins jarðvegs, þekju

Tafla 19.6. Ástandskvarði verkefnisins GróLindar, sem skipt er niður í fimm ástandsflokka frá mjög lítilli virkni (lág heildareinkunn; slæmt ástand) til stöðugra og virkra vistkerfa (há heildareinkunn). Litir í töflunni fylgja litum sem notaðir eru á kortinu sem sýnir ástand landsins.

	Mjög lítil virkni eða stöðugleiki			Mikil virkni og stöðugleiki	
	Flokkur 1	Flokkur 2	Flokkur 3	Flokkur 4	Flokkur 5
Einkunn – vistgerð + rof	5–12	13–16	17–21	22–26	27–30

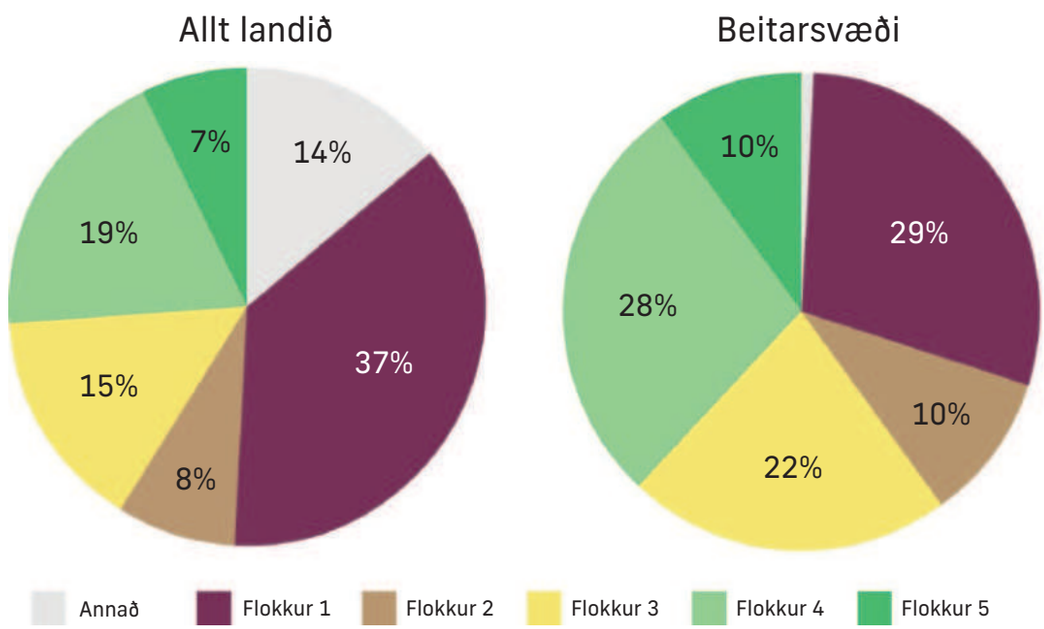


Mynd 19.25. Ástand íslenskra vistkerfa – verkefnið GróLind. Lágar einkunnir þýða slæmt ástand en háar (grænlitað) gott ástand lands. Heimild: grolind.is, júlí 2020/Bryndís Marteinsdóttir o.fl. 2020.

æðplantna og kolefnisinnihaldi, allt þættir sem nefndir eru í töflu 19.4 um mögulega þætti til að meta ástand lands. Gefnar voru „virknieinkunnir“ sem sýndar eru í töflu 19.5, en þeim er ætlað að endurspegla ástand vistkerfa. Síðan voru rofeinkunnum samkvæmt kortlagningu á jarðvegsrofi gefin gildi frá einum til tíu: 10 þar sem er ekkert rof en 1 þar sem rofið telst mjög mikið.

Í júní 2020 var birt stöðumat verkefnisins um ástand gróður- og jarðvegsauðlinda Íslands (mynd 19.25; Bryndís Marteinsdóttir o.fl. 2020, 2021). Stöðumatið fékkst með því að leggja saman virknieinkunn vistgerða (fjórar breytur með mögulegar einkunnir, samtals 4–20) og rofeinkunn fyrir jarðvegsrof (1–10). Þar með fékk jarðvegsrof um þriðjung hlutdeildar í heildareinkunninni (með breiðari skala – hærri tölur ef land er í góðu ástandi) en þess getið að illa gróið land kæmi einnig fram í einkunn fyrir vistgerðir. Heildareinkunn eftir samlagningu þessara fimm þátta var skipt niður í fimm ástandsflokka (tafla 19.6), en litir í töflunni eiga sér samsvörun í heildarkortinu sem sýnir niðurstöðurnar (mynd 19.25).

Kortið sýnir vel að ástand beitilands með tilliti til virkni og stöðugleika samkvæmt aðferðafræði GróLindar er víða langt frá því að vera ásættanlegt – kortið sýnir vel dapurlegt ástand íslenskra vistkerfa. Í skjali sem lýsir aðferðafræðinni eru ljósmyndir, sem sýna dæmi um hvers kyns land einkennir flokkana fimm, sem vert er að gefa gaum (Bryndís Marteinsdóttir o.fl. 2020) en þeir eiga margt sameiginlegt með ástandsflokkunum I–VI sem lýst var hér á undan. Samkvæmt þessu fyrsta mati GróLindar eru 29% af því svæði sem nú er skilgreint sem beitarsvæði í flokki 1, sem nær yfir verst farna landið miðað við gróðurhulu og jarðvegsrof (mynd 19.26). Þessi tölfræði er vitaskuld langt frá því að vera ásættanleg er varðar nýtingu lands, sem í þokkabót er að stórum hluta rekin fyrir almannafé. Flokkar 1 og 2, sem sannarlega verður að telja sem óheppilegt beitiland, eru samtals 39% þess lands sem gefið er upp til beitar af sauðfjárbændum. Þó er það svo að stærra land í flokkum 1 og 2 er nýtt til beitar en hér er gefið upp (ÓA 2019). Ef gulu svæðunum (flokkur 3) er bætt við lendir ansi stór hluti lands sem nýttur er til beitar í þeim flokkum (61%).



Mynd 19.26. Ástand gróður- og jarðvegsauðlinda – fyrsta mat. Myndin er fengin úr glærukynningu GróLindar í júní 2020 (grolind.is). Flokkar 1 og 2 eru samtals 39% lands sem nýtt er til beitar, en mest af þessu landi er ekki hæft til slíkrar nýtingar. Um 38% lands sem telst beitarsvæði er í góðu ástandi samkvæmt þessum niðurstöðum. Sumt af því landi sem hér er talið utan beitarsvæða og telst til flokks 1 (versta ástandið) er sannarlega beitt.

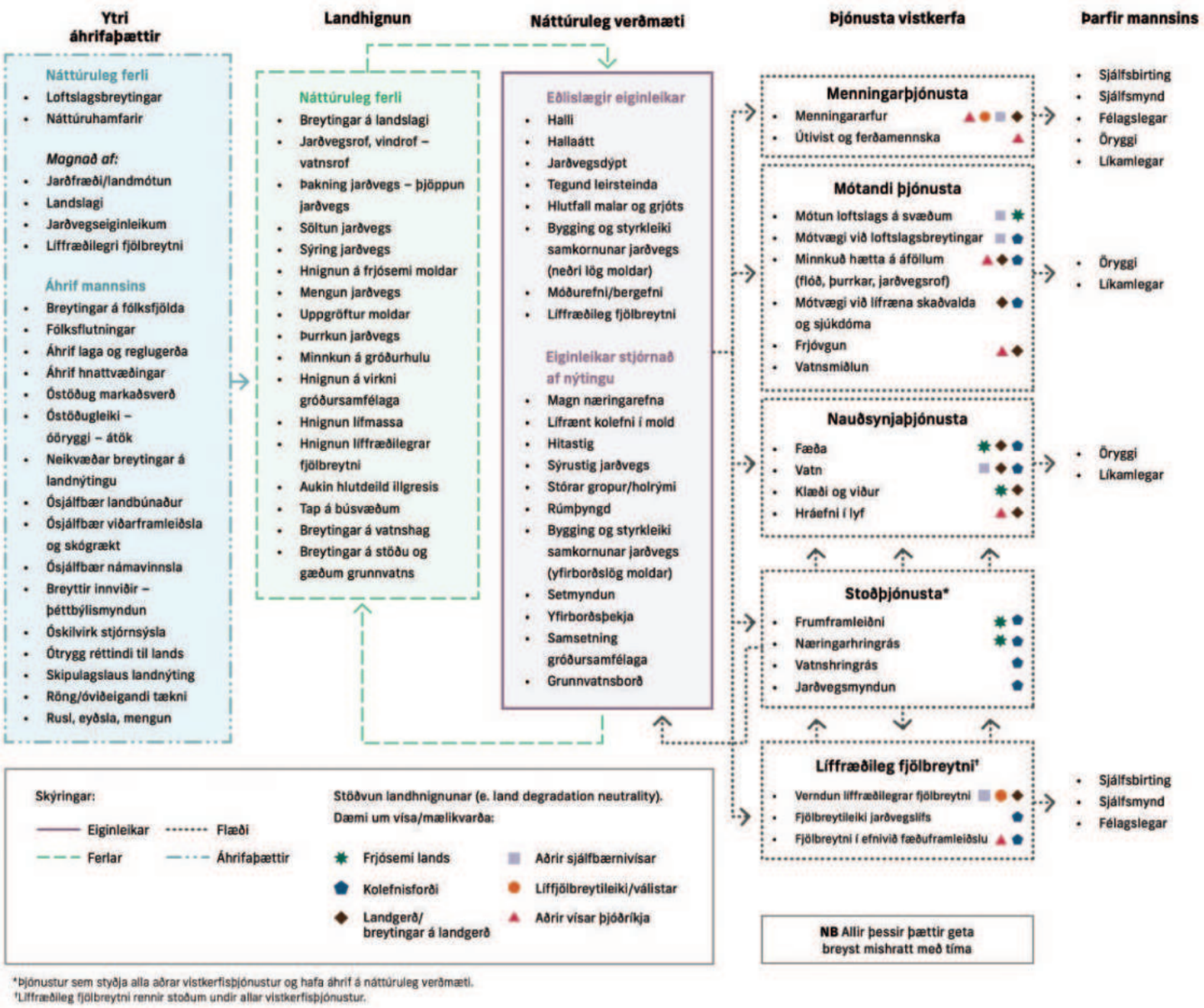
Niðurstöður GróLindar sýna svo ekki verður um villst að breyta þarf viðhorfum til þess hvaða land er nýtt til sauðfjárbeitar – ráða þarf bót á heilkenni breyttra grunnviðmiða meðal landnotenda og innan stjórnsýslunnar, sem hugsanlega ber merki „stofnanayfirtöku" (sjá 21. kafla). Niðurstöðurnar eru í raun mjög svipaðar þeim sem áður höfðu komið fram í rofkortlagningunni sem birt var 1997, en hér liggja aftur á móti að baki fjölbreyttari upplýsingar í mun betri upplausn en áður voru til. Vitaskuld hefði verið æskilegt fyrir bændur, samfélagið og vistkerfi landsins að landnýtingarþáttur gæðastýringar í sauðfjárrækt, sem komið var á m.a. vegna niðurstaðna úr rofkortlagningunni 1997, hefði tekið mun fastar á nýtingu svæða í slæmu ástandi. Þessar niðurstöður GróLindar eru þó aðeins áfangi í vinnu verkefnisins. Það blasir við að tengja þarf allar þessar upplýsingar við núverandi landnýtingu, skilja á milli einstakra beitarsvæða og gera tillögur um úrbætur.

Mikilvægt er að hafa í huga hvað varðar vöktunarhluta verkefnisins að breytingar á úthaga á hverjum stað eru líklegar til að takmarkast við hægfara þróun innan hvers vistþreps (sjá 21. kafla), en nauðsynlegt er að tengja stöðu hvers mælistaðar við ástand miðað við vistgetu (þ.e. festast ekki í heilkenni breyttra viðmiða). Höfundur þessa rits (ÓA 2019, 2020) hefur bent á að víkka þurfi út hugmyndir um hverjir teljist til hagaðila við nýtingu útjarðar. Tilhögun og stjórn verkefnisins GróLindar hefur ýkt upp þá hugmynd að afréttir og útjörð varði aðeins sauðfjárbændur. Það er brýnt að verkefni sem þetta, kostað af fjármunum almennings, sé sjálfstætt og byggt á aðkomu mun fleiri aðila. Hér væri æskilegt að hugsa málin upp á nýtt.

19.6. Lokaorð

Slæmt ástand vistkerfa jarðar er ásamt loftslagsbreytingum alvarlegasti umhverfisvandinn sem mannkynið glímir við. Enda er áratugurinn 2021–2030 helgaður endurheimt vistkerfa – vistheimt – á vettvangi Sameinuðu þjóðanna. Á Íslandi hefur orðið mjög alvarleg hnignun landkosta og víða fullkomið hrun vistkerfa – Ísland er notað sem dæmi um hrun vistkerfa á alþjóðavettvangi. Rannsóknir á landhnignun og ástandi lands er afar mikilvægt þverfaglegt viðfangsefni (mynd 19.27) sem er lykillinn að bættri landnýtingu og endurheimt vistkerfa.

Ástand lands er unnt að meta út frá mælanlegum þáttum vistkerfa á borð við gróðurhulu, samsetningu, frjósemi jarðvegs og þáttum sem móta vatnshringrásina í samhengi við þanþol og vistgetu vistkerfa (e. ecological potential). Þess er að vænta að ör þróun verði á næstu árum hvað varðar mat á ástandi lands og eftirfylgni sem ætlað er að tryggja sjálfbæra landnýtingu – m.a. í kjölfar nýrra laga um landgræðslu sem sett voru í lok árs 2018. Ennþá var unnið að nýrri reglugerð um sjálfbæra landnýtingu í samræmi við þessi lög þegar þessi orð voru rituð (júní 2022).



Mynd 19.27. Skýringarmynd sem sýnir tengsl landhnignunar við náttúrulega og félagslega vísa (e. indicators) eins og hún var lögð fram af Umhverfisstofnun Evrópu í byrjun árs 2023. Úr verður víðtækt net sem er að mörgu leyti í anda þeirrar nálgunar sem þessi bók setur fram. Unnið upp úr mynd 1.4 í *Soil Monitoring in Europe. Indicators and Thresholds for Soil Health Assessments*. Umhverfisstofnun Evrópu, nr. 08–2022, Kaupmannahöfn.

Heimildir

Heildstæða nálgun á umfjöllun um landhnignun er m.a. að finna í bók Antons Imeson „Desertification, Land Degradation and Sustainability“, bók Evrópusambandsins „World Atlas of Desertification. Rethinking Land Degradation and Sustainable Land Management“ (Cherlet o.fl. 2018) og í „Scientific Conceptual Framework for Land Degradation Neutrality“ (Orr o.fl. 2017) sem var gefin út á vegum „Auðnasamningsins“ (UN-CCD – sjá umfjöllun síðar). Einnig er rétt að benda á „Global Land Outlook“ sem einnig var gefin út á vegum Auðnasamningsins (UN-CCD 2022). Yfirgripsmikil skýrsla samningsins um líffjölbreytileika (IPBES 2019) tekur á mörgum þessara sömu atriða.

ÓA og Ása L. Aradóttir (2015) rituðu kennsluefni um landlæsi og vistheimt (Að lesa og lækna landið) sem var gefið út af Landvernd, Landgræðslu ríkisins og Landbúnaðarháskóla Íslands, en ritinu var ætlað að auka almennt landlæsi. Sumt af því efni sem hér birtist er einnig að finna í því riti. Þá má nefna greinar eftir Isabel Barrio og ÓA 2022 og ÓA o.fl. 2022 þar sem ástand lands á Íslandi ber á góma. Við umfjöllun á aðferðum við mat á landi er byggt á skrifum sem hafa birst á alþjóðlegum vettvangi á þessu sviði (t.d. Doran og Jones 1996, Tongway og Hindley 2000, Bestelmeyer o.fl. 2003, Herrick o.fl. 2005, 2018, Pellant o.fl. 2019; sjá einnig Bland o.fl. 2018, Briske 2017a,b).

Archer, S. og C.J. Stokes 2000. Stress, disturbance and change in rangeland ecosystems. Í: Ólafur Arnalds og S. Archer (ritstj.), Rangeland desertification. Kluwer Publishing Company, Dordrecht, Holland. Bls. 17–38.

Ása L. Aradóttir, Ólafur Arnalds og S. Archer 1992. Hnignun gróðurs og jarðvegs. Í: Andrés Arnalds (ritstj.), Græðum Ísland IV. Landgræðsla ríkisins, Gunnarsholti. Bls. 73–82.

Bestelmeyer, B.T., D.P. Goolsby og S.R. Archer 2011. Spatial perspectives in state-and-transition models: a missing link to land management? Journal of Applied Ecology 48:746–757.

Bestelmeyer, B.T., J.R. Brown, K.M. Havstad, G. Alexander, G. Chavez og J. Herrick 2003. Development and use of state-and-transition models for rangelands. Journal of Range Management 56:114–126.

Bestelmeyer, B.T., A. Ash, J.R. Brown, B. Densambuu, M. Ferández-Giminéz, J. Johanson, M. Levi, D. Lopez, R. Peinetti, L. Ruumpff og P. Shaver 2017. State and transition models. Theory, applications and challenges. Í: D.D. Briske. Rangeland Systems. Processes, Management and Challenges. Springer Open, Cham, Sviss. Bls. 303–345.

Bland, L.M., J.A. Rowland, T.J. Regan, D.A. Keith, N.J. Murray, E.R. Lester, M. Linn, J.P. Rodríguez og E. Nicholson 2018. Developing a standardized definition of ecosystem collapse for risk assessment. Frontiers in Ecology and the Environment 16:29–36.

Borgþór Magnússon, Ásrún Elmarsdóttir og Björn H. Barkarson 1997. Hrossahagar. Aðferð til að meta ástand lands. Rannsóknastofnun landbúnaðarins (nú LbhÍ), Reykjavík.

Briske, D.D. 2017a. Rangeland Systems. Processes, Management and Challenges. Springer Open, Cham, Sviss.

Briske, D.D. 2017b. Rangeland systems: Foundation for conceptual framework. Í: D.D. Briske (ritstj.), Rangeland Systems. Processes, Management and Challenges. Springer Open, Cham, Sviss. Bls. 1–21.

Briske, D.D., A.W. Illius og J.M. Anderies 2017. Nonequilibrium Ecology and Resilience Theory. Í: D.D. Briske (ritstj.), Rangeland Systems. Processes, Management and Challenges. Springer Open, Cham, Sviss. Bls. 197–227.

Bryndís Marteinsdóttir, Kristín Svavarsdóttir, Þóra Ellen Þórhallsdóttir 2017. Multiple mechanisms of early plant community assembly with stochasticity driving the process. Ecology 99:DOI: 10.1002/ecy.2079.

Bryndís Marteinsdóttir, Elín Fjóla Þórarinsdóttir, Guðmundur Halldórsson, Jóhann Helgi Stefánsson, Jóhann Þórsson, Kristín Svavarsdóttir, Rán Finnsdóttir og Sigþrúður Jónsdóttir 2021. GroLind-Sustainable Land Use Based on Ecological Knowledge. The XXIV International Grassland Congress / XI International Rangeland Congress. Virtual conference, Kenya Agricultural and Livestock Research Organization.

Bryndís Marteinsdóttir, Elín Fjóla Þórarinsdóttir, Guðmundur Halldórsson, Jóhann Helgi Stefánsson, Jóhann Þórsson, Kristín Svavarsdóttir, Magnús Þór Einarsson, Sigþrúður Jónsdóttir, Sigmundur Helgi Brink 2020. Stöðumat á ástandi gróður- og jarðvegsauðlinda Íslands. Aðferðafræði og faglegur bakgrunnur. Drög. Landgræðsla ríkisins. grolind.is. Júní 2020.

Cherlet, M., C. Hutchinson, J. Reynolds, J. Hill, S. Sommer og G. von Maltitz (ritstj.) 2018. World Atlas of Desertificaton. Rethinking Land Degradation and Sustainable Land Management. Publication of the European Union, Luxemburg.

Diamond, J. 2005. Collapse. Penguin, New York, USA.

Doran, J.W. og J.J. Jones (ritstj.) 1996. Methods for Assessing Soil Quality. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.

Elín Fjóla Þórarinsdóttir, Fanney Ósk Gísladóttir, Anna Björk Þorsteinsdóttir, Sigmundur Helgi Brink og Guðmundur Halldórsson 2017. Kortlagning á áfallaþoli vistkerfa í nágrenni við Heklu með tilliti til öskufalls. Skýrsla til Ofanflóðasjóðs, Landgræðsla ríkisins og Landbúnaðarháskóli Íslands.

Forse, B. 1989. The myth of the marching desert. New Scientist 4. febrúar. Bls. 31–32.

Friðþór S. Sigurmundsson, Guðrún Gísladóttir og Hreinn Óskarsson 2014. Decline of birch woodland cover in Þjórsárdalur Iceland from 1587–1938. Human Ecology 42:577–590.

Gunderson, L.H., C.R. Allen og C.S. Holling 2010. Foundations of ecological resilience. IslandPress, Washington, USA.

Herrick, J.E. 2000. Soil quality: an indicator of sustainable land management? Applied Soil Ecology 15:75–83.

Herrick, J.E., J.W. Van Zee, K.M. Havstad, L.M. Burkett og W.G. Whitford 2005. Monitoring manual for grassland, shrubland and savanna ecosystems. Vol. I Quick start. Vol. II. Design, supplementary methods and interpretation. ARS Jornada Experimental Range, Las Cruces, New Mexico, USA.

Herrick, J.E., J.W. Van Zee, S.E. McCord, E.M. Courtright, J.W. Karl og L.M. Burkett 2018. Monitoring manual for grassland, shrubland and savanna ecosystems. Volume I. Core methods. 2. útg. USDA-ARS Jornada Experimental Range, Las Cruces, New Mexico, USA.

Holechek. J.L., R.D. Pieper og C.H. Hebel 2010. Range Management: Principles and Practices. Prentice-Hall, New Jersey, Bandaríkin.

Imeson, A. 2012. Desertification, Land Degradation and Sustainability. Paradigms, Processes, Principles and Policies. Wiley-Blackwell, Chichester, UK.

Ingvi Þorsteinsson 1980. Gildi úthagans og beitarþolsrannsóknir. Íslenskar landbúnaðarrannsóknir 12:5–10.

Ingvi Þorsteinsson, Ólafur Arnalds og Ása L. Aradóttir 1984. Rannsóknir á ástandi og beitarþoli gróðurlenda á Auðkúlu- og Eyvindarstaðaheiði 1983. Skýrsla Rannsóknastofnunar landbúnaðarins til Landsvirkjunar, Reykjavík.

IPBES 2019. Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. S. Díaz, J. Settele, E.S. Brondízio, H.T. Ngo, M. Guèze, J. Agard, A. Arneth, P. Balvanera, K.A. Brauman og 20 fleiri (ritstj.), Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, IPBES secretariat, Bonn, Þýskaland.

Isabel Barrio og Ólafur Arnalds 2022. Agricultural land degradation and ecosystem collapse in Iceland. Í: P. Pereira, I. Bogunovic, M. Munoz Rojas and W. Zhao (ritstj.), Global Agricultural Land Degradation, Volume I, The Handbook of Environmental Chemistry Series. Springer, Berlin, Heidelberg. doi.org/10.1007/698_2022_920.

Isabel C. Barrio, D.S. Hik, Jóhann Þórsson, Kristín Svavarsdóttir, Bryndís Marteinsdóttir, Inga Svala Jónsdóttir 2018. The sheep in wolf's clothing? Recognizing threats for land degradation in Iceland using state-and-transition models. Land Degradation and Development 29:1714–1725, DOI:10.1002/ldr.2978.

Jóhann Þórsson 2008. Desertification of high latitude ecosystems: Conceptual models, time-series analyses and experiments. PhD.-ritgerð, Rangeland Ecology and Management, Texas A&M University, College Station, Texas.

Jón Gunnar Ottósson, Anna Sveinsdóttir og María Harðardóttir 2016. Vistgerðir á Íslandi. Fjölrit Náttúrufræðistofnunar nr. 54. Garðabær.

Juo, A.S.R. og L.P. Wilding 1997. Land and civilization. Journal of Sustainable Agriculture 10:3–7.

Ludwig, J.A., D.J. Tongway, K. Hodgkinson, D. Freudenberger og J. Noble 1997. Landscape Ecology, Function and Management: Principles from Australia's Rangelands. CSIRO Publishing, Melbourne, Ástralía.

Ólafur Arnalds 1992. Jarðvegsleifar í Ódáðahrauni. Í: Andrés Arnalds (ritstj.), Græðum Ísland IV, Landgræðsla ríkisins, Gunnarsholti. Bls. 159–164.

Ólafur Arnalds 2000b. Desertification, an appeal for a broader perspective. Í Rangeland Desertification. Ólafur Arnalds og S. Archer (ritstj.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Holland. Bls. 5–15.

Ólafur Arnalds 2015. The Soils of Iceland. World Soils Book Series. Springer, Dordrecht, Holland.

Ólafur Arnalds 2019. Á röngunni. Alvarlegir hnökrar á framkvæmd landnýtingarþáttar gæðastýringar í sauðfjárrækt. Rit LbhÍ nr. 118. Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.

Ólafur Arnalds 2020. Ástand lands og hrun íslenskra vistkerfa. Rit LbhÍ nr. 130. Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.

Ólafur Arnalds og Ása L. Aradóttir 2015. Að lesa og lækna landið. Landvernd, Landgræðsla ríkisins og Landbúnaðarháskóli Íslands, Reykjavík.

Ólafur Arnalds og Jón Guðmundsson 2020. Loftslag, kolefni og mold. Rit LbhÍ nr. 133. Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.

Ólafur Arnalds, Bryndís Marteinsdóttir, Sigmundur Helgi Brink og Jóhann Þórsson 2022. A framework model for current land condition in Iceland. Í ritrýningu.

Ólafur Arnalds, Elín Fjóla Þórarinsdóttir, Sigmar Metúsalemsson, Ásgeir Jónsson, Einar Grétarsson og Arnór Árnason 1997. Jarðvegsrof á Íslandi. Landgræðsla ríkisins og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, Reykjavík.

Orr, B.J., V.M. Cowie, P. Castillo Sanchez, N.D. Chasek, A. Crossman, G. Erlewein, M. Louwagie og 6 fleiri höfundar 2017. Scientific Conceptual Framework for Land Degradation Neutrality. A Report of the Science-Policy Interface. United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD), Bonn, Þýskaland.

Pearce, F. 1992. Mirage of the shifting sands. New Scientist, 12. desember 38–42.

Pellant, M., P.L. Shaver, D.A. Pyke, J.E. Herrick, N. Lepak, G. Riegel, E. Kachergis, B.A. Newingham, D. Toledo og F.E. Busby 2019. Interpreting indicators of rangeland health. Version 5. Tech. Ref. 1734–6. Bureau of Land Management, USA.

Serra, G. 2015. Over-grazing and desertification in the Syrian steppe are the root causes of war. The Ecologist 2015,5:1–7.

Shi, P., H. Zhang, P. Wang og W. Zhou 2000. The regional patterns for combating sandification in sandy disaster affected area in China. Journal of Natural Disasters: 2000–03:S424.

Sigrún Dögg Eddudóttir, Egill Erlendsson og Guðrún Gísladóttir 2015. Life on the periphery is tough: Vegetation in Northwest Iceland and its responses to early-Holocene warmth and later climate fluctuations. Holocene 25:1,437–1,453.

Sigrún Dögg Eddudóttir, Egill Erlendsson og Guðrún Gísladóttir 2017. Effects of the Hekla 4 tephra on vegetation in Northwest Iceland. Vegetation History and Archaeobotany 26:389–402.

Sigrún Dögg Eddudóttir, Egill Erlendsson, Leone Tinganelli og Guðrún Gísladóttir 2016. Climate change and human impact in a sensitive ecosystem: the Holocene environment of the Northwest Icelandic highland margin. Boreas 45:715–728.

Sigþrúður Jónsdóttir 2010. Sauðfjárhagar. Leiðbeiningar við mat á ástandi beitilanda. Landgræðsla ríkisins, Gunnarsholt.

Starfshópur LbhÍ 2016. Að meta landgræðsluland með hliðsjón af því hvort það er „tilbúið til afhendingar" til landbúnaðarnota. Ása L. Aradóttir, Fanney Ósk Gísladóttir, Hlynur Óskarsson og Ólafur Arnalds, Umhverfisdeild Landbúnaðarháskóla Íslands, greinargerð unnin fyrir Landgræðslu ríkisins. Reykjavík.

Stoddart, L.A., A.D. Smith og T.W. Box 1975. Range Management. 3. útg. McGraw-Hill, New York, USA.

Sturla Friðriksson 1991. Kolagrafir við Bláfell. Lesbók Morgunblaðsins 42. tbl. (23.11.1991). Bls. 6–8.

Sturla Friðriksson og Grétar Guðbergsson 1995. Hraði gróðureyðingar við rofabörð. Freyr 1995(5):224–231.

Tongway, D. 1994. Rangeland soil condition assessment manual. CSIRO, Melbourne, Ástralía.

Tongway, D. og N. Hindley 2000. Assessing and monitoring desertification. Í: Ólafur Arnalds og S. Archer (ritstj.), Rangeland desertification. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Holland. Bls. 89–98.

UN-CCD 2017. Global Land Outlook 1. útg. United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD), Bonn, Þýskaland.

UN-CCD 2022. Global Land Outlook 2. útg. United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD), Bonn, Þýskaland.

UNEP 2016. Unlocking the Sustainable Potential of Land Resources: Evaluation Systems, Strategies and Tools. J.E. Herrick, Ólafur Arnalds, B. Bestelmayer, S. Bringezu, G. Han, M.V. Johnson, D. Kimiti, Y. Lu, L. Montanarella, W. Pengue, G. Toth, J. Tukahirawa, M. Velayutham og L. Zhang. Nairobi, Kenya.

van der Leeuw, S.E. (ritstj.) 1998. Understanding the natural and anthropogenic causes of land degradation and desertification in the Mediterranean Basin. European Communities, Belgía.

Whisenant, S.G. 1999. Repairing Damaged Wildlands. A Process Orientated, Landscape-Scale Approach. Biological Conservation, Restoration, and Sustainability, Cambridge University Press, UK.

Wright, D.K. 2017. Humans as agents in the termination of the African Humid Period. Frontiers in Earth Sciences 5:4.doi: 10.3389/feart.2017.00004.

Þóra Ellen Þórhallsdóttir 2015. Saga gróðurs og umhverfis á Brunasandi. Dynskógar, Héraðsrit Vestur-Skaftfellinga 2015. Bls. 1–70.

Þóra Ellen Þórhallsdóttir og Kristín Svavarsdóttir 2022. The environmental history of Skeiðarársandur Outwash Plain, Iceland. Journal of North Atlantic 43(12): 1–21.

20 Hrun íslenskra vistkerfa

Mynd 20.1. Biskupstungnaafréttur. Hér var áður 1–2 m þykkur jarðvegur þakinn birkiskógi þar sem nú er mörg hundruð ferkílómetra auðn. Erfitt getur verið að útskýra umfangið á slíku vistkerfishruni fyrir erlendum vísindamönnum – hið algjöra hrun sem orðið hefur, svo sem fyrir þessum tveimur sem komu frá Kirgistan og Innri-Mongólíu. Íslendingar láta sér oftast fátt um finnast og svæðið er ennþá nýtt til beitar. Mynd: Guðmundur Kr. Jóhannesson / Nærmynd.

20.1. Hrun vistkerfa er alþjóðlegur vandi

Í fyrri köflum þessa rits hefur verið vakin athygli á að slæmt ástand lands og vísindi um ástand útjarðar sé alþjóðlegur vandi. Í þessum kafla er sjónum beint að vistkerfishruni á Íslandi. Auðnir og illa gróið land þekja yfir 40% landsins en gróin vistkerfi eru víða í mjög hnignuðu ástandi. Talið er að skóg- og kjarrlendi hafi áður þakið um fjórðung landsins en voru við það hverfa í byrjun 20. aldar (Snorri Sigurðsson 1977, Andrés Arnalds 1987, Sigurður Blöndal og Skúli Björn Gunnarsson 1999). Þá hefur um 70% votlendis á láglendi verið raskað með framræslu (Ólafur Arnalds o.fl. 2016).

Hrun vistkerfa hérlendis er að mörgu leyti einstakt í veröldinni og er iðulega tekið sem dæmi um svæði þar sem áhrif mannsins á náttúruauðlindir hafa verið skelfileg, svo sem í frægri bók Jared Diamond frá árinu 2005 (*Hrun*, e. *Collapse*) og einnig í bók David R. Montgomery frá 2007 (*Mold*, e. *Dirt*). Eyðilegging vistkerfa á Íslandi á ýmislegt sameiginlegt með hruni vistkerfa í vesturríkjum Bandaríkjanna, þar sem landnám hvíta mannsins með tilheyrandi beit húsdýra hefur leitt til stórkostlegra breytinga á ástandi landsins (Jakobs 1991).

Landnýting á mjög hnignuðum landsvæðum í vesturhluta Bandaríkjanna er mjög umdeild og umræðan um málefnið minnir um margt á umræðu hérlendis, sbr. bók í ritstjórn Wuerthner og Matteson (2002): *Welfare ranching; the subsidizied destruction of the American West* sem og bækurnar *The western range revisited. Removing livestock from public lands to conserve native biodiversity* (Donahue 1999), *Western turf wars – The politics of public lands ranching* (Hudak 2007) og *Stitching the west back together* (Charnley o.fl. ritstj. 2014). Náttúrusagnaritarinn Bowden (1987) skrifaði um ofbeitina í Arizona (lauslega þýtt og stytt af ÓA):

> „Kýrnar komu og þeim fjölgaði. Ríkisstjóri Arizona áætlaði að 1,5 milljónir nautgripa stæðu á beit í fylkinu. En landið barði frá sér. Það gerði langvinnan þurrk og kýrnar féllu dauðar niður. Þær lágu sem hráviði um svæðið. Graslendið gaf eftir eða það hvarf, ár og lækir urðu að sandi ... Landið sem ég ann var skilið eftir í rúst af forfeðrum mínum ..."[1]

Þegar þurrkurinn gekk í garð og gróðurinn hætti að vaxa fækkaði búfénaði ekki strax. Hins vegar óx álag ört á þann gróður sem enn tóri og varð stjarnfræðilegur vandi (mældur í fjölda eða kg beitardýra/kg uppskeru) með gríðarlega alvarlegum afleiðingum fyrir vistkerfin, sem hafa ekki náð sér síðan. Upphafsmaður náttúruheimspekinnar, Aldo Leopold, ritaði snemma á 20. öld (ÓA lausleg þýðing): „Innan við einn af hverjum þúsund þeirra sem barnfæddir eru í Suðvestrinu gerir sér grein fyrir því sem komið hefur fyrir landið – að fegurðin á sér ekki rót í lífinu heldur eyðingu[2] (tilvitnun í Bowden 1987). Hér birtist vitaskuld heilkennið um breytt grunnviðmið eða „samdaunasýki" sem rætt er um í næsta kafla.

Alvarlegasta hrunið varð þar sem sandurinn tók yfir hluta kerfanna, því þá hverfur vatnsheldni úr kerfinu á svæði sem er heitt og uppgufun mikil en úrkoma lítil. Þetta á við í Arizona jafnt sem á Íslandi, enda þótt hér sé kaldara og blautara.

Íslensk dæmi eru áberandi í bók Anton Imeson (2012) um landhnignun (*Desertification, land degradation and sustainability*). Óstöðugleiki í samfélögum, jafnvel stríðsrekstur og fólks-

1. „The cows came and they did increase. But the land lashed back. In 1891, Arizona's governor estimated that 1.500.000 cattle were busy eating the Territory. Then came draught and the cows dropped dead. Old reports claim that a man in southern Arizona could skip a stone across the region from carcass to carcass. The grasslands diminished or vanished, the streams and rivers fell away into sands ... The land I have come to love is in many ways in ruin left me by my ancestors ..."

2. „Even among those who were born in the Southwest, not one in thousand realizes what has happened to it, – that much of the beauty is the beauty not of life, but of dissolution."

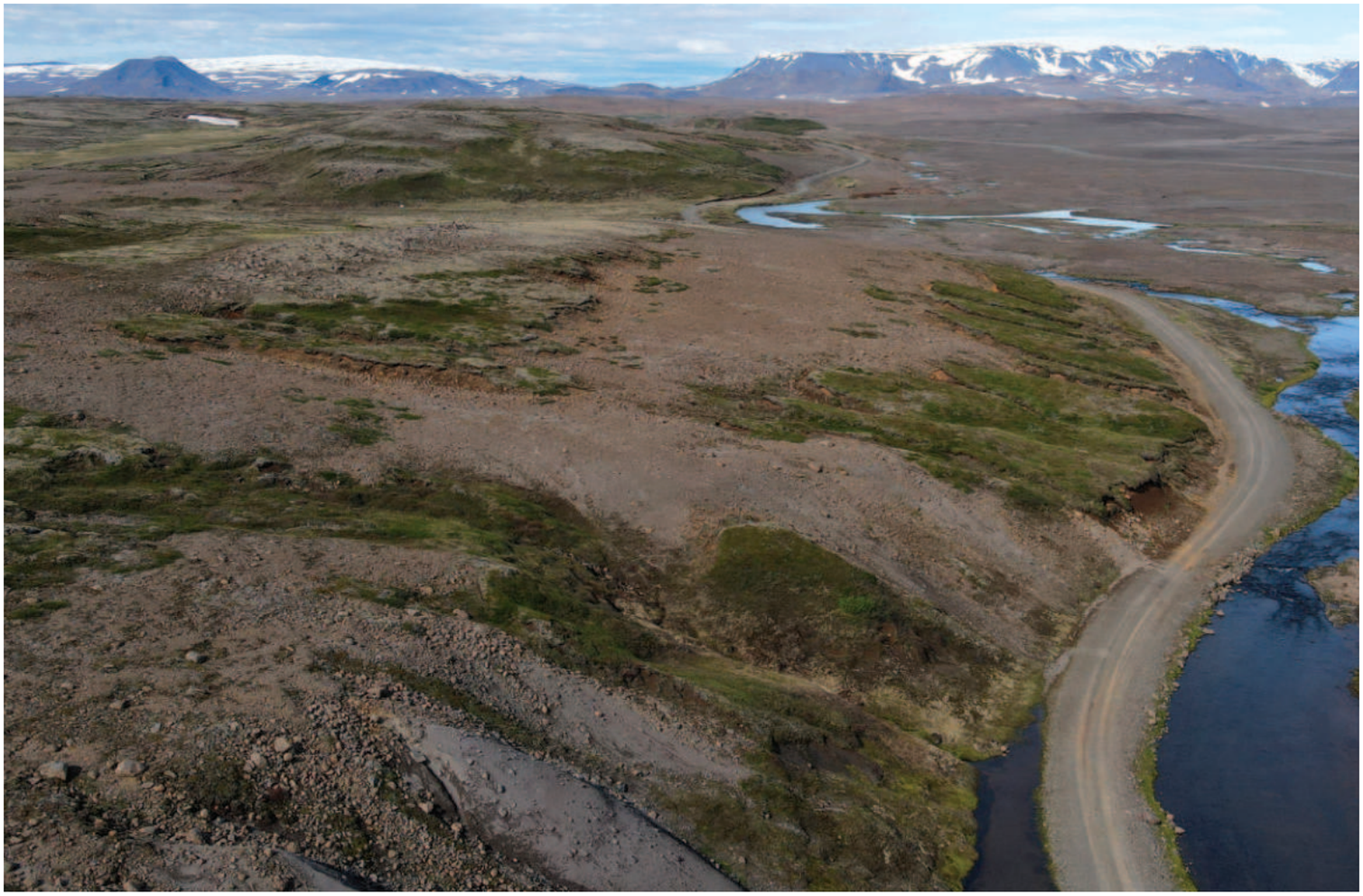
Vandamál afréttanýtingar

Beitilönd í samfélagseigu eru talin sérstaklega útsett fyrir ofnýtingu, hnignun og hruni, sbr. fræga grein Garrett Hardin, „Tragedy of the commons" í Science (1968), sem sannarlega á við víða í Bandríkjunum og á síðustu öldum á Íslandi. Hardin taldi að skortur á eignarhaldi á landi leiddi til óábyrgrar og rangrar nýtingar. Þó kunna reglur um afréttarnýtingu í Grágás að hafa stuðlað að sjálfbærri nýtingu á Íslandi fyrr á öldum (sjá Simpson o.fl. 2001), enda urðu Íslendingar vitni að stórkostlegum breytingum á umhverfi sínu á fyrstu öld byggðarinnar, sem kann að hafa ýtt undir lagasetningu um nýtingu landsins.

Nýting sameiginlegs beitarlands er háð flóknum félagslegum, lagalegum, þjóðfélagslegum og hagrænum þáttum, rétt eins og umsýsla eignarlands, og því eru alhæfingar um afrétti af þessum toga oft ekki réttlætanlegar, sbr. umræður Derek Wall (2017) í bókinni „The commons in history", þar sem íslensk afréttarlönd ber nokkuð á góma (sjá einnig ritgerð Lilju Jónsdóttur 2020 um lausagöngu búfjár og beitarrétt, sem og rit Landverndar 2021 um vörsluskyldu búfjár). Eignarhaldið eitt og sér er iðulega ekki aðalatriðið heldur skilningur á þeim auðlindum sem nýttar eru, sem og hvort reglur um nýtinguna haldi þegar á hólminn er komið. Það vantar mikið upp á það hér á landi.

Hér er einnig rétt að tilgreina dæmi til samanburðar frá Úganda, þar sem lög og reglur um verndun votlenda eru sannarlega fyrir hendi, en þeim er þó eigi að síður raskað sem aldrei fyrr, enda eru innviðir ekki fyrir hendi til að tryggja að lögum sé fylgt.

Mynd 20.2. Monument Valley (Utah/Arizona) í suðvesturhluta Bandaríkjanna. Víða á þessu svæði hefur ofbeit valdið því að stór hluti landsins er „kominn í sand" með takmarkaða gróðurhulu og vatnsheldni (kunnuglegt á Íslandi). Náttúran var mjög viðkvæm fyrir beitaráhrifum sökum þurrka, mikils sands í kerfinu (mold sem hefur myndast í sandstein og mikið áfok) o.s.frv. Monument Valley og nágrenni er gríðarlega vinsælt ferðamannasvæði, en fæstir gera sér grein fyrir ástandi landsins. Miklir árekstrar eru á milli „landeigenda" (óljóst hugtak hjá Navajo-indíánum sem búa á svæðinu), beitarhagsmuna, ferðaþjónustu og atvinnuuppbyggingar – er það ekki svolítið kunnuglegt stef?



Mynd 20.3. Dæmi um svæði sem margir fara um án þess að velta mikið fyrir sér ástandi landsins. Hér hefur átt sér stað fullkomið hrun vistkerfa og landið hægra megin á myndinni er „komið í sand". Eftir standa torfur í landslaginu þar sem þanþol kerfanna hefur verið meira. Ástand gróna hluta landsins í mósaíkinni er bágborið. Myndin er tekin á Uxahryggjaleið árið 2020; horft er til Þórisjökuls (hægra megin) og Oks (vinstra megin), en leiðin um Kaldadal liggur þar á milli.

Óhagstæð samfélagsþróun

Þróun samfélagsins frá hagrænu og pólitísku sjónarmiði er mikilvæg, hérlendis sem annars staðar. Þar má sem dæmi nefna áhrif svokallaðs „vistarbands" í kjölfar „Píningsdóms" árið 1490, en þar var áréttað að þeir landsmenn sem ekki höfðu efni á að reisa sér bú væru skyldugir til að vera í vist hjá bændum, söfnun jarðnæðis á fárra hendur, takmarkanir á sjávarútvegi og hindrun á myndun þéttbýlis (sjá Gunnar Karlsson 2000 og Gísla Gunnarsson 1983).

Þessi þróun kom í veg fyrir sérhæfingu í samfélaginu sem fylgir borgarmenningu og festi fábreytni í sessi. Meginþorri jarðnæðis var lengi vel á höndum leiguliða en í eigu tiltölulega fárra landeigenda. Slíkt kerfi stuðlar sjaldan að sjálfbærri landnýtingu því ábyrgð leiguliða er oft óljós, sem og hagur þeirra af góðri landnýtingu eða fjárfestingum til landbóta. Lífsbaráttan var þar að auki stöðugt hörð – hungrið sjaldan langt undan.

flutningar, á sér oft rætur í ofnýtingu, hnignun og hruni vistkerfa, m.a. í hörmungum nútímans fyrir botni Miðjarðarhafs (t.d. Serra 2015). Svo kann einnig að hafa verið á 13. öld, öld Sturlunga á Íslandi. Saga lands og þjóðar er um margt saga eyðingar náttúruauðlinda, en um leið saga baráttu fyrir því að lifa af á viðkvæmu jaðarsvæði (Gunnar Karlsson 2000); baráttu fyrir lífsviðurværi svo ekki færi fyrir Íslendingum eins og t.d. norrænum mönnum á Grænlandi (Streeter o.fl. 2012). Lífsbarátta sem var dýru verði keypt fyrir vistkerfi landsins – saga sem mikilvægt er að skilja til að unnt sé að bæta ástand og nýtingu landsins.

20.2. Hnignun og hrun vistkerfa á Íslandi – sögulegir þættir og heimildir

Slæmt ástand vistkerfa út frá mælanlegum þáttum (síðasti kafli), sem og mikil útbreiðsla auðna og illa gróins lands, er skýr vitnisburður um þá hnignun sem átt hefur sér stað á Íslandi. Sagan um hrun náttúruauðs hér á landi er afar merkileg, hvort heldur sem er á íslenskan eða alþjóðlegan mælikvarða. Hér verður leitast við að draga saman margvíslegar tegundir vísbendinga um hnignun og hrun vistkerfa hérlendis, en um leið að gefa yfirlit yfir rannsóknir og dæmi um ritaðar heimildir á þessu sviði, en áherslan er á mold og vistkerfi. Heimildalistinn er þó engan veginn tæmandi.

Eftir að jökull ísaldar hörfaði af landinu fyrir 9–10 000 árum tók gróður að nema land og jarðvegur að þróast. Smám saman þroskuðust vistkerfi og náðu styrk, en kjarrlendi varð ráðandi gróðurfar neðan hálendismarkanna ásamt votlendum þar sem grunnvatn stóð hátt. Loftslag á nútíma (e. holocene) frá lokum ísaldar hefur sveiflast umtalsvert með sífelldum breytingum á náttúrufari, ekki síst útbreiðslu mýra og kjarrlendis, eins og rannsóknir á frjókornum hafa leitt glögglega í ljós (t.d. Þorleifur Einarsson 1962, 1994; Margrét Hallsdóttir og Caseldine 2005, Egill Erlendsson o.fl. 2009).

Aldursgreind gjóskulög (öskulög) í moldinni eru grunnurinn að slíkum rannsóknum, en Sigurður Þórarinsson (1944) og samstarfsmenn hans voru frumkvöðlar í þeim fræðum á heimsvísu. Þorleifur Einarsson (1994) skipti nútímanum upp í nokkur tímabil í samræmi við útbreiðslu votlenda og birkiskóga, í svokölluð birkiskeið og mýraskeið. Við lifum nú á tímum mýraskeiðsins síðara. Mögulegt er að loftslagsbreytingar nútímans muni leiða landið inn í þriðja birkiskeiðið. Þessar breytingar á gróðurfari um þúsundir ára skipta vitaskuld miklu máli, en vistkerfin á Íslandi tóku þó langsamlega örustu breytingunum í kjölfar landnáms norrænna manna um miðja 9. öld. Nýting mannsins hefur sums staðar leitt til hruns vistkerfa en annars staðar eru breytingarnar mjög miklar enda þótt gróður og mold séu ennþá til staðar. Breytingarnar urðu m.a. fyrir tilstuðlan beitarnýtingar, skógarnytja (m.a. til kola- og járngerðar) og ruðnings skógar til beitar og akuryrkju á viðkvæmu landi sem verður reglulega fyrir öðrum áföllum á borð við gjóskufall og kalt árferði, eins og síðar verður vikið að.

Margir hafa ritað um bága stöðu íslenskra vistkerfa og þau skrif má rekja langt aftur í tímann. Þorvaldur Thoroddsen kemur víða að þessu í skrifum sínum um aldamótin 1900 sem og Sæmundur Eyjólfsson (sjá samantekt Arnórs Sigurjónssonar 1958a og Andrésar Arnalds 1987, 1988a,b). Vestur-Íslendingar rituðu um slæmt ástand landsins fyrir aldamótin 1900, m.a. Stephan G. Stephansson. Samhengið milli þess og landnýtingar fór ekki fram hjá þeim, enda álag á landið gríðarlegt á ofanverðri 19. öld (sjá m.a. Sigurð Blöndal og Skúla Björn Gunnarsson 1999). Að afneita vandanum er þó viðtekin venja meðal landnotenda, hérlendis sem annars staðar að fornu og nýju (t.d. Wuerthner og Matteson 2002 og Jakobs 1991 fyrir suðvesturhluta Bandaríkjanna).

Er leið fram á 20. öld varð æ ljósara að þung beit sauðfjár árið um kring, sem og nýting skógarleifa til brúkunar sem eldsneyti, orsökuðu mikla landeyðingu. Vert er að geta um sögufræga grein Hákons Bjarnasonar skógræktarstjóra frá 1942: „Ábúð og örtröð“ og tímamótagrein Sigurðar Þórarinssonar (1961) í riti Skógræktarfélags Íslands: „Vindrof á Íslandi í ljósi ösku-

Vísbendingar um horfin landgæði

Hvaðan kemur vitneskjan um þessar miklu breytingar sem hafa orðið á vistkerfum landsins?

Vísbendingar og heimildir eru margvíslegar, svo sem: (i) skrifaðar heimildir frá miðöldum; (ii) gróður- og moldarleifar á auðnalandi; (iii) frjókornarannsóknir; (iv) gamlar kolagrafir og kolaleifar í auðnalandi; (v) þykknunarhraði jarðvegs; (vi) örnefni; (vii) borkjarnar í vatnaseti; (viii) fornleifarannsóknir; (ix) gróðurfar á svæðum sem eru náttúrulega varin fyrir beit (eyjar o.s.frv.); (x) gróðurfarsbreytingar og bötun við friðun lands fyrir beit; (xi) líkön fyrir útbreiðslu birkis fyrr á tímum, og (xii) samtenging sem flestra þessara tegunda heimilda.

Hér á eftir er fjallað um margar þessara heimilda um fyrrnefndar breytingar, en sú umfjöllun byggist m.a. á samantekt Andrésar Arnalds (1988a), 12. kafla bókarinnar „The Soils of Iceland“ (ÓA 2015) og öðrum skrifum sem hér eru nefnd jafnóðum.

lagarannsókna“. Þá má segja að rit sem gefið var út í tilefni 50 ára afmælis Sandgræðslu ríkisins (nú Landgræðslan) árið 1958 hafi markað viss tímamót, en bókinni var ritstýrt af Arnóri Sigurjónssyni. Landgræðsla ríkisins gaf út um margra ára skeið árbók undir heitinu *Græðum Ísland* (1987–1997) sem ritstýrt var af Andrési Arnalds og fleirum. Þar er mikinn fróðleik að finna sem fleytti áfram skilningi landsmanna á slæmu ástandi landsins.

i. Skrifaðar heimildir. Að sumu leyti er Ísland einstakt hvað það varðar hve mikið er til af rituðum sögulegum heimildum frá miðöldum, allt frá Íslendingasögum og Íslendingabók Ara fróða til annála-skrifa, máldaga og Jarðabókar Árna Magnússonar og Páls Vídalíns (sjá Andrés Arnalds 1988a). Heimildirnar tiltaka m.a. byggð og gróðurlendi þar sem nú er illa gróið, getið er um skóga þar sem þeir eru ekki nú og svo mætti lengi telja. Fræg er fullyrðing Ara fróða um að landið hafi verið skógi vaxið milli fjalls og fjöru við landnám. Gott dæmi um notkun á rituðum heimildum er að finna í rannsóknum Friðþórs Sófusar Sigurmundssonar o.fl. (2014) á hnignun skóga í Þjórsárdal. Heimildir lúta m.a. að því hver átti skógarítök í skógum sem nú eru löngu horfnir. Gögn af þessu tagi sýna glögglega að sums staðar stóð áður blómleg byggð þar sem er rýrt land í dag.

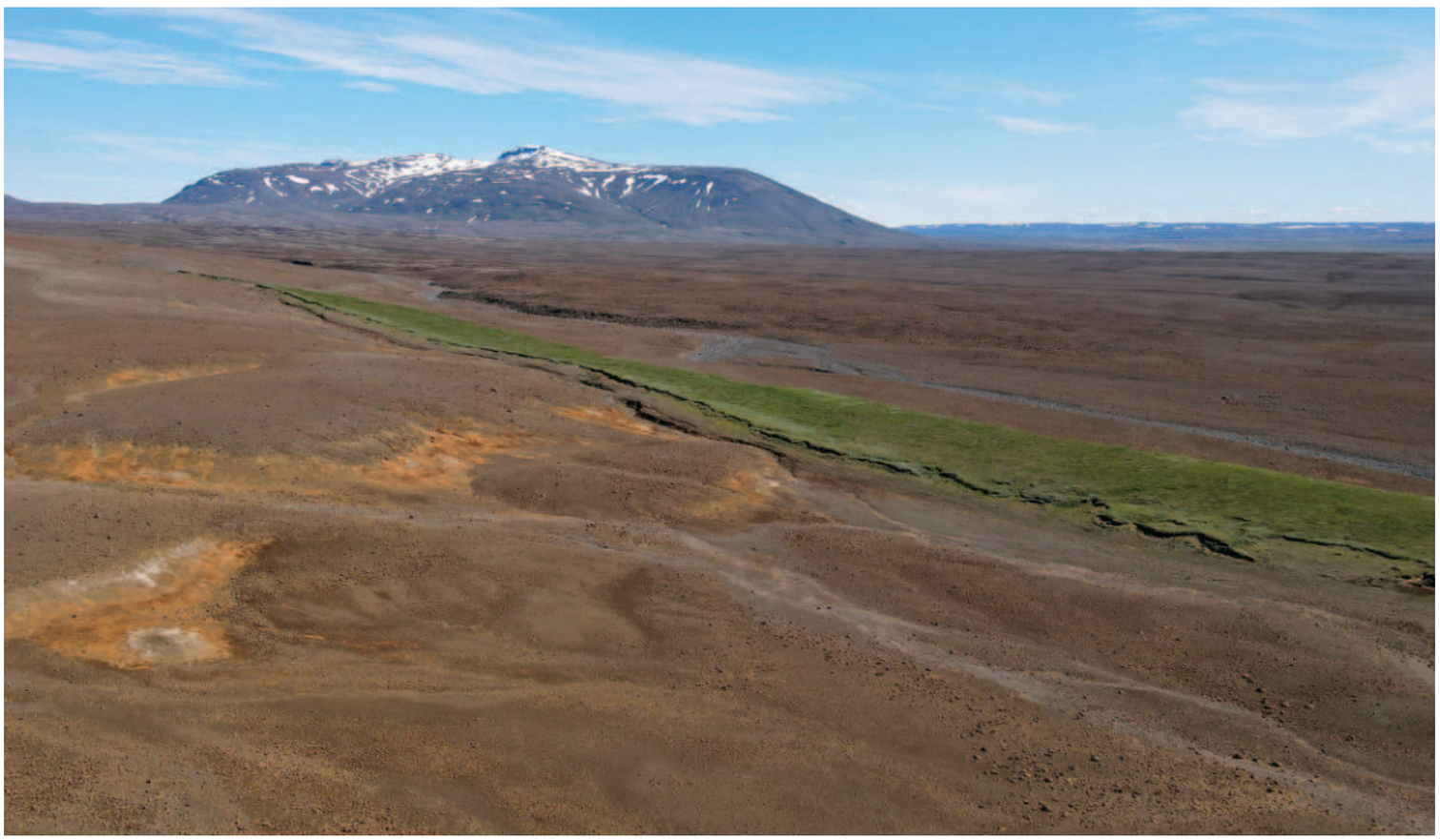
ii. Gróður og jarðvegsleifar á auðnalandi. Víða finnast leifar gróðurs og jarðvegs á landi sem er annars illa gróið, jafnvel nánast auðnir einar. Gróðurtorfurnar á Biskupstungnaafrétti í Sandvatnshlíðum og við Kjalveg beggja vegna Bláfellsháls eru mjög vel þekktar (myndir 20.4 og 20.5), en slíkar torfur er að finna á flestum þeim svæðum sem nú eru illa gróin á afréttum Suður-, Suðvestur- og Norðausturlands, sem og víða um Austurland. Gróðurtorfur á borð við þær sem eru á Biskupstungnaafrétti eru ákaflega dramatískur vitnisburður um horfin landgæði þar sem nú ríkir auðn á hundruðum ferkílómetra lands sem áður var sannarlega hulið þykkri mold og birkiskógum (myndir 20.4 og 20.5).

Gróðurtorfur hafa m.a. verið rannsakaðar til að rekja eyðingarsögu viðkomandi héraðs (t.d. Guttormur Sigbjarnarson 1969; Sigurður Þórarinsson 1961; Grétar Guðbergsson 1975, 1996, Fanney Ósk Gísladóttir o.fl. 2005, Guðrún Gísladóttir o.fl. 2010; Sigurður Greipsson 2012). Oft er mikilvægt að vernda torfurnar því heimildagildi þeirra er mikið. Jarðvegsleifar sem finnast í auðnum ofan í gjótum og undir sandi eru heimildir af sama meiði. Þannig finnst mold undir sandinum vítt um Ódáðahraun sem bendir til að stór hluti þess svæðis hafi áður verið gróinn (ÓA 1992).

iii. Frjókornarannsóknir. Sigurður Þórarinsson (1944) og Þorleifur Einarsson (1962) voru frumkvöðlar á sviði frjókornarannsókna og síðar Margrét Hallsdóttir (t.d. Margrét Hallsdóttir og Caseldine 2005). Miklar breytingar verða á samsetningu frjókorna í mýrum við landnám eða einhvern tíma eftir það; gróðurbreytingar sem voru afleiðing af nýtingu lands. Þessar breytingar voru afskaplega misjafnar eftir stöðum og aðstæðum (sjá t.d. Margréti Hallsdóttur og Caseldine 2005, Lawson 2007, Egil Erlendsson o.fl. 2009, Vickers o.fl. 2011, Sigrúnu Dögg Eddudóttur o.fl. 2015, 2016, 2017), sem m.a. fór eftir þanþoli svæðanna, eins og síðar verður vikið að.

iv. Leifar um gerð kola á auðnalandi. Áður fyrr var gjarnan haldið til skógar og viði safnað í holur og hann brenndur að því marki að til urðu viðarkol, sem eru létt í sér og meðfærileg (mynd 20.6). Þau voru síðan flutt til byggða og notuð heima fyrir. Leifar kolagerðar finnast víða þar sem enginn er nú skógurinn, jafnvel þar sem nánast auðnin ein er eftir. Kolaleifarnar á Biskupstungnaafrétti eru t.d. afar merkilegar, en þær finnast

Mynd 20.4. Gróðurtorfur í Hvítárnesi. Kjalvegur til hægri, Hrútfell og Langjökull til vinstri; horft til norðurs. Einnig sést í gróðurtorfur í hlíðum Hrefnubúðar (sunnan Hrútfells) handan Fúlukvíslar sem enn tóra og þar finnst m.a. birki. Lítil torfa sést hægra megin við veginn. Áfoksgeiri virðist hafa gengið beggja megin stóru gróðurtorfunnar í forgrunni. Jaðarinn hefur verið græddur upp til að vernda barðið. (Myndin er tekin árið 2020.)



Mynd 20.5. Barð í Sandvatnshlíð á Biskupstungnaafrétti í miðri auðninni. Jaðrar barðsins hafa að hluta verið græddir upp til að bjarga því. Bláfell í baksýn. Hér hafa fundist leifar af kolagerð fyrri tíma þegar landið var þakið birkiskógi. (Myndin er tekin árið 2020.)

vítt um afréttinn (t.d. Arnór Karlsson 1992, Sturla Friðriksson 1991). Athygli vakti þegar kolamolar fundust fyrir tilviljun nálægt Hvítárnesi við Kjalveg í fræðsluferð með erlendum vísindamönnum árið 2013 (óbirt).

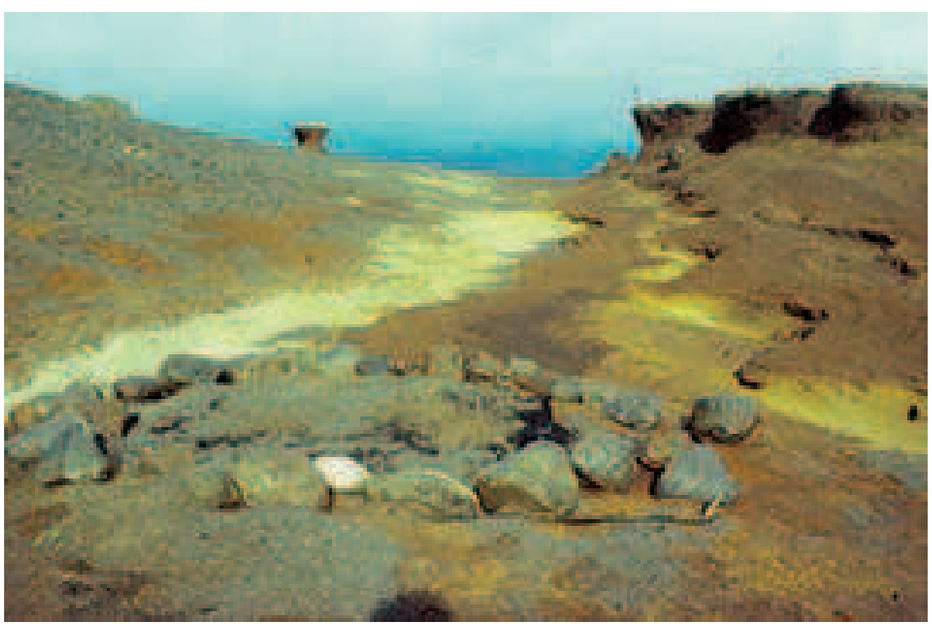
v. Þykknunarhraði jarðvegs. Eftir að búið var að aldurssetja flest megingjóskulögin í moldinni var hægt að skoða áfokshraða mismunandi öskulaga og ákvarða með hvaða hætti eiginleikar þeirra breytast á milli aldursskeiða. Mikil aukning áfoks í kjölfar landnámsins er meðal helstu einkenna moldarinnar á nær öllu landinu og því augljóst að því fylgdi aukinn uppblástur (mynd 20.7). Reyndar er aukningin oft fjórföld og jafnvel meiri (nær sums staðar að tífaldast, sjá Sigurð Þórarinsson 1961, Grétar Guðbergsson 1975, Margréti Hallsdóttur 1982, Dougmore o.fl. 2005, Guðrúnu Gísladóttur o.fl. 2010; Guðrúnu Sveinbjarnardóttur o.fl. 1982 og Gerrard 1985).

Vert er að vekja hér sérstaklega athygli á yfirlitsgrein Guðrúnar Larsen og Jóns Eiríkssonar um gjóskulagafræði í tímaritinu *Jökli* (2008). Streeter o.fl. (2015) bentu á að eftir pláguna miklu 1402 minnkaði áfok á sama tíma og fólki fækkaði. Í mörgum tilfellum er til-tölulega auðvelt að staðfesta að mikið af áfokinu á uppruna í mold sem fýkur frá upprunastað, því að í áfokinu greinast korn sem rekja má til þekktra gjóskulaga (einkum ljósu Heklulögin) – korn sem áður voru varðveitt í jarðvegi (Grétar Guðbergsson 1975; Stoops o.fl. 2008).

Oft og tíðum sést að áfokshraðinn hefur verið hvað mestur síðustu 500 árin, t.d. á Norðausturlandi, þar sem miðað er við gjóskulag frá gosi í Bárðarbungukerfinu um 1480 (sjá Sigurð Þórarinsson 1961), en einnig eftir gos 1717 (McGovern o.fl. 2007). Hafa verður í huga að meginuppsprettur áfoks hafa breyst í tímans rás; minni hluti áfoks er nú vegna uppblásturs á moldarefnum en meginhlutinn er ættaður frá sérstökum upptakasvæðum ryks á auðnum (Ólafur Arnalds o.fl. 2019a,b).

vi. Örnefni. Víða um land eru örnefni sem gefa til kynna miklar breytingar á gróðurfari. Gömul merking orðsins „holt“ er skógi vaxin hæð, sbr. máltækið „oft er í holti heyrandi nær“. Staðarnafnið Mörk bendir einnig til skógar. Skógarhlíð og Hvannstóð eru örnefni þar sem nú eru auðnir og illa farið land í Suður-Þingeyjarsýslu og benda má á fjölda örnefna sem vísa til skóglendis á auðnum á Suðurlandi; Landskógar voru til að mynda í ofanverðri Landsveit (Andrés Arnalds 1988b), svo dæmi séu tekin (sjá einnig Friðþór Sófus Sigurmundsson o.fl. 2014). Hin skóglitlu héruð í Skaftárhreppi og á Síðu hétu áður Skógarhverfi en þar var birkinu nánast útrýmt (Þóra Ellen Þórhallsdóttir 2015). Sigurður Blöndal og Skúli Björn Gunnarsson (1999) rituðu ágætan kafla um skógareyðinguna í bók sinni *Íslandsskógar*.

vii. Borkjarnar úr vatnaseti. Á undanförnum árum hafa vísindamenn



Mynd 20.6. Leifar gamallar kolagrafar í jaðri rofabarða við Rótarmannatorfur nálægt Brunnalækjum á Biskupstungnaafrétti. Þarna var svæðið áður algróið og hulið skógi sem var nýttur til að gera til kola. Svarta efnið innan hringsins eru kol. Hlaðið var grjóti í kringum leifarnar til að auðvelda staðsetningu þeirra. Myndin er tekin um 1987 en kolamolarnir voru ófinnanlegir árið 2020. Sjá umfjöllun Arnórs Karlssonar 1992 um birkileifar og kolagrafir á Biskupstungnaafrétti. Mynd: Andrés Arnalds.

Mynd 20.7. Litabreyting í jarðvegi um landnám. Moldin er ljósari eftir landnámið (efri hluti sniðsins) vegna aukins uppblásturs, sem m.a. feykir burt ljósum Heklukornum í jarðvegi á hálendinu og út yfir nálæg svæði, auk þess sem lífrænt innihald hennar minnkar mikið. Myndin er frá Mosfellsbæ.

Mynd 20.8. Skógivaxin eyja í Þjórsá sem er náttúrlega varin fyrir beit. Horft er suðaustur yfir Þjórsá; Skarðsfjall til hægri en sér í Heklu til vinstri. Merki um áfoksgeira eru handan árinnar og gömul rofabörð. Sjá umfjöllun Önnu Sigríðar Valdimarsdóttur og Sigurðar H. Magnússonar (2013) um eyjuna. (Myndin er tekin árið 2020.)

Mynd 20.9. Birkitorfan í Fellum á Austurlandi. Skógarleifar hanga á klettasyllum þar sem sauðfé kemst ekki að. Landið umhverfis er í slæmu ástandi. Einnig er algengt að birkihríslur tóri í þröngum giljum þar sem annars er ekkert birki að finna. (Myndin er tekin árið 2021.)

sótt borkjarna úr botnum stöðuvatna og með hjálp gjóskulaga og fleiri þátta notað þá til að ráða í sögu umhverfisbreytinga í tíma. Má þar nefna rannsóknir í Hvítárvatni á Kili (Larsen o.fl. 2011), vötnum á Norðvesturlandi (Doner 2003), nærri Reykholti í Borgarfirði (Gathorne-Hardy o.fl. 2009) og í Haukadalsvatni í Dölum (Áslaug Geirsdóttir o.fl. 2009). Þessar rannsóknir sýna m.a. að hnignun og hrun hafa verið háð þanþoli og náttúru landsins og því hafist á misjöfnum tíma, auk þess sem þær sýna að áföll hafa einnig dunið yfir í kjölfar gjóskugosa á forsögulegum tíma.

viii. Forleifarannsóknir. Nákvæmar fornleifarannsóknir á mörgum stöðum á landinu varpa ljósi á forna lifnaðarhætti og nýtingu landsins. Má þar nefna uppgröft í Mývatnssveit (McGovern o.fl. 2007, Egill Erlendsson o.fl. 2009, sjá einnig yfirlit McGovern o.fl. 2007). Byggð stóð t.d. áður þar sem nú skortir vistkerfi til að framfleyta fólki, m.a. við hálendismörkin á Suðurlandi.

ix. Gróðurfar á svæðum sem eru náttúrlega varin fyrir beit. Hér er t.d. átt við eyjar í stórfljótum (mynd 20.8) og á klettasyllum. Munurinn getur stundum verið ansi sláandi. Nefna má sérstaklega rannsóknir Ingu Svölu Jónsdóttur (1984) á hólmum í Friðmundarvötnum á Auðkúluheiði og rannsókn Önnu Sigríðar Valdimarsdóttur og Sigurðar H. Magnússonar (2013) á gróðri í eyju í Þjórsá. Birkitorfan á klettasyllu í Fellum, skammt norðan Lagarfljóts, er frægt dæmi um gróðurfar þar sem sauðfjárbeitar gætir ekki (mynd 20.9).

x. Gróðurfarsbreytingar og bötun við beitarfriðun. Þetta er þáttur sem mörgum þykir svo augljós að hann er sjaldan færður til bókar og því er hér

aðeins lengri umfjöllun um hann en ella væri. Miklar breytingar verða á vistkerfum þar sem land er friðað fyrir beit, en það er misjafnt hve örar þær eru. Þar sem land er í slæmu ástandi og yfirborðið óstöðugt er landið afar seint að taka við sér í byrjun uns stöðugleika er náð og næringarefni taka að safnast fyrir í kerfinu (sjá kafla um auðnir og gróðurtorfur í umræðu um ástandsstig í síðasta kafla).

Reynsla og rannsóknir sýna að birki getur breiðst ört út sé land umhverfis friðað og fræframleiðsla er mikil, ekki síst þar sem skán er komin í landið (Ása L. Aradóttir 2007), t.d. á Skeiðarársandi (Bryndís Marteinsdóttir o.fl. 2017), í Gunnlaugsskógi við Gunnarsholt, Stóra-Klofa í Landsveit, út frá ungum birkieyjum á Hekluskógasvæðinu og víðar (sjá Ásu L. Aradóttur og Guðmund Halldórsson 2011). Umhverfi Reykjavíkur tekur nú örum stakkaskiptum vegna friðunar lands. Þá eru skógræktaraðgerðir undanskildar, en þær eru umfangsmiklar, t.d. í Heiðmörk, Hafnarfirði og Mosfellsbæ. Í Mosfellsbæ vekur athygli að snarbrött urðarhlíð í Úlfarsfelli (Hamrahlíð) hefur gróið að mestu saman á undanförnum áratugum eftir að landið var friðað (mynd 20.10), sem sýnir að gróður getur átt afturkvæmt í slíkar hlíðar. Sömu sögu má segja um umhverfi Akureyrar og fleiri bæjarfélaga. Framvinda birkiskógar í Þórsmörk er stórbrotið dæmi um breytingar sem hafa orðið við beitarfriðun (mynd 20.11).

Bati vistkerfa tekur þeim mun lengri tíma sem ofar dregur í landið. Meðal rannsókna á hálendi má nefna athuganir Sigurðar H. Magnússonar (1997) og Sigurðar H. Magnússonar og Kristínar Svavarsdóttur (2007). Eigendur sumarbústaðalanda og skógræktarsvæða hafa vitaskuld séð stórfelldar breytingar sem verða við friðun lands. Þær eiga sér einnig stað við afgirta vegi landsins. Dæmi um hraðfara breytingar á vistkerfum nú um stundir eiga sér stað innan Þingvallaþjóðgarðsins og fleiri þjóðgarða, sem og á Þórsmerkursvæðinu. Friðun Hornstranda hefur gjörbreytt gróðurfari og frjósemi moldar (mynd 20.12).

Mynd 20.10. Sjálfgræðsla í hlíðum Úlfarsfells í Mosfellsbæ þar sem áður var urðarskriða. Ljónslappi hefur reynst mikilvægur frumherji í skriðum sem þessum. Einnig hefur fugl aukist í bjarginu ofan hlíðarinnar með tilheyrandi driti, sem eykur á sjálfgræðsluna í kjölfar friðunar.

Mynd 20.11. Framvinda birkiskógar við beitarfriðun. Svæðið næst tilheyrir Þórsmerkursvæðinu og er beitarfriðað. Horft er í norður, Almenningar eru handan árinnar (Þröngá) en Fljótshlíðarafréttur til vinstri, vestan Markarfljóts. Almenningar voru aðeins friðaðir í 22 ár (1990–2012) en þar var hafið stórfellt landnám birkis þegar tekið var að beita þá á ný árið 2012 (ÓA og Ása L. Aradóttir 2011). Stærsti hluti svæðisins sem er næst á myndinni var áður skóglaus en þó tórðu torfur hér og þar (m.a. Hamraskógar) áður en svæðið var friðað fyrir beit (að mestu) fyrir um 100 árum.

Sums staðar var sáð og borið á og einnig var birki bæði sáð og plantað, einkum seint á síðustu öld. En meginhluti skógarins hefur vaxið upp af sjálfsdáðum við beitarfriðunina. Birkið breiðist út æ víðar og athygli vekur að það er tekið að breiðast út upp í 500 m hæð í nágrenni Rjúpnafells. Það tekur langan tíma að ná svo stórkostlegum árangri því vistheimt af þessu tagi fylgir stigvaxandi falli, lítið gerist fyrst (t.d. í 10–30 ár) en síðan æ hraðar eftir margra áratuga beitarfriðun. Þetta þekkja sumarhúsaeigendur og aðrir sem friðað hafa land fyrir beit. Myndatexti unninn í samvinnu við Hrein Óskarsson, sviðsstjóra Þjóðskógasviðs Skógræktarinnar. (Myndin er tekin árið 2020.)

Mynd 20.12. Blómskrúð í fjallshlíð á Hornströndum eftir margra áratuga friðun fyrir sauðfjárbeit. Svæðið sem hér sést var líklega orðið illa gróið þegar það var friðað.

Rannsóknastöð Skógræktar ríkisins á Mógilsá heldur utan um aukningu skóglendis í landinu, bæði vegna plöntunar á trjám sem og aukinnar útbreiðslu birkis við minnkað beitarálag (Arnór Snorrason o.fl. 2016). Breytingar sem verða við friðun lands hafa hingað til verið taldar sjálfsagðar og auðskildar, en hins vegar væri æskilegt að auka verulega rannsóknir á þeim breytingum sem verða á vistkerfum í kjölfar stórfelldrar friðunar lands; slíkar rannsóknir eru mikilvægar fyrir skilning á tengslum beitarnýtingar og ástands lands, fyrir hugmyndir um vistheimt á hlutfallslega stóru landsvæði og vegna þeirrar kolefnisbindingar sem þar á sér stað.

xi. Líkön fyrir útbreiðslu birkis og annars gróðurs fyrr á tímum. Rannveig Ólafsdóttir o.fl. (2001) þróuðu líkan fyrir gróðurbreytingar á Íslandi frá lokum ísaldar. Einnig má nefna námsritgerð eftir Wöll (2008). Líkön benda til þess að útbreiðsla bæði birkis og gróðurs almennt hafi sveiflast töluvert í samræmi við loftslagsbreytingar. Talið er að skóglendi myndi hylja 20–40% landsins (breytilegt eftir líkönum) ef ekki kæmu til áhrif mannsins.

xii. Samtenging allra tiltækra gagna sem lúta að vistkerfisbreytingum. Þessari aðferð hefur verið beitt í auknum mæli á undanförnum árum, m.a. í rannsóknum Egils Erlendssonar o.fl. (t.d. 2009) og Streeter o.fl. (t.d. 2015).

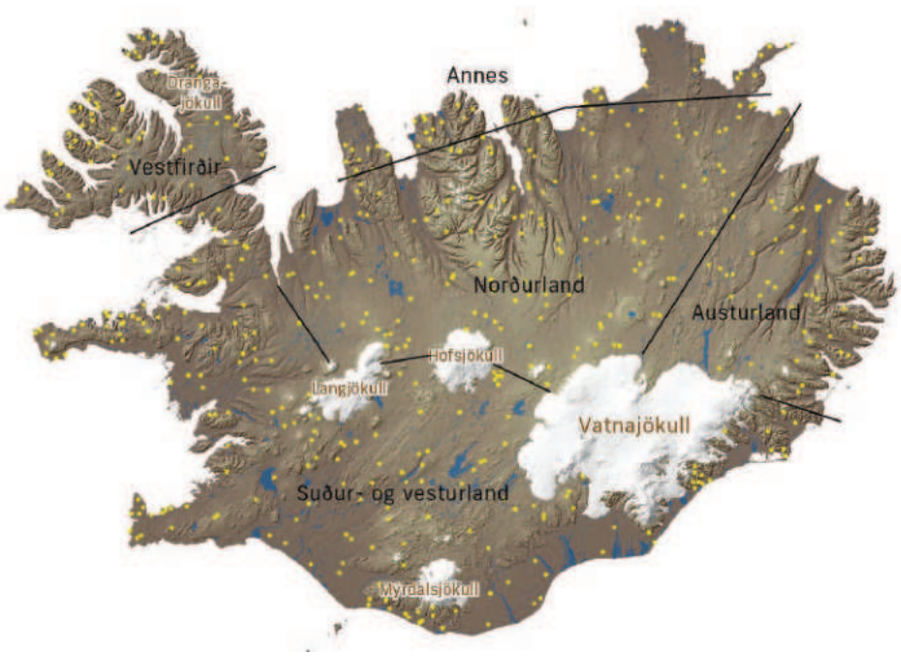
20.3. Hvað gerðist eiginlega? Þanþol, hnignun og hrun vistkerfanna

Af hverju hefur hrun íslenskra vistkerfa verið svo viðamikið og alvarlegt sem raun ber vitni? Hvað gerðist eiginlega? Og af hverju er eyðingin mikil á einu svæði landsins en tiltölulega lítil á öðrum? Svarið liggur í samspili margra þátta sem hafa áhrif á hvernig vistkerfum reiðir af.

Hér á undan var gerð grein fyrir heimildum fyrir hruni íslenskra vistkerfa. Það er þó vitaskuld háð þanþoli vistkerfanna hvort, hvar og hvenær vistkerfishrun á sér stað, og það alvarlega vistkerfishrun sem hér varð eftir landnám átti sér stað með mis-

Mynd 20.13. Líkan fyrir þætti sem höfðu áhrif á afdrif vistkerfa eftir landnám. Heildaráhrifin eru fall af margfeldi þessara þátta. Þar sem nokkrir þættir teljast óhagstæðir (rauð svæði fyrir hvern), t.d. mikil nýting nálægt gosbelti í mikilli hæð, er líklegt að nýtingin hafi valdið áföllum og jafnvel gróðurleysi, ekki síst á köldustu tímaskeiðunum (áföll). Þar sem þessar aðstæður fóru saman við nálægð við uppsprettur sands urðu afleiðingarnar mjög afdrifaríkar, m.a. með myndun áfoksgeira og sandsvæða. Við þær aðstæður eyddust jafnvel votlendi. Gróin svæði nú á dögum eru þar sem flestir þessara þátta eru hagfelldir (græn svæði fyrir hvern þátt). Mikilvægt er að stilla þessum þáttum saman til að átta sig á af hverju afleiðingar landnýtingar hafa verið svo misjafnlega miklar í landinu.

- **Hæð yfir sjávarmáli** – því kaldara, því minna þanþol.
- **Nálægð við kalda hafstrauma** (Vestfirðir og annes á Norðurlandi).
- **Nálægð við gosbeltin** (sem hefur áhrif á tíðni gjóskufalls og rofgirni jarðvegsins).
- **Gerð og samsetning vistkerfis** (m.a. mold og gróður, hæð, samsetning o.s.frv.).
- **Árferði og tíðni neikvæðra veðurfarsöfga** (kuldaköst o.s.frv., breytileg áhrif á milli landshluta).
- **Halli landsins og landslag almennt,** m.a. samfelld lengd hlíða (móbergshlíðar og urðarhlíðar).
- **Útbreiðsla votlendis.**
- **Nýtingarþættir** eins og aðgengi að landinu til beitar og viðarhöggs.
- **Tíðni og ágengni náttúrulegra áfalla** svo sem gjóskugosa.
- **Nálægð við uppsprettu sands** sem gerir moldina grófa og þykka og eykur hættu á myndun áfoksgeira.



Mynd 20.14. 500 reitum, sem hver er 500x500 m í þvermál, var dreift tilviljanakennt um landið og ástand hvers reits kannað. Landinu var svæðaskipt í einfalda flokka (ÓA o.fl. 2022). Niðurstöðurnar sýna að hæð yfir sjávarmáli er langmikilvægasta breytan en tilvist votlendis og brattra hlíða ásamt nánd við gosbeltið hefur áhrif á núverandi ástand landsins.

munandi hætti eftir aðstæðum (t.d. Dugmore o.fl. 2000). Þættir sem móta þanþolið gagnvart nýtingu eru taldir upp í kassa hér til vinstri:

20.4. Líkan til að útskýra mismun á núverandi ástandi vistkerfa landsins

Líkan til að meta líkur á því hvort vistkerfi hafi komist af eftir landnám eða orðið fyrir hruni tæki tillit til allra fyrrnefndra þátta og slíkt líkan er sett fram á mynd 20.13, nokkuð einfaldað. Gert er ráð fyrir að samsetning og gerð vistkerfa sé mótuð af þessum þáttum líkansins. Þar sem „gildi“ fyrir flesta þættina eru lág (græn á myndinni) eru meiri líkur á að gróin vistkerfi hafi komist af, t.d. á láglendi fjarri gosbeltum, einkanlega votlendin. Votlendi á hálendi, fjarri gosbeltum á fremur hallalitlu landi, eru enn til staðar á heiðum á Vestur- og Norðvesturlandi, svo dæmi séu tekin.

Vistkerfi á gosbelti hálendisins voru útsett fyrir tíðum skakkaföllum því moldin er þykkari og grófkorna og vatnsheldni er minni. Nálægð við sanduppsprettur varð afdrifarík þar sem aðrir þættir þessa líkans voru óhagstæðir, moldin iðulega gróf, þykk og óstöðug og því mynduðust áfoksgeirar bæði á láglendi og hálendi. Þar sem einhver þessara þátta gerir vistkerfin viðkvæm (rauðu gildin) þarf minni áhrif annars þáttar, t.d. kuldakast, til að nýting hafi afdrifaríkar afleiðingar.

ÓA o.fl. (2022) gerðu tilraun til að meta gildi þessa líkans á einfölduðu formi með því að leggja út 500 reiti tilviljanakennt á landið, sem hver um sig var 500 m á hverja hlið (samtals 0,25 ha). Um 30 reitanna voru þó ekki notaðir (árfarvegir, byggt land o.fl.). Ástand innan hvers reits var fengið úr gagnagrunni GróLindar (Bryndís Marteinsdóttir o.fl.

2021, 2022). GróLind metur ástand lands á mælikvarðanum 1–5 þar sem land með einkunnina 1 er með mjög litla virkni og stöðugleika vistkerfa en 5 er með mjög mikla virkni og stöðugleika (sjá kafla 19.5). Meðalhæð yfir sjávarmáli, þekja votlendis, meðalhalli, magn áfoks og tilvist urðarhlíða var metið með því að skoða hvern reit fyrir sig á gervihnattamyndum í Nytjaland-gagnagrunni Landbúnaðarháskólans o.fl. Landinu var skipt upp í fimm meginsvæði, eins og sýnt er á mynd 20.14 þar sem reitirnir eru einnig sýndir.

Líkanið útskýrði um 68% breytileikans á ástandi landsins í heild – sem verður að teljast ansi mikið, og náði >70% fyrir einstaka landshluta á mynd 20.14. Í heildina er líkanið einkar vel til þess fallið að skýra af hverju sum svæði landsins eru í verra ástandi nú heldur en önnur.

20.4.1. Hæð yfir sjávarmáli

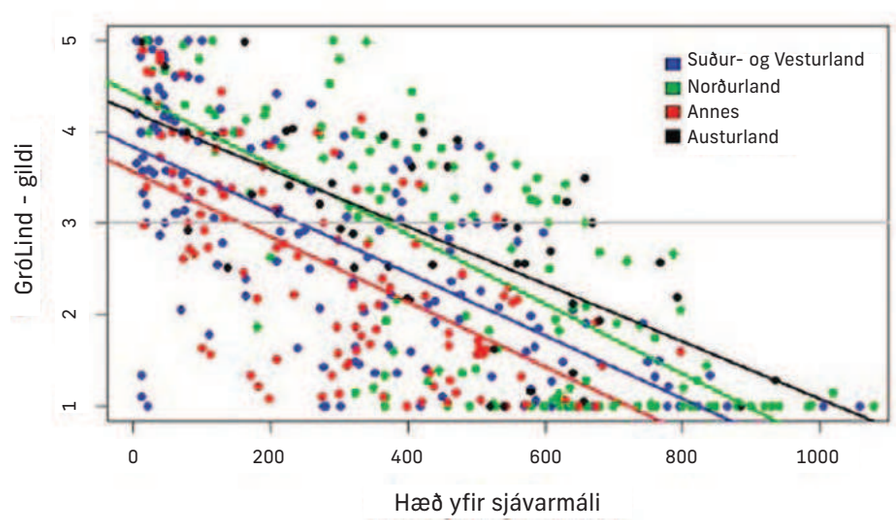
Sem fyrr sagði sýna niðurstöður rannsóknar ÓA o.fl. (2022) að hæð yfir sjávarmáli er mikilvægasti þátturinn sem útskýrir mismunandi ástand landsins í dag. Eftir því sem hærra dregur er þanþol vistkerfa gagnvart raski og nýtingu minna og þess að vænta að virkni og stöðugleiki þeirra sé minni (GróLind-gildi á mynd 20.15).

Á Vestfjörðum og annesjum norðanlands (sjá mynd 20.15) versnar ástandið mun hraðar með hæð (rauð lína) en á öðrum svæðum landsins, en mestar líkur eru á að finna land í góðu ástandi í mikilli hæð inn til landsins á Austur- og Norðurlandi. Þar er unnt að finna há gildi (gott ástand) upp í 600–700 m hæð, en slík gildi finnast vart ofan 450 m hæðar á Suðurlandi og annesjunum samkvæmt þessu úrtaki. Þessar niðurstöður eru í góðu samræmi við rannsókn Björns Traustasonar o.fl. (2006) á gróðurmörkum sem voru í 300 m hæð á Vestfjörðum og 450 m á Tröllaskaga.

Lína er dregin þvert yfir grafið við ástandsgildið 3 þar sem land með það gildi eða hærra myndi teljast í ásættanlegu ástandi. Meðaltalið sker þessa línu í u.þ.b. 200 m hæð á Vestfjörðum og annesjum norðanlands (mynd. 20.15), í tæplega 300 m hæð á Suður- og Vesturlandi en í rúmlega 400 m hæð á Norður- og Austurlandi. Meðal þeirra reita sem mynda punktana á grafinu eru sandar og önnur ógróin svæði sem koma fyrir í flestum hæðarbeltum og hafa áhrif á hvar línurnar skera GróLindar-gildið 3, ekki síst á Suðurlandi. Skoða ætti nýtingu ofan þeirra hæðarmarka sem hér voru nefnd fyrir hvern landshluta með gagnrýnum augum – færa má rök fyrir því að hún sé ekki sjálfbær nema að ljóst sé að nýtingin einskorðist við vel gróið land í góðu ástandi.

20.4.2. Votlendin hafa þanþol

Votlendi hafa mikið þanþol (mynd 20.17). Þau eru einmitt áberandi í þeirri gróðurþekju sem eftir er á landinu, og þau héruð sem nú eru best gróin eru votlend í eðli sínu: Suðurlandsundirlendið, Vesturland og Norðvesturland.



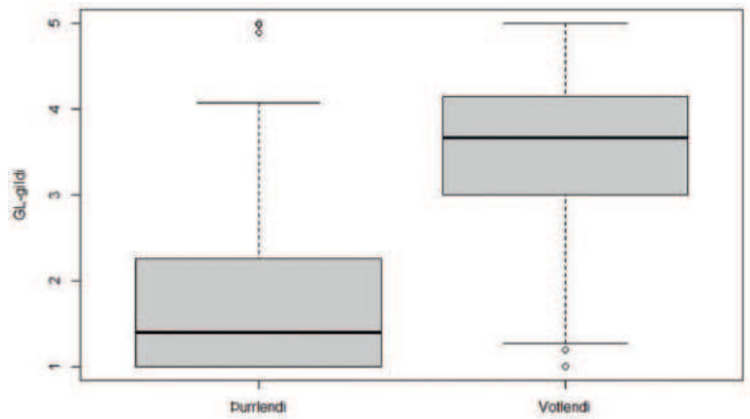
Mynd 20.15. Tengsl ástands lands og hæðar yfir sjávarmáli. Hver punktur táknar 500x500 m reit, en alls eru reitirnir 472. Landið er flokkað í fjögur mismunandi svæði sem sýnd eru á mynd 20.14. Ástand lands er meðalgildi GróLindar fyrir hvern reit. Línur tákna tengsl hæðar og ástands fyrir hvert svæði. Ástandið versnar hratt með hæð yfir sjávarmáli. Ástandsgildið 3 er dregið á grafið, sem segja má að skilji á milli ásættanlegs og óásættanlegs ástands með tilliti til beitar. Að meðaltali skera línurnar þetta gildi í um 200 m hæð (Vestfirðir og annes norðanlands), um 250 m hæð (Suður- og Vesturland) og 400 m hæð (Norður- og Vesturland). Byggt á ÓA o.fl. 2022.

Mynd 20.16. Illa farið land með virku rofi sem stendur fremur lágt á annesi norðaustanlands. Loftslag á slíkum svæðum er kaldara en inn til landsins – sem hefur áhrif á þanþol þessara svæða – enda benda niðurstöður rannsókna (mynd 20.15) til þess að þau séu iðulega í slæmu ástandi þó svo að mörg svæðanna séu votlend og ekki innan gosbelta – sem einnig hefur áhrif á hvert ástand landsins er nú á tímum eftir nýtingu síðustu þúsaldar.

Mynd 20.17. Votlendi á Mýrum á Vesturlandi með mikið þanþol. Svæðið telst meðal best grónu svæða landsins er varðar þekju (gróðurhulu). Jarðvegur þurrlendisins er grunnur en hann hefur sums staðar látið undan síga í aldanna rás, en ekki í sama mæli og þurrlendisjarðvegur gosbeltanna.

Vesturland og Norðvesturland eru einnig tiltölulega fjarri gosbeltinu sem minnkar líkur á eyðingu þeirra, sbr. líkan á mynd 20.13.

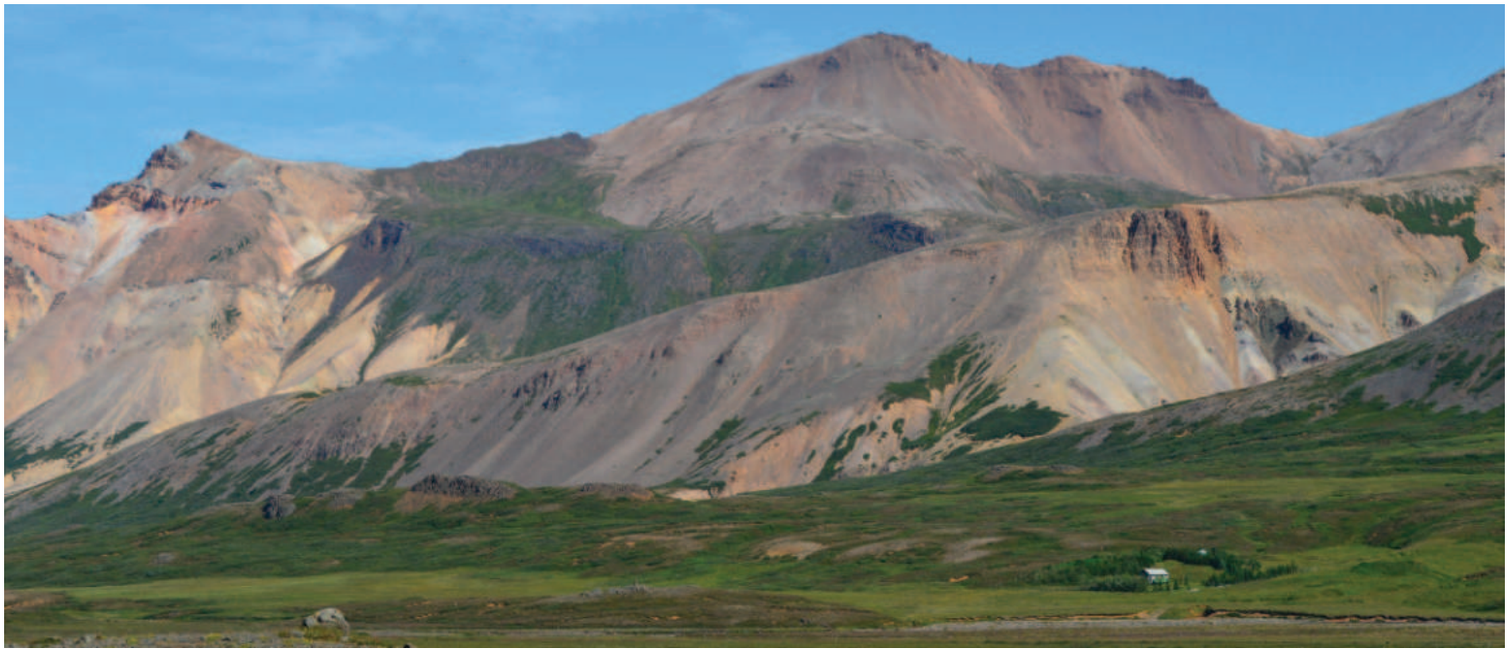
Rannsóknir ÓA o.fl. (2022) sýna einmitt að líkur á góðri ástandseinkunn (GróLind) eru mun meiri fyrir votlendissvæði en þurrlendissvæði, en dreifing GróLindar-einkunna er sýnd á mynd 20.18. Votlendi hafa ennfremur áhrif á byggðamynstur og þéttleika byggðar, sem getur hafa haft áhrif á mynstur landhnignunar. Rannsóknir Árna Einarssonar (2019) á fornaldargörðum sýna einmitt að mörg svæði sem eru í eðli sínu þurrlend voru afar þéttsetin á þjóðveldisöld (930–1262/1264) – sem hefur víða haft slæmar afleiðingar fyrir þurrlendisvistkerfi sem voru viðkvæm fyrir.



Mynd 20.18. Dreifing meðaltalseinkunna innan rannsóknareita samkvæmt mælikvarða GróLindar, skipt á milli þurrlendis og votlendis. Votlendin eru að meðaltali með umtalsvert hærri einkunn enda þanþol og stöðugleiki þeirra mun meiri en þurrlendissvæða.

20.4.3. Halli lands og núverandi ástand þess

Ljóst er að halli lands skiptir meginmáli fyrir þanþol og stöðugleika vistkerfa. Mest verður rof þegar hlíðar hafa langan samfelldan halla og þar sem hann er mestur. Tertíer-staflinn einkennist af stuttum brekkum með palli á milli og þar hefur rof orðið minna en í hlíðum innan gosbeltisins. Einnig skiptir lögun hallans máli, sbr. umfjöllun um rof á Íslandi í 18. kafla. Við framkvæmd rannsókna ÓA o.fl. (2022) var litið til hallaþátta. Hæðarmunur innan rannsóknareita (meðalhalli) leiddi ekki til marktækra niðurstaðna, m.a. vegna fjölda svæða innan hraunlagastaflans frá Tertíer þar sem heildarmunur á milli lægsta og hæsta punkts er mikill í mörgum rannsóknareita en í heild fremur stuttar brekkur á milli palla. Tilvist urðarhlíða skilaði hins vegar marktækum niðurstöðum – ástand vistkerfa er víða bágborið í þeim. Þar hafa verið fyrir



Mynd 20.19. Urðarhlíð á Austurlandi. Líparítskriðurnar, þær sem voru á annað borð grónar, misstu líklega gróðurhuluna snemma og gróður á mjög erfitt með landnám í þeim vegna ófrjósemi. Gróður tórir þar sem bergið virðist basískara, eins og sést til vinstri við miðja mynd. Torfur hér og þar í hlíðunum bera vitni um gróðurhulu fyrri daga.

langar samfelldar brekkur sem hafa verið afar viðkvæmar fyrir nýtingu. Þegar rof hefst í slíkum hlíðum getur vatnsrof orðið gríðarlegt (mynd 20.19). Vissulega eru margar urðarhlíðar fagrar ásýndum en ástand þeirra er langt frá því að geta talist „náttúrulegt".

20.4.4. Nálægð við gosbelti og aðrir þættir

Ljóst er að ástand lands innan gosbeltisins er almennt verra en utan þess. Þar fer saman lítið af votlendum (gropinn berggrunnur), rask vegna hraunrennslis og gjóskufalls, þykkur óstöðugur jarðvegur og sums staðar ágangur sands (áfoksgeirar o.fl.). Skipting landsins eftir magni áfoks var notuð sem nálgun á þessum þáttum og leiddi til marktæks munar innan gosbelta og utan í rannsókn ÓA o.fl. 2022. Það kemur vitaskuld ekki á óvart. Hér á eftir fer almenn umræða um alla þessa framangreinda og fleiri þætti til að fá fyllri mynd af hnignun og hruni íslenskra vistkerfa.

20.5. Þanþol, vistkerfi, loftslag og sagan

20.5.1. Hvar og hvenær?

Í upphafi byggðar hefur landnýting fyrst og fremst stuðlað að gróðurfarsbreytingum, en rof þarf alls ekki að fylgja í kjölfarið nema þar sem kerfin eru veikust fyrir, sbr. líkanið hér að ofan. Það er ljóst að jarðvegur sem stóð hæst í nágrenni við gosbeltið eða innan þess var viðkvæmastur fyrir landnýtingu (mynd 20.20), eins og rannsóknir Grétars Guðbergssonar (1975, 1996) og Hjalta Guðmundssonar (1997) leiða glögglega í ljós.

Gróður og mold í bröttum samfelldum hlíðum hafa einnig staðið hlutfallslega veikar en önnur vistkerfi, ekki síst þar sem aðstæður eru með þeim hætti að mjög stórir úrkomuatburðir (>100 mm á sólarhring) geta orðið (mynd 20.19). Rannsóknir (t.d. Áslaugar Geirsdóttur o.fl. 2009) sýna að hnignunin hófst

Mynd 20.20. Uppgræddur reitur í um 800 m hæð yfir sjárvarmáli við Nýjadal á Sprengisandi, einn svokallaðra „Sturlu-reita", nefndur eftir Sturlu Friðrikssyni sem gerði tilraunir með uppgræðslu á hálendi á nokkrum svæðum á landinu (Sturla Friðriksson og Jóhann Pálsson 1970). Borið var á reitinn í átta ár eftir sáningu upp úr 1960, sem telst ansi mikið inngrip. Gróðurinn hefur verið að breiðast mjög hægt út síðan (fáeinir cm á ári). Athyglisvert er hvernig inngrip af þessu tagi koma landinu til baka yfir ákveðinn þröskuld og þanþolið er nægjanlegt til að viðhalda þessari þekju. Stöðugleiki og næringarefni gera útslagið, sem m.a. greiddu leið fyrir myndun jarðvegsskánar. Náttúrulegur gróður er tekinn við og breiðist hægt út. Myndin er tekin sumarið 2014, Tungnafellsjökull í baksýn.

mun síðar þar sem þanþolið er meira, t.d. á Vesturlandi þar sem votlendi eru útbreidd og jarðvegurinn þynnri og fínkornóttari en á gosbeltinu og við það. Þá jókst rof mjög misjafnlega hratt á Norðausturlandi eftir svæðum. McGovern og félagar (2007) tóku eftir því að neikvæðar breytingar á vistkerfum urðu einkum í hluta Mývatnssveitar eftir 1717 (aldurssett öskulag), en Rannveig Ólafsdóttir og Hjalti Guðmundsson (2002) hafa bent á að breytingar hafi orðið fljótlega eftir landnám á svipuðum slóðum.

Hnignun og eyðing skóglendis á landinu var e.t.v. afdrifaríkasta breytingin, a.m.k. á láglendi, því skógurinn léði kerfunum mikið þanþol og batt jarðveginn saman en hin skóglausu svæði voru víða afar viðkvæm fyrir frekara raski. Eitt lykilatriði í viðhaldi birkiskóganna er endurnýjun, en umtalsverð beit kemur í veg fyrir hana, sem verður til þess að skógar deyja smám saman. Auk þess eru gamlir beittir skógar, þar sem endurnýjun á sér ekki stað, útsettir fyrir sjúkdómum, sem síðan er jafnvel ranglega kennt um skógareyðingu (mynd 20.21). Því miður á það sér stað enn þann dag í dag. Um hnignun skóganna er að öðru leyti ekki fjallað hér, en benda má á bók Sigurðar Blöndal og Skúla Björns Gunnarssonar (1999): *Íslandsskógar*.

Mikið af þeim rannsóknum sem taka á umhverfisbreytingum eftir landnám byggjast á áfokshraða í jarðvegi. Áfokshraðinn endurspeglar hins vegar ekki nema að hluta stórfelldar breytingar á gróðurfari og eiginleikum moldarinnar, ekki síst ef landhnignun fylgir ekki uppfok á efnum. Þá er vatnsrof virkari þáttur en uppfok á mörgum svæðum, ekki síst þar sem moldin er grunn. Virkni vindrofs er ákaflega mismunandi á landinu eftir veðurfari og landgerðum (m.a. útbreiðslu votlendis, halla lands, nálægð við hálendi, nálægð við auðnir, kornastærð, þykkt jarðvegs, sbr. líkanið á mynd 20.13). Þá hefur uppruni áfoks

Mynd 20.21. Deyjandi skógur innarlega í Skyndidal í Lóni. Ástæðan er ofbeit. Á þessu svæði eyðist nú stórt samfellt skóglendi þar sem skógurinn nær ekki að endurnýja sig, en beitarálagið er mjög mikið. Þegar skógar sem þessir verða gamlir án endurnýjunar undir miklu beitarálagi verða þeir útsettir fyrir sjúkdómum, sem stundum er ranglega kennt um eyðingu þeirra. Mynd: Friðþór Sófus Sigurmundsson.

breyst mikið í tímans rás og er núna að stórum hluta bundinn sérstökum „heitum reitum“ uppfoks (sjá ÓA o.fl. 2019 a,b), sem m.a. má rekja til þess að jöklar hafa hörfað síðustu öldina og að nánast allur viðkvæmasti jarðvegurinn er þegar eyddur.

Því er mikilvægt að reyna að beita sem fjölbreyttustu rannsóknaaðferðum, eftir því sem við verður komið, samhliða t.d. frjókornarannsóknum, skoðun á margvíslegum sögulegum heimildum o.s.frv., eins og gert var af Vickers o.fl. (2011) á Suðurlandi, í Þjórsárdal af Friðþóri S. Sigurmundssyni o.fl. (2014) og á Vesturlandi af Gathorne-Hardy o.fl. (2009). Enda eru heimildir og vísbendingar um landhnignun á Íslandi afskaplega fjölbreytilegar, eins og tekið var saman hér á undan.

20.5.2. Loftslag, þanþol og hrun

Loftslag fór kólnandi þegar fyrir landnám, sem sést m.a. af því að birki var tekið að láta undan síga (t.d. Lawson o.fl. 2007), sem hefur einmitt dregið úr þanþoli birkiskóga og gert þá viðkvæmari fyrir nýtingu mannsins. Rannveig Ólafsdóttir o.fl. (2001)

álykturðu að trjáhula sem og gróðurhula almennt hafi farið hnignandi fyrir landnám vegna kólnunar loftslags sem hófst fyrir tæplega 3 000 árum, þróun sem leiddi til kuldaskeiðs sem stóð sem hæst u.þ.b. 1 300–1 900. Hin svala tíð „litlu ísaldarinnar“ var þó ekki samfelldur kuldatími.

Rannsóknir á vatnaseti leiða í ljós að „litla ísöldin“ skiptist í samfelld hagstæð loftslagstímabil með kuldatímabilum á milli sem gátu varað nokkra áratugi (Áslaug Geirsdóttir o.fl. 2009). Náttúruleg vistkerfi sem ekki eru nýtt af manninum laga sig að breytingum á loftslagi, þau nýta m.a. góðu árin til að endurnýja styrk sinn, og flest íslensk vistkerfi, nema þau sem stóðu hæst, höfðu að öllum líkindum nægt þanþol til að ganga í gegnum kuldatímabil og ná sér síðan aftur á strik þegar hlý ár gengu í garð. Samspil skerts þanþols og kaldara loftslags hefur verið afdrifaríkast fyrir vistkerfi hálendisins, þar sem jafnvel lítil nýting (t.d. fuglar og búfénaður) samfara öðrum áföllum á borð við eldgos hefur getað valdið stórfelldri eyðingu, sbr. umfjöllun um suðvesturríki Bandaríkjanna og beitarumræðu hér fremst í kaflanum. Streeter og Dugmore (2013) bentu á að jarðvegsrof minnkaði t.d. í kjölfar fólksdauða af völdum plágunnar miklu 1402, sem sést af minna áfoki, en slík skammtímaáhrif vega þó minna en langtímaáhrif nýtingar í margar aldir (Streeter o.fl. 2012).

Slæmu árferði er gjarnan kennt um hnignun landkosta hér á landi, enda hefur loftslag mikil áhrif á starfsemi vistkerfa. Vísindamenn eru alls ekki allir á sama máli um hversu alvarleg áhrif árferðisins voru á vistkerfi í samanburði við aðra þætti (Ogilvie 2005). Áhrifin eru háð ástandi vistkerfa, þanþoli – þ.e. samspili margra þátta sbr. líkan á mynd 20.13.

Þar sem landnýting er þung og/eða þanþol skert af einhverjum orsökum eru áhrif langvarandi kulda mun meiri en ella. Eyðing skóga, sem breytir nærveðurfari og næringarhringrásinni í moldinni, hefur örugglega haft mikil áhrif á útreið þurrlendisvistkerfanna á gostbeltunum og í nágrenni þeirra og þar hefur slæmt árferði og gjóskugos í kjölfar skógarfellis haft slæm áhrif. Doner (2003) taldi að þung landnýting yfirskyggði áhrif af köldu árferði, en þá ályktun byggði hann á rannsóknum á vatnaseti á Vestfjörðum. Streeter o.fl. (2012) fjölluðu um hvernig öflugt þanþol seinkar áhrifum af köldu árferði. Það er ávallt mikilvægt að hafa í huga að minni framleiðni í köldum árum, þegar mjög hefur reynt á þanþolið, leiðir til veldisvaxandi álags á vistkerfi. Í kjölfarið fylgir iðulega hinn þekkti „vítahringur landhnignunar“ með sífellt auknu álagi á þær auðlindir sem eftir eru. Hafís fylgdi köldustu árunum, sem lokaði meðal annars höfnum svo ekki var hægt að róa til fiskjar (sjá Ogilvie og Trausta Jónsson 2001), og þar með óx álag á auðlindir á landi. Ogilvie og Trausti Jónsson (2001) telja að áhrif slæms árferðis á „litlu ísöldinni“ hafi í raun verið lítilvæg miðað við áhrif landnýtingarinnar. Í þessu riti er lögð áhersla á samspil þáttanna, sbr. líkan á mynd 20.13. Spurningin um áhrif loftslagsbreytinga í samanburði við áhrif landnýtingar er vitaskuld í brennidepli eftir því sem áhrif gróðurhúsalofttegunda í andrúmsloftinu verða meiri (sjá Herrick o.fl. 2013).

20.6. Þanþol og jarðvegseiginleikar

Aðalástæðan fyrir ólíkum örlögum vistkerfa á Íslandi má rekja til samspils álagsins á þau, annarra álagsþátta á borð við gjóskugos og mismunandi þanþols vistkerfanna, sbr. líkanið á mynd 20.13. Þau sem tæpast stóðu þoldu ekki að þanþolið minnkaði og þegar fleiri áföll dundu yfir (slæmt árferði og gjóskufall), ásamt áframhaldandi beit, fylgdi eyðing í kjölfarið. Hæð yfir

sjávarmáli, sem endurspeglar loftslag, er mikilvægasti þátturinn samkvæmt líkani ÓA o.fl. (2022), eins og áður var rakið. Gerð moldarinnar hefur einnig megináhrif á þanþol vistkerfa ásamt ýmsum gróðurþáttum, svo sem hæð gróðurs og samsetning hans (sem m.a. er háð loftslagi/hæð yfir sjávarmáli), en vitaskuld spila gróður- og moldarþættirnir saman, þeir eru háðir hver öðrum.

Það er mikilvægt að hafa í huga að landhnignunin fól ekki aðeins í sér rof á jarðvegsauðlindinni (þ.e. að moldin var fjarlægð) heldur hnignun moldarinnar (m.a. minna kolefni, nitur og hægari umsetning næringarefna), sem og stórfelldar breytingar á gróðurfari. Allir þessir þættir hafa áhrif á þanþol. Fimm eiginleikar moldarinnar eru hvað mikilvægastir í þessu samhengi: rakastig og vatnsheldni, kornastærð, samloðun, þykkt jarðvegsins og lífrænt innihald (oftast metið eða mælt sem % C).

20.6.1. Grófur og þykkur jarðvegur er viðkvæmur fyrir rofi

Grófum jarðvegi gosbeltisins er hættast við uppblæstri og vatnsrofi. Það er vegna þess að samloðun í honum er lítil, kornin sjálf hafa mikinn rofmátt þegar vindur eða vatn ná að hreyfa við þeim, auk þess sem slíkur jarðvegur þornar auðveldlega. Á það sérstaklega við þar sem þykk, gróf gjóskulög eru í moldinni, enda samloðun nánast engin í þeim jarðvegslögum. Þar er lífrænt innihald jarðvegsins jafnframt oft lágt, ekki síst í kjölfar langvarandi nýtingar.

Þykka, grófa mold var helst að finna í nágrenni virkustu eldstöðvanna, svo sem Heklu, Kötlu, Grímsvatna og Bárðarbungu. Vikurkennd gjóska er gróf og létt í eðli sínu og fýkur mjög auðveldlega. Gróf gjóska er áberandi í þeirri mold sem eftir er á afréttum sunnanlands, m.a. á milli Hofsjökuls og

Mynd 20.22. Jarðvegur með grófu gjóskulagi. Þegar gróðurhulan opnast hafa þessi grófu korn afskaplega mikinn rofmátt. Sniðið er úr ofanverðri Árnessýslu.

Langjökuls, sem og víða á Suðurlandi (mynd 20.22). Vindur hreyfir jafnvel vikurkorn sem eru yfir 1 cm í þvermál, en rofafl slíkra korna þegar þau berast með hvössum vindi er gríðarlegt. Þar sem mikið er af grófri gjósku þegar moldin rofnar leggst til nægur efniviður til að valda miklu tjóni. Þegar vistkerfi með jarðvegi af þessu tagi standa tæpt vegna landnýtingar á borð við beit og skógarnytjar eru þau mjög viðkvæm fyrir frekara raski og eyðing getur þá orðið ör

og jafnvel leitt til myndunar áfoksgeira. Þá fara saman margir þættir í líkaninu á mynd 20.13.

Þykkur jarðvegur leggur til mikinn efnivið til rofs þegar landið opnast og því er honum mikið hættara við rofi og víðtækum áhrifum þess í samanburði við svæði þar sem jarðvegurinn er þunnur. Rofabörð myndast einkum þar sem jarðvegur er þykkari en u.þ.b. 30 cm, þannig að óvarið lag myndast á milli rótarmottu og berggrunnsins (sjá ÓA 2000). Sé moldin orðin þykkari en t.d. 1,5–2 m á þurrlendi eru gróf gjóskulög venjulega til staðar. Moldaryfirborðið verður óstöðugra, bæði vegna hæðarinnar og tilvistar þessara grófu öskulaga. Enda er það svo að það er einkum grófur og þykkur þurrlendisjarðvegur sem hefur orðið eyðingaröflum að bráð, vistkerfi sem voru á og við gosbelti landsins. Á mörgum svæðum þar sem svo háttar til eru vistkerfin sem þar voru áður algjörlega eydd.

20.6.2. Eldgos og hnignun landsins

Eldgos og gjóskufall sem þeim fylgir eru örlagavaldar í sögu hnignunar vistkerfa á Íslandi en áhrif þeirra eru þó samofin þanþoli kerfanna. Áföll eru einn meginþáttanna í líkaninu á mynd 20.13 fyrir afdrif íslenskra vistkerfa. Hæð gróðurs hefur megináhrif á þol kerfa gagnvart öskufalli – neikvæð áhrif öskunnar vaxa ört eftir því sem gjóskan hylur meira af gróðrinum (sjá ÓA 2013), en einnig er samsetning gróðurs og strúktúr mikilvægir þættir (Cutler o.fl. 2016). Rannsóknir Sigrúnar Daggar Eddudóttur o.fl. (2015, 2016, 2017) sýna m.a. að þar sem birkikjarr var fyrir stóðust vistkerfin vel gríðarlegt

Mynd 20.23. Búrfellsskógur í austurhlíðum Búrfells, skammt frá Heklu. Þjórsá í forgrunni en bergvatnsáin Bjarnarlækur rennur út í hana til hægri á myndinni. Skógurinn hefur lifað af mikið gjóskufall, jafnvel þótt hann standi í brattri hlíð. Hallinn kann jafnvel að hafa hjálpað, nýfallin gjóska hefur runnið ofan af svarðlaginu niður brekkuna í vatnsveðrum. Svæðið er fremur óaðgengilegt, sem hefur dregið úr líkum á mikilli nýtingu af völdum skógarhöggs og beitar. (Myndin er tekin árið 2020.)

áfall sem varð af völdum H4 eldgossins (risastórt gjóskugos í Heklu fyrir 4 200–4 300 árum, vikurmökkinn lagði til norðurs; Guðrún Larsen og Jón Eiríksson 2008). Gjóskufallið olli þó miklum gróðurfarsbreytingum í átt til mólendis, sem er tiltölulega stöðugt en á lægra stigi en þau vistkerfi sem voru til staðar fyrir gosið, enda var komið álag á kerfin vegna kólnandi loftslags. Slík færsla er dæmigerð fyrir ástandsstig og breytingar í samræmi við þanþol.

Á 19. öld jókst byggð víða á jaðarsvæðum, eins og uppi á Jökuldalsheiði, sem hafði áhrif á hæð og samsetningu gróðurs sem og næringarástand moldar á heiðinni. Öskjugosið 1875 dreifði gjósku út yfir svæðið og í kjölfarið fylgdi mikil landeyðing – byggðin lagðist smám saman af (sjá Sigurð Þórarinsson 1979). Í þessu riti hefur verið lögð áhersla á að aska sem fellur á illa gróið land sé óstöðug og fjúki á ný. Strúktúr gróðursins hefur áhrif á hvar askan getur safnast fyrir, t.d. í víðibrúskum (sjá m.a. Cutler o.fl. 2016). Gjóskufall hefur ennfremur áhrif á þanþol kerfanna og endurtekið gjóskufall er talinn mikilvægur þáttur í eyðingu svæða á Íslandi, eins og Dugmore o.fl. (2007) bentu á í tengslum við eyðingu Þjórsárdals þar sem gosið í Heklu 1104 veikti kerfin, en gosið árið 1300 gerði víða útslagið (tíð áföll í líkaninu á mynd 20.13).

Stóru Heklugosin sem dreifðu ösku yfir stóran hluta landsins höfðu áhrif á sögu vistkerfanna, ekki aðeins í kjölfar landnámsins heldur einnig á forsögulegum tíma. Þar má t.d. nefna gjósku frá Heklu sem féll fyrir landnám í risastóru gjóskugosi fyrir um 3 100 árum og nefnt er H3, en rannsóknir á borkjörnum í Hvítárvatni sýna að mikið rof hefur orðið í umhverfi þess í yfir 100 ár eftir gosið (sjá Larsen o.fl. 2011). Gjóska úr þessu gosi er áberandi í jarðvegi víða um land. En vistkerfin náðu sér smám saman eigi að síður, jafnvel á svæðum þar sem gjóskan var meira en 10 cm þykk. Gróskumiklir birkiskógar verja sig t.d. vel fyrir áföllum af þessu tagi (mynd 20.23). Öðru máli gegnir um land þar sem nýting á borð við beit á sér stað í kjölfar stórra áfalla af völdum eldgosa.

20.7. „Og hvað með það?“

Ísland er meðal þeirra landa sem hafa orðið fyrir hvað mestri hnignun og hruni landkosta, eins og ljóst má vera af efni þessa kafla. Það er meðal mikilvægustu verkefna jarðvegsfræðinnar og fleiri fræðigreina á Íslandi að skilja ferli landhnignunar á Íslandi svo unnt sé að takast á við vandann með skilvirkum hætti. Núverandi ástand vistkerfa er þó afar breytilegt, allt frá mjög öflugum og stöðugum vistkerfum til fullkomlega hruninna kerfa. Ástand landsins var rætt í 19. kafla en hér voru tilgreindar fjölbreyttar heimildir fyrir vistkerfishruninu. Þá var lagt fram sérstakt líkan sem lýsir því hvaða þættir voru hvað mikilvægastir og útskýra að hluta ástand kerfanna í dag (ÓA o.fl. 2022).

Ljóst er að draga þarf úr beitarnýtingu á þeim svæðum sem viðkvæmust eru – þeim sem standa hátt yfir sjávarmáli og eru í bröttum hlíðum, og sérstaklega þarf að huga að kerfunum á Vestfjörðum og annesjum norðanlands þar sem gróðurmörk standa sérstaklega lágt. Einnig ætti að ganga út frá því að dregið sé markvisst úr nýtingu gróinna vistkerfa innan gosbeltanna – ekki síst við framtíðarskipulag landbúnaðar og stuðning við hann (Isabel Barrio og ÓA 2022, ÓA o.fl. 2022). Augljóst er að ekki ætti að nota illa farið land til beitar – auðnir, illa gróið land og rofsvæði. Sérstaklega ætti að hlífa sendnum svæðum við beit nema að öflugt vistkerfi sé til staðar sem verndi moldina.

Heimildir

Andrés Arnalds 1987. Ecosystem disturbance in Iceland. Arctic and Alpine Research 19:508–513.

Andrés Arnalds 1988a. Landgæði á Íslandi fyrr og nú. Í: Andrés Arnalds (ritstj.), Græðum Ísland I. Landgræðsla ríkisins, Gunnarsholti. Bls. 13–31.

Andrés Arnalds 1988b. Brautin rudd. Saga landgræðslu á Íslandi fyrir 1907. Í: Andrés Arnalds (ritstj.), Græðum Ísland I. Landgræðsla ríkisins, Gunnarsholti. Bls. 33–39.

Anna Sigríður Valdimarsdóttir og Sigurður H. Magnússon 2013. Gróður í Viðey í Þjórsá. Náttúrufræðingurinn 83:49–60.

Arnór Karlsson 1992. Birkileifar og kolagrafir á Biskupstungnaafrétti. Í: Andrés Arnalds (ritstj.), Græðum Ísland IV. Landgræðsla ríkisins, Gunnarsholti. Bls. 93–98.

Arnór Sigurjónsson 1958a. Ágrip af gróðursögu landsins til 1880. Í: Arnór Sigurjónsson (ritstj.), Sandgræðslan. Minnzt 50 ára starfs Sandgræðslu Íslands. Búnaðarfélag Íslands og Sandgræðsla ríkisins, Reykjavík. Bls. 5–40.

Arnór Sigurjónsson (ritstj.) 1958b. Sandgræðslan. Minnzt 50 ára starfs Sandgræðslu Íslands. Búnaðarfélag Íslands og Sandgræðsla ríkisins, Reykjavík.

Arnór Snorrason, Björn Traustason, Bjarki Þór Kjartansson, Lárus Heiðarsson, Rúnar Ísleifsson og Ólafur Eggertsson 2016. Náttúrulegt birki á Íslandi – Ný úttekt á útbreiðslu þess og ástandi. Náttúrufræðingurinn 86:97–111.

Árni Einarsson 2019. Tíminn sefur. Fornaldargarðarnir miklu á Íslandi. Mál og menning, Reykjavík.

Ása L. Aradóttir 2007. Restoration of birch and willow woodland on eroded areas. Í: G. Halldorsson, E.S. Oddsdottir and O. Eggertsson (ritstj.), Effects of afforestation on ecosystems, landscape and rural development. TemaNord 2007: 508, Reykholt, Iceland, June 18–22, 2005. Bls. 67–74.

Ása L. Aradóttir og Guðmundur Halldórsson (ritstj.) 2011. Vistheimt á Íslandi. Landbúnaðarháskóli Íslands og Landgræðsla ríkisins, Reykjavík.

Áslaug Geirsdóttir, G.H. Miller, Þorvaldur Þórðarson og Kristín B. Ólafsdóttir 2009. A 2000 year record of climate variations reconstructed from Haukadalsvatn, West Iceland. Journal of Paleolimnology 49:95–115.

Björn Traustason, Sigmar Metúsalemsson, Einar Grétarsson, Fanney Ósk Gísladóttir og Ólafur Arnalds 2006. Gróðurmörk á Íslandi utan eldvirka beltisins. Fræðaþing landbúnaðarins 2006: 295–298.

Bowden, C. 1987. Frog Mountain Blues. The University of Arizona Press, Tucson, Arizona, USA.

Bryndís Marteinsdóttir, Kristín Svavarsdóttir og Þóra Ellen Þórhallsdóttir 2017. Multiple mechanisms of early plant community assembly with stochasticity driving the process. Ecology 99:DOI: 10.1002/ecy.2079.

Bryndís Marteinsdóttir, Elín Fjóla Þórarinsdóttir, Guðmundur Halldórsson, Jóhann Helgi Stefánsson, Jóhann Þórsson, Kristín Svavarsdóttir, Rán Finnsdóttir og Sigþrúður Jónsdóttir 2022. GroLind-Sustainable Land Use Based on Ecological Knowledge. The XXIV International Grassland Congress / XI International Rangeland Congress. Virtual conference, Kenya Agricultural and Livestock Research Organization, Nairobi, Kenya.

Bryndís Marteinsdóttir, Elín Fjóla Þórarinsdóttir, Guðmundur Halldórsson, Jóhann Helgi Stefánsson, Jóhann Þórsson, Kristín Svavarsdóttir, Magnús Þór Einarsson, Sigþrúður Jónsdóttir og Sigmundur Helgi Brink 2020. Stöðumat á ástandi gróður- og jarðvegsauðlinda Íslands. Aðferðafræði og faglegur bakgrunnur. Drög. Landgræðsla ríkisins. grolind.is. Júní 2020.

Charnley, S., T.E. Sheridan, G.P. Nabhan (ritstj.) 2014. Stitching the West Back Together. The University of Chicago Press Ltd. Chicago, USA.

Cutler, N.A., R.M. Bailey, K.T. Hickson, R.T. Streeter og A.J. Dugmore 2016. Vegetation structure influences the retention of airfall tephra in a sub-Arctic landscape. Progress in Physical Geography 40:661–675.

Diamond, J. 2005. Collapse. Penguin, New York, USA.

Donahue, D.L. 1999. The Western Range Revisited. Removing Livestock From Public Lands to Conserve Native Biodiversity. University of Oklahoma Press, Norman, Oklahoma, USA.

Doner, L. 2003. Late-Holocene paleoenvironments of northwest Iceland from lake sediments. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 193:535–560.

Dugmore, A.J., A.J. Newton, Guðrún Larsen og G.G.T. Cook 2000. Tephrochronology, environmental change and the Norse colonisation of Iceland. Environmental Archaeology 5:21–34.

Dugmore, A.J., M.J. Church, K-A. Mairs, T.H. McGovern, S. Perdikaris og Orri Vésteinsson 2007. Abandoned farms, volcanic impacts, and woodland management: revisiting Þjórsárdalur, the „Pompeii of Iceland". Arctic Anthropology 44:1–11.

Dugmore, A.J., M.J. Church, P.C. Buckland, K.J. Edwards, I.T. Lawson, T.H. McGovern, E. Panagiotakopulu, I.A. Simpson, P. Skidmore og Guðrún Sveinbjarnardóttir 2005. The norse Landnám on the North Atlantic Islands: An environmental impact assessment. Polar Record 41:21–37.

Egill Erlendsson, K.J. Edwards og P.C. Buckland 2009. Vegetational response to human colonisation of the coastal and volcanic environments of Ketilsstaðir, southern Iceland. Quaternary Research 72:174–187.

Fanney Ósk Gísladóttir, Ólafur Arnalds og Guðrún Gísladóttir 2005. The effect of landscape and retreating glaciers on wind erosion in South Iceland. Land Degradation and Development 16:177–187.

Friðþór S. Sigurmundsson, Guðrún Gísladóttir og Hreinn Óskarsson 2014. Decline of birch woodland cover in Þjórsárdalur Iceland from 1587–1938. Human Ecology 42:577–590.

Gathorne-Hardy, F.J., Egill Erlendsson, P.G. Langdon og K.J. Edwards 2009. Lake sediment evidence for late Holocene climate change and landscape erosion in western Iceland. Journal of Paleolimnology 42:413–426.

Gerrard, A.J. 1985. Soil erosion and landscape stability in southern Iceland: a tephrochronological approach. Í: K. Richards, R. Arnett og S. Ellis (ritstj.), Geomorphology and Soils. George Allen and Unwin Ltd, UK. Bls. 78–95.

Gísli Gunnarsson 1983. Monopoly trade and economic Stagnation: Studies in the foreign trade of Iceland 1602–1787. Ekonomisk-historiska Institutionen, Lund, Meddelande XXXII.

Grétar Guðbergsson 1975. Myndun móajarðvegs í Skagafirði. Íslenskar landbúnaðarrannsóknir 7:20–45.

Grétar Guðbergsson 1996. Í norðlenskri vist. Um gróður, jarðveg, búskaparlög og sögu. Icelandic Agricultural Sciences 10:31–89.

Guðrún Gísladóttir, Egill Erlendsson, R. Lal og J. Bigham 2010. Erosional effects on terrestrial resources over the last millennium in Reykjanes, southwest Iceland. Quaternary Research 73:20–32.

Guðrún Larsen og Jón Eiríksson 2008. Postglacial volcanism in Iceland. Jökull 58: 197–228.

Guðrún Sveinbjarnardóttir, P.C. Buckland og A.J. Gerrard 1982. Landscape change in Eyjafjallasveit, Southern Iceland. Norsk Geografisk Tidskrifter 36:75–88.

Gunderson, L.H., C.R. Allen og C.S. Holling 2010. Foundations of ecological resilience. Island Press, Washington, USA.

Gunnar Karlsson 2000. Iceland's 1100 Years. History of a Marginal Society. C. Hurst & Co Ltd, London, UK.

Guttormur Sigbjarnarson 1969. Áfok og uppblástur. Náttúrufræðingurinn 39:68–118.

Hardin, G. 1968. The tragedy of the commons. Science 1962:1243–1248.

Hákon Bjarnason 1942. Ábúð og örtröð. Ársrit Skógræktarfélags Íslands 1942:8–40.

Herrick, J.E., O.E. Sala og J.W. Karl 2013. Land degradation and climate change: a sin of omission? Guest editorial. Frontiers in Ecology 11:213.

Hjalti J. Guðmundsson 1997. A review of the Holocene environmental history of Iceland. Quaternary Science Reviews 16:81–92.

Hudak, M. 2007. Western Turf Wars. The Politics of Public Lands Ranching. Biome books, Binghamton, New York, USA.

Imeson, A. 2012. Desertification, Land Degradation and Sustainability. Paradigms, Processes, Principles and Policies. Wiley-Blackwell, Chichester, UK.

Inga Svala Jónsdóttir 1984. Áhrif beitar á gróður Auðkúluheiðar. Náttúrufræðingurinn 53:19–40.

Isabel Barrio og Ólafur Arnalds 2022. Agricultural land degradation and ecosystem collapse in Iceland. Í: P. Pereira, I. Bogunovic, M. Munoz Rojas and W. Zhao (ritstj.), Global Agricultural Land Degradation, Volume I, The Handbook of Environmental Chemistry Series. Springer, Berlin, Heidelberg. doi.org/10.1007/698_2022_920.

Jakobs, L. 1991. Waste of the West. Public Lands Ranching. Lynn Jacobs, Tucson, Arizona.

Landvernd 2021. Vörsluskylda búfjár. Landvernd, Reykjavík.

Larsen, D.J., G.H. Miller, Áslaug Geirsdóttir og Þorvaldur Þórðarson 2011. A 3000-year varved record of glacier activity and climate change from the proglacial lake Hvítárvatn, Iceland. Quaternary Science Reviews 30:2715–2731.

Lawson, I.T., F.J. Gathorne-Hardy, M.J. Church, A.J. Newton, K.J. Edwards, A.J. Dugmore og Árni Einarsson 2007. Environmental impacts of the Norse settlement: palaeoenvironmental data from Mývatnssveit, northern Iceland. Boreas 36: DOI 10.1080/03009480600827298.

Lilja Jónsdóttir 2020. Beitarréttur. Lögfestar takmarkanir í þágu náttúruverndar. ML-ritgerð, Háskólinn í Reykjavík.

Margrét Hallsdóttir 1982. Frjógreining tveggja jarðvegssniða úr Hrafnkelsdal. Áhrif ábúðar á gróðurfar dalsins. Í: Helga Þórarinsdóttir o.fl. (ritstj.), Eldur er í norðri. Sögufélagið Reykjavík. Bls. 253–265.

Margrét Hallsdóttir og C.J. Caseldine 2005. The Holocene vegetation history of Iceland, state-of-the art and future research. Í: C. Caseldine, A. Russell, Jórunn Harðardóttir, Ó. Knudsen (ritstj.), Iceland – Modern Processes and Past Environments. Developments in Quaternary Sciences 5:319–334.

McGovern, T.H., Orri Vésteinsson, Adolf Friðriksson, M.J. Church, I.T. Lawson, I.A. Simpson, Árni Einarsson og 11 fleiri höfundar 2007. Landscapes of settlement in northern Iceland: historical ecology of human impact and climate fluctuation on the millennial scale. American Anthropologist 109:27–51.

Montgomery, D.R. 2007. Dirt. The erosion of civilizations. University of California Press, Berkeley, California, USA.

Ogilvie, A.E.J. 2005. Local knowledge and travellers' tales: a selection of climate observations in Iceland. Í: C. Caseldine, A. Russell, Jórunn Harðardóttir, Ó. Knudsen (ritstj.), Iceland – Modern Processes and Past Environments. Development in Quaternary Sciences 5:257–287.

Ogilvie, A.E.J. og Trausti Jónsson 2001. „Little Ice Age" research: A perspective from Iceland. Climate Change 48:9–52.

Ólafur Arnalds 1992. Jarðvegsleifar í Ódáðahrauni. Græðum Ísland IV, Árbók Landgræðslu ríkisins, Andrés Arnalds (ritstj.). Bls. 159–164.

Ólafur Arnalds 2000. The Icelandic 'rofabard' soil erosion features. Earth Surface Processes and Landforms 25:7–28.

Ólafur Arnalds 2013. The influence of volcanic tephra (ash) on ecosystems. Advances in Agronomy 121:331–380.

Ólafur Arnalds 2015. The Soils of Iceland. World Soils Book Series, Springer, Dordrecht, Holland.

Ólafur Arnalds og Ása L. Aradóttir 2011. Almenningar. Ástand jarðvegs og gróðurs. Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.

Ólafur Arnalds og Ása L. Aradóttir 2015. Að lesa og lækna landið. Landvernd, Landgræðsla ríkisins og Landbúnaðarháskóli Íslands, Reykjavík.

Ólafur Arnalds og Jón Guðmundsson 2020. Loftslag, kolefni og mold. Rit LbhÍ nr. 133. Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.

Ólafur Arnalds, Elín Fjóla Þórarinsdóttir og Fanney Ósk Gísladóttir 2019a. Sandauðnir, sandfok og ryk á Íslandi I. Sandar og fok. Náttúrufræðingurinn 89:5–47.

Ólafur Arnalds, Pavla Dagsson-Waldhauserová og Sigmundur Helgi Brink 2019b. Sandauðnir, sandfok og ryk á Íslandi II. Áfok og ryk. Náttúrufræðingurinn 89:132–145.

Ólafur Arnalds, Bryndís Marteinsdóttir, Sigmundur Helgi Brink og Jóhann Þórsson 2022. A framework model for current land condition in Iceland. Í ritrýningu.

Ólafur Arnalds, Hlynur Óskarsson, Sigmundur Helgi Brink og Fanney Ósk Gísladóttir 2016. Icelandic inland wetlands: Characteristics and extent of draining. Wetlands 36:759–769, DOI 10.1007/s13157-016-0784-1.

Ólafur Arnalds, Elín Fjóla Þórarinsdóttir, Sigmar Metúsalemsson, Ásgeir Jónsson, Einar Grétarsson og Arnór Árnason 1997. Jarðvegsrof á Íslandi. Landgræðsla ríkisins og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, Reykjavík.

Rannveig Ólafsdóttir og Hjalti Guðmundsson 2002. Holocene land degradation and climate change in Notheastern Iceland. The Holocene 12:159–167.

Rannveig Ólafsdóttir, P. Schlyter og Hörður V. Haraldsson 2001. Simulating Icelandic vegetation cover during the Holocene. Implications for long-term land degradation. Geografiska Annaler 83(A):203–215.

Serra, G. 2015. Over-grazing and desertification in the Syrian steppe are the root causes of war. The Ecologist 5:1–7.

Sigrún Dögg Eddudóttir, Egill Erlendsson og Guðrún Gísladóttir 2015. Life on the periphery is tough: Vegetation in Northwest Iceland and its responses to early-Holocene warmth and later climate fluctuations. Holocene 25:1,437–1,453.

Sigrún Dögg Eddudóttir, Egill Erlendsson og Guðrún Gísladóttir 2017. Effects of the Hekla 4 tephra on vegetation in Northwest Iceland. Vegetation History and Archaeobotany 26:389–402.

Sigrún Dögg Eddudóttir, Egill Erlendsson, Leone Tinganelli og Guðrún Gísladóttir 2016. Climate change and human impact in a sensitive ecosystem: the Holocene environment of the Northwest Icelandic highland margin. Boreas 45:715–728.

Sigurður Blöndal og Skúli Björn Gunnarsson 1999. Íslandsskógar. Mál og mynd, Reykjavík.

Sigurður Greipsson 2012. Catastrophic soil erosion in Iceland: Impact of long-term climate change, compounded natural disturbances and human driven land-use changes. Catena 98:41–54.

Sigurður H. Magnússon 1997. Restoration of eroded areas in Iceland. Í: K.M. Urbanska, N.R. Webb, P.J. Edwards (ritstj.), Restoration Ecology and Sustainable Development. Cambridge University Press, Cambridge, UK. Bls. 188–211.

Sigurður H. Magnússon og Kristín Svavarsdóttir 2007. Áhrif beitarfriðunar á framvindu gróðurs og jarðvegs á lítt grónu landi. Fjölrit Náttúrufræðistofnunar 49.

Sigurður Þórarinsson 1944. Tefrokronologiska studier på Island. Geografiske Annaler 26:1–217.

Sigurður Þórarinsson 1961. Uppblástur á Íslandi í ljósi öskulagarannsókna. Ársrit Skógræktarfélags Íslands 1960–1961:17–54.

Sigurður Þórarinsson 1979. On the damage caused by volcanic eruptions with special reference to tephra and gases. Í: P.D. Sheets og D.K. Grayson (ritstj.), Volcanic Activity and Human Ecology. Academic Press, New York, USA. Bls. 125–159.

Simpson, I.A., A.J. Dugmore, A. Thomson og Orri Vésteinsson 2001. Crossing the thresholds: human ecology and historical patterns of landscape degradation. Catena 42: 175-192.

Snorri Sigurðsson 1977. Birki á Íslandi – útbreiðsla og ástand. Skógarmál, útgefendur vinir Hákons Bjarnasonar. Bls. 146–172.

Stoops, G., M. Gerard og Ólafur Arnalds 2008. A micromorphological study of Andosol genesis in Iceland. Í: S. Kapur, A. Mermut, G. Stoops (ritstj.), New Trends in Micromorphology. Springer, Heidelberg, Þýskaland. Bls. 67–90.

Streeter, R.T. og A.J. Dugmore 2013. Reconstructing late-Holocene environmental change in Iceland using high-resolution tephrochronology. Holocene 23:197–207.

Streeter, R., A.J. Dugmore og Orri Vésteinsson 2012. Plague and landscape resilience in premodern Iceland. PNAS 109:3664–3669.

Streeter, R., A.J. Dugmore, I.T. Lawson, Egill Erlendsson og K.J. Edwards 2015. The onset of the palaeoanthropocene in Iceland: Changes in complex natural systems. The Holocene 25:1662–1675.

Sturla Friðriksson 1991. Kolagrafir við Bláfell. Lesbók Morgunblaðsins 42. tbl. (23.11.1991). Bls. 6–8.

Sturla Friðriksson og Jóhann Pálsson 1970. Landgræðslutilraun á Sprengisandi. Íslenzkar landbúnaðarrannsóknir 2:34–49.

Vickers, K., Egill Erlendsson, M.J. Church, K.J. Edwards og J. Bending 2011. 1000 years of environmental change and human impact at Stóra-Mörk, southern Iceland: A multiproxy study of a dynamic and vulnerable landscape. The Holocene 21:979–995.

Wall, D. 2017. The commons in History. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA.

Wuerthner, G. og M. Matteson 2002. Welfare Ranching. The Subsidized Destruction of the American West. Foundation for Deep Ecology/Island Press, Sausalito, California, USA.

Wöll, C. 2008. Treeline of mountain birch (Betula pubescens Ehrh.) in Iceland and its relationship to temperature. Diploma thesis in Forest Botany, Technical University Dresden, Department of Forestry, Þýskaland.

Þorleifur Einarsson 1962. Vitnisburður frjógreiningar um gróður, veðurfar og landnám á Íslandi. Tímaritið Saga 162:441–469.

Þorleifur Einarsson 1994. Myndun og mótun lands. Jarðfræði. Mál og menning, Reykjavík.

Þóra Ellen Þórhallsdóttir 2015. Saga gróðurs og umhverfis á Brunasandi. Dynskógar, Héraðsrit Vestur-Skaftfellinga 2015. Bls. 1–70.

21 Rætur landhnignunar

Mynd 21.1. Þekking á mörgum sviðum er nauðsynleg til að ráða megi bót á rangri landnýtingu og slæmu ástandi vistkerfa.

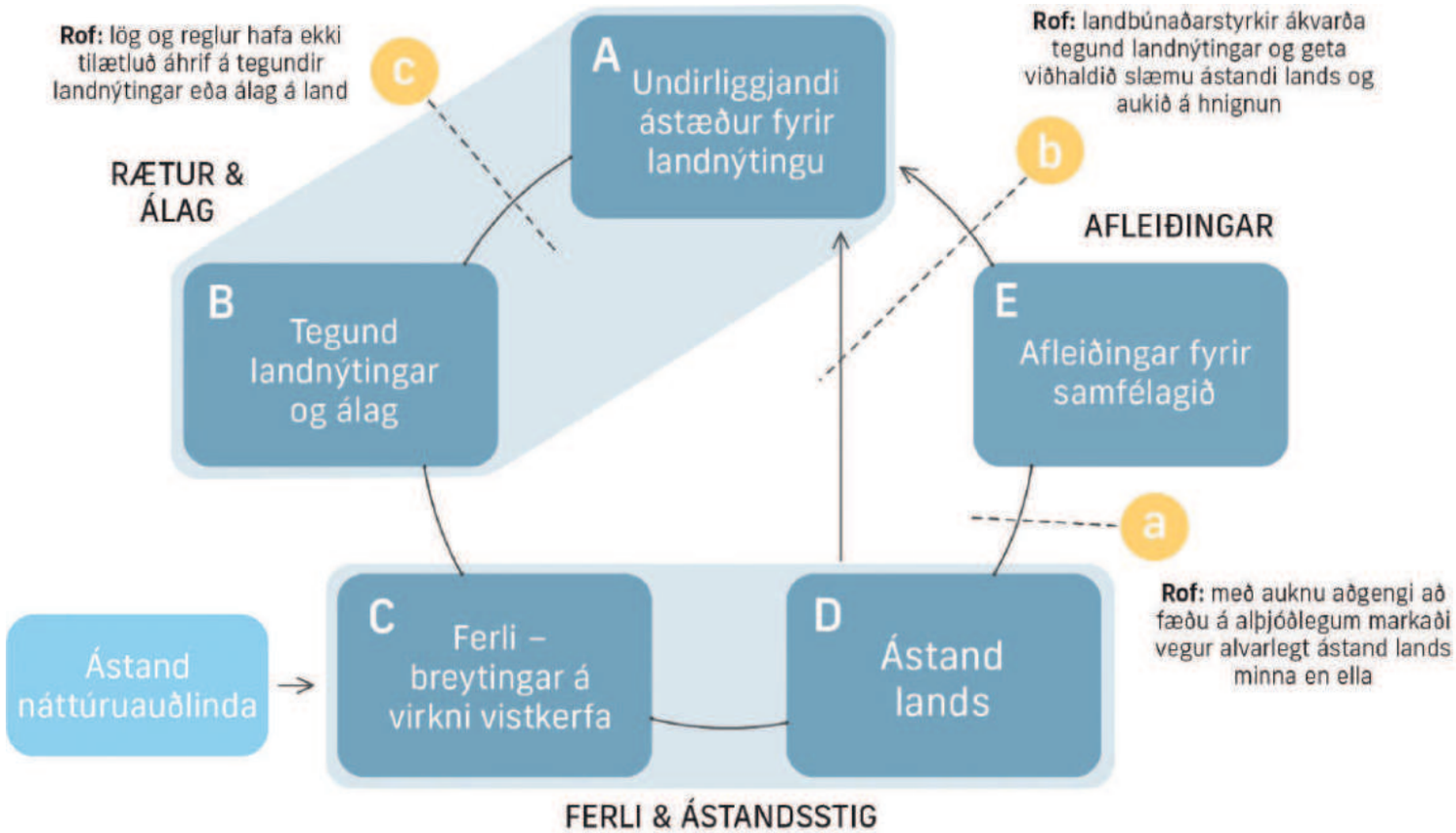
Slæmt ástand vistkerfa jarðar er alvarlegasti umhverfisvandinn sem mannkynið glímir við ásamt loftslagsbreytingum. Í þessu riti hefur verið leitast við að útskýra hugtakið „ástand lands“, hvernig unnt sé að ákvarða það m.a. út frá mælanlegum gildum fyrir mold og aðra þætti vistkerfisins, og einnig hafa ferli sem valda hnignuninni verið nefnd til sögunnar. Eða með öðrum orðum: að efla landlæsi. En málið er flóknara en það – það er einfaldlega ekki nóg að lesa landið sér til gagns. Það er einnig mikilvægt að skilja af hverju ekki gengur betur að eiga við alvarlega hnignun landkosta – en þær ástæður eru af ýmsum toga. Og sé verið að fjalla um mold og ástand lands í breiðu samhengi er rétt að tæpa á hverjar megi teljast „rætur“ landhnignunar alþjóðlega sem hérlendis.

Mikilvægt er að skilja á milli A) undirliggjandi ástæðna eða hvata sem knýja nýtingu (rætur landhnignunar), B) mismunandi landnýtingar sem knýr hnignunina og/eða viðheldur henni, C) mismunandi hnignunarferla, D) mismunandi ástands lands, þ.e. afleiðingar hnignunar, og E) áhrifa hnignunar á samfélög (mynd 21.2). Hér á undan var fjallað um ferlin (þáttur C). Sú landnýting (þáttur B) sem veldur raskinu getur t.d. verið akuryrkja, skógarhögg og skógareyðing, beit, framræsla votlendis, utanvegaakstur, ágangur ferðamanna, námarekstur, einræktun, t.d. í skógrækt (e. monoculture), fóðurframleiðsla, ofnotkun vatnsauðlinda, útþensla byggðra svæða o.s.frv. Það sem veldur mestu um ástand lands hérlendis er beitarnotkun, eins og síðar verður fjallað um, enda þótt fleiri tegundir landnýtingar af þeim sem hér voru taldar upp komi við sögu. En þessi kafli er tileinkaður undirliggjandi ástæðum landhnignunar – rótum landhnignunar (þáttur A).

Undirliggjandi ástæður landhnignunar eiga rætur í félagslegum, lagalegum, pólitískum og hagrænum þáttum. Þar má nefna venjur, brýna þörf fyrir fæðu í fátækari löndum, fólksfjölgun, framleiðslustyrki, búsetustyrki sem stuðla að rangri nýtingu, markaðslegar ástæður, gróðasjónarmið, menningargildi (sbr. göngur og réttir) o.m.fl. Sem dæmi um hagræna þætti má nefna þegar markaður opnast fyrir tiltekna vöru, t.d. nautakjöt, sem skilar miklum hagnaði á skömmum tíma, en sú landnýting sem fylgir von um skjótfenginn gróða getur valdið varanlegum skemmdum á vistkerfum á fáum árum. Þannig er talið að niðurgreiðslur á framleiðslu og annar ríkisstuðningur í landbúnaði, sem getur haft neikvæð áhrif á náttúruna, nemi um 100 milljörðum dollara á ári (IPBES 2019), og það á sannarlega við á Íslandi. Hagfræði og félagsvísindi eiga vaxandi hlutdeild í rannsóknum og þekkingu er lúta að hnignun og ástandi vistkerfa (Hruska o.fl. 2017; sjá einnig Þórunni Pétursdóttur 2020 og Þórunni Pétursdóttur o.fl. 2020).

21.1. Lagalegir þættir og stjórnsýsla

Lagalegir þættir fela iðulega í sér úreltan, ónógan eða sértækan lagaramma sem viðheldur skaðlegri landnýtingu og verndar hana. Lagagreinar sem lúta að vatnsréttindum valda t.d. oft tjóni þar sem vatn er af skornum skammti (Schuyt 2005). Hér á landi eru gömul lög um búfjárhald, afréttarmálefni og fjallskil notuð til að viðhalda lausagöngu búfjár á láglendi (Lilja Jónsdóttir 2020, Landvernd 2021) sem oft leiðir til beitar fjáreigenda á land annarra án þeirra leyfis. Landeigendur geta orðið fyrir tjóni og m.a.s. þurft að leggja í mikinn kostnað við að smala eigið land og afhenda eigendum búfjárins gripina, enda þótt þeir hafi aldrei gefið leyfi fyrir beitinni. Að öðrum kosti geta eigendur búfjárins smalað eigin búfé af landi



Mynd 21.2. Líkan sem sýnir tengsl ástands lands við aðra þætti (Isabel Barrio og ÓA 2022) þar sem rætur (**A**) og álag af völdum landnýtingar (**B**) leiða til breytinga á vistkerfum (**C**) og þar með tiltekins ástands (**D**). Í mörgum tilfellum ætti lélegt ástand að hafa afleiðingar fyrir samfélagið (**E**), en þessi vensl eru víða rofin (e. decoupling), m.a. vegna aðgengis að fæðu á alþjóðlegum markaði (**a**), vegna þess að landbúnaðarstyrkir tryggja áframhaldandi nýtingu án tillits til kröfu um hagkvæmni eða á landi í mjög slæmu ástandi (**b**) eða að lög og reglur ná ekki tilætluðum árangri (**c**), meðal annars vegna „samdaunasýki“ og „stofnanameðvirkni“.

annarra á kostnað landeigenda, sem voru þó fullkomlega mótfallnir þessari beit – sem verður að teljast afar sérstök réttarstaða þeirra sem verða fyrir ágangi búfjár. Sérkennilegur angi þessa máls er að beit á ábyrgð eins sauðfjáreiganda á aðra án leyfis er óheimil samkvæmt reglugerð um stuðningsgreiðslur við greinina (almannafé og samkvæmt lögum) og ætti að koma í veg fyrir a.m.k. hluta styrkveitinga til þeirra er beita á aðra án leyfis. Ekki er aðhafst í þeim málum þar sem slík brot koma upp enda þótt eftir því sé leitað (staðan í desember 2022). Auk þess hafa þessar lagagreinar og reglugerðir stuðlað að ósjálfbærri afréttanýtingu (ÓA 2019a,b).

Lagalegir þættir og stjórnsýsla geta valdið því að tengslin á milli ástands lands og samfélagslegra þátta (e. decoupling) rofna (mynd 21.2). Dæmi um það er þegar lélegt ástand landsins hefur ekki áhrif á ákvarðanatöku um landnýtingu heldur er hún keyrð óbreytt áfram – slæmt ástand lands hefur þá ekki afleiðingar fyrir samfélagið. Ástæður rofsins geta bæði falist í „samdaunasýki“ og „stofnanayfirtöku“, eins og rætt er um hér á eftir. Þá geta styrkjagreiðslur stutt við óbreytta landnýtingu enda þótt ástand landsins sé slæmt. Stuðningurinn getur líka rofið þau tengsl sem eru á milli ástands lands og samfélags þegar fjárveitingar draga úr þörfinni fyrir að halda vistkerfum í góðu ástandi. Þetta eru aðeins dæmi sem sýna að taka verður þessa þætti með í reikninginn við rannsóknir á ástæðum þess að landi er viðhaldið í slæmu ástandi. Ástæða er til að benda hér sérstaklega á rannsóknir og yfirlit Þórunnar Pétursdóttur (2020, o.fl. 2013, 2017, 2020) sem kannaði m.a. áhrif stjórnsýslu og stjórnunarhátta á sjálfbærni í landbúnaði og komst að

Gagnsæið ...

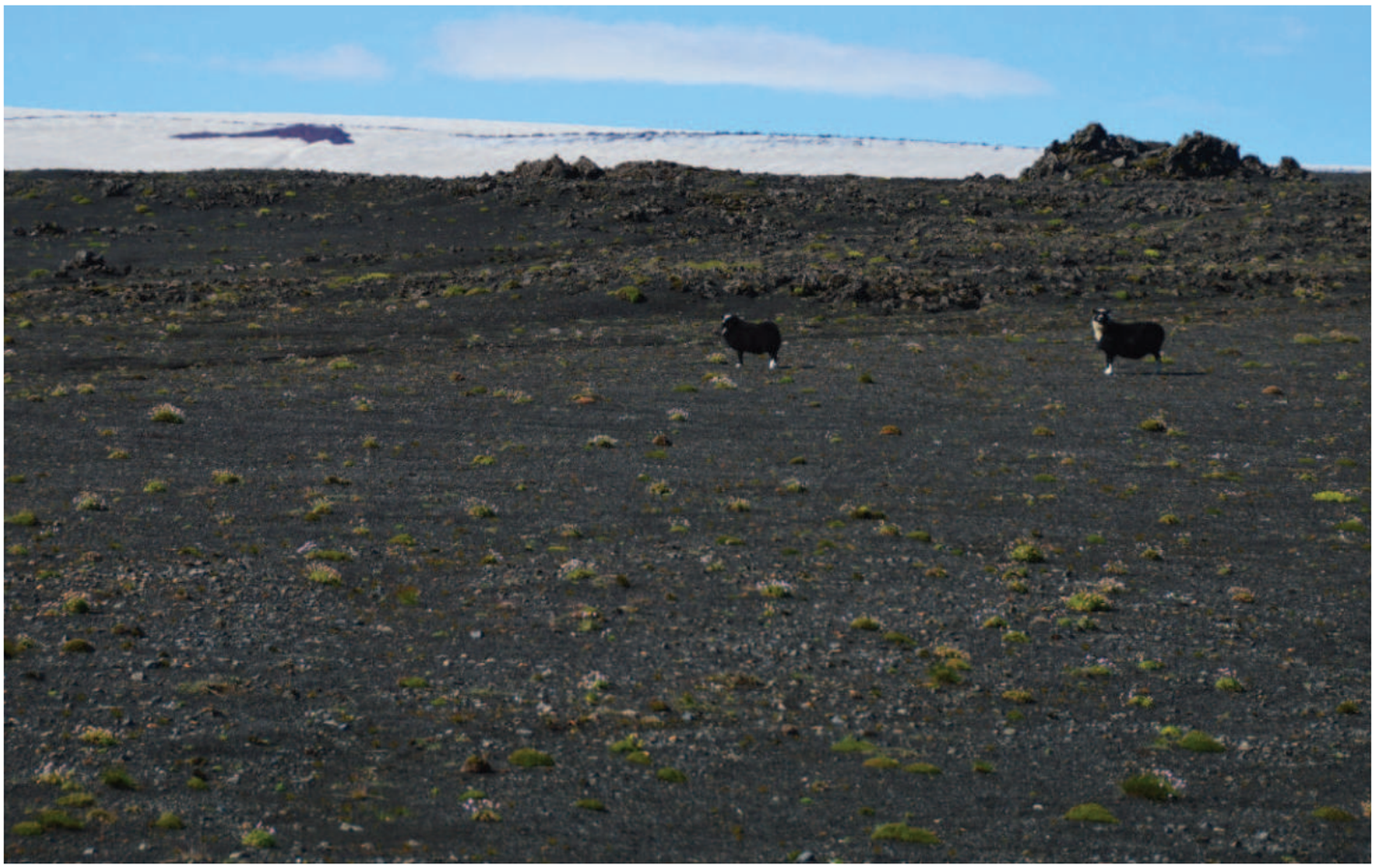
„Gagnsæi er eitt vanmetnasta stjórntæki samtímans. Það er einfaldara en lagabálkur, ódýrara en eftirlitsstofnun og áhrifamátturinn er studdur vísindalegum rökum“ (Sif Sigmarsdóttir, „Mín skoðun“, Fréttablaðið, maí 2020).

ýmsum alvarlegum vankönum á þessu sviði. Stjórnsýsla og sértækar aðgerðir stjórnvalda hafa stuðlað að stöðnun framleiðslukerfis er varðar náttúru og umhverfi samkvæmt rannsóknum Þórunnar (sjá einnig Jóhann Helga Stefánsson 2018, Landvernd 2021, Kolbein Arnarson 2021, ÓA 2016, 2019a,b, Isabel C. Barrio og ÓA 2022).

Færa má rök fyrir því að framkvæmd skipulagslaga á Íslandi sé föst í viðjum fortíðar þegar kemur að viðhorfum til lands í slæmu ástandi – sem iðulega er skilgreint sem „landbúnaðarland" við skipulagsgerð (sjá Salvör Jónsdóttir 2012, bls. 12 og 16). Það er að vísu afar misjafnt á milli sveitarfélaga, sums staðar er það t.d. skilgreint sem „annað land". Ákvarðanir um landnýtingu á „landbúnaðarlandi" og „öðru landi" eru oftast á höndum landbúnaðarnefnda sem eru einkum skipaðar aðilum sem hafa hagsmuni af óbreyttu fyrirkomulagi (dæmi um „stofnanayfirtöku", sjá síðar í kaflanum). Þetta er um margt úrelt stjórnsýsla – við umsýslu þessa lands sem hér um ræðir (land í slæmu ástandi) ætti það ekki að flokkast sem „landbúnaðarland" í skipulagi eða stjórnsýslu. Möguleikar til annarra nota geta verið mjög margvíslegir og því ætti breiður hópur hagaðila að koma að skipulagi á því landi sem hér um ræðir.

21.2. Hagrænir þættir og landbúnaðarstyrkir

Hnignun landkosta á Íslandi í sögulegu samhengi er iðulega tengd félagslegum og hagrænum þáttum, eins og Friðþór Sófus Sigurmundsson o.fl. (2014) sýndu fram á hvað varðar hrun vistkerfa í Þjórsárdal eftir siðaskipti. Hér er hvorki rúm né ástæða til að útskýra alla þessa þætti en mikilvægt er að þeir sem



Mynd 21.3. Ósjálfbær og skaðleg beit á þessu svæði nýtur veglegra styrkja frá almenningi. (Myndin er tekin árið 2020.)

fjalla um landhnignun gefi þeim gaum. Styrkir til framleiðenda í landbúnaði – landbúnaðarstyrkir – eru dæmi um slíka þætti. Landbúnaðarstyrkir eru meðal þess sem mótar landnýtingu á Íslandi með hvað afdrifaríkustum hætti, eins og víða er raunin annars staðar á hnettinum (Meyers og Kent 1998, van Beers og van den Bergh 2001, Schuyt 2005, Tanentzap o.fl. 2015). Samningur Sþ um líffræðilega fjölbreytni leggur nú mikla áherslu á að stöðva landbúnaðarstyrki sem hafa neikvæð áhrif á líffjölbreytileika en einnig endurheimt vistkerfa í hnignuðu ástandi (6., 18. o.fl. markmið sett á 15. aðildarþingi samningsins 2022).

21.2.1. Landbúnaðarstyrkir og aðgangur að upplýsingum

Stjarnfræðilega miklum fjármunum er varið til stuðnings við landbúnað víða um veröld og þessar greiðslur hafa afgerandi áhrif á landnýtingu og vistkerfi. Stuðningsgreiðslur eru taldar einn helsti undirliggjandi þáttur landhnignunar í heiminum. Á Íslandi eru einnig notuð hugtök á borð við „ beingreiðslur“ og „niðurgreiðslur“ um landbúnaðarstyrki (e. agricultural subsidies).

Stuðningsgreiðslur við landbúnað í heiminum nema 700–1 000 milljörðum dollara á ári en aðeins um 1% af því fé er talið tengjast umhverfismálum og náttúruvernd með einhverjum hætti (The Food and Land Use Coalition 2019). Aðeins hluti framleiðslunnar er styrktur – stuðningurinn er ekki miðaður við almannaheill og takmarkað fjármagn rennur til umhverfistengdra verkefna (Smith o.fl. 2017). Innan Evrópusambandsins námu styrkirnir um 60 milljörðum evra árið 2019 (EU data portal). Þar hefur verið lögð mikil áhersla á umhverfistengingu styrkja og að setja skilyrði um að nýting spilli ekki landkostum (e. cross-compliance), en deilt er um hversu vel hefur gengið að ná slíkum markmiðum.

Árangur landbúnaðarstyrkja við að tryggja fæðuöryggi og búsetu í dreifbýli er ákaflega misjafn á milli landa sem og tegundar styrkja. Landbúnaðarstyrkir hafa oft þau áhrif að festa ákveðnar framleiðslugreinar í sessi, sem getur komið í veg fyrir sveigjanleika, til dæmis gagnvart breyttu fæðuvali neytenda eða vegna umhverfiskostnaðar framleiðslunnar (t.d. sótspor; sjá ÓA og Jón Guðmundsson 2020).

Upplýsingar um landbúnaðarstyrki hafa á tíðum verið afar torsóttar. Víða hefur þeim verið haldið leyndum með skilvirkum hætti, sem hefur hamlað aðhaldi að framkvæmd búvörusamninga og könnun á áhrifum þeirra á vistkerfi og samfélag. Með alþjóðlegri þróun, sem miðar að setningu laga til að tryggja frjálst aðgengi að upplýsingum er varða almannahag og umhverfismál á undanförnum áratugum, hefur umfang og eðli landbúnaðarstyrkja komið æ betur í ljós. Útgáfufyrirtæki „The Washington Post“ (1996) og „The Guardian“ (2005) náðu að opna aðgengi að upplýsingum um landbúnaðarstyrki með lögsóknum í Bandaríkjunum og Bretlandi. Upplýsingar um landbúnaðarstyrki í Evrópusambandinu eru yfirleitt aðgengilegar almenningi því lögð er áhersla á að með góðu aðgengi sé hægt að veita aðhald og opna umræðu um hvernig þessum fjármunum verður best varið (farmsubsidy.org).

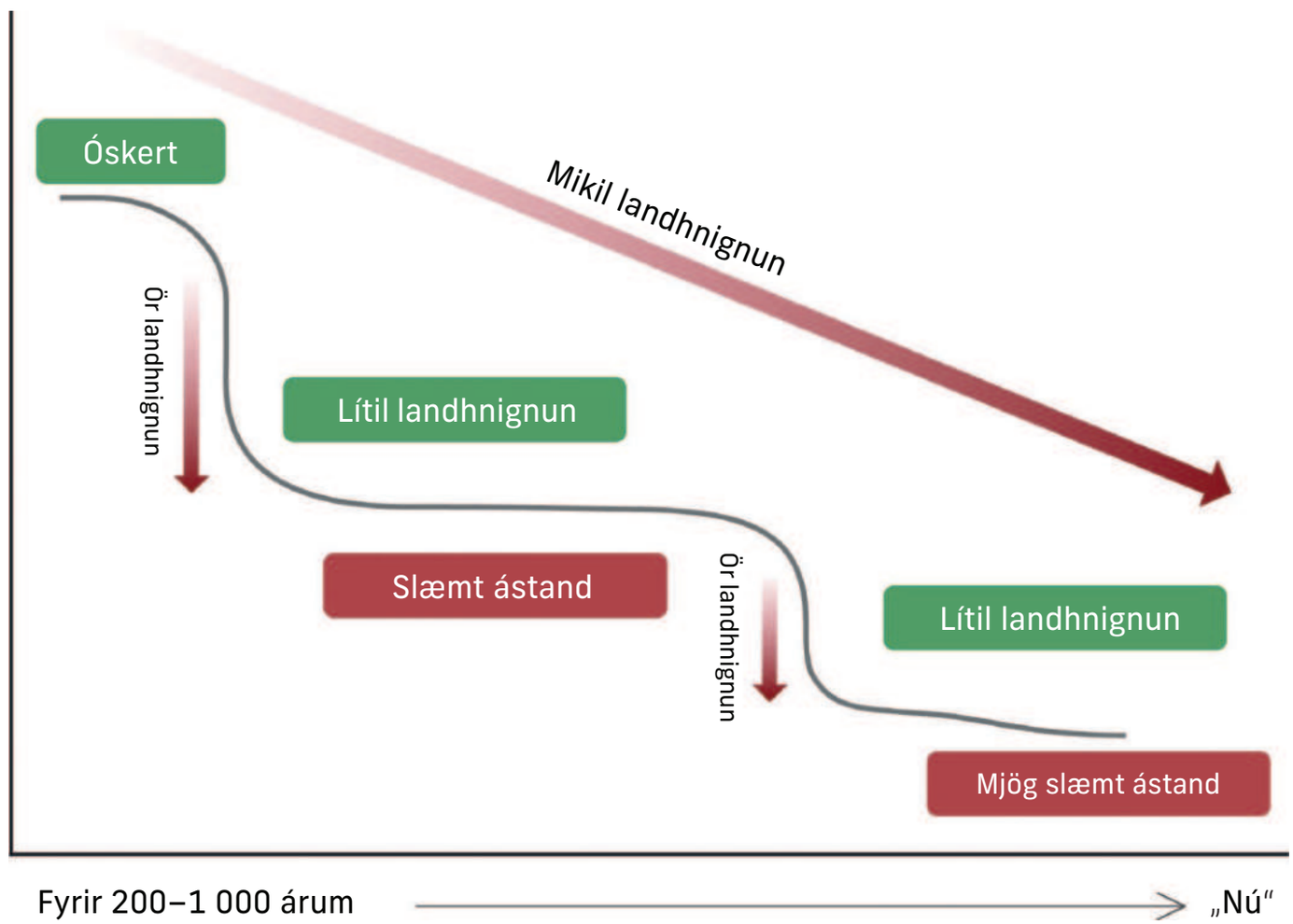
Hérlendis voru upplýsingar um landbúnaðarstyrki óaðgengilegar, svo vægt sé til orða tekið, og fengust ekki jafnvel þótt alþingismenn leituðu eftir slíkum upplýsingum með formlegum hætti. Að lokum unnust mál fyrir Úrskurðarnefnd um upplýsingamál árin 2018 og 2020 og í kjölfarið voru gögn um landbúnaðarstyrki gerð aðgengileg (ÓA 2020a,b), m.a. á „Mælaborði landbúnaðarins“ (vefsíða í Matvælaráðuneyti 2022), og upplýsingar um sauðfjárstyrki eru nú aðgengilegir á kortavefsjánni „map.is“ (2022).

Upplýsingar um landbúnaðarstyrki á heimsvísu draga fram dökka mynd af kerfunum. Í Bretlandi eru það að meginhluta auðugir landeigendur, þeirra á meðal drottningin og krónprinsinn, sem fá stóran hluta styrkjanna. Í Mexíkó kom í ljós að styrkirnir runnu í miklum mæli til velstæðra landeigenda, en einnig til starfsmanna stjórnvalda – en ekki til fátækra smábænda eins og ætlunin var (The Food and Land Use Coalition 2019). Fullvíst má telja að styrkirnir nýtist víða ekki sem skyldi (Smith o.fl. 2017). Að baki stendur oftast gríðarlega sterkur hagsmunahópur sem viðheldur úreltum kerfum, svo sem landeigendur í landbúnaðarnefndum þjóðþinga, t.d. í Bandaríkjunum. Bændur eru þá beggja megin borðsins, sem á sér skýra hliðstæðu í stjórnmálum á Íslandi.

21.3. Tíminn og ástandið

Þegar litið er til þess sem mótar ástand moldar og vistkerfa er, sem fyrr segir, mikilvægt að líta til samfélagsþátta – en einnig tímans. Ástandið breytist í tíma og því þarf að huga að því hvaða tímamælikvarði er notaður til að móta viðmiðunarástand landsins, þ.e. vistgetuna. Ástæða þess að fjallað er um þennan þátt nú er að hann tengist þeim atriðum sem rædd eru hér fyrir neðan: „samdaunasýki“ og meðvirkni.

Það er nauðsynlegt að horfa til langs tíma við mat á landi – ekki síst þegar kemur að eiginleikum moldar. Sums staðar liggja takmarkaðar upplýsingar fyrir um upprunalega gerð vistkerfa þar sem landið hefur verið nýtt um



Mynd 21.4. Hnignun lands í skrykkjum. Ef breytingar á ástandi lands eru bornar saman yfir stuttan tíma nær samanburðurinn yfirleitt aðeins til tímabils þar sem lítið er að gerast (engar breytingar, hægfara hnignun eða bati), sem gefur ranga mynd af ástandi landsins miðað við náttúrulegt ástand þess – vistgetu kerfisins (lengst til vinstri). Þegar ástand lands er metið út frá breytingum innan hvers þreps er um „óbreytt ástand“ eða „nýtingarmiðað viðhorf“. Mat innan neðri þrepa, án þess að líta til eðlilegs ástands eða vistgetu, er gott dæmi um „heilkenni breyttra grunnviðmiða“ eða „samdaunasýki“ (e. shifting baseline syndrome – sjá texta).

árþúsundir, t.d. í Evrópu, Asíu og Afríku. Annars staðar er fyrra ástand betur þekkt, ekki síst þar sem stutt er síðan landnýting var aukin til muna, t.d. í Bandaríkjunum, Eyjaálfu og einnig hér á Íslandi. Hnignun vistkerfa er yfirleitt skrykkjótt, eins og áður var rætt; miklar breytingar geta átt sér stað á skömmum tíma en þess á milli eru kerfin stöðug á hverju ástandsstigi og breytingar fremur litlar (mynd 21.4; sjá einnig umfjöllun um rask og þanþol í 19. kafla).

Við mat á landi er hætt við að of stuttur tími sé notaður til viðmiðunar – að ekki sé horft nógu langt aftur í tímann og þá aðeins horft til breytinga innan eins ástandsstigs. Það gerist t.d. iðulega þegar bornar eru saman misgamlar gervitunglamyndir, enda komu þær ekki til sögunnar fyrr en eftir 1980. Gervitunglamyndir geta aðeins gefið til kynna skammtímabreytingar, sérstaklega þar sem breytingar á vistkerfum eru örar (mynd 21.4). Þær veita takmarkaða sýn á þá þróun sem hefur orðið í tímans rás. Myndirnar gefa þó glögga mynd af gróðurhulu o.fl. þáttum sem hægt er að nota við mat á ástandi; skortur á gróðurhulu þar sem umhverfisaðstæður leyfa mikla framleiðni (t.d. loftslag og jarðvegur – þ.e. vistgeta) sýnir ótvírætt fram á slæmt ástand vistkerfa; hringrás orkunnar hefur verið rofin. Rannsóknir á jörðu niðri eru iðulega þessu marki brenndar – þær taka aðeins til breytinga innan eins ástandsstigs, eins og áður var nefnt.

Við framkvæmd vöktunarverkefna er mikilvægt að ástand lands sé metið í ljósi ástandsstigs og vistgetu. Verið getur að vöktunin eigi sér stað innan lægra ástandsstigs sem getur verið stöðugt sem slíkt. Niðurstaðan getur þá verið sú að núverandi landnýting hafi lítil áhrif á vistkerfið í núverandi ástandi en að horft sé framhjá slæmu ástandi þess (breytt grunnviðmið).

21.4. „Samdaunasýki“ – „heilkenni breyttra grunnviðmiða“

21.4.1. Hvað er „samdaunasýki“?

Að horfa aðeins til viðmiða innan hvers ástandsstigs er birtingarmynd þess sem nefnt hefur verið „shifting baseline syndrome“ á ensku eða „shifting baselines“ („heilkenni breyttra grunnviðmiða“, „breytt grunnviðmið“). Fyrirbærið gæti einfaldlega kallast „samdaunasýki“, þar sem breyttu ástandi – jafnvel slæmu – er tekið sem sjálfsögðum hlut og það haft til viðmiðunar (sjá t.d. Pauly 1995, Papworth o.fl. 2009, Holl 2018). Heilkennið lýsir sér þannig að hver kynslóð tekur sífellt verra ástandi sem eðlilegu í stað þess að gera sér grein fyrir þeim breytingum sem umsvif mannsins hafa orsakað (t.d. Holl 2018).

Heilkennið var fyrst notað í vísindagreinum um afneitun á hnignandi stöðu fiskistofna, þar sem könnun vísindamanna á rýrnun fiskistofna tók aðeins til starfstíma rannsakendanna en miðaði ekki við vistgetuna og ástandið áður en nýting hófst að marki (Pauly 1995). Auðvelt er að greina ummerki þessa heilkennis víða við nýtingu náttúruauðlinda, tilvist þess hefur verið augljós lengi, m.a. fagfólki á sviði moldarfræða og vistfræði hérlendis. Það raungerist í því hvernig mörgum yfirsést bágt ástand vistkerfa hérlendis og tekur því sem sjálfsögðum hlut. Heilkennið birtist glögglega í setningu beitarviðmiða og framkvæmd gæðastýringar í sauðfjárrækt (sjá ÓA 2019a) sem fellur að neðri stigum þróunar viðmiða í beitarvísindum, sem sýnd voru á mynd 19.9, og nýtingarmiðuðu sjónarhorni.

Mynd 21.5 a og b. Slæmt ástand og virk eyðing vistkerfa, m.a. birkiskóga, vegna beitar á náttúruverndarsvæði. Umsjónaraðilar svæðisins sáu þó ekkert athugavert við ástand vistkerfa og á upplýsingaskilti er það útlistað nánar (sjá tilvitnun í texta). Gott dæmi um áhrif „heilkennis breyttra grunnviðmiða“ þar sem ástandi sem þessu er tekið sem sjálfsögðum hlut.

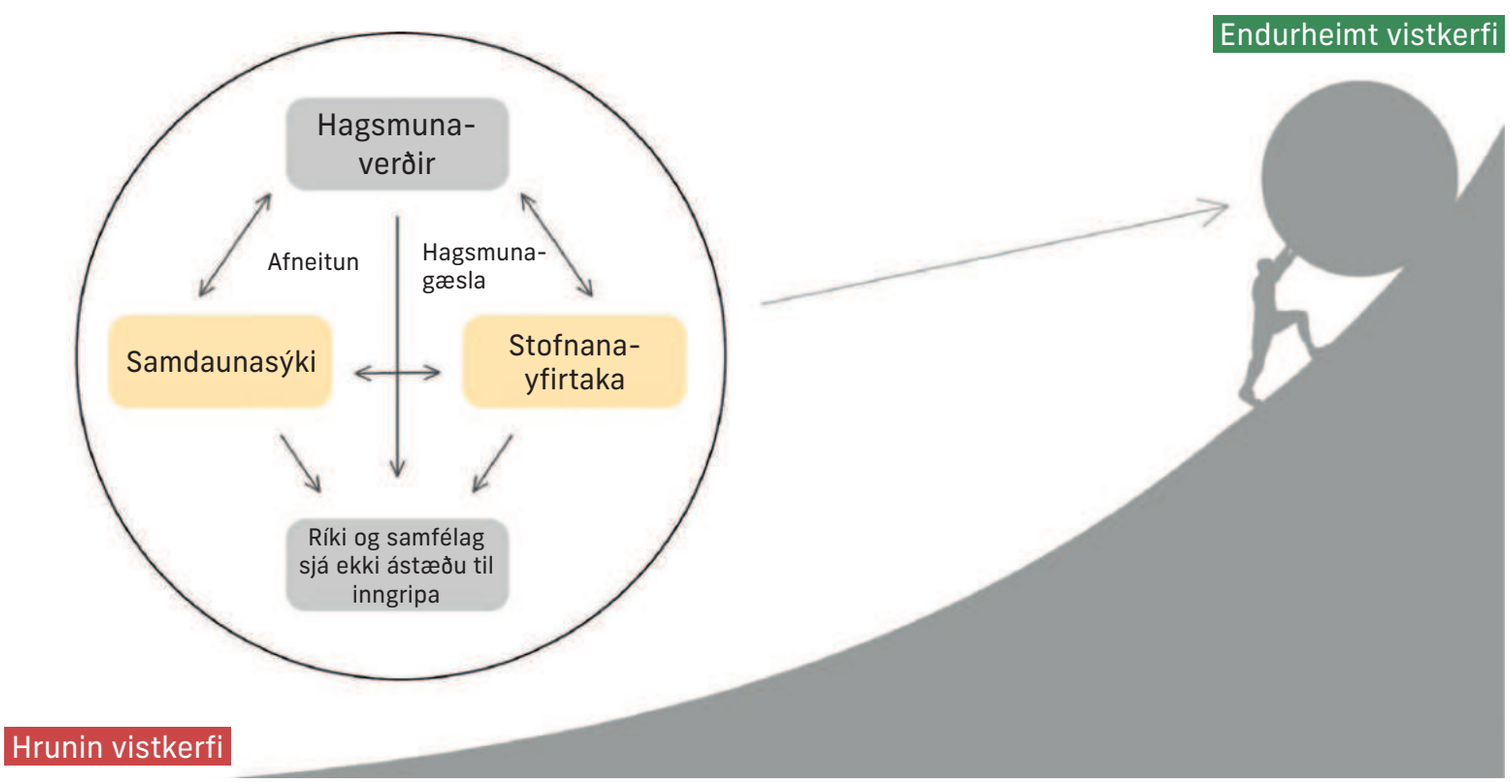
21.4.2. Heilkenni breyttra grunnviðmiða (samdaunasýki) og íslensk vistkerfi – dæmi

Eins og áður segir felur heilkenni breyttra grunnviðmiða það í sér að taka slæmu ástandi sem sjálfsögðu af því að ekki er horft nógu langt aftur í tímann til að sækja viðmið um eðlilegt ástand. Ennfremur það að veigalitlar breytingar innan hvers ástandsstigs verða að aðalatriði í umræðu um ástand lands án skilnings á fyrri ástandsstigum eða eðlilegu ástandi landsins. Það birtist m.a. í því að þeir sem taka ákvarðanir um landnýtingu skortir vistfræðilega þekkingu til að gera sér grein fyrir raunverulegu ástandi landsins – hnignuðu ástandi er tekið sem gefnum hlut.

Heilkenni breyttra grunnviðmiða er því miður ráðandi í sýn margra landnotenda og jafnvel fagstofnana á ástand lands. Gott dæmi um það er upplýsingaskilti á vegum fagstofnana á náttúruverndarsvæði (sett upp 2006) þar sem mikil eyðing vistkerfa hefur átt sér stað og slæmu ástandi er viðhaldið með sauðfjárbeit (mynd 21.5). Hér eru vistkerfin hrunin; það vantar gróður til að safna orku í kerfið, næringarástand í moldinni er orðið slæmt og vatnsheldni kerfisins á köflum afar takmörkuð. Rof er mjög virkt á svæðinu auk þess sem þarna á sér stað skógareyðing þar sem mikilvægt er að halda í kjarrlendi á afar viðkvæmu svæði. Á skiltinu standa m.a. eftirfarandi glefsur um landnýtingu:

> **„Án sauðkindarinnar hefði Ísland verið óbyggilegt** ... Hefðbundnar nytjar svo sem sauðfjárbeit er ekki í andstöðu við friðlýsingu svæðisins
> ... sauðfjárbeit og sauðkindin er órjúfanlegur hluti af menningu svæðisins
> ... Núverandi beit á svæðinu er hófleg og gengur ekki of nærri gróðrinum.“

Með textanum á upplýsingaskiltinu opinberast „heilkenni breyttra grunnviðmiða“ með afar skýrum hætti.



Mynd 21.6. Segja má að „samdaunasýki“ og „stofnanayfirtaka“ myndi æði þungt bjarg sem þrýstir niður tilraunum til að færa landnýtingu til skynsamlegra horfs eða í átt til endurheimtar vistkerfa. Landbúnaðarstyrkir eru einnig hluti af þessum þunga – hagsmunaðilar eru yfirleitt ekki ginkeyptir fyrir breytingum á þeim – jafnvel þótt þörfin sé skýr með tilliti til markaða og ástands lands.

Ástand lands og miðlun þekkingar

„Þátttökuaðferðum“ (e. participatory approaches, facilitation), þar sem unnið er með landnotendum á vettvangi, er ætlað að tryggja að ákvarðanir eða leiðbeining um landnýtingu séu teknar í samvinnu við þá er nýta landið. Slíkar aðferðir eru oftast mun heppilegri en tilskipanir ofan frá, t.d. frá stjórnvöldum (e. top-down approaches). Mikilvægt er að þó að slíkar aðferðir byggist á traustum vísindalegum grunni, bestu þekkingu sem fyrir hendi er á hverjum tíma. Vísindamenn eru oft gagnrýndir fyrir að koma ekki þekkingu til þeirra sem á þurfa að halda, að þeir séu fastir í „fílabeinsturni vísindanna“. Það má vissulega taka undir þá gagnrýni og einnig að vísindin glími ekki nægjanlega mikið við vandamál samtímans, vanda á borð við landhnignun. Í raun er þörf á hvoru tveggja, góðu fagfólki á vettvangi landnýtingar og góðu vísindafólki sem þróar áfram þekkinguna – annars er hætt við stöðnun sem gjarnan ýtir undir ranga landnýtingu – stöðnun sem jafnvel er talin heppileg af valdhöfum hvers tíma. En vísindafólk er ekki endilega allt farsælt í samstarfi við landnotendur á vettvangi, jafnvel stundum afleitt – mennirnir eru misjafnir.

Ástand vistkerfa og landnýting eru mikilvæg viðfangsefni vísinda og þeirri þekkingu þarf sannarlega að koma á framfæri til þeirra sem nýta landið. Starf á vettvangi með landnotendum og þeim sem móta landnýtingarstefnu er lykilatriði og það er afar brýnt að þeir sem axla þá ábyrgð hafi haldgóða þekkingu á vistkerfum og landnýtingu jafnt sem skilning á samfélagslegum þáttum sem móta nýtinguna. Það er ekki alltaf raunin. Oft skortir verulega á að samstarf við landnotendur byggist á bestu fáanlegu þekkingu – hún getur jafnvel einkennst af afneitun á þekkingu og vísindum – sem leiðir iðulega til þess að landverndarstarf festist í viðjum „samdaunasýki“ („heilkennis breyttra grunnviðmiða“).

Sömuleiðis getur fagfólk á vettvangi með mikla samskiptahæfileika valdið umtalsverðu tjóni ef það hefur ekki grundvallarskilning á náttúruauðlindum, vistkerfum og eðli landhnignunar, jafnvel viðhaldið rangri landnýtingu og áframhaldandi bágri stöðu. Hér geta einmitt farið saman birtingarmyndir „samdaunasýki“ og „stofnanayfirtöku“ (mynd 21.5). Stundum endurspeglar lagaramminn ennfremur úrelta þekkingu á náttúru og nýtingu hennar. Þegar faglega þekkingu skortir á vettvangi hjá fagstofnunum og í regluverki má segja að bæði menntakerfið og þær einingar sem manna stöður fagfólks á vettvangi og í stjórnsýslu, t.d. ríkisstofnanir, hafi ekki staðið sig nægjanlega vel í að lesa í og fullnægja þörfum samfélagsins fyrir þekkingu á þessum sviðum.

Þekking á ástandi lands leiðir fljótt í ljós að gengið hefur verið mjög nærri gróðrinum, virkt rof er á svæðinu sem og skógareyðing. Skiltið fer því beinlínis með rangt mál í upplýsingagjöf opinberra aðila til almennings. Rót vandans liggur vitaskuld í „samdaunasýki“ – þeirri sömu og býr að baki mistaka við framkvæmd gæðastýringar í sauðfjárrækt, en einnig í „stofnanayfirtöku“ (rædd hér á eftir).

Afstaða fagaðila til ástands lands er því miður iðulega afar nýtingarmiðuð – en ekki verndarmiðuð, hvað þá að vistheimt sé höfð að leiðarljósi. Ekki er tekið tillit til vistgetu og eðlilegs ástands vistkerfa. Augljóslega er mikið verk fyrir höndum við að auka skilning fagstofnana, landnotenda og almennings á ástandi landsins og því vistkerfishruni sem hér hefur orðið. Til þess þarf að efla menntun á þessu sviði í landinu.

21.5. „Stofnanayfirtaka“ og meðvirkni

„Stofnanayfirtaka“ (e. agency capture) er hugtak sem hefur fengið aukið vægi í tengslum við nýtingu náttúruauðlinda að undanförnu – því ljóst er að vandamál er tengjast jarðvegsvernd og nýtingu vistkerfa eiga oft rætur að rekja til stjórnsýslunnar og aðila sem eiga að tryggja sjálfbæra nýtingu náttúruauðlinda.

Stofananayfirtaka getur átt sér stað með því að aðilar með bein tengsl við nýtingaraðila sem vilja ekki breytingar eru ráðnir til stofnana – þeim jafnvel komið fyrir af ásettu ráði – eða þegar eftirlitsstofnanir reyna allt til að forðast árekstra við hagsmunaaðila. Það er þá stundum gert undir merkjum „samráðs“ við takmarkaðan hóp hagsmunaaðila án þess að hafa almannahag að leiðarljósi og oft undir merkjum „samdaunasýki“ – vandinn er þá í raun ekki viðurkenndur. Yfirtaka er líklegust þar sem náin tengsl eru á milli stjórnsýsluaðila, kosinna fulltrúa og hagaðila og/eða þar sem almannahagsmunir eru ekki skýrir og almenningur hefur fá tækifæri til að taka þátt í stefnumótun (Singleton 2000). Þetta er vitaskuld mjög algengt vandamál sem er vel þekkt í tengslum við orkuiðnað og landbúnað.

Myndin hér að framan (mynd 21.6) á rætur að rekja til grísku goðsagnarinnar um Sýsifos, sem var hugmyndaríkur snillingur sem fór fram úr sér í samskiptum sínum við guðina og þá einkum Seif. Honum var hegnt fyrir misgjörðir sínar og skikkaður til að ýta þungum steini upp brekku. En þegar Sýsifos nálgaðist takmarkið ör-magnaðist hann og steinninn rúllaði niður aftur, og þá þurfti að hefja verkið að nýju. Þetta minni hefur verið notað í vistfræði og vistheimtarfræðum og á einkar vel við um það þegar reynt er að koma vistkerfum upp yfir ákveðinn þröskuld en rangar aðferðir, misheppnuð markmiðssetning eða röng nýting koma í veg fyrir ætlaðan árangur og kerfið rúllar aftur niður á „byrjunarreit“. Hér er minnið hins vegar tengt því hvernig samdaunasýki, stofnanayfirtaka og fleiri þættir koma í veg fyrir að árangur náist jafnvel þótt fagleg þekking og skilningur séu til staðar – þegar sífellt aukin þekking á slæmu ástandi lands hverfur inn í frumskóg flókins lagaumhverfis, hagsmunagæslu og afneitun á vanda.

Segja má að samspil samdaunasýki og stofnanayfirtöku sé nokkuð áberandi í samhengi við landnýtingu og náttúruvernd á Íslandi, sbr. mynd 21.6. Þegar kemur að nýtingu útjarðar hefur samráð við hagaðila einskorðast við lítinn hluta þeirra – þá sem eiga sauðfé. Það er t.d. afar áberandi í tengslum við nýtingu á landi í eigu þjóðarinnar – þjóðlendum. Oft er sú nýting sem hlýst af svo takmörkuðu samráði í andstöðu við skoðanir þorra annarra íbúa í dreifbýli eða þjóðarinnar í heild – fagstofnanir eru þá ekki að gæta að almannaheill, heldur hagsmunum tiltölulega fárra hagsmunavarða.

21.6. Rangsnúnir landbúnaðarstyrkir skaða vistkerfi

21.6.1. Á röngunni

Fjárhagslegir eða stjórnsýslulegir hvatar sem hafa alvarlegar afleiðingar fyrir efnahag samfélaga eða umhverfi hafa verið nefndir „rangsnúnir hvatar“ (e. perverse incentives[2]), t.d. rangsnúnir efnahagshvatar, rangsnúnir lagalegir hvatar eða reglugerðarákvæði sem og rangsnúnir landbúnaðarstyrkir (sjá Meyers og Kent 1998, van Beers og van den Bergh 2001, Schuyt 2005). Gríðarlegar styrkjagreiðslur til nýtingar á óendurnýjanlegum orkugjöfum á

Stofnanayfirtaka

„Stofnun hefur verið „tekin yfir“ þegar annaðhvort stofnunin í heild eða hluti hennar samsamar sig við hagsmuni hagaðila sem stofnunin á að hafa eftirlit með, þannig að stofnunin hefur ekki lengur áhuga á að verja almannahagsmuni eða sjálfstæði stofnunarinnar“ (skilgreining Söru Singleton, 2000).[1]

1. „An agency is “captured” when either an entire agency or a subset of agents identifies its interests as so tightly bound up with the interests of those they are charged with regulating that they no longer have the inclination to defend the broader public’s interests or their own agency’s independence.”

2. Gætu einnig verið nefndir „öfugsnúnir“ hvatar, en hugtakið „rangsnúnir“ varð fyrir valinu – „rangt“ og „ranglátur“ er nær ensku merkingunni en hugtakið „öfugt“.

borð við kol og olíu í Bandaríkjunum og Evrópu eru dæmi um rangsnúna efnahagshvata vegna neikvæðra áhrifa á land og loftslag, styrkjagreiðslur sem hafa tafið þróun á vistvænni aðferðum við orkuframleiðslu.

Landbúnaðarstyrkir eru iðulega drifkraftur landnýtingar sem veldur skaða á vistkerfum eða landhnignun, eða viðheldur slæmu ástandi lands (IPBES 2019 – skýrsla vísindaráðs Samnings Sameinuðu þjóðanna um líffjölbreytileika, sjá einnig Meyers og Kent 1998, van Beers og van den Bergh 2001). Þannig komst Meyers (2007) að þeirri niðurstöðu að aflétting á rangsnúnum landbúnaðarstyrkjum væri áhrifaríkasta aðgerðin til að bæta umhverfið í veröldinni. Talið er að styrkir upp á u.þ.b. 100 milljarða dollara á ári (2015) hafi neikvæð umhverfisáhrif innan OECD-landa en mun minni hluti styrkja hafi jákvæð umhverfisáhrif (IPBES 2019, The Food and Land Use Coalition 2019).

Landbúnaðarstyrkir hafa margháttuð áhrif á íslenskt umhverfi – hugsanlega er þessi þáttur sá afdrifaríkasti fyrir vistkerfi landsins nú um stundir. Upplýsingar um landbúnaðarstyrki á Íslandi, sem voru gerðar opinberar árið 2020, leiddu í ljós að hér sem annars staðar hefur margt farið úrskeiðis við framkvæmdina. Þannig fengu hundruð tómstundabænda og aðila utan lögbýla styrki til að framleiða dilkakjöt (gögn frá 2016), stundum til heimabrúks og oft í hróplegri andstöðu við nauðsynlegar breytingar á landnýtingu í grennd við þéttbýli, eða þar sem ástand lands er slæmt. Þá hafa vaxið upp gríðarlega stór bú sem hljóta háa styrki (allt að 20 milljónir króna á ári í heildargreiðslur á sauðfjárbú, verðlag 2020), sem er bæði andstætt byggðasjónarmiði styrkjanna (fá stór bú) og umhverfissjónarmiðum. Það getur leitt til ofbeitar að safna miklum fjárfjölda á eitt bú, sem hefur raunar gerst án tillits til þess hvaða svæði eru heppileg til framleiðslunnar, enda fylgja litlar kvaðir upplýsingagjöf styrkþega um hvort nægt beitiland sé til staðar og eftirfylgni er lítil.

Aðgerðir til að tengja styrkina við ástand landsins (e. cross compliance) hafa misheppnast hérlendis hingað til (ritað árið 2022) – rangsnúnir hvatar í sauðfjárframleiðslu viðhalda ósjálfbærri landnýtingu víða um land (ÓA 2019a, Kolbeinn Arnarson 2021). Flókið lagaumhverfi er varðar lausagöngu búfjár eykur enn á vandann (ÓA 2016, Lilja Jónsdóttir 2020, Landvernd 2021). Landbúnaðarstyrkir voru einnig drifkraftur framræslu votlendis á seinni hluta síðustu aldar sem leiddi til þess að stór hluti votlenda landsins hefur verið ræstur fram með afar neikvæðum áhrifum á vistkerfi, samfara stórfelldri losun á gróðurhúsalofttegundum. En ekki má gleyma því að framræslan gjörbreytti aðstæðum til fóðurframleiðslu í landbúnaði sem þarf að vega upp á móti neikvæðum umhverfisáhrifum.

Rétt er að horfa til þess að nú, árið 2022, er styrkjum beint til framleiðslu á fremur fábreyttu úrvali fæðu – framleiðslu sem oft losar mjög mikið af gróðurhúsalofttegundum (ÓA og Jón Guðmundsson 2020). Styrkirnir skekkja samkeppnisaðstöðu við aðrar greinar. Hægt væri að beina stuðningi þjóðarinnar til aðgerða og framleiðsluhátta sem hafa minni neikvæð áhrif á umhverfið, til aðgerða sem stuðla að kolefnisbindingu og endurheimt vistkerfa. Mikilvægt er að almenningur, stjórnvöld og löggjafinn átti sig á neikvæðum áhrifum landbúnaðarstyrkja á bæði land og loftslag.

Þá er rétt að ítreka að landeigendur um land allt búa við algjörlega úrelta löggjöf er varðar lausagöngu búfjár og afréttamálefni, sem sannarlega má nefna rangsnúin lagaleg skilyrði sem ganga gegn hagsmunum náttúruverndar

Mynd 21.7. Beit á auðn innan svæðis sem talið er friðað samkvæmt fyrirliggjandi landbótaáætlun í tengslum við landnýtingarþátt gæðastýringar í sauðfjárrækt. Lítil eftirfylgni er með því hvort landbótaáætlanirnar standist, t.d. er varðar svæði sem gefið er upp að séu friðuð fyrir beit – eða hvað varðar beit landnotenda á land annarra án þeirra leyfis.

og almennings (sjá Lilju Jónsdóttur 2020, Landvernd 2021).

21.6.2. Ástand landsins og landnýtingarþáttur gæðastýringar í sauðfjárrækt

Bágur skilningur þeirra er bera ábyrgð á landnýtingu á ástandi íslenskra vistkerfa hefur víðtækar afleiðingar. Þar kemur m.a. við sögu framkvæmd landnýtingarþáttar gæðastýringar í sauðfjárrækt – sem vottar hvort beit sauðfjár standist viðmið um góð landgæði.

Við mat á landi í tengslum við landnýtingarþátt gæðastýringar í sauðfjárframleiðslu var m.a. horft til gróðurþekju og útbreiðslu rofs, sem eru vitskuld sjálfsagðir þættir við mat á ástandi lands. Því miður standast þau viðmið um helstu þætti sem og þau sjálfbærniviðmið sem voru sett í gæðastýringarkerfi sauðfjárræktarinnar ekki skoðun – kerfið virkar ekki eins og rökstutt var ítarlega af ÓA (2019a).

Samkvæmt kerfinu má allt að þriðjungur lands vera í óásættanlegu ástandi (rof og ástand gróðurs) auk þess sem lítill gaumur er gefinn að ástandi lands sem telst gróið en er í mjög hnignuðu ástandi – þ.e. gróið land á lægri ástandsstigum. Sérkennilegt er að stór landsvæði, t.d. heilu afréttirnir, þurfa síðan ekki að standast þessi settu léttvægu viðmið, hvorki í nútíð eða fjarlægri framtíð (sjá ÓA 2019a). Því er einsýnt að kerfið hefur brugðist í því að vernda land sem er óhæft til beitar – að gera skýran greinarmun á landi í góðu ástandi og því sem telst ekki gott beitiland. Allt land – öll nýting – fær vottun.

Við mótun laga og reglugerða er mikilvægt að virkja varúðarregluna – að náttúran njóti vafans – en sú regla er lögfest með skýrum hætti í náttúruverndarlögum. Því ber að setja ströng viðmið fyrir nýtingu landsins. Varúðarreglunni er iðulega snúið á haus af þeim sem hafa hag af óbreyttu kerfi, eins og algengt er við nýtingu á náttúruauðlindum almennt – ákveðinn vilji er til að nýta áfram illa farið land til beitar (sbr. A á mynd 21.2 í upphafi kaflans). Þá er illa farið land talið hæft til beitar svo lengi sem því fari ekki meira aftur en orðið er eða fari jafnvel eitthvað fram. Hér er því miður yfirleitt litið til mjög skamms tímamælikvarða til viðmiðunar, sem flokkast undir dæmigert heilkenni breyttra grunnviðmiða eða „samdaunasýki".

Hvorki þanþol né náttúrulegar sveiflur eru teknar með í reikninginn – hvað þá slæmt ástand miðað við vistgetu. Beit getur vissulega verið eðlilegur hluti nýtingar vistkerfa í góðu ástandi og er það víða á Íslandi. En það er ekki réttlætanlegt að tilgreina jákvæð áhrif beitar á lítinn hluta vistkerfa á stóru beitarsvæði í mjög misjöfnu ástandi til að réttlæta, hvað þá styrkja með almannafé, beit á landsvæði sem einkennist af hrundum vistkerfum (mynd 21.7). Þessar staðreyndir kalla á þörf fyrir að upplýsa almenning um umhverfisáhrif þeirrar framleiðslu sem styrkt er með fé úr sjóðum almennings.

21.7. Lokaorð

Mikið vantar upp á skilning á slæmri stöðu vistkerfa hérlendis og hér er velt upp undirliggjandi ástæðum, ferlum og afleiðingum landnýtingar sem orsaka núverandi ástand. „Heilkenni breyttra grunnviða" (e. shifting baseline syndrome; einnig nefnt „samdaunasýki") er alvarlegt vandamál meðal almennings, stjórnsýslu og fagstofnana – slæmu ástandi landsins er tekið sem eðlilegri og ásættanlegri stöðu.

Einnig má færa rök fyrir því að hér gæti „stofnanayfirtöku" (e. agency capture) sem eykur á meðvirkni í stjórnsýslu landsins – sem veldur því að skort hefur á festu í viðbrögðum við sannarlega slæmu ástandi íslenskra vistkerfa. Framkvæmd laga og viðmið í opinberum reglugerðum bera þess glöggt merki. Staðan minnir á afneitun samfélaga á mögulegum loftslagsbreytingum á síðustu öld. Þröng skilgreining á hagaðilum er varðar nýtingu og verndun útjarðar, m.a. þjóðlendna í eigu þjóðarinnar, er mjög takmarkandi fyrir eðlilega sýn á ástand landsins og nýtingu þess. Viðhorf og framkvæmd í stjórnsýslu verða því ákaflega nýtingarmiðuð og úrelt. Það er afar brýnt að skoða nánar hverjir teljist hagaðilar þegar kemur að ástandi og nýtingu útjarðar.

Meðal undirliggjandi ástæðna fyrir nýtingu hnignaðra og hruninna vistkerfa í nútíð má telja rangsnúna hvata (e. perverse incentives) á borð við landbúnaðarstyrki sem taka ekki mið af ástandi lands – sem er alþjóðlegt vandamál. Mikilvægt er að endurskoða landbúnaðarstyrki með aukinni áherslu á umhverfisáhrif og endurheimt vistkerfa, þar sem mun þrengri skorður verði settar fyrir beitarnýtingu á hnignuðum og hrundum vistkerfum. Mikilvægt er að upplýsa almenning um umhverfisáhrif þeirrar framleiðslu sem styrkt er eða jafnvel kostuð af sjóðum almennings. Opna þarf fyrir aðra möguleika til fæðuframleiðslu og styrkingu byggða sem tæki mið af breyttum neysluvenjum samfélagsins og því að lágmarka umhverfisáhrif landbúnaðar.

Heimildir

Friðþór Sófus Sigurmundsson, Guðrún Gísladóttir og Hreinn Óskarsson 2014. Decline of birch woodland cover in Þjórsárdalur Iceland from 1587–1938. Human Ecology 42:577–590.

Holl, K.D. 2018. Primer of Ecological Restoration. Island Press, London, UK.

Hruska, T., L. Huntsinger, M. Brunson, W. Li, N. Marshall, J.L. Oviedo og H. Whitcomb 2017. Rangelands as social-ecological systems. Í: D.D. Briske (ritstj.), Rangeland Systems. Processes, Management and Challenges. Springer Open, Cham, Sviss. Bls. 263–302.

Hudak, M. 2007. Western turf wars. The politics of public lands ranching. Biome books, Binghamton, New York, USA.

IPBES 2019. Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. S. Díaz, J. Settele, E.S. Brondízio, H.T. Ngo, M. Guèze, J. Agard, A. Arneth, P. Balvanera, K.A. Brauman og 20 fleiri (ritstj.), Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, IPBES secretariat, Bonn, Þýskaland.

Isabel C. Barrio og Ólafur Arnalds 2022. Agricultural land degradation and ecosystem collapse in Iceland. Í: P. Pereira, I. Bogunovic, M. Munoz Rojas and W. Zhao (ritstj.), Global Agricultural Land Degradation, Volume I, The Handbook of Environmental Chemistry Series. Springer, Berlin, Heidelberg. doi.org/10.1007/698_2022_920

Jóhann Helgi Stefánsson 2018. Of sheep and men. Analysis of the agri-environmental cross-compliance policies of the Icelandic sheep grazing regime. MA-ritgerð, Félagsvísindasvið, Háskóli Íslands, Reykjavík.

Kolbeinn Arnarson 2021. Er vottun beitar ferð til fjár?: Landnýtingarþáttur gæðastýringar í sauðfjárrækt í Ljósi útfærslukenninga. BSc.-ritgerð, stjórnmálafræði, Háskóli Íslands.

Landvernd 2021. Vörsluskylda búfjár. Landvernd, Reykjavík.

Lilja Jónsdóttir 2020. Beitarréttur. Lögfestar takmarkanir í þágu náttúruverndar. ML-ritgerð, Háskólinn í Reykjavík.

Meyers, N. 2007. Opinion. Perverse subsidies. Inter Press Service, www.ipsnews.net.

Meyers, N. og J. Kent 1998. Perverse subsidies: their nature, scale and impacts. International Institute for Sustainable Development, Winnipeg, Manitoba, Kanada.

Montgomery, D.R. 2007. Dirt. The erosion of civilizations. University of California Press, Berkeley, California, USA.

Ólafur Arnalds 2016. Sauðfjárbeit og íslensk vistkerfi: Afneitun vanda. Leiðari. Náttúrufræðingurinn 86:3–4.

Ólafur Arnalds 2019a. Á röngunni. Alvarlegir hnökrar á framkvæmd landnýtingarþáttar gæðastýringar í sauðfjárrækt. Rit LbhÍ nr. 118. Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.

Ólafur Arnalds 2019b. Development of perverse environmental subsides for sheep production in Iceland. Agricultural Sciences 10:1135–1151, 10.4236/as.2019.109086.

Ólafur Arnalds og Jón Guðmundsson 2020. Loftslag, kolefni og mold. Rit LbhÍ nr. 133. Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.

Ólafur Arnalds, Bryndís Marteinsdóttir, Sigmundur Helgi Brink og Jóhann Þórsson 2022. A framework model for current land condition in Iceland. Í ritrýningu.

Papworth, S.K., J. Rist, L. Coad og E.J. Milner-Gulland 2009. Evidence for shifting baseline syndrome in conservation. Conservation Letters 2:93–100.

Pauly, D. 1995. Anecdotes and the shifting baseline syndrome of fisheries. Trends Ecological Evolution 10:430.

Salvör Jónsdóttir 2012. Landbúnaðarland í skipulagsáætlunum. Skipulagsstofnun. Sótt á skipulag.is.

Schuyt, K. 2005. Perverse Policy Incentives. Í: S. Mansourian, D. Vallauri og N. Dudley (ritstj.), Forest Restoration in Landscapes. Beyond Planting Trees. Springer, New York, USA. Bls. 78–83.

Singleton, S. 2000. Cooperation or Capture? The Paradox of Comanagement and Community Participation in Natural Resource Management and Environmental Politics. Environmental Politics 9:1–21.

Smith, V.H., J.W. Glauber, B.K. Goodwin og D.A. Sumner 2017. Agricultural Policy in Disarray. Reforming the Farm Bill – Overview. American Enterprise Institute, Washington DC, USA.

Tanentzap, A.J., A. Lamb, S. Walker og A. Farmer 2015. Resolving Conflicts between Agriculture and the Natural Environment. PLOS Biology 13:e1002242.

The Food and Land Use Coalition 2019. Growing better: The critical transitions to transform food and land use. The Global Consultation Report of the Food and Land Use Coalition. https://www.foodandlandusecoalition.org/wp-content/uploads/2019/09/FOLU-GrowingBetter-GlobalReport-ExecutiveSummary.pdf

The Guardian 2005. EU farm subsidies uncovered. Royals must declare sums under freedom of information. The Guardian 7. janúar 2005. https://www.theguardian.com/uk/2005/jan/07/freedomofinformation.monarchy.

van Beers, C. og C.J.M.J. van den Bergh 2001. Perseverance of perverse subsidies and their impact on trade and environment. Ecological Economics 36:475–486.

Wall, D. 2017. The Commons in History. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA.

Wuerthner, G. og M. Matteson 2002. Welfare Ranching. The Subsidized Destruction of the American West. Foundation for Deep Ecology/Island Press, Sausalito, California, USA.

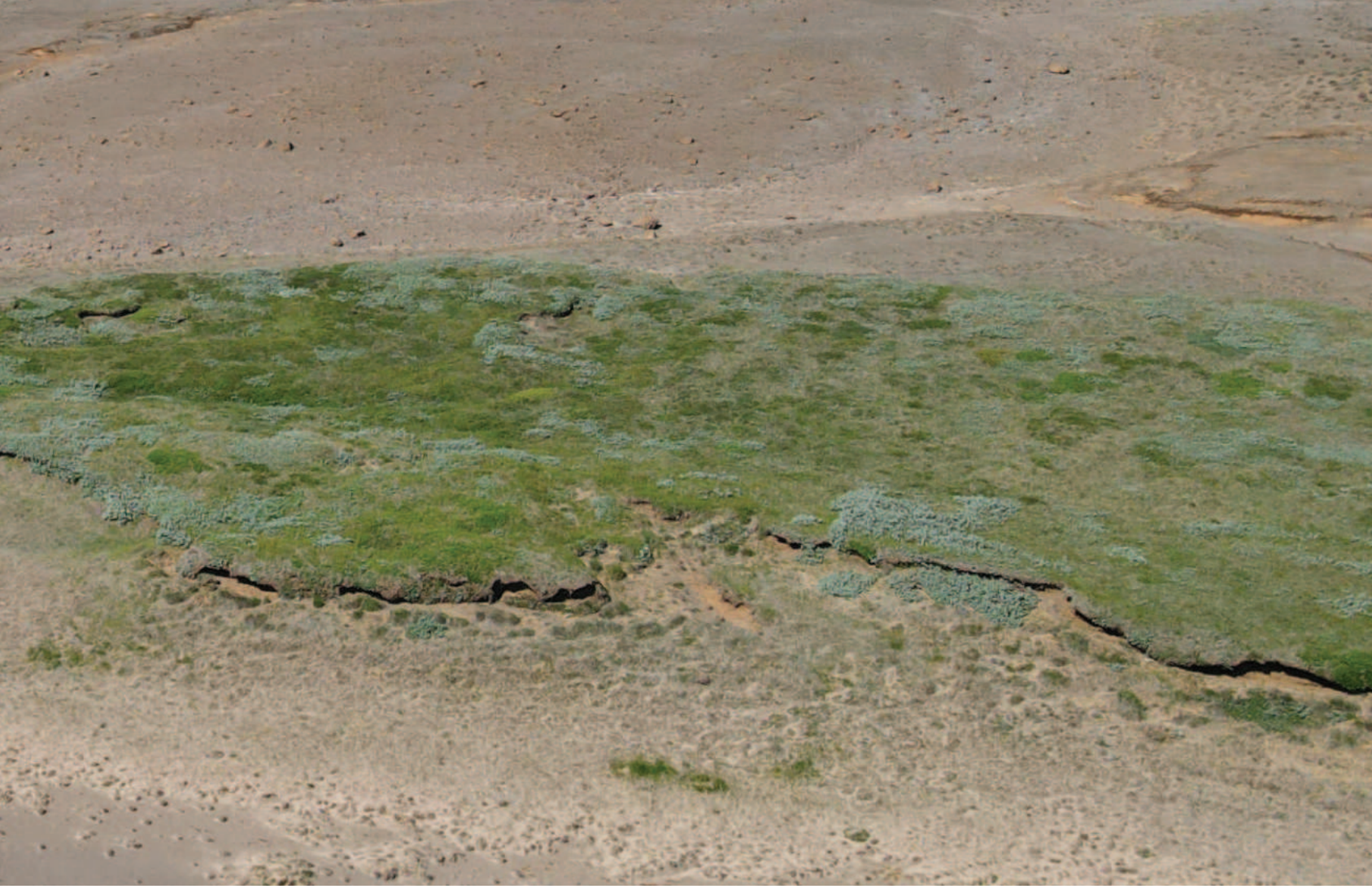
Þórunn Pétursdóttir 2020. Governing land use and restoration: The long-term progress of environmental and agricultural policies on sustainable rangeland management and restoration in Iceland. PhD-ritgerð, Landbúnaðarháskóli Íslands, Náttúra og skógur, Hvanneyri og Reykjavík.

Þórunn Pétursdóttir, S. Baker og Ása L. Aradóttir 2020. Functional silos and other governance challenges of rangeland management in Iceland. Environmental Science and Policy 105:37–46.

Þórunn Pétursdóttir, Ása L. Aradóttir, S. Baker, Guðmundur Halldórsson og B. Sonneveld 2017. Successes and failures in rangeland restoration: An Icelandic case study. Land Degradation and Development 28:34–45.

Þórunn Pétursdóttir, Ólafur Arnalds, S. Baker, Luca Montanarella og Ása L. Aradóttir 2013. A social-ecological system approach to analyze stakeholders' interaction within a large-scale rangeland restoration program. Ecology and Society 18:29.

22 Moldin og hlýnun jarðar



Mynd 22.1. Land í tötrum í Sandvatnshlíðum á Biskupstungnaafrétti. Þetta land var áður skógi vaxið fram eftir öldum. Gróðureyjan til hægri er til vitnis um horfna landkosti – maðurinn vinstra megin við barðið er til viðmiðunar. Jaðrar barðsins hafa verið græddir upp. Tapast hefur 1–2 m þykkt jarðvegslag af mörg hundruð km² svæði þannig að auðnin ein situr eftir.

Um er að ræða ótrúlega gjöreyðingu sem á sér fáar hliðstæður á jörðinni. Hér hafa glatast ókjör af kolefni sem má áætla að samsvari um 50 000 tonnum af C á km² (um 180 000 tonnum af CO_2 á hvern ferkílómetra). Ef tapið væri reiknað á hundruð ferkílómetra yrði það af geigvænlegri stærðargráðu (tugir milljóna tonna CO_2-ígilda).

Mold og CO_2

Ætla mætti af umræðu um gróðurhúsalofttegundir að meira væri af kolefni í andrúmsloftinu eða gróðri í samanburði við moldina. En svo er alls ekki, heldur þvert á móti. Moldin geymir meira kolefni en andrúmsloftið og gróður samanlagt.

22.1. Moldin er miðlæg í kolefnishringrásinni

Meðal mikilvægustu áskorana mannkynsins er að bæta ástand lands og draga úr styrk gróðurhúsalofttegunda í andrúmsloftinu. Hrun og ástand vistkerfa og hlýnun andrúmsloftsins eru nátengd fyrirbrigði: stór hluti þeirra gróðurhúsalofttegunda sem losaður er út í andrúmsloftið á rætur að rekja til hnignunar vistkerfa og þá einkum moldar (mynd 22.1). Bruni jarðefnaeldsneytis vegur þó þyngra á heimsvísu og hann þarf að minnka. Leiðir til að minnka styrk CO_2 í andrúmsloftinu felast ekki síst í að binda kolefni (C) aftur í vistkerfum samhliða því að draga úr bruna jarðefnaeldsneytis. Moldin er miðlæg í kolefnishringrás jarðar og þar er hægt að binda á nýjan leik mikið kolefni.

Í þessum kafla er fjallað um kolefni (C) og koltvísýring (CO_2) og ferð kolefnis á milli vistkerfa og andrúmslofts. Kolefnið er á ýmsu formi í lífríkinu, í moldinni og einnig í andrúmsloftinu sem CO_2 og CH_4. Aðrar gróðurhúsalofttegundir en koltvísýringur koma við sögu hlýnunar andrúmsloftsins, svo sem tvínituroxíð (hláturgas – N_2O), metan (CH_4), óson (O_3) og brennisteinshexaflúoríð (SF_6) auk vatnsgufu (H_2O) (sjá Halldór Björnsson 2008). Umfjöllun um hringrás kolefnis hefur einatt einskorðast við losun gróðurhúsalofttegunda vegna bruna jarðefnaeldsneytis og leiðir til að draga úr henni – sem er skiljanlegt. Einnig hafa rándýrar verkfræðilausnir, sem ganga út á að soga CO_2 úr andrúmsloftinu, hlotið mikla athygli. Þessar áherslur gera það þó að verkum að mikilvægi vistkerfa í þessu samhengi er iðulega vanmetið. Verulega skortir á almenna þekkingu á hlutverki vistkerfa í kolefnishringrásinni og það endurspeglast í umræðu um loftslag og umhverfismál.

Tafla 22.1. Skipting kolefnis. Hér er tekið tillit til mikils kolefnis í jarðvegi norðurhjarans og *eldfjallajörð*, sem yfirleitt nær mun dýpra en kolefni í öðrum jarðvegsgerðum (tölur frá IPCC 2013, talan fyrir úthafið felur í sér lífrænt set).

KOLEFNISHÍT	Gt C (Pg C)
Andrúmsloftið	830
Lífheimurinn (gróður)	450–650
Jarðvegur	1500–2400
Sífreri	1700
Úthafið	40 450
Jarðefnaeldsneytisforði	1000–1940

22.2. Kolefni í jarðvegi

22.2.1. Moldin og aðrir hnattrænir geymar

Meginuppistaða lífrænu efnanna í hringrás lífsins eru kolefnisefnasambönd. Heildarmagn kolefnis í hnattrænni (e. global) hringrás skiptist á nokkra megingeyma. Hafið er langsamlega stærsti geymirinn með um 40 000 Pg (petagrömm, milljarðar tonna eða gígtatonn Gt) en jarðvegurinn kemur þar á eftir með 1500–3500 Pg eftir því hver telur hverju sinni (tafla 22.1). Höfundur þessa rits hallast að efri tölunni því magn kolefnis í jarðvegi á heimskautasvæðum er yfirleitt vanmetið í heildartölum um kolefni í mold á jörðinni (Tarnocai o.fl. 2009, sjá einnig IPCC 2013).

Mun minna er af kolefni í andrúmsloftinu (830 Pg) og gróðri jarðar (450–650 Pg). Stærstu geymarnir eru þó í kalksteini ($CaCO_3$) sem fellur út í hafinu og lífrænu kolefni sem bundið er í jarðlögum (kol, olía, tjara, gas). Þar sem mikið losnar af Ca^{++} við efnaveðrun í jarðvegi skilar það sér til sjávar og fellur út sem kalk (sem inniheldur C). Það á sérstaklega við hérlendis og er fjallað um það hér á eftir (sjá einnig Sigurð Reyni Gíslason 2012). Breytingar á kolefni í einum forða hafa alltaf í för með sér gagnstæða breytingu

Kolefni, CO_2 og flatarmál

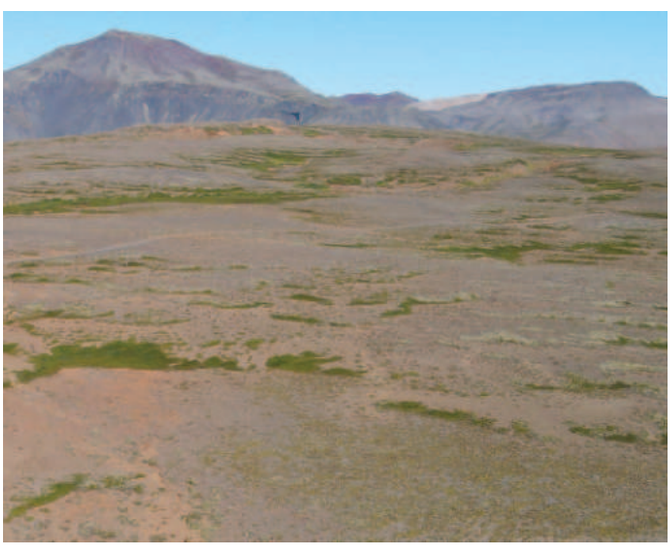
C eða CO_2. Það er eðlilegt að loftslagsvísindin miði við koltvísýring (CO_2) því það efni umfram önnur veldur hlýnuninni. En í öðrum náttúruvísindum er algengt að nota frumefnaformið kolefni (C), enda getur C verið í afar mörgum myndum eða efnasamböndum í hringrás kolefnis og orku. Til þess að umbreyta 1 g af kolefni (C) yfir í g CO_2-ígildi er margfaldað með stuðlinum 44/12 = 3,667.

CO_2-ígildi. Hugtakið CO_2-ígildi er mikið notað, m.a. vegna þess að fleiri lofttegundir en CO_2 valda gróðurhúsaáhrifum. Áhrif þeirra eru þá borin saman við gróðurhúsaáhrif CO_2, en þær hafa virkni á við tiltekið magn af CO_2. Þetta tiltekna magn af CO_2 er þá CO_2-ígildi þeirrar lofttegundar.

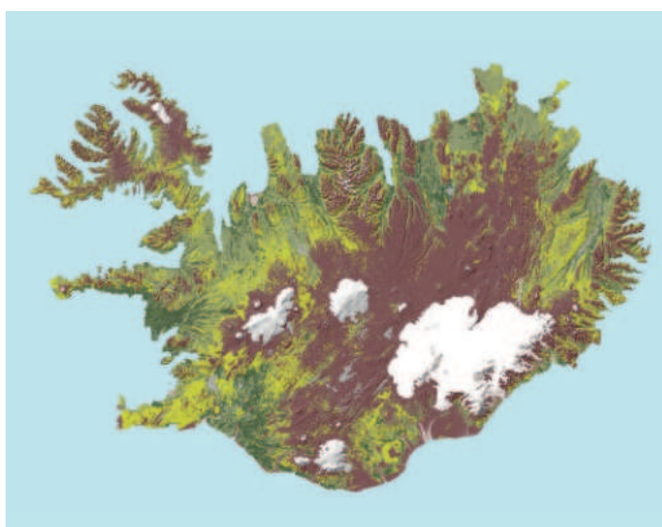
Einingar – magn. Margar einingar eru notaðar til að gefa til kynna magn kolefnis eða koltvísýrings, allt frá milligrömmum við útreikninga á flæði í tilraunareitum upp í Pg (Peta grömm = 1015 g, sama og milljarðar tonna) þegar fjallað er um hnöttinn í heild. Hér eru einingarnar kg/m², t/km² og t/ha mest notaðar. Einingin verður síðan milljón tonn þegar fjallað er um kolefni (C) eða koltvísýring (CO_2-ígildi) á landsvísu (einnig gefið upp sem 1000 kílótonn, þúsund kt).

Snið – kg/m²

Landbúnaður – tonn/ha



Landslag – þúsund tonn/km²



Ísland – milljón tonn

Mynd 22.2. Mismunandi einingar fyrir kolefni (C) eða koltvísýring (CO_2) annars vegar og flatarmál lands hins vegar.

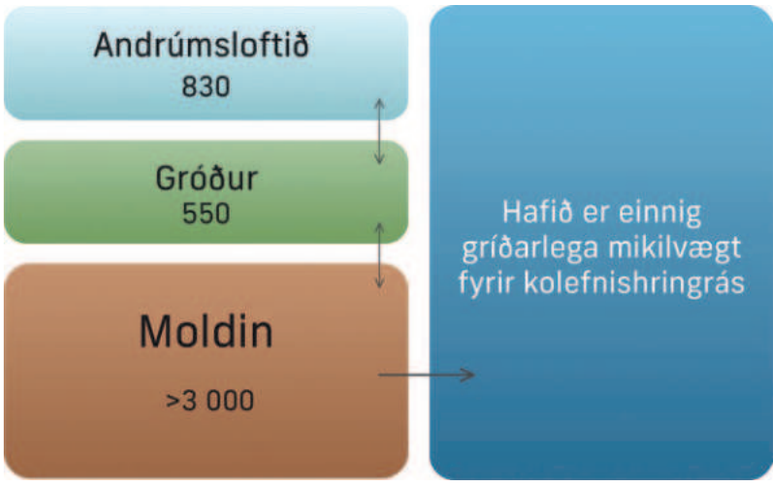
á öðrum, kolefni sem frumefni er hvorki að verða til né eyðast.

22.2.2. Hvað er mikið kolefni í hverri „moldareiningu“?

Mikilvægt er að þeir sem eru með hugann við kolefnisjöfnuð og kolefnisbindingu í landbúnaði, skógrækt eða landgræðslu geti reiknað út magn kolefnis í jarðvegi. Hér er stuttur kafli til að auðvelda þeim leikinn sem vilja fóta sig í slíkum útreikningum. Magn kolefnis í mold undir hverjum fermetra er talið í kílóum kolefnis (kg C/m²).

Eyðimerkurjörð hefur fá kg C/m² en í *mójörð* getur kolefnismagnið hæglega numið yfir 200 kg C/m². Kolefnisforðinn er afar breytilegur innan jarðvegssniða. Til að fá út heildarmagnið þarf að leggja saman magn kolefnis í hverju jarðvegslagi eða dýptarbili fyrir sig, því mikill breytileiki getur verið innan hvers sniðs. Yfirleitt er mest af kolefni í yfirborðslögunum og stundum beinast útreikningar aðeins að þeim, t.d. efstu 30 cm moldarinnar. Í jarðvegi mýrlendis hér á landi er þessu ekki þannig farið: mikið er af kolefni niður allt moldarsniðið (*mójörð*, *svartjörð*, *votjörð*), oft niður á eins til tveggja metra dýpi.

C í lífrænni hringrás



Mynd 22.3. Dreifing kolefnis í hringrás við andrúmsloft og vistkerfi. Moldin er miðlæg í hringrásinni. Hér er gert ráð fyrir >3000 Pg í jarðvegi, en líklegri tala er >3500 þegar allt kolefni í jarðvegi heimskautasvæðanna sem getur losnað er talið með (sjá töfluna hér að framan).

Niðurstöður mælinga á jarðvegskolefni eru yfirleitt gefnar upp sem % C. Til að reikna kolefnisforða á rúmmálseiningu er hlutfallsgildi kolefnis (% deilt með 100; gefur t C/t jarðvegs) margfaldað með rúmþyngd jarðvegsins (t jarðvegs/m³ jarðvegs) og niðurstaðan verður þá tonn kolefnis í hverjum rúmmetra; t C/m³ jarðvegs. Síðan þarf að laga þá tölu að þykktinni. Ef lagið er t.d. 10 cm þykkt, þ.e. 0,1 metri, er niðurstaðan t C/m³ jarðvegs x 0,1 m jarðvegs = t C/m² jarðvegs. Margfaldað er með 1000 til að breyta tonnum í kg. Dæmi: Ef jarðvegslagið er 20 cm þykkt, rúmþyngdin 0,8 t/m³ og hlutfall kolefnis 8% er heildarmagn kolefnis í kg/m² í þessu lagi eða dýptarbili:

$$8/100 \times 0{,}8\ t/m^3 \times 0{,}2\ m \times 1000\ kg/t = 12{,}8\ kg/m^2$$

Hafa ber í huga að hér er miðað við moldarefni og því þarf að draga frá þyngd og rúmmál steina sem eru stærri en 2 mm í þvermál. Sé mikið af steinum í jarðveginum verða mælingar á kolefnisforða því tafsamari. Finna þarf rúmmál steinanna (margar aðferðir) og reikna síðan þyngd og magn kolefnis í því rými sem eftir er, það er hið „virka“ rými sem inniheldur kolefnið. Þannig fæst heildarmagn kolefnis fyrir tiltekið jarðvegsbil samkvæmt formúlunni hér að ofan. Steinar eru einkum viðfangsefni slíkra útreikninga á illa grónu landi og í skriðujarðvegi, en yfirleitt ekki í þurrlendisjarðvegi sem myndast við áfok (fínefni, lítið um steina) – eða í þykkum votlendisjarðvegi.

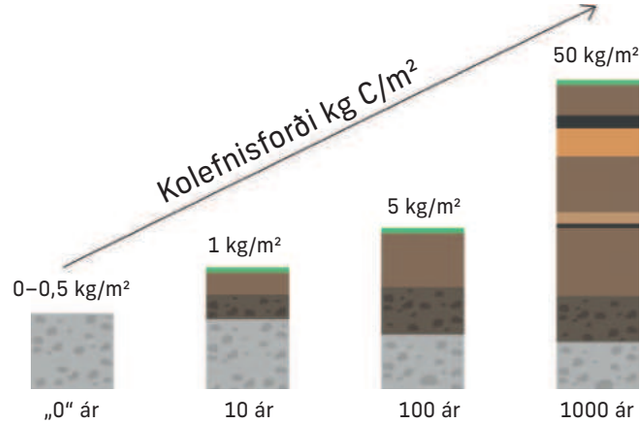
Reikna þarf kolefnismagnið fyrir hvert jarðvegslag fyrir sig og leggja saman öll lögin til að fá magn undir hverri flatareiningu. Jarðvegslögin hafa mismunandi kolefnishlutfall og rúmþyngd og því er mikilvægt að mæla báða þætti. Oft og tíðum er rúmþyngdin samt ekki þekkt, en með þekkingu á moldinni á hverju svæði fyrir sig, sem

og tengslum rúmþyngdar og kolefnis, er iðulega hægt að áætla rúmþyngdina, enda þótt niðurstaðan verði ekki fullkomlega nákvæm (sjá 12. kafla um eðliseiginleika íslensks jarðvegs). Þá verður einnig að hafa í huga að breytileiki moldarinnar innan hvers svæðis er mikill og því verða mælingar og útreikningar aldrei annað en nálgun á kolefnisinnihald hvers svæðis.

22.2.3. Útreikningar á bindingu

Við útreikninga á bindingu eða losun kolefnis í jarðvegi bætist við tímaþáttur. Hver er bindingin í kg C/m² á ári? Eða losun sem CO_2 á ári? Unnt er að mæla upptöku og losun CO_2 með tækjabúnaði sem mælir breytingar á styrk CO_2 í lokuðu rými eða loftstreymi, en það er fremur dýrt og tímafrekt og slíkar mælingar þurfa að ná yfir langan tíma, helst nokkur ár því breytileikinn er mikill. Þær eru engu að síður nauðsynlegar til þess að fá fyllri skilning á kolefnisjöfnuði vistkerfa. Önnur leið er að fylgjast með ákveðnum svæðum og mæla kolefnisforða þeirra á nokkurra ára fresti. Það er m.a. aðferð sem notuð er á Íslandi í tengslum við Loftslagssamning Sameinuðu þjóðanna (Keller o.fl. 2020).

Þar sem ráðist er í landgræðslu er hægt að fylgjast með hversu hratt kolefni safnast fyrir í moldinni með því að mæla svæðin á 10 ára fresti, svo dæmi sé tekið. Einnig er unnt að rannsaka misgömul landgræðslusvæði þar sem aðstæður eru sambærilegar að öðru leyti (sjá t.d. ÓA o.fl. 2002). Við slíkar rannsóknir er mikilvægt að mæla alltaf rúmþyngd því hún fer lækkandi eftir því sem lífræn efni safnast fyrir í moldinni. Þá þarf að draga frá það rúmmál sem steinar taka í moldinni, bindingin tengist aðeins moldarefnunum (skilgreind sem korn <2 mm og kolefni er aðeins mælt í þeim hluta). Ókosturinn við þessa aðferð er að breytingar á kolefnisforða eru oft hægar og innan hvers svæðis getur verið mikill breytileiki – sem kallar á mikinn fjölda sýna.



Mynd 22.4. Kolefni safnast fyrir í mold, t.d. við landgræðslu. Í þessu dæmi er lítið kolefni í moldinni í upphafi, 0,5 kg/m², en að hundrað árum liðnum er magnið orðið 5 kg/m² og getur vel farið yfir 50 kg/m² í frjósömum vistkerfum eftir 1000 ár (en er þó iðulega lægra, t.d. 30 kg/m³, m.a. vegna nýtingar). Þessar tölur gefa einnig til kynna það tap sem verður þegar landhnignun og jarðvegsrof hafa orðið til þess að mold hverfur af yfirborðinu. Með tímanum lækkar rúmþyngd efsta lagsins, sem mikilvægt er að taka tillit til við útreikninga.

Binding í mold í náttúrulegum vistkerfum við bætta landnýtingu og landgræðslu er iðulega af stærðargráðunni 0,01–0,1 **kg C/m²** á ári eða 0,04–0,37 **kg CO_2/m²**. Það samsvarar 10–100 t C /km² eða 37–370 **t CO_2 á km²** á ári. Fyrir þá sem kjósa að nota hektara sem viðmið: 0,1–1 **t C/ha**/ári eða 0,37–3,7 **t CO_2 á ha** á ári (yfirlit í töflu 22.2 til einföldunar).

22.3. Kolefni í íslenskum jarðvegsflokkum

22.3.1. Núverandi forði kolefnis

Eldfjallajörð, meginjarðvegsflokkur Íslands, safnar mun meira kolefni en aðrir jarðvegsflokkar heimsins að *mójörð*

Tafla 22.2. Dæmigerð binding kolefnis í mold í náttúrulegum vistkerfum við landgræðslu og vistheimt. Bæði sem C og CO_2-ígildi á hvern fermetra, hektara og ferkílómetra ár hvert.

Eining kolefnis	Binding á m² á ári	Binding á ha á ári	Binding á km² á ári
C	0,01–0,1 kg/m²	0,1–1 tonn/ha	10–100 tonn/km²
CO_2	0,04–0,37 kg/m²	0,37–3,7 tonn/ha	37–370 tonn /km²

Tafla 22.3. Dæmigerð gildi fyrir kolefnisforða í *eldfjallajörð* sem íslenskur jarðvegur telst til, bæði sem kolefni (C) og samsvarandi magn CO_2 á fermetra, hektara og ferkílómetra. Íslensku gildin í óraskaðri mold eru iðulega allnokkru hærri.

Eining kolefnis	Á fermetra	Á hektara	Á ferkílómetra
C	30 kg/m²	300 tonn/ha	30 000 tonn/km²
CO_2	110 kg/m²	1 100 tonn/ha	110 000 tonn/km²

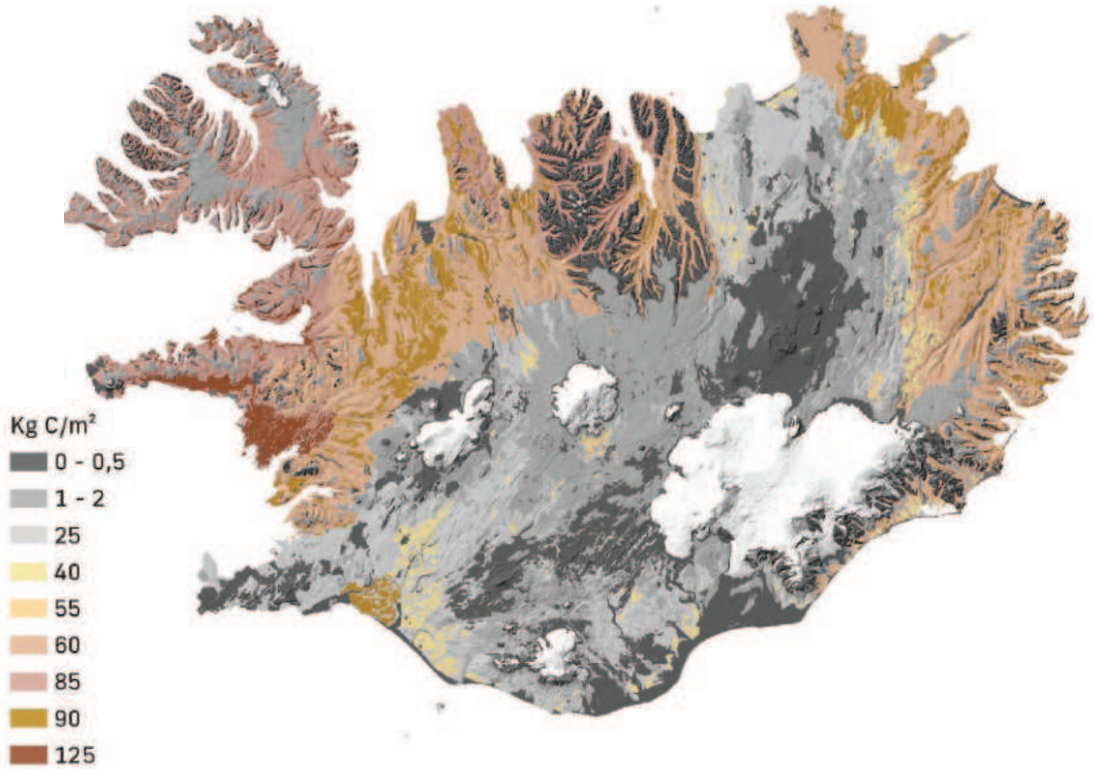
undanskilinni sé gróðurhula til staðar, en hana skortir á *glerjörð* (sjá 11. kafla um jarðvegsflokka). Oft er talað um að kolefnisforði *eldfjallajarðar* sé um 30 kg af C á fermetra að meðaltali, sem samsvarar 300 tonnum á hektara og 30 000 tonnum af C á ferkílómetra. Samsvarandi magn af CO_2 væri 110 kg CO_2 á fermetra, 1100 t CO_2/ha og 110 000 t CO_2/km² (yfirlit í töflu 22.3). Þetta eru há gildi – það er einfaldlega ansi mikið af kolefni í mold svæða sem einkennast af *eldfjallajörð*, uppsöfnunin er einn hinna sérstæðu eiginleika hennar.

Moldin á Íslandi inniheldur afar misjafnlega mikið af kolefni. Dýpt jarðvegsins, grunnvatnsstaða, áfokshraði, landnýting o.fl. þættir móta lífrænt innihald *sortujarðar* (*brúnjörð*, *votjörð*, *svartjörð*) sem og *mójarðar*. Djúp *mójörð* getur geymt meira en 300 kg af C undir hverjum fermetra, en meðaltal í gagnagrunni Landbúnaðarháskólans (Hlynur Óskarsson o.fl. 2004) er 198 kg C/m² (tafla 5). Meðaltal fyrir *brúnjörð* í gagnagrunni LbhÍ er mikið lægra, eða 23–30 kg/m², en í gagnagrunninum er einkum að finna mólendi með fremur lágt kolefnisinnihald vegna mikillar nýtingar – að meðaltali 3% C í yfirborðslögum. Innihald í yfirborðslögum þar sem gróskumikill gróður er á yfirborðinu er 6–12% að jafnaði, en mólendi á Íslandi er yfirleitt í hnignuðu ástandi – það hefur misst hluta kolefnisforðans.

Höfundur þessa rits og samstarfsfélagar hafa áætlað heildarforða hvers jarð-

Tafla 22.4. Kolefnisforði helstu jarðvegsflokka á Íslandi, byggt á jarðvegskorti LbhÍ (vor 2020). Flokkar gróins lands eru grænlitaðir en mold auðna grálituð. Oft eru flákar kortlagðir sem fleiri en einn jarðvegsflokkur vegna margbreytileika í landslaginu (mósaík). Skammstöfun (lykill) endurspeglar alþjóðleg heiti flokkanna. Heildarmagn kolefnis er gefið upp í milljónum tonna (M t). Gríðarlegur munur er á milli eininga sem innihalda mikið af kolefni og þeirra sem eru kolefnissnauðar. Samtals er kolefnisforði í mold á Íslandi talinn vera um 3 milljarðar tonna kolefnis, eða 11 milljarðar tonna CO_2-ígilda.

Jarðvegsflokkur / mósaík	Lykill	kg C/m²	km²	M t C	M t CO_2
Mójörð	H	125	1341	168	615
Mójörð-Brúnjörð	H-BA	90	6	0,5	2
Svartjörð	HA	90	4707	424	1553
Brúnjörð-Svartjörð-Mójörð	BA-HA-H	85	9989	849	3113
Brúnjörð-Svartjörð-Votjörð	BA-HA-GA	60	18.041	1082	3969
Frerajörð-Votjörð	C-GA	55	140	7,7	28,2
Votjörð-Brúnjörð	GA-BA	40	2377	95,1	349
Brúnjörð	BA	25	13.352	334	1224
Melajörð-Malarjörð (Glerjörð)	MV-GV	2	17.528	35,1	128
Melajörð-Sandjörð (Glerjörð)	MV-SV	1	5830	5,8	21,4
Sandjörð (Glerjörð)	SV	0,5	4480	2,2	8,2
Sandjörð-Bergjörð	SV-L	0,5	4890	2,4	9
Bergjörð	L	0,2	7341	1,5	5,4
Vikurjörð (Glerjörð)	PV	0,1	248	0	0,1
Samtals				**3007**	**11.025**



Mynd 22.5. Tilgátukort af kolefnisforða í jarðvegi. Byggt á nýjustu útgáfu af grófu jarðvegskorti sem er endurskoðað reglulega í gagnagrunnum LbhÍ. Kortið sýnir ljóslega að mest kolefni er í moldinni á vel grónum svæðum á Vesturlandi og Norðvesturlandi, en einnig á Austurlandi.

Moldin losar mest!

Ætla má að yfir 2000 milljónir tonna af CO_2 hafi tapast úr íslenskri mold á umliðnu árþúsundi vegna hnignunar vistkerfa. Losun af mannavöldum nú er undir 5 milljónum tonna af CO_2 ef losun frá landi er undanskilin. Mikilvægi moldar í samhengi við hlýnun loftslags er augljóst.

vegsflokks með endurbættri útgáfu af jarðvegskorti Landbúnaðarháskóla Íslands sem er í sífelldri þróun (tafla 22.4). Niðurstaðan er kolefnisforði sem telur 3007 milljónir tonna af C í íslenskri mold (11 026 milljón tonn CO_2). Áður höfðu Hlynur Óskarsson o.fl. (2004) áætlað að forðinn væri um 2100 milljónir tonna af C, byggt á eldri útgáfu jarðvegskorts LbhÍ. Vitaskuld eru þetta einvörðungu grófar áætlanir, það vantar ítarlegri rannsóknir og jarðvegskort í nákvæmari mælikvarða til að bæta um betur. Það er afar brýnt að auka gæði gagna um kolefni í íslenskri mold í framtíðinni, enda varða þau framtal losunar, bindingar og kolefnisbókhald landsins sem og skipulag sjálfbærrar landnýtingar.

Það er afar mikilvægt að fá mynd af dreifingu kolefnis um landið og hvar það er að losna eða bindast í vistkerfum. Mynd 22.5 sýnir tilgátukort fyrir kolefnisforða landsins (sjá töflu 22.4). *Mójörð* á Vesturlandi og *svartjörð* á Vestur- og Norðvesturlandi eru stærstu kolefnisgeymarnir. Illa gróið land, m.a. á gosbeltum landsins, geymir lítið kolefni.

22.4. Hve mikið hefur tapast af kolefni úr íslenskum vistkerfum?

1) **Jarðvegsrof.** Kolefni í mold tapast með jarðvegsrofi sem flytur mold t.d. til sjávar með vatni og vindum.

2) **Framræsla votlenda.** Kolefni tapast við framræslu votlenda – þau taka að losa kolefni í stað þess að binda það. Losun CO_2 og N_2O eykst en losun á CH_4 minnkar. Í heild eykst losun í CO_2-ígildum talið.

3) **Landnýting – landhnignun.** Minna verður eftir af kolefni í þurrlendi og votlendum vegna landnýtingar sem raskar kolefnishringrás kerfanna.

4) **Kolefnisbinding.** Gróið land bindur kolefni vegna þess að jarðvegurinn verður smám saman dýpri vegna áfoks steinefna, uppsöfnunar kolefnis í mýrum og aðgerða til að bæta ástand lands sem leiða til þess að kolefnisforði byggist upp.

Mynd 22.6. Efri mynd: Land í slæmu ástandi hefur tapað gríðarlegum kolefnisforða, sem m.a. eykur á styrk gróðurhúsalofttegunda í andrúmsloftinu. Land í góðu ástandi geymir mikið af kolefni og með endurheimt vistkerfa má minnka styrk CO_2 í lofthjúpnum. Neðri mynd: Illa farið land getur enn haft umtalsvert magn kolefnis í moldinni sem smám saman er að losna sem CO_2 út í andrúmsloftið.

Líta þarf til fjögurra meginþátta eða ferla er varða tap eða bindingu kolefnis í jarðvegi.

Jarðvegsrof. Hlynur Óskarsson og félagar (2004) áætla að 120–500 milljónir tonna kolefnis hafi tapast á síðustu u.þ.b. 1000 árum vegna jarðvegsrofs og þá einkum með tilliti til útbreiðslu og virkni rofabarða (mynd 22.6), sem samsvarar 440–1 833 milljónum tonna af CO_2. Sé tapinu deilt jafnt á þúsund ár nemur það 0,4–1,8 milljónum tonna af CO_2 á ári. Þetta gríðarlega magn sem hefur tapast úr vistkerfunum endar þó alls ekki allt í andrúmsloftinu, sumt grefst sem set í höfunum eða er tekið upp í vistkerfi sjávar og getur þar bundist í kalki. En í þessar tölur vantar tap vegna áfoksgeira, rofdíla o.fl. ferla sem einnig stuðla að myndun auðna, rétt eins og rof sem tengist rofabörðum.

Framræst votlendi. Tap frá framræstum mýrum er áætlað um 8,4 milljónir tonna CO_2-ígilda árið 2017 samkvæmt framtali Íslands til Loftslagssamnings Sameinuðu þjóðanna (Keller o.fl. 2019). Hér eru notaðir stuðlar Vísindanefndar Loftslagssamningsins (ICPP) en þeir eru umdeildir þegar þetta er ritað (2022), enda er losunin örugglega mjög breytileg frá einum stað til annars, en frekari rannsóknir skortir. Framræsla votlendis hófst fyrir alvöru upp úr lokum heimsstyrjaldarinnar síðari. Með hliðsjón af því að búið var að grafa meirihluta skurða fyrir árið 1980 (fyrir 40 árum síðan) er ljóst að losun frá framræstum votlendum nemur tugum eða hundruðum milljóna tonna CO_2-ígilda eftir árið 1940, en hér verður ekki farið út í að áætla heildarlosunina nákvæmar en það.

Minnkun kolefnisforða í *brúnjörð* (gróin þurrlendi). Minnkun kolefnisforða í mold vegna landnýtingar (myndir 22.7 og 22.8) leiðir til samsvarandi losunar á CO_2 út í andrúmsloftið (stundum einnig N_2O). Með öðrum orðum: kolefnisinnihald efsta hluta jarðvegsins minnkar miðað við náttúrulegt kolefnismagn við eðlilegar aðstæður. Það verður að segjast að óvissan sem fylgir mati á þessum þætti á Íslandi er mikil. Til að fá hugmynd um stærðargráðu þessarar minnkunar má gefa sér að minnkun vegna landnýtingar hafi orðið á a.m.k. 45 000 km² lands (u.þ.b. stærð gróðurlendis nú en það var mun útbreiddara), og þá er tap á kolefni vegna jarðvegsrofs ekki talið með.

Minnkunin er vitaskuld æði misjöfn á milli einstakra svæða. Hér verður aðeins miðað við virkasta lag jarðvegsins: efstu 30 sentimetrana. Heilbrigð birkivistkerfi hafa iðulega 6–14% C að meðaltali í efstu 30 cm jarðvegs, með rúmþyngd 0,6 t/m³, metin út frá kolefnishlutfallinu.

Mynd 22.7. Úr sér genginn úthagi á Norðvesturlandi. Talsvert er af ógrónum blettum í yfirborðinu sem verða meira áberandi ef horft er á landið ofan frá. Land sem þetta losar líklega mikið af gróðurhúsalofttegundum. Beitarálag er mikið en kerfið ennþá að mestu gróið.

Nú er kolefnisinnihaldið iðulega 3–6% en rúmþyngdin meiri: 0,75 t/m³. Miðað við 10% meðalinnihald kolefnis í upphafi en 4,5% meðalinnihald nú í efstu 30 cm jarðvegsins hefur minnkunin verið sem hér segir:

Í upphafi: 0,3 m x 10/100 C x 0,6 t/m³ x 1 000 000 m²/km² x 45 000 km²
= 810 milljón tonn C

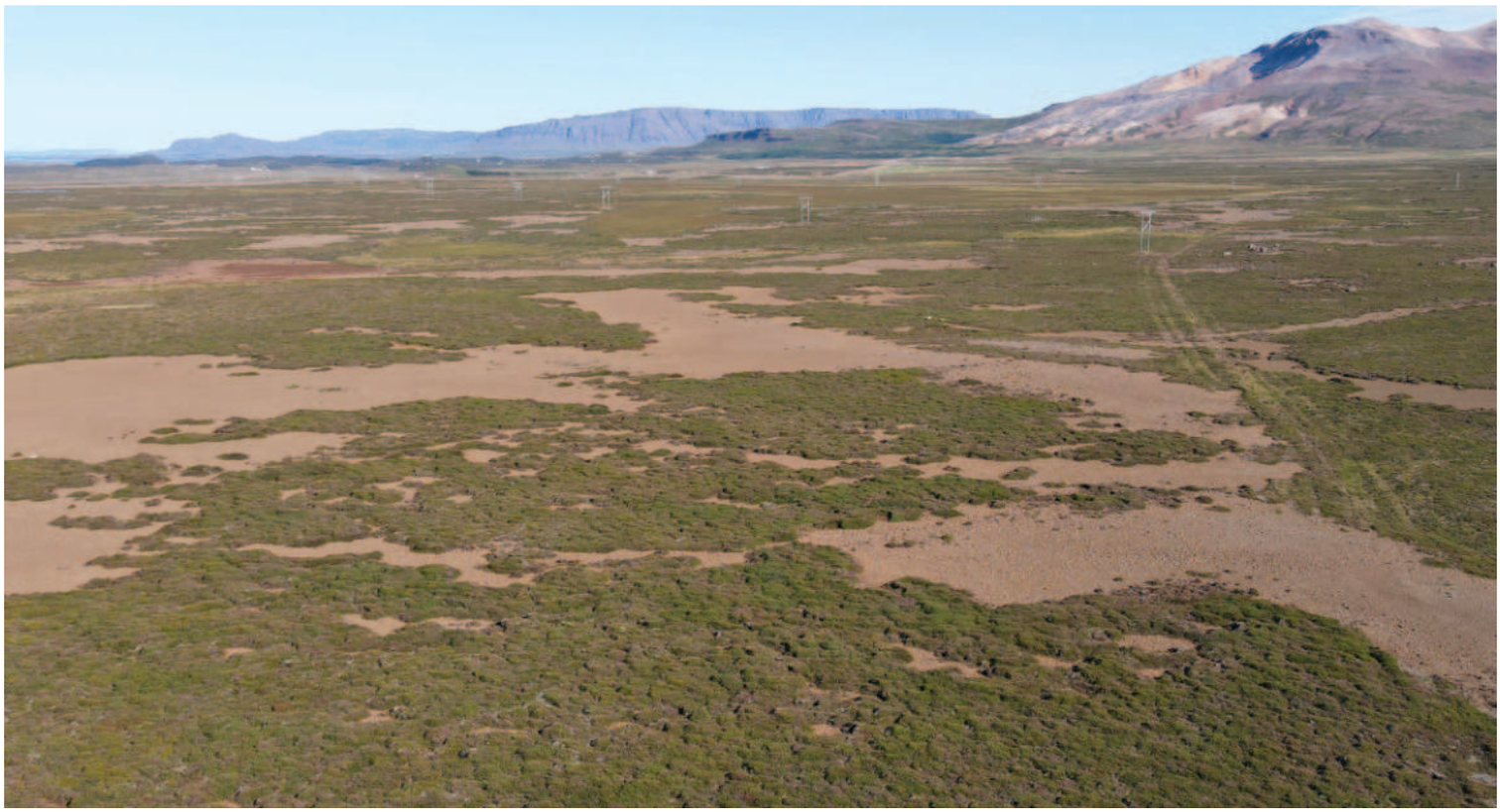
Nú: 0,3 m x 4,5/100 C x 0,75 t/m³ x 1 000 000 m²/km² x 45 000 km²
= 456 milljón tonn C

Munurinn: 354 milljón tonn C eða 1298 milljónir tonna af CO_2

Mismunur á eðlilegu náttúrulegu ástandi og því sem nú ríkir er gróflega reiknaður sem 354 milljónir tonna af C í kolefnisforða í efstu 30 cm jarðvegs, sem samvarar **1298 milljónum tonna af CO_2.** Talan gefur til kynna stærðargráðuna. Sé þessari lækkun deilt á 1000 ár er niðurstaðan að um **1,3 milljónir tonna af CO_2 hafi tapast á ári** að meðaltali í þúsund ár. Enda þótt mikil óvissa fylgi útreikningum af þessu tagi lýsa þeir stærðargráðunni hvað varðar áhrif af minnkun kolefnis í yfirborðslögum vegna landnýtingar, sem vert er að gefa nánari gaum.

22.5. Áfok og kolefnisuppsöfnun

Stöðugt áfok veldur því að yfirborðið hækkar: kolefnið grefst í moldina í dýpri jarðlögum undir áfokinu. Algengur „áfokshraði" (þykknun moldar) er á bilinu 0,025–0,4 mm á ári (ÓA 2010) en kolefnisinnihaldið 2–8% (Hlynur Óskarsson o.fl. 2004, LbhÍ gagnagrunnur), en rúmþyngd er því minni sem meira er af kolefni, þ.e. moldin verður léttari (Rannveig Anna Guicharnaud 2002). Uppsöfnun kolefnis í mold gæti verið á bilinu 0,005–0,03 kg af C á fermetra á ári af þessum sökum (ÓA 2015, 8.



Mynd 22.8. Illa farið land á Snæfellsnesi. Moldir eru í yfirborði ógróna landsins og rofdílar í gróðurþekjunni þar sem losun CO_2 á sér stað. Kolefni moldarinnar brotnar niður en ekkert kemur á móti frá gróðri. Endurheimt birkiskógar á þessu svæði gæti bundið mikið kolefni eins og síðar verður rætt um.

kafli). Út frá þessum tölum má áætla að binding CO_2 gæti auðveldlega numið um 1 milljón tonna á ári í óröskuðum jarðvegi með gróðurhulu á Íslandi.

Unnt er að áætla þátt áfoks með öðrum hætti: Gefum okkur að 45 000 km² af grónu yfirborði hafi hækkað um 15 cm á 1000 árum að meðaltali (afar misjafnt eftir landshlutum). Ennfremur að hlutdeild kolefnis sé 3% C og rúmþyngdin 0,75 t/m³. Slíkur útreikningur leiðir til þess að 557 milljónir tonna af CO_2 hafi bundist, og ef reiknað er miðað við 1000 ár er bindingin 557 þúsund tonn af CO_2 á ári. Sú tala getur verið töluvert hærri ef kolefnisinnihaldið er hærra en 3% í efstu cm moldarinnar (t.d. 6–10% en minni rúmþyngd), m.a. þar sem beitarálag er hóflegt eða land friðað fyrir beit (mynd 22.9). Óvissan er mikil en stærðargráðan virðist samsvara 0,5–1 milljón tonna af CO_2 á ári.

Það er alveg ljóst að áfokið eitt og sér er mikilvirkt í að grafa kolefni úr andrúmsloftinu í íslenskan jarðveg. Þessar tölur eru af svipaðri stærðargráðu og rannsóknir á mikið beittum svæðum gefa til kynna, t.d. í Krísuvík þar sem hafa safnast upp 0,017–0,030 kg af C á fermetra á ári síðan á 12. öld eftir því sem jarðvegurinn þykknaði (Guðrún Gísladóttir o.fl. 2010). Eva Ritter (2007) fékk um 0,023 kg af C á fermetra á ári þar sem skógi var plantað í rýrt mólendi. Gildin fyrir Ísland eru hærri en þau sem birt voru í yfirliti Zehetner (2010) fyrir *eldfjallajörð* í heiminum (meðaltal 0,01 kg af C á fermetra á ári). Við alla þessa bindingu í moldinni, raunverulega og mögulega, bætist binding í gróðri.

22.6. Binding kolefnis í þurrlendismold við friðun gróins lands eða bætta landnýtingu

Áður var greint frá því að kolefni binst smám saman í jarðvegi vegna áfoks; moldin þykknar – yfirborðið hækkar. Kolefni er einnig að skila sér aftur í moldina þar sem land hefur verið tekið úr beitarnotum, t.d. þar sem land er tekið til skógræktar, frístunda og útivistar eða þar sem búskapur er aflagður.

Mynd 22.9. Ríkt mólendi nærri þjóðgarðinum í Jökulsárgljúfrum. Hlutdeild blómplantna og gulvíðis fer vaxandi sem gefur til kynna bætt næringarástand og minnkaða beit. Birki er tekið að nema land. Hér er að safnast fyrir kolefni bæði vegna minnkandi beitar og áfoks frá hálendinu sem veldur því að moldin er að þykkna og grefur um leið umtalsvert kolefni.

Mynd 22.10. Land í framför eftir ofbeit þegar fé var sem flest á Suðurlandi. Rofsár eru gróin saman að mestu. Slíkt land getur verið að binda mikið kolefni þar sem aðstæður eru góðar, rakt og hlýtt og gróðurhula á yfirborðinu, sem þó er mjög háð beitarálagi. Bæði þurrlendið og votlendið binda kolefni.

Moldin jafnar sig á áratugum eða árhundruðum eftir aðstæðum.

Kolefnið safnast misjafnlega hratt fyrir í moldinni eftir friðun, m.a. eftir ástandi landsins í upphafi sem og öðrum aðstæðum. Þar sem ástandið er slæmt gerist lítið í fyrstu. En ef miðað er við 2% uppsöfnun að meðaltali á fjölbreytilegu landi á 50 ára tímabili, sem væri fremur hæg uppsöfnun, næmi hún sem samsvarar 71,5 t CO_2 á ha. Væri henni deilt á 50 ára tímabil er uppsöfnunin 1,43 t CO_2/ha á ári. Þegar stór svæði eru undir, t.d. þúsundir ferkílómetra, fer þessi binding að segja verulega til sín, t.d. 715 þúsund tonn af CO_2 á ári á 5000 km² svæði (miðað við 0,65 t/m³ rúmþyngd, efstu 15 cm moldar og að 50 ár taki að hækka kolefnisgildi um 2%, t.d. úr 4 í 6%).

Á svæðinu milli Hólmsár og Skeiðarársands eru t.d. afréttarsvæði sem sitja lágt þar sem beitarálag hefur minnkað, land er gróið og loftslag er bæði hlýtt og rakt og hagstætt gróðri (mynd 22.10). Ætla má að umtalsverð kolefnisbinding fari þar fram, sem þó er háð aðstæðum á hverjum stað. Öðru máli gegnir um þau svæði sem sitja hærra, þar sem jafnvel lítil beit kemur í veg fyrir uppsöfnun, enda hitiastig lægra og vöxtur minni, sem og gróðurþekja.

22.7. Framræsla votlendis – geigvænleg losun gróðurhúsalofttegunda

22.7.1. Votlendi

Framræst votlendi eru afar öflug uppspretta gróðurhúsalofttegunda, stundum nefnd „heitir reitir“ (e. hot-spots) fyrir losun. Á milli 10 og 20% votlenda heimsins hafa verið þurrkuð upp vegna landbúnaðar og skógræktar (FAO 2014, Crump o.fl. 2017). Það er ekki aðeins á Íslandi þar sem stórum hluta votlenda hefur verið raskað, t.d. hefur 53% votlenda Bandaríkjanna utan Alaska verið raskað – og yfir 90% í Kaliforníu og Ohio (Mitch og Gosselink 2007). Það er mikilvægt að taka losun

gróðurhúsalofttegunda frá framræstum votlendum alvarlega við skipulag mótvægisaðgerða vegna hlýnunar lofthjúpsins – en það er enn sem komið er yfirleitt ekki gert.

Þegar vatnsstaða í votlendunum lækkar vegna framræslu á súrefni greiðan aðgang að lífrænum efnum sem safnast hafa upp í moldinni. Við það tekur hinn lífræni forði að brotna niður og kolefnið losnar sem CO_2. Þegar votlendin þorna við framræsluna og taka að brenna lífræna forðanum gengur á efnin í moldinni. Við það losnar iðulega um nitur og landið verður því frjósamt til ræktunar til að byrja með.

Yfirborðið tekur víðast hvar að lækka ef moldin er lífræn og þar sem langt er um liðið síðan landið var ræst fram getur yfirborðið hafa sigið um margra metra. Sums staðar á Bretlandseyjum er aðeins eftir grunnur forði (tugir cm) þar sem áður var marga metra þykkur votlendisjarðvegur. Á Flórída hafa mikil flæmi verið ræst fram vegna byggðar og þar síga nú umfangsmiklir flákar lands með tilheyrandi losun gróðurhúsalofttegunda. Á láglendi við strendur getur land jafnvel lækkað niður fyrir sjávarmál með tilheyrandi kostnaði við að verja landið fyrir ágangi sjávar.

Land virðist síga hægar hér á landi en víða annars staðar en þó skortir verulega á mælingar á landsigi í framræstum mýrum (sjá þó B.Sc.-ritgerð Ingu Völu Gísladóttur 2010). Greinileg ummerki þessa sigs má sjá víða, t.d. í Norðurmýrinni í Reykjavík þar sem steyptar girðingar ná ekki niður á yfirborðið og sökklar húsa standa ómúraðir upp úr jarðvegi (mynd 22.12). Minna sig hérlendis má að hluta til rekja til þess hve stór þáttur ösku og áfoks er í moldinni, sem heldur henni saman (Bartoli og Burtin 2007).

Rotnunarstig hefur líka áhrif, en lítið rotnaðar, kaldar mýrar síga líklega hægar en ef lífræna efnið væri meira rotnað. Þess má geta að mýrar hér á landi eru að miklu leyti orðnar til úr leifum háplantna sem leiðir til annarrar jarðvegsbyggingar (e. structure) en í mýrum sem eru að

Mynd 22.11. Framræst votlendi. Súrefni kemst að lífrænum efnum moldarinnar, hún tekur að anda og losar um leið kynstrin öll af CO_2. Smám saman lækkar hlutfall kolefnis í moldinni ef bergefni (áfok og aska) eru til staðar, en einnig tekur yfirborðið að síga.

Mynd 22.12. Landsig í Norðurmýrinni í Reykjavík vegna framræslu. Mýrin hefur sigið við húsið og unnið er að viðgerð (fyrir ofan) en landið hefur sigið niður fyrir girðinguna á myndinni fyrir neðan svo að gapir undir hana.

mestu orðnar til úr mosa (*sphagnum*) (t.d. Christensen o.fl. 2003). Gunnhildur Eva G. Gunnarsdóttir (2017) gerði ráð fyrir að lækkun kolefnisforðans samsvaraði því að um 0,5 cm lag oxaðist árlega, en sigið er væntanlega nokkru hægara af áðurgreindum ástæðum.

Votlendi Íslands eru á bilinu 9 000 km² (ÓA o.fl. 2016) til 10 300 km² (Keller o.fl. 2020) eftir því hvaða gagnagrunnar og forsendur fyrir skilgreiningu á votlendi eru lagðir til grundvallar. Svæði með mold sem hafa stöðu votlendis í moldarfræðum – þar sem grámi er til staðar (e. gleyic) vegna þess að vatn stendur uppi í jarðveginum í umtalsverðan tíma – eru væntanlega mun umfangsmeiri hérlendis.

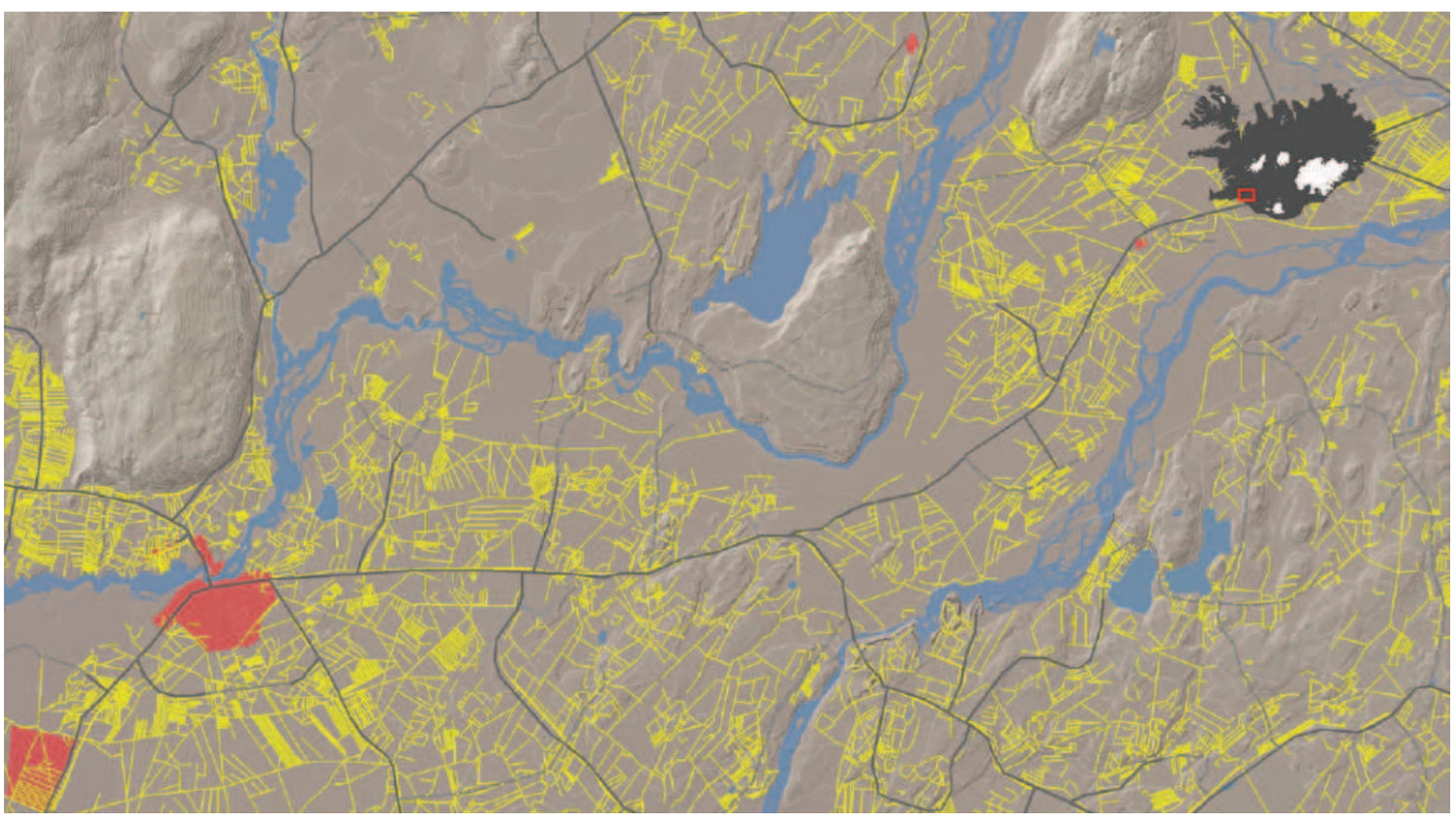
Mjög skortir á kortlagningu jarðvegs er þetta varðar. Um helmingi votlendis á landinu hefur verið raskað og um 70% votlendis neðan 200 m yfir sjávarmáli (Hlynur Óskarsson 1998b, Þóra Ellen Þórhallsdóttir o.fl. 1998, ÓA o.fl. 2016). Miklu af því landi sem var ræst fram fyrir u.þ.b. 1970 var ætlað að auka heyframleiðslu, en draga má þá ályktun af því sem ritað hefur verið um framræsluna (Sólveig Ólafsdóttir 2013) að hvatinn að hluta hennar eftir 1970 hafi verið ríkisstyrkir sem veittir voru til verkefnisins. Umtalsverður hluti þess lands sem ræstur var fram eftir 1970 er aðeins nýttur til beitar eða er ekki nýttur til landbúnaðar (sjá Sólveig Ólafsdóttir 2013, einnig ÓA o.fl. 2016).

Framræsluskurðir eru um 30 000 km langir og síðan eru um 60 000 km af svokölluðum kílræsum sem hefur verið bætt við (Áslaug Helgadóttir o.fl. 2013, Fanney Gísladóttir o.fl. 2010; myndir 22.11, 22.13 og 22.14). Tölur um heildarlengd skurða eru í stöðugri endurskoðun eftir því sem landfræðileg gagnasett batna. Röskunin er vitaskuld mjög mismunandi eftir þéttleika skurðanna og hve langt frá skurði hið raskaða land er.

Losun CO_2 úr framræstu landi er að hluta til háð því hve lækkun grunnvatns er mikil, sem m.a. fer eftir fjarlægð frá skurðum, dýpt þeirra og moldarinnar, hvort kílræsing er til staðar, vatnsleiðni o.fl. þáttum. En jafnvel aðeins 10 cm lækkun vatnsborðs leiðir til öflugrar losunar, þótt hún sé minni en t.d. ef vatnsborð lækkaði um 100 cm. Þá hefur hitastig áhrif á losunina; því meiri hiti, þeim mun örari getur losunin orðið. Því getur verið að votlendi á köldum annesjum hérlendis losi minna en t.d. votlendi inn til dala eða á Suðurlandi. Dýptin, jarðvegsgerðin, landnýtingin o.fl. atriði koma einnig til álita: breytileikinn er örugglega mikill. Hér er þó ekki rúm til að ræða þessi atriði frekar en þeim verða vonandi gerð góð skil af öðrum í framtíðinni.

22.7.2. Óröskuð votlendi losa líka

Mýrar safna smám saman í sig lífrænum efnum – þær eru að binda kolefni. En málið er þó flóknara en svo að hægt sé að líta til þessarar uppsöfnunar kolefnis einvörðungu. Sérhæfðar örverur sem hafa aðlagast súrefnisfirrð moldarinnar nýta sér orkuforðann sem er í lífrænum efnum og losa metan – CH_4. Metan er öflug gróðurhúsalofttegund og því telst vera nettólosun CO_2-ígilda jafnvel þótt votlendin séu að binda kolefni á móti þessari metanlosun. Á Íslandi er gert ráð fyrir að losun gróðurhúsalofttegunda frá óröskuðum votlendum samsvari 2,8 t CO_2-ígilda á ha á ári (Keller o.fl. 2020).



Mynd 22.13. Framræslu- og áveituskurðir á Suðurlandi, Ölfusá til vinstri, Þjórsá til hægri. Þéttleiki og heildarlengd skurðanna er gríðarlegur og lítið um óraskað votlendi. Skurðirnir hafa verið hnitaðir inn í landfræðilegan gagnagrunn (GIS-kerfi) hjá Landbúnaðarháskóla Íslands í tengslum við LULUCF-verkefnið og framtal Íslands til Loftslagssamnings Sameinuðu þjóðanna.

Mynd 22.14. Dæmi um skurði við bæ á Suðurlandi – framræst votlendi eru víða undirstaða heyframleiðslu til vetrarfóðurs auk þess sem hluti þeirra er nýttur til beitar.

Hér er búið að taka tillit til losunar á metani (CH_4) sem og uppsöfnunar kolefnis. Tölur af þessu tagi munu væntanlega taka breytingum eftir því sem þekking eykst með fleiri rannsóknum og einnig er þess að vænta að mikill breytileiki sé bæði innan svæða og á milli þeirra.

22.8. Losun frá framræstum votlendum hérlendis

22.8.1. Losun á flatarmálseiningu

Við framræslu taka lífræn efni í votlendunum að oxast – þau „brenna" og losa þar með CO_2 út í andrúmsloftið með margföldum hraða en fyrir framræsluna. Þau losa einnig CH_4 (mest úr sjálfum skurðunum) og N_2O en langmest af losuninni er á formi CO_2 (Jón Guðmundsson 2016). Vísindanefnd Loftslagssamnings Sameinuðu þjóðanna (e. Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) kemur á samstarfi vísindamanna um heim allan og er ábyrg fyrir vísindastarfi samningsins. Vísindanefndin hefur gefið út leiðbeinandi tölur um losun frá votlendum sem byggðar eru á rannsóknum víða um lönd.

Leiðbeinandi tala fyrir losun kolefnis fyrir íslenskar aðstæður er 5,7 t C/ha, eða 20,9 t CO_2 á hektara umfram náttúrulega losun (IPCC 2014; sjá einnig Jón Guðmundsson 2016, Keller o.fl. 2020). Leiðbeinandi tölur fyrir tún eru nokkru hærri því þar er þéttleiki skurða meiri. Mælingar á losun CO_2 frá framræstu votlendi á Íslandi sýna losun upp á 4–8,25 t C/ha (Jón Guðmundsson og Hlynur Óskarsson 2014) sem er af sömu stærðargráðu og IPCC-gildið (5,7 t C/ha). Gunnhildur Eva G. Gunnarsdóttir (2017) fékk heldur lægri losunartölur

við rannsóknir á Vestur- og Suðurlandi, en þær tóku aðeins til efsta hluta jarðvegsins niður að öskulagi frá því um 1500 og því eru niðurstöður hennar sambærilegar við losunargildi IPCC. Þóroddur Sveinsson o.fl. (2022) mældu einnig losun í efstu lögum (um 20 cm) jarðvegs með sömu aðferð (niður á H1104) á tveimur stöðum í grunnum jarðvegi á Norðurlandi sem gaf 0,95 og 5,1 tonn af CO_2 í losun á ha á ári, en lægri talan fékkst í yfirborði lands sem var í kornrækt. Ekki er ljóst hvernig unnt er að yfirfæra þessar tölur á heildarlosun og allra síst á framræst votlendi í úthaga án kornræktar.

Niðurstöðurnar taka einungis til efsta hluta jarðvegsins þar sem áhrif ræktunar eru mikil. Hærri talan yfirfærð á 1 m dýpi gefur svipaða tölu og IPCC-gildið fyrir votlendi utan ræktarlands. Af öllu þessu er ljóst að mikilvægt er að auka rannsóknir á losun úr framræstum votlendum á Íslandi, m.a. með tilliti til mismunandi jarðvegsgerða, landnýtingar, dýptar, loftslags o.fl. þátta.

22.8.2. Heildarlosun frá framræstum votlendum

Losun og binding gróðurhúsalofttegunda frá landi á Íslandi er talin fram til Loftslagssamnings Sameinuðu þjóðanna (UN-FCCC) í svokallaðri „Landsskýrslu“ (e. National Inventory Report – NIR) sem er á höndum Umhverfisstofnunar. Þar er vitaskuld talin losun frá samgöngum, skipum, landbúnaði, iðnaði og svo mætti lengi telja.

Losun gróðurhúsalofttegunda án „landnýtingar“ nam 4,956 milljónum tonna CO_2-ígilda árið 2018 (Keller o.fl. 2020). Síðan er einnig tilgreindur kolefnisjöfnuður fyrir landið og landnýtingu. Sá hluti gengur undir heitinu „LULUCF“ sem stendur fyrir „Land Use, Land Use Change and Forestry“. Losun vegna LULUCF á Íslandi 2018 var 9,009 milljónir tonna CO_2-ígilda (Keller o.fl. 2020). Skógræktin, Landgræðslan og fleiri stofnanir koma að því verkefni að safna saman tölum er lúta að landinu og landnýtingu. Leggja

Mynd 22.15. Endurheimt votlendi að Hesti í Borgarfirði. Með slíkum aðgerðum snarminnkar losun CO_2 og N_2O en losun á metangasi eykst (CH_4). Losunin verður fljótt svipuð og frá óröskuðu votlendi eftir að fyllt hefur verið upp í skurðina.

þarf saman landstærðir og losunartölur og í sumum tilfellum bindingu kolefnis, t.d. á svæðum þar sem skógrækt og landgræðsla er stunduð, til þess að fá heildarmynd af kolefnisjöfnuði og losun gróðurhúsalofttegunda frá landi.

Hér er valin sú leið að hnýta saman losunartölur fyrir framræst votlendi og flatarmálstölurnar sem áður voru gefnar í töflu 22.5.

Framræstu votlendin losa nú um 8,430 milljónir tonna CO_2-ígilda samkvæmt stuðlum IPCC. Hins vegar þarf að draga frá hvað þessi votlendi væru að losa væru þau óröskuð (2,84 t CO_2-ígilda/ha/ári), sem er gert í neðstu línu töflunnar. Þar er niðurstaðan fyrir áhrif framræslu 7,448 milljónir tonna CO_2-ígilda á ári. Sú losun er meiri en um 5 milljóna tonna losun frá öðrum þáttum sem taldir eru fram til Loftslagsbókhaldsins (samgöngur, iðjuver, landbúnaður, skip o.fl.). Það er til mikils að vinna að reyna að minnka þessa losun.

22.8.3. Deilur um losun votlenda á Íslandi

Ekki eru allir á einu máli um losun gróðurhúsalofttegunda frá framræstum votlendum. Gagnrýni og rök fela m.a. í sér að votlendin hafi mun hærra hlutfall steinefna hérlendis, að losunarstuðlar kunni að vera ofmetnir, að flatarmál votlendis sé ofmetið, að breytileiki á milli svæða sé mjög mikill, að losun sé minni á kaldari svæðum landsins, að ræktun kunni að skila kolefni í moldina á móti losuninni og að inni í skurðaþekjunni séu m.a. gamlir, hálffylltir skurðir. Hér er ekki dregið úr mikilvægi þeirra sjónarmiða sem endurspegla þessar efasemdir. Stuðst hefur verið við bestu fáanlegu gögn hvers tíma, en mikilvægt er að bæta þau, t.d. gögn um lengd skurða, stærð framræsts lands, mismunandi jarðvegsgerðir og dreifingu þeirra (m.a. jarðvegskort), losun frá mismunandi landeiningum, sem og skurðaþéttleika, stærð áhrifasvæðis, kílræsingu o.s.frv.

Rök sem færð eru fyrir því að íslensk votlendi losi ekki eins mikið kolefni og erlendar mómýrar vegna þess að minna sé af lífrænum efnum í þeim, talið í prósentum, standast þó alls ekki, heildarmagnið er það sem skiptir máli (kg C/m³) sbr. rammagrein á næstu blaðsíðu.

Hluti deilnanna er e.t.v. sprottinn af flóknu framtali gagna til Loftslagssamningsins, en þörf er á einfaldari framsetningu fyrir almenning og fagfólk sem reynir að fóta sig í þessum fræðum. Tekið er undir þau sjónarmið að það sé afar brýnt að efla rannsóknir á Íslandi á losun og bindingu gróður-

Tafla 22.5. Losun gróðurhúsalofttegunda frá óröskuðum og röskuðum votlendum á Íslandi. Tölurnar eru í CO_2-ígildum þar sem tekið hefur verið tillit til bindingar kolefnis í votlendum og losunar CH_4 og N_2O. Ekki er tekið tillit til bindingar í gróðri, m.a. í skógrækt (ÓA og Jón Guðmundsson 2020).

	Landgerð	Stærð	Losun á ári	Samtals á ári
		ha	*t CO_2-ígildi/ha*	*milljón t CO_2-ígildi*
A	Óröskuð votlendi	681 720	2,84	1,936
B	Röskuð votlendi, beit o.fl. not	290 310	23,04	6,689
C	Röskuð votlendi í ræktun	55 600	31,32	1,741
B+C	**Samtals röskuð votlendi**	345 910		**8,430**
A+B+C	Samtals votlendi	1 027 000		10,366
(B-A)+(C-A)*	**Aukin losun vegna framræslu**			**7,448**

*: losun nú að frádreginni losun frá samsvarandi óröskuðu votlendi: aukin losun vegna framræslu.

húsalofttegunda frá landi, votlendi sem þurrlendi. Breytileiki er eflaust mikill á milli jarðvegsgerða og landsvæða. Rannsóknir eiga eflaust eftir að leiða í ljós breytingar á þessum tölum er varða losun, stærð lands o.fl. Þó er ólíklegt með hliðsjón af bestu fáanlegum gögnum nú að stærðargráðan breytist verulega: losun sem telst í milljónum tonna CO_2-ígilda á ári. Það er þessi stærðargráða sem er mergur málsins. Jafnvel þótt komi í ljós að losunin sé helmingi minni en gert er ráð fyrir skv. stuðlum IPCC er losun CO_2 frá framræstum votlendum á Íslandi geigvænleg.

22.9. Landnýting og kolefnisspor

Með aukinni umhverfisvitund vex áhugi neytenda á kolefnisspori fæðunnar og öðrum neysluvörum. Hér er einkum hugað að kjötframleiðslu, sem hefur mun hærra kolefnisspor („sótspor") en aðrar fæðutegundir almennt, ekki síst nautakjöt og lambakjöt, iðulega um 25 kg CO_2-ígilda á hvert kíló kjöts (sjá Environice 2017, FAO 2020 – vefsíða). Þetta teljast há gildi. Kolefnisspor lambakjöts hefur verið metið sem

Losa íslensk votlendi minna af CO_2 en erlendar mómýrar vegna lægra kolefnishlutfalls?

Mold íslenskra votlenda inniheldur áfok og gjóskulög og þau eru sannarlega með lægra hlutfall kolefnis í hverju jarðvegslagi en gengur og gerist í mómýrum norðurslóða. Því er gjarnan haldið fram að þá hljóti losun íslenskra votlenda að vera minni en t.d. finnskra mómýra.

Í þessu felst algengur misskilningur, heildarmagn kolefnis er ekki endilega minna í íslensku votlendunum. Það má ekki gleyma því að gera ráð fyrir rúmþyngd jarðvegsins, sem er meiri í votlendum á Íslandi en í arktískum mómýrum almennt. Tökum dæmi þar sem borið er saman arktískt votlendi með 30% C og rúmþyngd 0,2 t/m³ annars vegar og hins vegar *votjörð* á Suðurlandi með 10% C (sem telst lágt kolefnishlutfall í votlendi) en rúmþyngdina 0,6 t/m³:

Þyngd kolefnis í rúmmetra moldar (kg) =
% C/100 x BD t/m³ x 1000 kg/t

Arktísk *mójörð*: 30/100 x 0,2 x 1000 = 60 kg/m³
Sunnlensk *votjörð*: 10/100 x 0,6 x 1000 = 60 kg/m³

Niðurstaðan er því sú að það er jafnmikið kolefni í rúmmetra af íslensku *votjörðinni* og í finnskri arktískri *mójörð* í þessu dæmi.

Því er almennt ekki hægt að nota þá röksemdafærslu að íslensk votlendi hljóti að losa minna af gróðurhúsalofttegundum vegna þess að þau séu ekki eins lífræn, heildarmagn kolefnis er sambærilegt. Hins vegar er örugglega afar misjafnt hve mikið þau losa, breytileiki í landslagi er mikill sem og grunnvatnsstaðan.

28,6 kg CO_2-ígildi á hvert kg kjöts á Íslandi (Environice 2017). En þá á eftir að meta áhrif nýtingarinnar á landið: losar landið gróðurhúsalofttegundir við nýtinguna? Eða er það jafnvel að binda þær? Slíkir útreikningar hafa verið gerðir í öðrum löndum, m.a. fyrir dilkakjöt, en niðurstöður eru ákaflega misjafnar eftir aðstæðum hverju sinni (t.d. Ripoll-Bosch o.fl. 2013).

Hluti framleiðslu nautakjöts, mjólkurafurða og dilkakjöts nýtir framræst land til fóðurframleiðslu. Því getur kolefnisspor þessarar framleiðslu verið mun hærra en talið er þegar landið er ekki tekið með í reikninginn. Ein ástæða þess að landið hefur ekki verið tekið með er sú að það er talið flókið eða erfitt að færa landnýtinguna inn í reikningsskil gróðurhúsalofttegunda fyrir framleiðsluna. Það gefur þó beinlínis ranga mynd af kolefnissporinu að sleppa landnýtingarþættinum. Það er ekki rétt að erfitt sé að taka losun við fóðurframleiðslu á votlendi með í reikninginn, það er hægt með því að nota fyrirliggjandi stuðla um losun frá votlendi og stærð túna á framræstum votlendum. Unnt er að reikna losun vegna fóðurframleiðslu fyrir hvert býli fyrir sig en jafnframt er hægt að reikna eins konar landsmeðaltal. Erfiðara er að taka beit sauðfjár á úthaga með inn í myndina því þar er óvissan meiri. Hér á eftir eru sýndir útreikningar fyrir dilkakjöt sérstaklega, en færa má rök fyrir því að kolefnisspor nautakjötsframleiðslu sé á svipuðu róli er varðar landnýtingu, en að víðfeðmu mólendi og framræstum úthaga undanskildum. Þá er vikið lítillega að kolefnisspori hrossa.

22.9.1. Kolefnisspor (sótspor) við framleiðslu á lamba- og nautakjöti

Lambakjöt

Rétt er að leggja á það áherslu að flestir þeir er stunda búskap nú tóku við búi áður en loftslagsspor landnýtingar komst á dagskrá samfélagsins. Viðbrögð og úrlausnir hljóta að taka mið af því. Hér verða færð rök fyrir því að losun gróðurhúsalofttegunda vegna beitar og fóðurframleiðslu geti verið gríðarlega mikil, en hún er m.a. tengd

Mynd 22.16. Hér er heyframleiðsla að stærstum hluta á framræstu votlendi og mólendið að hluta í slæmu ástandi með tilheyrandi losun CO_2 út í andrúmsloftið. Kolefnisspor framleiðslu við þessar aðstæður er ansi stórt.

nýtingu framræstra votlenda sem áður var rætt um. Mikilvægt er að hafa í huga að margvíslegar lausnir koma til greina til að draga úr þessari losun – m.a. breytingar á beitarháttum en ekki síður landgræðsla, skógrækt og endurheimt votlenda á bújörðum, ekki síst á framræstum votlendum sem ekki eru nýtt til fóðurframleiðslu. Unnt væri að breyta stuðningsgreiðslum til landbúnaðar með markvissum hætti til að auðvelda nauðsynlega þróun.

Útreikningar ÓA og Jóns Guðmundssonar (2020) benda til þess að kolefnisspor dilkakjöts – miðað við núverandi stuðla IPCC fyrir losun úr framræstum votlendum – geti numið hundruðum kg CO_2-ígilda á hvert kg dilkakjöts ef stór hluti vetrarfóðurs er framleiddur á framræstu votlendi. Það samsvarar flugferð til Evrópu. Ef mikið er af framræstu landi sem ekki er nýtt til túnræktar á sauðfjárbúum og beitt er á haglendi sem er í slæmu ástandi verða gildin ansi „skrautleg“, jafnvel hærri en 1 000 kg CO_2-ígilda á hvert kíló kjöts, sem sýnir svo ekki verður um villst að ekki ætti að framleiða dilkakjöt þar sem losunin er mest og alls ekki þar sem hagar eru í slæmu ástandi. Þá er kolefnisspor lambakjötsframleiðslu einnig mjög hátt þar sem vetrarfóður er einvörðungu ræktað á framræstu landi og mikið af öðru landi er einnig framræst.

Á mörgum stöðum væri unnt að færa kolefnisbindingu til tekna í kolefnisbókhaldi dilkakjöts. Sum sauðfjárbú nýta einvörðungu þurrlendi til heyframleiðslu eða beitar og sums staðar eru hagar það góðir að landið er að binda kolefni. Í þeim tilfellum gæti framleiðsla dilkakjöts verið kolefnishlutlaus – binding í landi vegur þá upp á móti um 29 kg CO_2-ígilda losun á hvert kg kjöts þegar landið er ekki talið með. Mikilvægt er að neytendur hafi innsýn í losun sem fylgir framleiðslu vörunnar sem þeir kaupa – þeir ættu að eiga rétt á að fá slíkar upplýsingar. Munurinn á kolefnishlutlausri framleiðslu og kjöti sem hefur sótspor sem nemur hundruðum kg CO_2-ígilda á hvert kg kjöts er afgerandi!

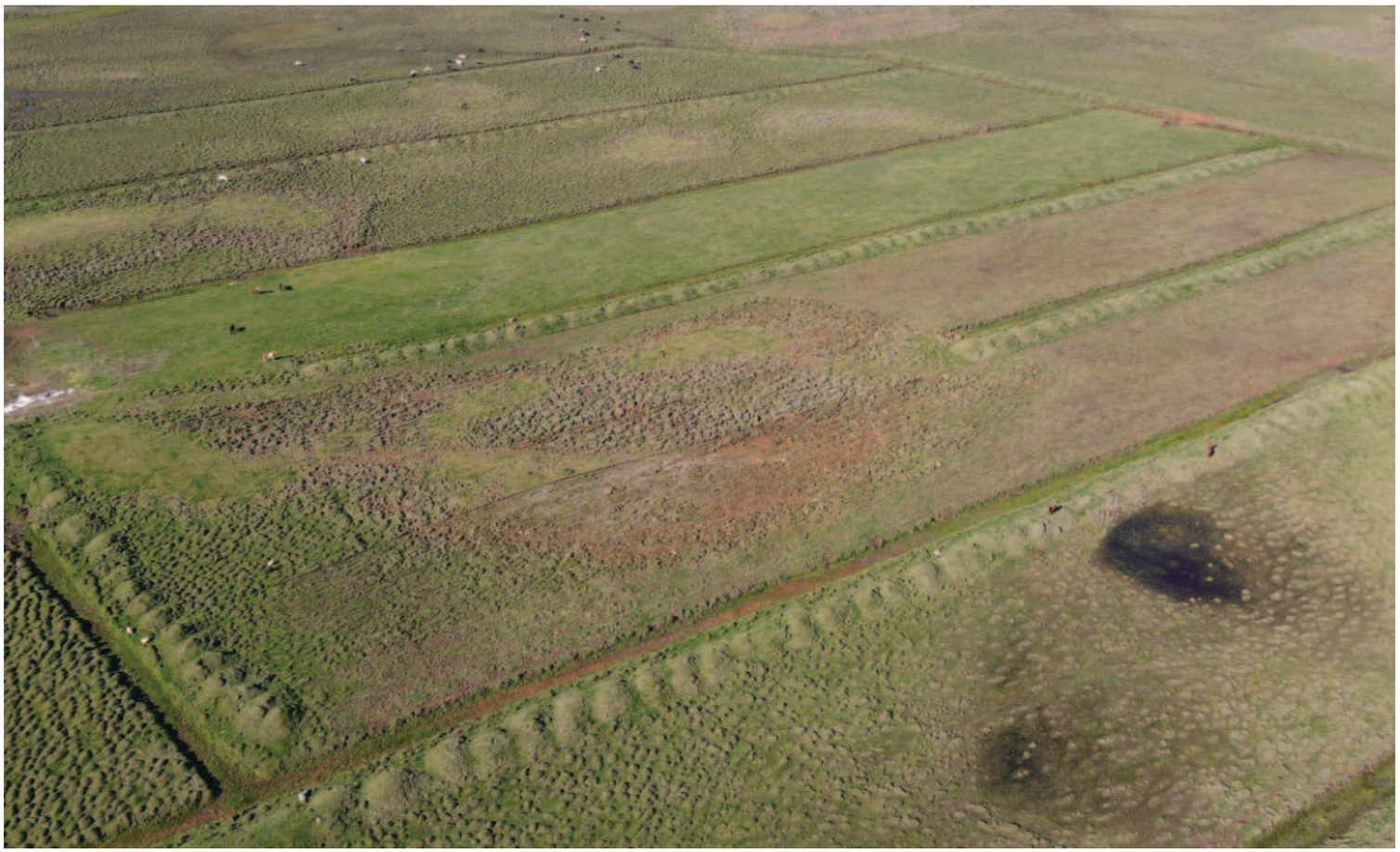
Mynd 22.17. Beit nautgripa á framræstu votlendi. Losun úr framræstu votlendi er mikil og sums staðar er gengið ansi nærri landinu sem eykur væntanlega verulega á losun úr rofnu yfirborðinu.

Nautakjöt
Mikil losun er úr framræstu votlendi sem notað er til fóðurframleiðslu og fyrir beit nautgripa (mynd 22.17). Telst sú losun til kolefnisspors við nautakjötsframleiðslu? Já, það gerir hún. Yfirleitt er minna land undir og oft einsleitara í samanburði við framleiðslu dilkakjöts. Niðurstaða fyrir losun í nautakjötsframleiðslu yrði af sambærilegri stærðargráðu og í framleiðslu dilkakjöts (að hágildunum sem fylgja stórum framræstum svæðum og illa förnu mólendi undanskildum).

Gildin eru afar breytileg eftir eðli túna og beitilands. Það þýðir að lægri mörk væru frá um 25 kg CO_2-ígilda losun þar sem einvörðungu þurrlendi og óframræst land er nytjað við framleiðsluna og án þess að gengið sé nærri landinu. Efri mörk væru við hundruð kg CO_2-ígilda losun þar sem framræst votlendi væru undirstaða framleiðslunnar. Þá myndi það auka verulega á losunina ef gengið væri nærri beitilandi sem tæki þá að losa ennþá meira – en því miður eru dæmi um slíkt (mynd 22.17). Mikilvægt er að framleiðslugreinin fái aðgang að reiknivélum fyrir kolefnisspor mismunandi framleiðsluhátta nautakjöts þar sem eðli landsins og landnýting eru tekin með í reikninginn. Þá er mikilvægt að neytendur verði upplýstir um kolefnisspor kjötsins sem í boði er.

22.9.2. Hesturinn

Kolefnisspor hrossa er ákaflega misjafnt eftir því hvernig beit og öflun vetrarfóðurs er háttað. Ef hagaganga byggist á beit á framræstu votlendi er kolefnissporið ansi stórt (mynd 22.18). Sem dæmi má miða við 1–4 ha beitilands á framræstum mýrum fyrir hvern hest og losun upp á um 20,2 t CO_2 á ha (heildarlosun mínus náttúruleg losun – núverandi IPCC-gildi).



Mynd 22.18. Hross á beit á framræstu votlendi sem ekki er notað til heyframleiðslu nema að litlu leyti. Kolefnisspor hvers hests er mjög stórt þegar beitt er á framræst votlendi, jafnvel mælt í tugum tonna miðað við 1–4 ha á hvert hross. Hér er sauðfé einnig á beit svo að kolefnissporið dreifist einnig á dilkakjötið. Mikilvægt er að opna umræðu um kolefnisspor sem afleiðingu af því að eiga hesta.

Kolefnissporið verður þá 20 til 81 tonn (20 000–81 000 kg) CO_2-ígilda á hvert hross sem beitt er á slíkt land. Þessi losun er margföld losun fólksbifreiðar sem nýtir jarðefnaeldsneyti (2000–3000 kg CO_2-ígilda á ári). Mikil óvissa fylgir útreikningum af þessu tagi og breytileikinn er ansi mikill. En útreikningarnir benda sterklega til þess að losun vegna hrossaeignar geti verið gríðarlega há. Mikilvægt er að meta og mæla losun vegna hrossaeignar af meiri nákvæmni og taka síðan tillit til hennar við umsýslu á kolefnisbúskap landsins. Þá er þekking á þessari losun mikilvæg við mat á vistspori einstaklinga, m.a. þeirra sem stefna að því að kolefnisjafna neyslu.

22.10. Efnaveðrun í mold, efnarof og kolefnisbinding

Regnvatn inniheldur koltvísýring úr andrúmsloftinu sem myndar bíkarbónat (HCO_3^-) í moldinni sem stuðlar að efnaveðrun í jarðvegi og skilar að lokum kolefnissamböndum til sjávar. Hluti þessa kolefnis binst sem kalk í setlögum á sjávarbotni fyrir tilstuðlan sjávarlífvera á borð við kalkþörunga, skeljar og kórala. Úr verður hringrás kolefnis á milli andrúmslofts, moldar og hafs. Þessi hringrás er afar viðkvæm fyrir breytingum á sýrustigi sjávar, sem þegar hefur súrnað vegna losunar gróðurhúsalofttegunda. Við súrnun minnkar geta sjávar til að binda CO_2 úr andrúmsloftinu. Hringrásinni sem tengist efnaveðrun í mold voru gerð góð skil í riti Sigurðar Reynis Gíslasonar (2012) um kolefnishringrásina.

Sem fyrr segir í þessu riti er efnaveðrun á Íslandi afar hröð. Plagióklas er ein helsta steindin í íslensku bergi. Hún inniheldur umtalsvert magn af kalsíum (Ca) og það gerir einnig illa kristallað gler (oft 6–8% Ca, Bergrún Arna Óladóttir o.fl. 2011, Sveinn P. Jakobsson o.fl. 2008) og fleiri bergefni. Við efnaveðrun í moldinni losnar um Ca^{++} og til verður bíkarbónat (HCO_3^-) auk allófans og fleiri efnasambanda (sjá bók Sigurðar Reynis Gíslasonar 2012, bls. 61). Kalsíum og bíkarbónat berast með vatni til sjávar þar sem kalsíum myndar að lokum kalk ($CaCO_3$) – kolefnið hefur þá bundist í seti sjávar. Efnaveðrun í mold veldur því „efnarofi“ á uppleystum efnum frá mold til sjávar.

Efnarof er talið binda um 3,1 milljón tonna CO_2-ígilda á ári vegna efnaveðrunar á Íslandi (Sigurður Reynir Gíslason 2012). Þetta gildi er því af svipaðri stærðargráðu og losun vegna bruna jarðefnaeldsneytis, iðnaðar o.fl. í landinu (landið ekki talið með). Líkur eru á að þessi binding aukist með hlýnandi loftslagi því rannsóknir sýna að efnarofið eykst ört með hækkandi meðalhita (Sigurður Reynir Gíslason o.fl. 2009). Þá er einnig ljóst að efnarofið er örara undir gróðri en á berangri – jafnvel 2–4 sinnum virkara. Efnarofið eykst einnig með aukinni ákomu vatns og afrennsli þess af landi (sjá Sigurð Reyni Gíslason 2012).

Binding vegna efnarofs er ekki talin fram í loftslagsbókhaldi í samningi Sameinuðu þjóðanna, ekki frekar en losun vegna eldgosa, því talið er að maðurinn hafi lítil áhrif á hana, hún sé eins konar fasti. Það er hins vegar ekki alveg rétt því efnarofið eykst með gróðurhulu og kannski ekki síst þar sem úrkoma er mikil á láglendi (hlýrra) og auðveðruð glerkorn eru í jarðveginum. Það á við mjög víða á Íslandi.

Sá eiginleiki basalts að hvarfast við koltvísýring og mynda torleystar steindir er nýttur í verkefnum við jarðhitasvæði þar sem CO_2 er dælt niður í bergið. Þar má nefna svokallað CarbFix-verkefni á Hellisheiði.

22.11. Kolefnisjöfnun – álitaefni

Skógrækt, landgræðsla og vistheimt geta bundið umtalsvert kolefni í jarðveginum allt þar til jafnvægi er náð á milli moldar og umhverfis. Vitaskuld skiptir máli hver upphafsstaðan er – hve mikið er af kolefni í kerfinu þegar aðgerðir hefjast. Við uppgræðslu á auðnum er byrjað með mjög rýran forða kolefnis sem hægt er að auka verulega. Þegar endurheimt eru öflug vistkerfi safnast mikið af kolefni fyrir í moldinni. Auk þess safnast kolefni fyrir í gróðrinum, t.d. í trjám við skógrækt, en hér er athyglinni fyrst og fremst beint að moldinni. Endurheimt votlendis minnkar hins vegar losun CO_2 út í andrúmsloftið, og þar sem mjög mikill munur er á losun framræsts votlendis og þess sem er náttúrulegt er ávinningur af endurheimt votlendis mikill og áhrifin koma fljótt fram.

22.11.1. Tíminn

Það tekur mislangan tíma að binda það magn kolefnis sem lofað er við sölu kolefnisjöfnunar. Tré eru áratugi að binda hið tiltekna magn eða ná þeim vaxtarhraða sem dugir til að binda ákveðið magn á ári. Með öðrum orðum: það tekur langan tíma frá því að trjágróður vex úr grasi, jafnvel áratugi, þar til hann hefur náð að fjarlægja hið skaðlega CO_2 úr andrúmsloftinu, hvort heldur sem það er ákveðið magn á ári eða heildarmagn – þ.e. að veita þá þjónustu sem neytandinn keypti. Þetta á einnig við um bindingu í jarðvegi með landgræðslu ef seld er ákveðin binding sem tekur áratugi að ná. Því eru þessar aðferðir háðar því hversu mikil „þolinmæði“ er byggð inn í kerfið: hvað má líða langur tími þar til ákveðinni bindingu er náð. Öðru máli gegnir um bindingu þar sem skógur er þegar vaxinn upp eða landgræðsluaðgerðir þegar teknar að skila árangri – og þetta þarf að hafa í huga þegar höndlað er með kolefnisjöfnun. Endurheimt votlendis minnkar hins vegar fljótt losun á gróðurhúsalofttegundum frá kerfinu, jafnvel á 1–3 vikum. Þá kemur einnig til álita til hvað langs tíma minnkuð losun er seld: minnkuð losun til eins árs (um 19 t CO_2-ígildi/ha á ári samkvæmt núverandi IPCC-stuðlum) eða t.d. til 10 ára (um 190 t CO_2-ígildi á 10 árum). Af þessu er ljóst að skilgreina þarf vel markmið aðgerða og tímann sem það tekur að ná settum markmiðum, en það hefur m.a. áhrif á kostnað á hvert CO_2-ígildi sem er jafnað. Neytandi sem kaupir kolefnisjöfnun á netinu fær iðulega afar litlar upplýsingar um meginforsendur af þessu tagi.

22.11.2. Kostnaður

Aðgerðir sem binda kolefni eru misdýrar á hvert bundið kíló eða tonn CO_2-ígildis. Ekki er nóg að taka tillit til hraða bindingar á tiltekinni flatarmálseiningu (t CO_2-ígildi/ha á ári) heldur þarf einnig að skoða kostnað við bundin CO_2-ígildi og þá eftir tiltekinn tíma. Kostnaður við gróðursetningu á um eins ha skógi er umtalsverður en venjulega mun minni en við að hefja landgræðsluaðgerðir á hvern ha (t.d. 50–150 þúsund kr. eftir eðli inngripa; mat byggt á gögnum frá Landgræðslunni, 2020). Heildarmagn bundins kolefnis verður mun meira í stórvöxnum skógi samanborið við endurheimt mólendis á hvern hektara, svo dæmi sé tekið. Kostnaður við bundið t CO_2-ígildis virðist svipaður fyrir landgræðslu og skógrækt (ÓA og Jón Guðmundsson 2020). Útkoma úr slíkum samanburði fer að vísu nokkuð eftir því við hvaða tímaspönn er miðað (20 ár, 50 ár, 100 ár, 200 ár) og hvers kyns skógrækt og landgræðsla er stunduð.

Kostnaður við endurheimt votlendis er ákaflega misjafn en er að jafnaði minni en útplöntun á skógarplöntum á jafnstóru svæði. Minnkuð losun í votlendinu (ábatinn) er meiri en í skógrækt og landgræðslu að öllu jöfnu

Mynd 22.19. Sjálfgræðsla birkis á svæði þar sem áður var líklega mikil losun CO_2 úr ógrónum moldum og melum. Endurheimt birkiskóga er hagkvæm leið til að binda kolefni og felur jafnframt í sér mikinn umhverfisávinning, sem er ekki síður mikilvægt. Myndin er tekin á Þórsmerkursvæðinu árið 2022.

á hvern hektara og því er kostnaður á hvert kolefnisjafnað tonn CO_2-ígilda yfirleitt lægri fyrir votlendi, auk þess sem ábatinn næst strax en getur tekið áratugi í landgræðslu eða skógrækt.

Friðun samfelldra svæða fyrir búfjárbeit með uppsöfnun á kolefni í mold getur á tíðum verið ódýrasta og hagkvæmasta aðgerðin á mælikvarða kostnaðar í krónum á bundið tonn CO_2-ígildis ásamt endurheimt birkiskóga þar sem sjálfgræðsla er hluti aðgerða (mynd 22.19). Slíkar aðgerðir eru ekki einungis hagkvæmar heldur fylgir þeim mikill umhverfisávinningur, sem er ekki síður mikilvægt, rétt eins og landgræðslu og skógrækt! Gera þarf ráð fyrir að taka kostnað vegna eftirfylgni til að aðgerðirnar heppnist með í reikninginn, sé aðgerðum sem þessum beitt til kolefnisjöfnunar.

22.11.3. Umhverfisáhrif kolefnisbindingar

Margar þeirra aðgerða sem notaðar eru til að binda kolefni hafa sannarlega umhverfislegan ávinning í för með sér – meiri frjósemi moldar, líffjölbreytileika og í sumum tilfellum endurheimt landgæða eftir vistkerfishrun (Ása L. Aradóttir 2009), sbr. endurheimt birkiskógarins í Þórsmörk (mynd 22.19). Mikilvægt er að aðgerðir til kolefnisjöfnunar valdi ekki umhverfisskaða að öðru leyti – það stoðar ekki að leysa eitt umhverfisvandamál með því að búa til annað! Slíkt hefur verið nefnt rangsnúin aðferðafræði (e. perverse methods). Alþjóðlegar rannsóknir sýna að rangsnúnum aðferðum og hvötum hefur iðulega verið beitt í nafni kolefnisbindingar (Jackson o.fl. 2005, Lindenmayer o.fl. 2012).

Mynd 22.20. Lúpína við línuveginn á Uxahryggjum. Um er að ræða umdeilda aðferð við uppgræðslu. Kostirnir eru fremur litlir og héðan mun hún dreifa sér um ógróið land., Útkoman er þó umdeilanleg og getur haft neikvæð umhverfisleg áhrif. Einnig er hugsanlegt að svæði sem þessi taki að losa N_2O vegna niturofauðgi og þá er loftslagsávinningur enginn.

Hvatarnir geta m.a. lotið að styrkjakerfum, niðurgreiðslum, skattaívilnunum, stefnumótun stjórnvalda, og geta einnig verið beinar aðgerðir til kolefnisbindingar eða aðgerðir sem hafa óbein áhrif á flæði gróðurhúsalofttegunda. Í samningi Sameinuðu þjóðanna um líffræðilega fjölbreytni er beinlínis mælt gegn aðferðum til kolefnisbindingar til að draga úr hlýnun lofthjúpsins ef þær eru skaðlegar fyrir umhverfið að öðru leyti. Hér má sérstaklega nefna notkun ágengra plöntutegunda og einræktun í skógrækt (e. monoculture), sem er ekki talin réttlætanleg aðferðafræði til kolefnisjöfnunar (mynd 22.20).

Einræktun og notkun ágengra trjátegunda gengur einnig gegn Heimsmarkmiðum Sameinuðu þjóðanna (e. Sustainable Development Goals) sbr. viðamikla úttekt frá 2019 (IPBES 2019). Alþjóðlegur vísindahópur á vegum Evrópusambandsins varaði við skógrækt þar sem notaðar væru hraðvaxta tegundir og einrækt vegna neikvæðra umhverfisáhrifa, m.a. fyrir vatnshag, líffjölbreytileika, alvarlegri afleiðingar skógarelda og þurrka og hugsanlega breytingu á frjósemi og samsetningu jarðvegs (Jackson o.fl. 2005). Sams konar ályktun var birt í skýrslu IPBES (2019), vísindaarms samningsins um verndun líffræðilegrar fjölbreytni (sjá einnig Wang og Cao 2011). Þessi álitamál hafa komið upp hérlendis, m.a. í tengslum við gerð Skógræktaráætlunar 2022.

Stórfelld landgræðsla og endurheimt vistkerfa þurfa að miða að endurheimt fjölbreyttra búsvæða. T.d. má ekki ganga of nærri opnu gróðurlendi sem er mikilvægt búsvæði vaðfugla (Tómas Grétar Gunnarsson 2020), sem er áhyggjuefni þegar kemur að áætlunum um stórfellda nytjaskógrækt á Íslandi (Aldís Erna Pálsdóttir o.fl. 2022). Þá er rétt að hafa í huga að endurheimt á stórum samfelldum svæðum gæti m.a. haft endurheimt votlendissvæða í för með sér, sem eykur fjölbreytni búsvæða þar sem nú eru auðnir auk annarra mikilvægra búsvæða fugla. Markmiðssetning, góður undirbúningur og vönduð eftirfylgni eru nauðsynlegir þættir fyrir aðgerðir af þessu tagi.

22.12. Kolefnisbinding í skógrækt og landgræðslu

22.12.1. Núverandi binding

Unnt er að binda mikið magn kolefnis með landgræðsluaðgerðum og skógrækt. Bindistuðlar á hverja flatarmálseiningu eru háir fyrir skógrækt, allt frá um 3 t CO_2-ígilda/ha á ári upp í >20 t CO_2-ígilda/ha á ári í hraðvaxta alaskaasparteigum. Meðaltal fyrir sitkagreni er 8,3 t CO_2-ígildi/ha, um 7 t CO_2-ígildi/ha fyrir stafafuru (sbr. grein Arnórs Snorrasonar og Sigríðar Júlíu Brynleifsdóttur 2018), en lægri stuðlar eru gefnir upp fyrir birki. Viðamiklar rannsóknir hafa verið gerðar á bindingu í skógrækt, sem og kolefnisflæði í skógum, m.a. hér á landi (Brynhildur Bjarnadóttir o.fl.

2007, 2009, Valentini o.fl. 2000). Með skógrækt er fyrst og fremst verið að binda kolefni í viði sem er ekki til umræðu að öðru leyti í þessu riti en er getið hér til samanburðar. Þó er skógrækt einnig stunduð á lítt grónu landi og þá verður binding í mold sambærileg og í landgræðslu auk bindingar í viði.

Endurheimt vistkerfa í slæmu ástandi safnar kolefni bæði í gróðri og jarðvegi. Hér er bindingin lægri á hverja flatarmálseiningu en yfirleitt er unnið með mun stærri svæði í einu samanborið við skógrækt. Lítum fyrst til landgræðslu á illa grónu landi. Rannsóknir sem gerðar voru um síðustu aldamót á misgömlum rannsóknasvæðum með samanburði við óuppgrædd svæði á sömu slóðum gáfu til kynna bindihraða sem var yfirleitt nálægt 0,06 kg C/m² á ári, eða 2,2 t CO_2-ígilda/ha á ári (ÓA o.fl. 2000, 2002).

Landgræðslan notar gildið 0,051 kg C/m² á ári fyrir landgræðslu við skýrslugjöf til Loftslagssamnings Sameinuðu þjóðanna, sem einnig byggist á mælingum Landgræðslunnar sem ekki hafa verið birtar ennþá. Þessi stuðull samsvarar 1,9 CO_2-ígildum á ha á ári (fyrir árið 2017; Keller o.fl. 2020, bls. 147), en einnig hefur stuðullinn 2,1 t CO_2-ígildi á ári verið notaður og er þá aukning í gróðri tekin með.

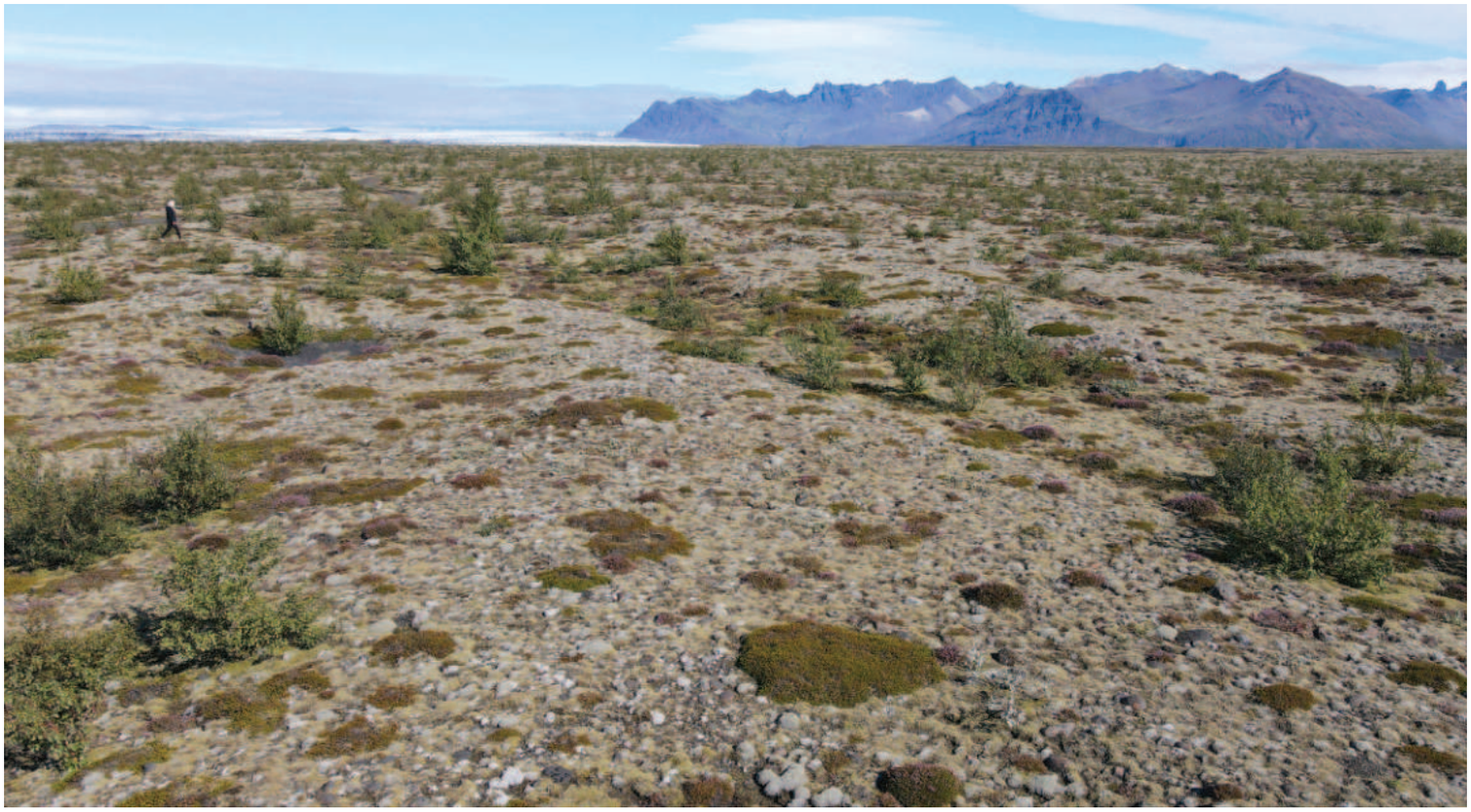
Landgræðsla og skógrækt skila nú tæplega **1 milljón t CO_2-ígilda** á ári í bindingu kolefnis, sem er afar mikilsvert og gefur áheit um hvað unnt væri að gera með aukinni áherslu á líffræðilegar aðferðir við bindingu kolefnis.

22.12.2. Breytt landnýting og vistheimt á stórum samfelldum svæðum

Það hefur legið fyrir lengi að stór svæði landsins eru í bágbornu ástandi, sum illa gróin þrátt fyrir að næg úrkoma og hlý sumur gefi tilefni til annars. Þetta á m.a. við um heilu afréttina, svo sem Biskupstungnaafrétt (mynd 22.21), Landmannaafrétt og Rangárvallaafrétt, svo dæmi séu tekin af Suðurlandi. Þá hefur kolefnisforði lækkað verulega í mörgum þurrlendisvistkerfum vegna langvarandi nýtingar og líklegt er að losun slíkra kerfa nemi nú um 1–8 milljónum t CO_2-ígilda á ári, eins og áður var rætt um. Mikilvægt er að leggja aukna áherslu á að stöðva þessa losun og auka bindingu í illa förnum vistkerfum.

Þörf er á nýrri sýn á nýtingu lands í slæmu ástandi. Fyrsta skrefið er að viðurkenna vandann og átta sig á því að hagaðilar sem láta sig varða um nýtingu stórra afréttarsvæða eru ekki einvörðungu sauðfjárbændur sem reka á fjall. Bætt

Mynd 22.21. Illa farið afréttarsvæði á Suðurlandi. Biskupstungnaafréttur er ennþá nýttur til beitar (árið 2022). Hér væri unnt að binda gríðarlega mikið kolefni með hagkvæmum hætti með vistheimtarverkefnum. Svæðið er þjóðlenda og nýting þess, sem og endurheimt landgæða, varðar samfélagið í heild – alls ekki einvörðungu þá sem nýta svæðið nú til beitar.



Mynd 22.22. Birkiskógur sem vex upp á Skeiðarársandi er dæmi um aukna kolefnisbindingu á landslagsskala. Manneskjan til vinstri er til viðmiðunar en myndin er tekin í um 15 m hæð. Mjög öflugar fræuppsprettur innan þjóðgarðsins í Skaftafelli valda því að nægt fræregn fellur á stóru svæði. Framvindan er framarlega á kúrfunni fyrir framvindu kerfisins, en vænta má þess að hraðinn aukist stigvaxandi eftir því sem þau tré sem hér sjást fara að dreifa meira af fræi um nágrennið. Þarna er kominn vísir að einum víðfeðmasta skógi landsins. Myndin er tekin árið 2020.

ástand landsins, vistheimt og fjölþætt nýting á borð við bindingu kolefnis ættu að verða meginmarkmið nýtingar þessara svæða. Slík sýn er mjög í anda alþjóðlegrar þróunar og er fullkomlega tímabær á áratug Sameinuðu þjóðanna um vistheimt (e. ecological restoration, áratugurinn 2021–2030).

Umfangsmikil vistheimtarverkefni geta haft ómældan umhverfisávinning og jákvæð áhrif á samfélög í dreifbýli. En hverju geta verkefni af þessu tagi skilað í kolefnisbindingu? Áður var fjallað um að binding í jarðvegi landgræðslusvæða væri af stærðargráðunni 0,051 kg C/m² í mold á ári sem samsvarar 1,9 t CO_2-ígilda á ha á ári, sem er bindistuðull sem notaður er við loftslagsbókhald landsins (Keller o.fl. 2020).

En nú er rétt að lyfta mælikvarðanum upp á stærri landsvæði, þ.e. á hvern ferkílómetra, og þá verður gildið 190 t CO_2-ígilda á km² á ári og binding í gróðri er þó ekki meðtalin. Hér er hugsunin sú að klæða landið birkiskógi (þó með opnum graslendissvæðum og votlendum þar sem við á). Meðaltalsstuðlar í ofanjarðarvexti birkis hafa verið tilgreindir sem 3–4 t CO_2-ígilda/ha á ári (Arnór Snorrason og Sigríður Júlía Brynleifsdóttir 2018), sem nemur 300–400 t CO_2-ígilda á hvern ferkílómetra á ári.

Heildarbinding í gróðri og mold er því 490–590 CO_2-ígildi á km² á ári. Vistheimt á 1 000 km² afréttarsvæði getur bundið 490–590 þúsund tonn CO_2-ígilda á ári í mold og gróðri en 190 000 tonn CO_2-ígilda á ári í moldinni einni saman þegar binding er hafin á öllu svæðinu. Það markmið næðist í hæfilegum áföngum eftir því sem landgræðslustarfi miðaði áfram. Sum illa farin svæði tækju þegar að binda mikið kolefni við friðun fyrir sauðfjárbeit. Mikilvægt er að fylgjast með breytingum og mæla þær þegar frá upphafi aðgerða.

Mynd 22.23. Vistheimt í Þórsmörk. Svæðið sem sést á myndinni var að mestu orðið skóglaust áður en Mörkin var friðuð. Sums staðar var sáð og borið á moldir, víðistiklum stungið niður á nokkrum svæðum o.fl., en inngrip voru þó fremur takmörkuð miðað við heildarstærð svæðisins. Þróunin tók kipp eftir að friðun svæðisins fyrir beit var aukin með beitarfriðun Almenninga um 1990 (Hreinn Óskarsson, munnleg heimild). Myndin er tekin árið 2020.

22.13. Lokaorð

Andrúmsloft jarðar fer hlýnandi og því fylgir vá. Nauðsynlegt er að þjóðir heimsins bregðist við af fullum þunga með því að draga úr losun og binda CO_2 eftir því sem tækifæri gefast. Ísland er í einstakri stöðu hvað þetta varðar. Endurheimt vistkerfa er meðal mikilvægustu aðgerðanna sem unnt er að hagnýta til að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda og binda þær. Jafnframt þarf að stíga löngu tímabær skref til að laga beitarnýtingu að landgæðum: kolefnisspor beitar á illa förnu landi er „stjarnfræðilega“ þungt. Landið er langsamlega stærsti losunarþátturinn á Íslandi og þar bjóðast líka möguleikar til að ná árangri. Um leið er stuðlað að endurheimt landgæða – komandi kynslóðum til hagsbóta. Bætt landnýting getur bundið ókjörin öll af kolefni í vistkerfum án mikils tilkostnaðar sem iðulega væri hægt að ná fram með nauðsynlegum breytingum á stuðningskerfi þjóðarinnar við landbúnað. Áherslur stuðningsins gætu í auknum mæli miðast við bindingu og að minnka losun gróðurhúsalofttegunda og styðja við vistheimt. Hér var lögð áhersla á að forðast neikvæð umhverfisáhrif vegna aðgerða sem ætlað er að stuðla að kolefnisjöfnun. Með því að draga úr bruna jarðefnaeldsneytis ásamt markvissum aðgerðum til að endurheimta votlendi og minnka losun gróðurhúsalofttegunda frá þurrlendi með bættri landnýtingu – og með aukinni skógrækt og vistheimt á landslagsskala (þúsundir km²) – má fara langt á þeirri braut að gera Ísland að kolefnishlutlausri þjóð. Til mikils er að vinna.

Heimildir

Rétt er að benda á tvö íslensk rit sem eru gott ítarefni fyrir þá sem vilja kynna sér kolefnishringrás og gróðurhúsaáhrif. Sigurður Reynir Gíslason gaf út bók árið 2012 sem nefnist *Kolefnishringrásin* þar sem m.a. er fjallað um losun gróðurhúsalofttegunda á Íslandi og áhrif efnaveðrunar og annarra jarðfræðilegra þátta á hringrásina. Ólífrænt kolefni fær talsvert rými í bókinni, en þar er bæði litið til forsögulegs tíma og nútíðar. Þá er bók Halldórs Björnssonar (2008), *Gróðurhúsaáhrif og loftslagsbreytingar*, mikilvæg fyrir þá sem vilja kynna sér hvernig andrúmsloftið fer hlýnandi. Hluti efnis þessa kafla var birtur áður í riti LbhÍ nr. 133, *Loftslag, kolefni og mold* (ÓA og Jón Guðmundsson 2020).

Arnór Snorrason og Sigríður Júlía Brynleifsdóttir 2018. Áhrif fjórföldunar nýskógræktar á Íslandi. Skógræktarritið 2018:36–47.

Aldís Erna Pálsdóttir, J.A. Gill, J.A. Alves, Snæbjörn Pálsson, V. Méndez, H. Ewing og Tómas G. Gunnarsson 2022. Subarctic afforestation: effects of forest plantations on ground-nesting birds in lowland Iceland. Journal of Applied Ecology doi:10.1111/1365-2664.14238

Ása L. Aradóttir 2009. Landgræðsla, líffræðileg fjölbreytni og náttúruvernd. Náttúrufræðingurinn 78:21–28.

Áslaug Helgadóttir, Emma Eyþórsdóttir og Torfi Jóhannesson 2013. Agriculture in Iceland – A grassland based production. Grassland Science in Europe 18:30–43.

Bergrún Arna Óladóttir, Olgeir Sigmarsson, Guðrún Larsen og J-L. Devidal 2011. Provenance of basaltic tephra from Vatnajökull subglacial volcanoes, Iceland, as determined by major- and trace-element analyses. The Holocene 21:1037–1048.

Bartoli, F. og G. Burtin 2007. Organo-mineral clay and physical properties in COST-622 European volcanic soils. Í: Ólafur Arnalds, F. Bartoli, P. Buurman, Hlynur Óskarsson, G. Stoops, E. García-Rodeja (ritstj.), Soils of Volcanic Regions in Europe. Springer, Heidelberg, Þýskaland. Bls. 469–491.

Brynhildur Bjarnadóttir, Bjarni D. Sigurðsson og A. Lindroth 2007. Estimate of annual carbon balance of a young Siberian larch (Larix sibirica) plantation in Iceland. Chemical and Physical Meteorology 59:891–899.

Brynhildur Bjarnadóttir, Bjarni D. Sigurðsson og A. Lindroth 2009. A young afforestation area in Iceland was a moderate sink to CO_2 only a decade after scarification and establishment. Biogeosciences 6:2895–2906.

Christensen, T.R., A. Ekberg, L. Ström, M. Mastepanov, N. Panikov, M. Öquist, B.H. Svensson, H. Nykänen, P.J. Martikainen og Hlynur Óskarsson 2003. Factors controlling large scale variations in methane emissions from wetlands. Geophysical Research Letters 30:1414, doi:10.1029/2002GL016848.

Crump, J. (ritstj.) 2017. Smoke on Water – Countering Global Threats From Peatland Loss and Degradation. A UNEP Rapid Response Assessment. United Nations Environment Programme and GRID-Arendal, Nairobi, Kenya. www.grida.no.

Environice 2017. Losun gróðurhúsalofttegunda frá sauðfjárbúum á Íslandi og aðgerðir til að draga úr losun. Unnið fyrir Landssamtök sauðfjárbænda. Birna Sigrún Hallsdóttir og Stefán Gíslason, Umhverfisráðgjöf Íslands ehf/ Environice, Borgarnes.

Fanney Ósk Gísladóttir, Jón Guðmundsson og Sunna Áskelsdóttir 2010. Mapping and density analyses of drainage ditches in Iceland. Mapping and monitoring of Nordic Vegetation and landscapes, Conference proceedings. Í: B. Anders, W. Dramstad, W.J. Fjellstad (ritstj.), Viten fra Skog og landskap. Norsk Institutt for Skog og Landskap, -1/10., Ás, Noregur. Bls. 1431:115.

FAO 2014. Towards climate-responsible peatlands management. Í: R.A.A. Biancalani (ritstj.), Mitigation of Climate Change in Agriculture. FAO, Róm, Ítalía. Bls. 497–540.

Guðrún Gísladóttir, Egill Erlendsson, R. Lal og J. Bigham 2010. Erosional effects on terrestrial resources over the last millennium in Reykjanes, southwest Iceland. Quaternary Research 73:20–32.

Gunnhildur Eva G. Gunnarsdóttir 2017. A novel approach to estimate carbon loss from drained peatlands in Iceland. MS-ritgerð, Háskóli Íslands, Líf- og umhverfisvísindadeild, Reykjavík.

Halldór Björnsson 2008. Gróðurhúsalofttegundir og loftslagsbreytingar. Umhverfisrit Bókmenntafélagsins. Hið íslenska bókmenntafélag, Reykjavík.

Hlynur Óskarsson 1998a. Icelandic Peatlands: Effects of draining on trace gas release. Doctoral dissertation, University of Georgia, Athens, Georgia, USA.

Hlynur Óskarsson 1998b. Framræsla votlendis á Vesturlandi. Í: Jón S. Ólafsson (ritstj.), Íslensk votlendi. Verndun og nýting. Háskólaútgáfan, Reykjavík. Bls. 121–129.

Hlynur Óskarsson, Ólafur Arnalds, Jón Guðmundsson og Grétar Guðbergsson 2004. Organic carbon in Icelandic Andosols: geographical variation and impact of erosion. Catena 56:225–238.

Inga Vala Gísladóttir 2010. Athugun á hentugleika WIV votlendisvísitölunnar við íslenskar aðstæður. BSc-ritgerð, Umhverfisdeild, Landbúnaðarháskóli Íslands.

IPBES 2019. Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Í: S. Díaz, J. Settele, E.S. Brondízio, H.T. Ngo, M. Guèze, J. Agard, A. Arneth og 22 fleiri (ritstj.), Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, IPBES secretariat, Bonn, Þýskaland.

IPCC 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK og New York, USA.

IPCC 2014. 2013: Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Í: T. Hiraishi, T. Krug, K. Tanabe, N. Srivastava, J. Baasansuren, M. Fukuda, T.G. Troxler (ritstj.), Wetlands. IPCC, Genf, Sviss.

Jackson, R.B., E.G. Jobbágy, R. Avissar, S. Baidya Roy, D.J. Barrett, C.W. Cook, K.A. Farley, D.C. le Maitre, B.A. McCarl og B.C. Murray 2005. Trading Water for Carbon with Biological Carbon Sequestration. Science 310:1944–1947.

Jón Guðmundsson 2016. Greining á losun gróðurhúsalofttegunda frá íslenskum landbúnaði. Greinargerð unnin fyrir Umhverfis- og auðlindaráðuneytið. Landbúnaðarháskóli Íslands, Reykjavík.

Jón Guðmundsson og Hlynur Óskarsson 2014. Carbon dioxide emission from drained organic soils in West-Iceland. Proceedings of the international conference: Soil carbon sequestration for climate, food security and ecosystem services, European Commission, Joint Research Centre and the Icelandic Soil Conservation Service, Ispra, Italy. Bls. 155–159.

Keller, N., M. Stefani, Sigríður R. Einarsdóttir, Ásta K. Helgadóttir, Jón Guðmundsson, Arnór Snorrason, Jóhann Þórsson og Leone Tinganelli 2020. National Inventory Report 2020. Emissions of Greenhouse Gases in Iceland from 1990 to 2018; Submitted under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol, Umhverfisstofnun, Reykjavík.

Lindenmayer, D.B., K.B. Hulvey, R.J. Hobbs, M. Colyvan, H. Possingham, W. Steffen, K. Wilson, K. Youngentob og P. Gibbons 2012. Avoiding bio-perversity from carbon sequestration solutions. Conservation Letters 5:28–36.

Mitsch, W.J. og J.G. Gosselink 2007. Wetlands. 4. útg. John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, USA.

Ólafur Arnalds 2010. Dust sources and deposition of aeolian materials in Iceland. Icelandic Agricultural Sciences 23:3–21.

Ólafur Arnalds 2015. The Soils of Iceland. Springer, Dordrecht, Holland.

Ólafur Arnalds og Jón Guðmundsson 2020. Loftslag, kolefni og mold. Rit LbhÍ nr. 133. Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.

Ólafur Arnalds, Grétar Guðbergsson og Jón Guðmundsson 2000. Carbon sequestration and reclamation of severely degraded soils in Iceland. Icelandic Agricultural Sciences 13: 87–97.

Ólafur Arnalds, Ása L. Aradóttir og Grétar Guðbergsson 2002. Organic carbon sequestration by restoration of degraded areas in Iceland. Í: J.M. Kimble, R. Lal o.fl. (ritstj.), Agricultural Practices and Policies for Carbon Sequestration in Soil. CRC Press, New York, USA. Bls. 267–280.

Ólafur Arnalds, Hlynur Óskarsson, Jón Guðmundsson, Sigmundur Helgi Brink og Fanney Ósk Gísladóttir 2016. Icelandic inland wetlands: Characteristics and extent of draining. Wetlands 36:759–769.

Rannveig Anna Guicharnaud 2002. Rúmþyngd í íslenskum jarðvegi. BS-ritgerð, Jarð- og landfræðiskor, Háskóli Íslands, Reykjavík.

Ripoll-Bosch, R., I.J.M. de Boer, A. Bernues og T.V. Vellinga 2013. Accounting for multi-functionality of sheep farming in the carbon footprint of lamb: A comparison of three contrasting Mediterranean systems. Agricultural Systems 116:60–68.

Ritter, E. 2007. Carbon, nitrogen and phosphorus in volcanic soils following afforestation with native birch (Betula pubescens) and introduced larch (Larix sibirica) in Iceland. Plant and Soil 295:239–251.

Sigurður Reynir Gíslason 2012. Kolefnishringrásin. Umhverfisrit Bókmenntafélagsins. Hið íslenska bókmenntafélag, Reykjavík.

Sigurður Reynir Gíslason, E.H. Oelkers, Eydís Sigurdís Eiríksdóttir, M.I. Kardjilov, Guðrún Gísladóttir, Bergur Sigfússon, Árni Snorrason, Sverrir O. Elefsen, Jórunn Harðardóttir, P. Torssander og Níels Ö. Óskarsson 2009. Direct evidence of the feedback between climate and weathering. Earth and Planetary Science Letters 277: 231–222.

Sólveig Ólafsdóttir 2013. Ástæður og áhrif framræslu í Mýrasýslu 1930–1990. BS-ritgerð, Landbúnaðarháskóli Íslands, Umhverfisdeild. Hvanneyri.

Sveinn P. Jakobsson, Kristján Jónasson og Ingvar A. Sigurðsson 2008. The three igneous rock series of Iceland. Jökull 58:117–138.

Tarnocai, C., J.G. Canadell, E.A.G. Schuur, P. Kuhry, G. Mazhitova og S. Zimov 2009. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. Global Biogeochemical Cycles 23: GB2023, doi:10.1029/2008GB003327.

Tómas Grétar Gunnarsson 2020. Búsvæði og vernd íslenskra vaðfugla. Náttúrufræðingurinn 90:145–162.

Valentini, R., G. Matteucci, A. Dolman, E. Schulze, C. Rebmann, E. Moors og 24 fleiri 2000. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. Nature 404:861–865.

Wang, Y. og S. Cao 2011. Carbon sequestration may have negative impacts on ecosystem health. Viewpoint. Environmental Science & Technology 45:1759–1760.

Zehetner, F. 2010. Does organic carbon sequestration in volcanic soils offset volcanic CO_2 emissions? Quaternary Science Reviews 29:1313–1316.

Þóra Ellen Þórhallsdóttir, Jóhann Þórsson, Svafa Sigurðardóttir, Kristín Svavarsdóttir og Magnús H. Jóhannsson 1998. Röskun votlendis á Suðurlandi. Í: Jón S. Ólafsson (ritstj.), Íslensk votlendi. Verndun og nýting. Háskólaútgáfan, Reykjavík. Bls. 131–142.

Þóroddur Sveinsson, Teitur Sævarsson, María Svavarsdóttir, Bergrún Arna Óladóttir, Þorbjörg Helga Sigurðardóttir, Eiríkur Loftsson og Þórarinn Leifsson 2022. Langtímatap kolefnis í framræstu ræktarlandi. Rit LbhÍ nr. 149. Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.

23 Mold og endurheimt landgæða – vistheimt

„... að moldu skaltu aftur verða.“

Mynd 23.1. Vistheimt í Stóra-Klofa í Landsveit. Búrfell í baksýn. Hér var áður sandauðn vegna ágangs sands. Birki var sáð upp úr miðri síðustu öld og elstu reitirnir mynda nú vöxtulegan skóg. Birkið er tekið að breiðast ört út og víðibrúskar einkenna suma hluta svæðisins. Melgresi sem sáð var til að stöðva sandfokið er víkjandi.

Kjarrið safnar snjó og snjóbráð skilar sér ofan í moldina. Lífræn efni eru tekin að safnast fyrir í jarðveginum og miðla vatni. Til svipaðra aðgerða má grípa á víðfeðmum svæðum sem nú eru illa gróin, ekki síst á landi sem er í eigu þjóðarinnar, t.d. á Suðurlandi. Myndin er tekin árið 2020.

Landgræðslan: elsta starfandi stofnun heims helguð jarðvegsvernd

Slæmt ástand íslenskra vistkerfa hefur lengi verið augljóst þeim sem bera sæmilegt skynbragð á náttúru landsins. Landgræðslan var stofnuð árið 1907, þá sem Sandgræðsla ríkisins, til að takast á við ógnvænlegan ágang sands og landeyðingu.

Stofnunin telst vera meðal elstu stofnana á sviði jarðvegsverndar og landgræðslu í heiminum – jafnvel sú elsta – sem endurspeglar sérstöðu landsins á þessu sviði. Hnignun vistkerfa hefur óvíða verið meiri á hnettinum.

Ástand vistkerfa jarðar er sannarlega víða bágborið (sjá UN-CCD 2022) og það á ekki síst við á Íslandi. Meðal brýnustu viðfangsefna umhverfisvísinda samtímans er að bæta ástand lands (UN-CCD 2022, IPBES 2019). Moldin er miðlæg fyrir skilning á ástandi lands og því eru margvísleg viðfangsefni sem tengjast hnignun og hruni vistkerfa skýrð í síðasta hluta þessa rits. Moldin kemur einnig mjög við sögu í tengslum við styrk gróðurhúsalofttegunda í andrúmsloftinu, eins og fjallað var um í kaflanum hér á undan (22. kafli). Í þessum síðasta kafla ritsins er fjallað um endurheimt vistkerfa – vistheimt – sem má segja að sé ein mikilvægasta áskorun náttúrufræða nú á dögum.

Með vistheimt er stefnt að endurheimt hringrása vatns og næringar, sem og orkunámi, miðlun orku og útöndun (sjá ÓA og Ásu L. Aradóttur 2015). Vistheimt er í raun ferli sem felur í sér að koma á að nýju virkum vistkerfisferlum og um leið þeirri þjónustu sem vistkerfi veita. Ekki nægir að líta aðeins til gróðurþekju, sem of oft er raunin þegar ástand lands er metið, heldur vistkerfisins í heild. Hrunin vistkerfi hafa losað ógrynni gróðurhúsalofttegunda, bæði úr gróðri og mold, sem mikilvægt er að færa aftur inn í vistkerfin (sbr. 22. kafla). Áður var fjallað um einkenni slæms ástands vistkerfa, m.a. þætti moldarinnar og frjósemi landsins. Aðrar afleiðingar hruns vistkerfa eru neikvæð áhrif á vatnshag og aukin tíðni alvarlegra flóða, fyrir utan neikvæð áhrif á lífsafkomu fólks. Einnig hefur maðurinn breytt árfarvegum, þrengt að þeim, gert þá beinni o.s.frv., sem eykur á flóðahættu og svo mætti lengi telja.

Mynd 23.2. Nemendur Landgræðsluskóla GRÓ-UNESCO við mat á ástandi lands. Þau koma frá Afríku og austanverðri Mið-Asíu og eru sérfræðingar á sínu sviði í heimalandinu. Mynd: Arnar Þórisson.

23.1. Landgræðsla og vistheimt

Landgræðsla og vistheimt eru margþætt viðfangsefni – í raun sérstakt fagsvið innan vistfræðinnar og fleiri greina. Umfjöllun þessa kafla tekur aðeins til hluta viðfangsefnisins vistheimtar: athyglin beinist fyrst og fremst að jarðvegsþáttum og útjörð. Þessu breiða viðfangsefni verða vonandi gerð víðtækari skil af öðrum einhvern tíma á næstunni.

23.1.1. Hvað er vistheimt?

Endurheimt náttúrulegra vistkerfa er nefnd vistheimt (e. ecological restoration) og þá er miðað við að koma á fót vistkerfi sem líkist því sem var til staðar áður en hnignun varð, eftir því sem hægt er, í öllum lögum vistkerfisins svo sem er varðar gróður, mold og dýr (sjá Ásu L. Aradóttur og Hagen 2013). Rétt er að vísa til skilgreiningar Alþjóðlega vistheimtarfélagsins (Society for Ecological Restoration – SER) sem tekin hefur verið upp af mörgum öðrum alþjóðasamtökum og stofnunum á borð við IUCN (Gann o.fl. 2019).

Vistheimt[1] er ferli sem stuðlar að endurheimt vistkerfis sem hefur hnignað, skemmst eða eyðilagst.

Hér er vísað til ferlis sem stuðlar að endurheimt eða bata vistkerfis. Hugtakið kom inn í íslensku seint á síðustu öld (ÓA 1988) sem þýðing á „ecological restoration". Ítarleg umfjöllun um vistheimt í íslensku samhengi má finna í riti sem ritstýrt var af Ásu L. Aradóttur og Guðmundi Halldórssyni (2011). Hröð þróun á sér stað á þessu sviði hérlendis sem og á alþjóðavettvangi. Í ritinu *Að lesa og lækna landið* (ÓA og Ása L. Aradóttir 2015) er stutt og aðgengileg umfjöllun um vistheimt sem vert er að benda á – ríkulega myndskreytt, sem m.a. er ætluð námsfólki á öllum stigum auk almennings.

Vistheimt er sú vísindagrein sem vex einna örast á sviði vistfræði almennt. Þing Evrópudeildar „Alþjóðlegu vistheimtarsamtakanna" (e. Society of Ecological Restoration – Europe) var haldið á Íslandi árið 2018, með yfir 400 þátttakendum frá 49 löndum, sem gefur til kynna hvað vísindastarf tengt vistheimt er orðið öflugt á heimsvísu. Þessi vísindagrein hefur mikið gildi á Íslandi í ljósi bágrar stöðu íslenskra vistkerfa. Sömuleiðis eiga rannsóknir á vistheimt á Íslandi erindi á alþjóðlegum vettvangi. Vert er að gefa því gaum að Landgræðsluskóli Sameinuðu þjóðanna (UNESCO – GRÓ Land Restoration Training Program) er á Íslandi þar sem nemendur frá þróunarlöndum sækja sér þekkingu á öllum sviðum landgræðslu og vistheimtar (mynd 23.2).

23.1.2. Lög um landgræðslu

Sett voru ný lög um landgræðslu árið 2018 þar sem áhersla á endurheimt er í forgrunni. Rétt er að víkja aðeins að þessum lögum nú enda þótt það sé eðli laga að þróast með aukinni þekkingu og breytingum í takt við viðhorf samfélagsins og svo verður eflaust um þennan lagabálk. Með lögum um landgræðslu setur þjóðin sér markmið um endurheimt landkosta og að tryggja sjálfbæra nýtingu landsins.

Lögin nota ekki hugtakið „vistheimt" heldur „endurheimt vistkerfa" sem skilgreint er sem: „Það ferli að koma vistkerfum, vistkerfisferlum, eiginleikum vistkerfa og vistkerfaþjónustu í það horf að vistkerfið nái að þróast án hnignunar", sem er nokkuð annarrar merkingar en hin markvissa alþjóðlega skilgreining á vistheimt hér á undan.

Skilgreining laganna er að sumu leyti ógreinilegri, jafnvel ekki alveg í takt við markmið laganna í fyrstu grein – síðasti parturinn „að vistkerfið nái að þróast án hnignunar" verður að teljast sérkennilegur í ljósi þess að stærsti hluti vistkerfa landsins er í afar hnignuðu ástandi. En efnisatriði í 2. og 3. grein laganna eru mun skýrari og það er ástæða til að birta hér báðar greinarnar sem setja eins konar ramma um framtíðarstarf á sviði landgræðslu á komandi árum eða áratugum. Segja

Lög um landgræðslu, 1. gr. Markmið.

Markmið laga þessara er að vernda, endurheimta og bæta þær auðlindir þjóðarinnar sem fólgnar eru í gróðri og jarðvegi og tryggja sjálfbæra nýtingu lands.

1. Ecological restoraton is the process of assisting the recovery of an ecosystem that has been degraded, damaged, or destroyed.

2. gr. Markmið um vernd og sjálfbæra nýtingu lands.

Til að stuðla að vernd og sjálfbærri nýtingu lands skal stefnt að því að:

a. nýting lands taki mið af ástandi þess og stuðli að viðgangi og virkni vistkerfa,

b. stöðva eyðingu jarðvegs og gróðurs,

c. komast hjá spjöllum á gróðri og jarðvegi,

d. hver sá sem veldur spjöllum á gróðri og jarðvegi bæti fyrir það tjón,

e. nýting lands verndi líffræðilega fjölbreytni og orku- og næringarforða og nauðsynlega jarðvegseiginleika fyrir virkni vistkerfisins,

f. auka þátttöku almennings og hagsmunaaðila í stefnumótun og aðgerðum sem varða gróður- og jarðvegsvernd,

g. auka þekkingu á mikilvægi jarðvegs og gróðurs og sjálfbærrar nýtingar lands,

h. fram fari reglubundin vöktun á gróðurlendi, jarðvegi og landnýtingu.

3. gr. Markmið um endurheimt og uppbyggingu vistkerfa á landi.

Til að efla vistkerfi landsins skal stefnt að því að:

a. byggja upp og endurheimta vistkerfi sem hafa raskast og líffræðilega fjölbreytni þeirra,

b. auka viðnámsþrótt og þanþol vistkerfa gagnvart náttúrulegum áföllum og náttúruvá,

c. auka kolefnisbindingu með endurheimt vistkerfa,

d. virkja almenning og hagsmunaaðila til þátttöku í endurheimt og uppbyggingu vistkerfa.

má að allur síðasti hluti þessa rits – og jafnvel allir kaflar þess – leggi til þekkingu sem nauðsynleg er þeim sem vinna við að tryggja framgang þessara laga.

Í orðskýringum laganna er skilgreining á ástandi lands sem vert er að gefa gaum. Hér er hugsunin um vistgetu höfð að leiðarljósi sem ítarlega var rædd í 19. kafla um ástand lands. Um leið er reynt að sporna við heilkennum breyttra grunnviðmiða (samdaunasýki) sem rætt var um í kafla um rætur landhnignunar (21. kafli). Við það aukast kröfur á viðeigandi fagstofnanir að tryggja að nægjanleg þekking sé til staðar til að sinna þessum verkefnum samkvæmt lögunum. Þá er og mikilvægt að sporna við „stofnanayfirtöku“ (e. agency capture) hagsmunaaðila í stjórnsýslunni (sjá 21. kafla).

Í lögunum (9. gr.) segir einnig: „Nýting lands skal vera sjálfbær þannig að ekki sé gengið á auðlindir þess og þær endurheimtar eins og unnt er, og jafnframt að viðgangur og virkni vistkerfa haldist.“ Hér er enn á ný heldur óskýrt orðalag því þar sem vistkerfi eru hrunin – þar sem hringrásir orku, vatns og næringar eru rofnar – er varla hægt að tala um að halda áfram að viðhalda „viðgangi og virkni“ við þær aðstæður sem færu í bága við markmið laganna sem getið var um hér á undan. Landgræðslunni er falið að setja viðmið um sjálfbæra nýtingu – en þau hafa ekki enn verið birt við ritun þessa bókarkafla (júní 2022).

23.2. Undirstöðuatriði vistheimtar

23.2.1. Alþjóðleg viðmið

Alþjóðlega vistheimtarfélagið (SER) gaf út ítarlega grein um meginreglur og viðmið við framkvæmd vistheimtar (e. International standards for the practice of ecological restoration; Gann o.fl. 2019) í vísindatímariti sem tileinkað er vistheimt (e. restoration ecology). Í inngangi að viðmiðunum er lögð áhersla á hvernig vistheimt stuðlar að vernd líffjölbreytileika, bættum lífsskilyrðum fólks, fæðuöryggi, hagsæld og minnkandi áhrifum loftslagsbreytinga. Um leið eykst þanþol vistkerfa og samfélaga fólks – m.a. gagnvart loftslagsbreytingum. Vistheimt er lausnamiðuð nálgun sem virkjar samfélagið, vísindafólk, stjórnsýslu og landnotendur til að bæta skaða á vistkerfum – og skapar heilbrigðari tengsl á milli fólks og náttúru, eins og segir í grein Gann o.fl. (2019) um viðmið vistheimtar.

Alþjóðasamtökin (SER) leggja áherslu á átta undirstöðuatriði vistheimtar sem ástæða er til að árétta hér (Gann o.fl. 2019).

1. Að virkja hagaðila og samfélög á sem breiðustum grunni. Þessi samtenging stuðlar að auknu þanþoli vistkerfa og samfélagsins í heild. Þátttökuaðferðir geta haft í för með sér bætt aðgengi að fjármagni til framkvæmda og stuðlað að því að sátt náist um verkefnin, aðferðir og markmið. Þetta skref er iðulega tímafrekt, ekki síst ef eitthvert hlutmengi hagaðila, jafnvel mjög lítið

mengi – telur að hagsmunum sínum sé ógnað. Vel heppnuð verkefni geta verið til eftirbreytni fyrir fleiri slík og dregið úr tortryggni (sjá umfjöllun um þátttökuaðferðir í 19. og 21. kafla).

2. Að beitt sé þverfaglegri nálgun á fjölbreyttum þekkingargrunni og besta fáanlega þekking nýtt á hverjum tíma. Hér er bæði átt við vísindalega þekkingu sem og staðarþekkingu. Vísindaþekking getur verið í örri þróun og það á ekki síst við um vistheimt og landgræðslu þar sem hugmyndir hafa tekið örum breytingum á undanförnum áratugum (sjá Ásu L. Aradóttur o.fl. 2013). Einnig er mikilvægt að virkja staðarþekkingu í slíkum verkefnum, t.d. við að finna náttúrulegan efnivið o.s.frv. – en mat á ástandi eða skilningur á viðmiðunarvistkerfum (vistgetu) má þá ekki vera litaður af „samdaunasýki" (sjá hér á eftir um 3. atriðið).

3. Að miða skuli við náttúruleg vistkerfi (Viðmiðunarvistkerfi – vistgeta, sjá umfjöllun í 19. kafla um ástand lands). Slík aðferðafræði er vitaskuld einnig undirstaða sjálfbærrar landnýtingar. Í frekari skýringum SER (Gann o.fl. 2019) er m.a. fjallað um hættuna af „heilkenni breyttra viðmiða" við skoðun á ástandi lands og val á viðmiðunarvistkerfum. Þar kemur „stofnanayfirtaka" einnig við sögu (sjá 21. kafla) í umfjöllun er varðar vandamál sem tengjast breyttum grunnviðmiðum (mjög lausleg þýðing):

„Þetta vandamál er auk þess mikilvægt þar sem gerð er krafa um vistheimt (t.d. vegna laga, reglugerða og í tengslum við framkvæmdir, innskot ÓA) vegna þess að stofnanir geta sett lág viðmið sem byggjast á röngum skilningi á eðlilegu ástandi lands sem ekki hefur hnignað. Þetta getur verið mikilvægt er varðar verkefni til verndar líffjölbreytileika, því ef skipulag þeirra er lélegt getur hnignun haldið áfram auk þess sem dregur úr líffjölbreytileika."[2]

4. Að vistheimt styðji við náttúruleg ferli við bötun kerfisins. Hér er m.a. átt við framvinduferla og hvernig stutt er við þá með skynsamlegum hætti – sem m.a. tekur mið af ástandi landsins á hverjum tíma. Inngrip eru vitaskuld háð ástandi landsins og þeim markmiðum sem sett eru. Aðferðir sem miða við náttúruleg ferli reynast alla jafna langsamlega hagkvæmastar – en geta tekið lengri tíma en þegar inngrip eru mikil. Mikil inngrip (t.d. of mikill áburður eða röng notkun plöntuefniviðar) geta komið í veg fyrir að settum markmiðum sé náð. Notkun ágengra erlendra tegunda samræmist ekki undirstöðuatriðum vistheimtar.

5. Að sett séu skýr mælanleg markmið. Það er mikilvægt að áhrif aðgerða og aðferða séu þekkt og að sýn á endanlega útkomu sé skýr. Þá er hægt að mæla árangurinn. Skýr markmið eru ennfremur undirstaða þess að velja hentugar aðferðir til að ná settum markmiðum.

6. Að ná sem bestum mögulegum bata. Samtökin (SER) settu fram stjörnukerfi í umfjölluninni um viðmiðin (Gann o.fl. 2019), sem nær frá einni stjörnu til fimm stjarna, til að meta árangur vistheimtarverkefna. Við eina stjörnu er búið að stöðva frekari eyðingu en við fimm stjörnur hefur vistheimtin endurskapað flesta meginþætti kerfisins sem miðað var við. Það er misjafnt eftir aðstæðum hvaða árangri er raunhæft að ná – t.d. er mjög erfitt að endurheimta kerfi á þurrum svæðum sem hafa „farið í sand". Á Íslandi er mjög víða hægt að ná „fimm stjörnu bata" – t.d. með endurheimt birkivistkerfa – jafnvel á landi sem nú er að mestu auðn, og með endurheimt votlenda.

7. Að ávinningur miðist við stærri mælikvarða. Landhnignun á einu svæði getur haft áhrif langt út fyrir viðkomandi svæði og eins getur vistheimt haft áhrif langt út fyrir aðgerðasvæðið (sbr. áhrif á

Mögulegar landbætur réttlæta ekki skaða!

Á það er lögð áhersla að möguleikar til vistheimtar megi aldrei nota sem réttlætingu fyrir því að skaða eða eyðileggja náttúruleg vistkerfi.

En vistheimt getur jafnframt falið í sér sjálfbæra nýtingu náttúrulegra vistkerfa.

2. „In addition, this problem is important for mandatory restoration programs, as agencies may aim for lower standards based on erroneous ideas of what constitutes a nondegraded ecosystem. This may be of importance for biodiversity offset programs, which, if poorly designed, may contribute to continued degradation and loss of biodiversity."

Áratugur vistheimtar 2021–2030

Vistheimt (e. ecological restoration) miðar að endurheimt náttúrulegra vistkerfa. Stór hluti vistkerfa jarðar er í hnignuðu ástandi og mörg hafa hrunið vegna óhóflegrar landnýtingar. Vistheimt stuðlar jafnframt að því að tryggja lífsviðurværi fólks, vatnsmiðlun og aðgang að drykkjarvatni og ótal öðrum þáttum.

Vistheimt er lykilaðgerð til að varðveita og endurheimta líffjölbreytileika og til að minnka styrk gróðurhúsalofttegunda í andrúmsloftinu. Vistheimt snertir öll heimsmarkmið Sameinuðu þjóðanna. Áratugurinn 2021–2030 er tileinkaður endurheimt vistkerfa á vettvangi Sameinuðu þjóðanna. Heimsmarkmið Sameinuðu þjóðanna og vistheimt eru í aukum mæli þáttur í stefnu stjórnvalda í heiminum, þ. á m. sveitarstjórna, fyrirtækja og almennings. Vistheimt er óvíða jafnmikilvæg og hérlendis vegna bágrar stöðu íslenskra vistkerfa.

vatnshag). Þá stuðlar vistheimt iðulega að bindingu kolefnis úr andrúmsloftinu og eykur líffjölbreytileika – sem eru þá hnattræn áhrif af vistheimt á tilteknu svæði.

8. Að aðgerðir séu þáttur í samfellu „endurbótaaðgerða“. Land er í ákaflega mismunandi ástandi hérlendis sem annars staðar og vistheimtaraðgerðir þurfa að fara fram á öllum stigum ástands og aðgerða. Samfellan tekur til þess að minnka ágang og áhrif á land í samræmi við ástand þess, bæta landnýtingu, koma inn náttúrulegum efniviði og endurheimta landgæði – á þeim tíma sem til þarf.

23.2.2. Samnefnari umhverfissáttmála Sameinuðu þjóðanna – og Ísland

Segja má að vistheimt sé samnefnari allra umhverfissamninga Sameinuðu þjóðanna, þ.e. um loftslagsmál, líffjölbreytileika og varnir gegn landeyðingu, og jafnframt mikilvægur hlekkur í heimsmarkmiðum Sameinuðu þjóðanna um sjálfbæra þróun. Ritið *Vistheimt á Íslandi*, sem var ritstýrt af Ásu L. Aradóttur og Guðmundi Halldórssyni (2011), gefur aðgengilegt yfirlit yfir hin fjölbreyttu vistheimtarverkefni á Íslandi. Sögu vistheimtar með hliðsjón af þróun í hugmyndafræði landgræðslu voru gerð skil af Ásu L. Aradóttur o.fl. (2013) og Þórunni Pétursdóttur o.fl. (2013). Þar kemur fram að eftir að tókst að stöðva mestu hamfarirnar sem fylgdu hraðfara jarðvegsrofi færðust áherslur í landgræðslu smám saman yfir í uppgræðslu til landbúnaðarnota, einkum beitar, um miðja síðustu öld. Á undanförnum ártugum hefur þungi landgræðslustarfs færst yfir á endurheimt landkosta – vistheimt – með fjölþætt sjónarmið að leiðarljósi.

Sem áður gat á landgræðsla á Íslandi sér langa og merkilega sögu sem hlotið hefur alþjóðlega athygli. Upplýsingar um sögu og eðli landgræðslu á upphafsárunum á Íslandi má finna í ritinu *Sandgræðslan 50 ára* sem ritstýrt var af Arnóri Sigurjónssyni (1958). Nýrri rit eru m.a. *Sáðmenn sandanna*, samið af Friðriki G. Olgeirssyni 2007, bók um sögu landgræðslu á Íslandi, *Healing the land*, sem Roger Crofts færði í letur (2011), sem og Árbækur Landgræðslu Íslands, *Græðum Ísland*, í ritstjórn Andrésar Arnalds o.fl. (1987–1997). Einnig skal bent á fyrrgreint rit um vistheimt á Íslandi (Ása L. Aradóttir og Guðmundur

Halldórsson 2011) og *Að lesa og lækna landið* eftir ÓA og Ásu L. Aradóttur (2015). Um vistheimt og framvindu er rétt að benda á yfirlitsgrein Ásu L. Aradóttur og Dagmar Hagen (2013). Þá voru margar málstofur á Fræðaþingum landbúnaðarins og Ráðunautafundum tileinkaðar landgræðslu, en það efni er aðgengilegt í greinasafni landbúnaðarins og eru áhugasamir lesendur hvattir til að leita fyrir sér þar. Ritrýndum greinum um vistheimt á Íslandi hefur fjölgað á síðustu árum, m.a. um sjálfgræðslu á Skeiðarársandi (Þóra Ellen Þórhallsdóttir og Kristín Svavarsdóttir 2022, Guðrún Óskarsdóttir o.fl. 2022). Þegar þetta er ritað (2022) er starfrækt stórt rannsókna- og þróunarverkefni, BirkiVist, sem beinist að endurheimt birkivistkerfa frá fjölbreytilegum sjónarhornum, allt frá jarðvegsþáttum, framvindu gróðurs, til DNA-rannsókna, lista og mats á gildi birkis í landslaginu (birkivist.is).

23.3. Vistheimt og jarðvegsþættir

Þekking á mold er mikilvæg til að geta útskýrt ástand lands, hnignunarferli, jarðvegsrof, kulferli og ísnálamyndun, vatnshringrás, kolefni og næringarefni í mold og hvað það er sem skerðist við hnignun lands. Endurheimt vistkerfa felst m.a. í því að byggja upp fyrri virkni jarðvegsþátta og örva jarðvegsmyndun. Rétt er að árétta að allir fyrri kaflar bókarinnar hafa gildi fyrir landgræðslu, skógrækt og vistheimt og hér er byggt á því efni sem þar var sett fram. Áður var m.a. fjallað um þætti sem notaðir eru til að leggja mat á ástand lands. Sömu þættir jarðvegs koma við sögu við endurheimt vistkerfa.

Rof – vatnsrof/vindrof

Þegar hafist er handa við uppgræðslu og vistheimt er mikilvægt að stöðva jarðvegsrof þar sem þess gætir. Yfirborðsstöðugleiki er nauðsynlegur til að plöntur geti fest rætur og þrifist – og þar með tekið að nema orku inn í kerfið með ljóstillífun. Oft er mikilvægt að mynda lífræna jarðvegsskán þar sem land er ógróið til að gera yfirborðið stöðugt (sjá 3. og 16. kafla og myndir 23.3 og 23.4). Sandsvæði eru erfið að þessu leyti því svörfun kemur í veg fyrir landnám gróðurs, ásamt öðrum þáttum á borð við skort á vatnsmiðlun og lítið fræframboð. Kanna þarf upptök sands þar sem það á við og minnka eða stöðva flæðið. Það var m.a. gert þegar yfirborð Sandvatns á Haukadalsheiði var gert stöðugt, sem minnkaði sandflæði frá vatnsborðinu (Sigurður Greipsson 2012).

Hér á eftir verður vikið stuttlega að aðgerðum í árdaga landgræðslu, m.a. hleðslu sandvarnargarða til að reyna að hamla flæði sands. Melgresi er lykiltegund til að binda sand í upphafi, en melhólar eru síkvik kerfi og það er nauðsynlegt að taka þróun þeirra áfram: að binda sandinn varanlega, t.d. með birkiskógi. Mikilvægt er að binda yfirborð samfelldra svæða á svipuðum tíma, annars er hætt við meira áfoki yfir þau svæði sem reynt er að græða upp, eins og „Landbótartilraunin" á Geitasandi sýnir glögglega (ÓA o.fl. 2012, 2015). Einnig getur verið skynsamlegt að hefja uppgræðslu í jaðri sandsvæða og vinna síðan undan meginátt sandfoksins, sé þess kostur. Mikilvægt er að stöðva færslu sands inn á vistheimtarsvæði þar sem náttúruleg framvinda á sér stað, eins og t.d. í Dimmuborgum í Mývatnssveit, með því að örva endurreisn birkiskóga á víðfeðmu svæði utan Dimmuborga á leið sandsins því annars gæti illa farið síðar.

Margar aðferðir eru árangursríkar við að binda yfirborð auðna í upphafi aðgerða. Í raun má segja að flest það sem gert er geti haft jákvæð áhrif, t.d. að nota heyrúllur og lífrænan úrgang sem og að dreifa tilbúnum áburði og grasfræi. Þessar aðgerðir mynda iðulega jarðvegsskán sem víða er mikilvæg

fyrir framvindu vistkerfisins. Mikilvægt er að ákvarða hversu stór inngrip eru hentugust til þess að tryggja framvindu í átt til náttúrulegra vistkerfa – of stórir skammtar geta tafið slíka þróun með því að mynda samfélög gróðurs og jarðvegslífs sem hrynur síðan aftur. Þannig tíðkast víða að nota litla áburðarskammta til að örva náttúrulega framvindu á tiltölulega stórum samfelldum svæðum, m.a. í verkefnum Landsvirkjunar, Landgræðslunnar og bænda á áhrifasvæði Hálslóns (sjá t.d. Gústaf M. Ásbjörnsson og Sigríði Þorvaldsdóttur 2021).

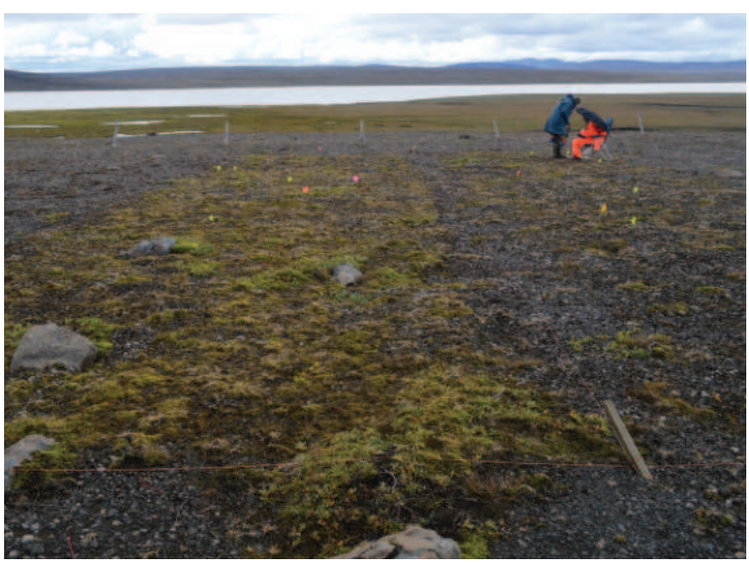
Stundum gætir þess misskilnings að það sé slæmt að sáðgrös, sem oft eru af erlendum uppruna, t.d. danskur túnvingull, sem notuð eru með áburði í upphafi aðgerða til að binda yfirborðið drepist þegar áburðaráhrifin hverfa. En það er öðru nær – tilgangurinn er að gera yfirborðið stöðugt og búa í haginn fyrir náttúrulega framvindu (mynd 23.3). Túnrækt og fóðurframleiðsla á illa grónu landi geta hins vegar ekki talist til vistheimtarverkefna – heldur til landbúnaðarverkefna sem hagnýta sér aðferðir landgræðslu – en vissulega verður yfirborðið stöðugra og margir þættir vistkerfisins ná virkni á ný við slík fóðurframleiðsluverkefni.

Ísnálar

Fjallað er um ísnálar í kaflanum um kulferli og kaflanum um rof. Þær hafa gríðarlegt afl og lyfta upp nýgræðingi og koma í veg fyrir frumframvindu gróðurs. Jarðvegsskán er mjög mikilvæg til að koma í veg fyrir ísnálamyndun. Kornastærð moldarinnar hefur áhrif á ísnálamyndunina, en siltríkri mold er hættast við myndun ísnála og holklaka. Mikilvægi lífrænnar jarðvegsskánar verður vart gert nægjanlega hátt undir höfði fyrir frumframvindu og niturnám inn í vistkerfin (mynd 23.3 og 23.4).

Ísig

Hægt eða takmarkað ísig veldur afrennsli á yfirborði og jarðvegsrofi. Jafnframt nýtist vatnið ekki í þágu vistkerfisins. Ísig er hægast á vetrum á auðnum þar sem myndast þéttur holklaki sem veldur yfirborðsrennsli og tjóni. Einnig er hætt við að yfirborðsvatn frjósi og myndi þétt svellalög (sjá kafla um kulferli). Mold undir ákveðnum gróðursamfélögum getur myndað ógegndræpan holklaka, m.a. í barrskógum og lúpínubreiðum (mynd 23.4). Vistheimt miðar m.a. að því að ísig verði með eðlilegum hætti allt árið um kring og því er ljóst að forðast ætti að nota erlendar ágengar tegundir á borð við lúpínu.



Mynd 23.3. Tilraunasvæði við Hálslón í um 640 m hæð yfir sjávarmáli. Sáð var í óstöðugan mel. Myndirnar eru teknar um 16 árum síðar (árið 2018). Til vinstri er horft til vesturs yfir svæðið sem fékk mestan áburð, Hálslón í bakgrunni. Sáðgrösin eru horfin en náttúruleg framvinda á sér stað innan reitsins. Til hægri er nærmynd af skáninni sem hefur myndast. Tilraunin er friðuð fyrir búfjárbeit. Sjá ÓA o.fl. 2010.

Mynd 23.4. Ísnálar lyfta upp nýgræðingi að vetri og viðhalda ógrónu ástandi (efsta myndin). Skánin dregur úr myndun ísnála og býr í haginn fyrir nýgræðing (myndin fyrir miðju). Uppgræðsla skilar iðulega skán sem gerir yfirborðið stöðugt þar sem staðargróður á borð við víði getur tekið að nema land. Það er oft tilgangur uppgræðsluaðgerða í upphafi. Neðsta myndin: Ísnálar hafa lyft upp litlum plöntum sem eru að nema land. Mynd: Ása L. Aradóttir.

Vatnsheldni/vatnsrýmd
Það eru lífræn efni og leir sem geyma og miðla vatni í moldinni. Vatnsskortur er mest áberandi þar sem unnið er með sendinn jarðveg, en þar er mikilvægt að safna upp lífrænum efnum til að kerfið miðli vatni og næringu. Þegar lítil úrkoma er takmarkandi þáttur þarf regnvatnið að nýtast vel. Jarðvegsskán dregur úr uppgufun úr illa förnu landi þar sem hún er til staðar. Hávaxinn gróður minnkar hitaöfgar og vind við yfirborðið sem dregur úr uppgufun og stuðlar að því að snjór safnast saman og skýlir yfirborðinu. Á auðnum þar sem snjór blæs að mestu af yfirborðinu á vetrum nýtist stór hluti ársúrkomunnar ekki í þágu ferla vistkerfisins, en með snjósöfnun sem bráðnar ofan í jarðveginn eykst framboð vatns í moldinni, svo fremi að leir og lífræn efni séu til staðar til að binda vatnið.

Kolefni
Án gróðurhulu kemst engin orka inn í kerfið. Magn lífrænna efna er klárlega einn besti mælikvarðinn á árangur landgræðslu og vistheimtar og í raun væri skynsamlegt að gera lágmarkskröfu um kolefni í jarðvegi (t.d. >3% að meðaltali í efstu 15 cm moldarinnar) fyrir útjörð sem nýtt er til beitar, jafnvel 6–10% ef miðað er við að endurheimta frjósamt land.

Heildarmagn kolefnis í jarðvegi er góður mælikvarði á árangur landgræðsluverkefna. Land sem hefur „farið í sand“ er alla jafna viðkvæmast þar sem hringrásir vatns, næringar og orku eru skertar (og orkunám er ekkert ef gróður vantar á yfirborðið). Þar ætti tvímælalaust að gera mjög miklar kröfur um uppbyggingu kolefnis í efstu lögum moldarinnar, t.d. >6% C í efstu 15 cm moldarinnar ásamt kröfum um sterka gróðurhulu af ákveðinni lágmarkshæð (kjarr). Ekki ætti að afhenda landgræðsluland til beitarnýtingar að nýju þar sem ógróið land er ennþá í yfirborði, sérstaklega þar sem sandur hefur gengið yfir (Starfshópur LbhÍ 2016). Að hefja nýtingu að nýju á landi sem einkennist af sandi og er skammt á veg komið í ferli framvindu mætti telja slæm mistök, en því miður eru dæmi um slíkt hér á landi á undanförnum áratugum.

Mynd 23.5. Mynd til vinstri: Rör fyrir ísig í lúpínubreiðu að vetri í Garðabæ. Vatni er hellt ofan í rörið og mælt hve hratt það streymir niður í moldina. Hér er klaki á yfirborði en undir er ógegndræpur ís svo vatnið kemst ekki niður. Mynd: Tarek A.M. Zaqout. Mynd til hægri: Ógróinn svörður í lúpínubreiðu að vetrarlagi. Hér myndast þéttur klaki og ísnálar í yfirborði á vetrum.

Jarðvegsörverur og umsetning næringarefna

Miklu skiptir að lífið í jarðveginum sé öflugt til að brjóta niður lífræn efni og skila næringarefnum í moldina á nýtanlegu formi fyrir rætur plantna. Heilbrigði næringarumsetningar sem keyrð er af jarðvegsörverum er mælikvarði á frjósemi kerfa. Hafa verður í huga að landgræðsluaðgerðir geta stuðlað að háu C/N-hlutfalli í upphafi aðgerða vegna þess að örverur teppa nitrið við niðurbrot á nýfengnum forða af lífrænum efnum, sem minnkar framboð á nitri fyrir rætur plantna. Það tekur tíma að byggja upp vistkerfin að þessu leyti svo að C/N verði hagstætt og nóg framboð af kolefni, nitri og öðrum næringarefnum fyrir hringrásina. Dreifing á hvers konar lífrænum áburði hefur þann kost að örva jarðvegslífið.

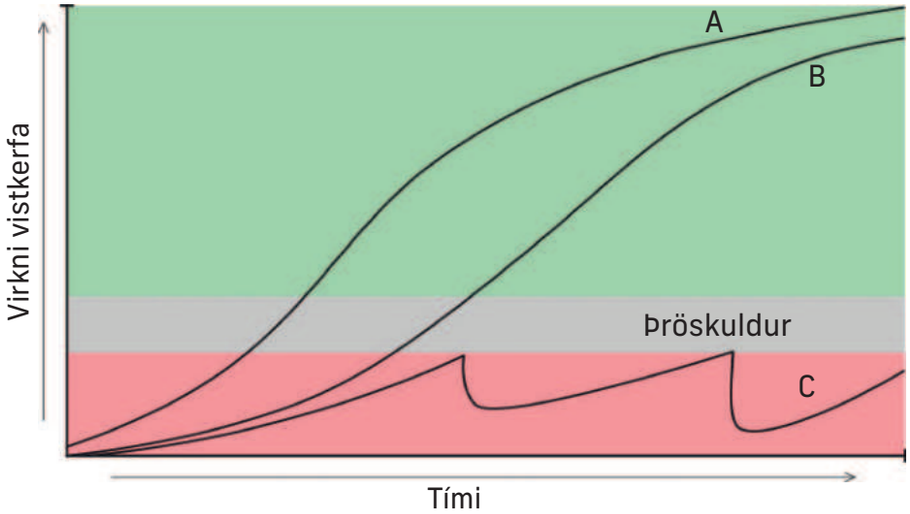
Nitur er oft mest takmarkandi næringarefnið. Mikilvægt er að safna saman nitri og öðrum næringarefnum í moldina áður en kemur til nýtingar að einhverju marki, sem getur tekið áratugi. Uppbygging niturforðans tengist mörgum þáttum, t.d. hvort áburðargjöf eigi sér stað. Það hægist á niturupsöfnun eftir því sem kólnar með aukinni hæð yfir sjó. Eins og með kolefni væri hægt að gera lágmarkskröfu fyrir nitur í vistkerfum fyrir það land sem nýtt er til beitar, t.d. 1 000–1 500 kg N/ha, m.a. með tilliti til stuðnings almennings við landbúnað eða fyrir nýtingu á útjörð í eigu sveitarfélaga og þjóðarinnar.

Uppbygging jarðvegsþátta sem hér hefur verið fjallað um – ekki síst niturs – fylgir stigvaxandi aukningu þar sem lítið gerist í upphafi en hraðinn vex síðan eftir því sem kerfinu vindur fram. Þar sem eru fyrir hendi þröskuldar sem koma í veg fyrir þróun kerfisins, svo sem skortur á yfirborðsstöðugleika og myndun ísnála, nær þróun kerfisins aldrei nægjanlegum þrótti og það hrynur jafnharðan til baka við rof, ísnálamyndun o.s.frv. (lína C á mynd 23.7).

Mynd 23.6. Uppsöfnun kolefnis á nýlegu landgræðslusvæði í Mosfellsbæ.

Uppsöfnun niturs og þróun jarðvegseiginleika er mishröð á milli landslagseininga innan sömu svæða. Sé landið beitt á viðkvæmum stað í þessu ferli kemur það niður á þeim spildum þar sem uppsöfnun er komin vel á veg en einnig þeim sem eru komnar stutt áleiðis. Uppvöxtur birkis fylgir svipaðri kúrfu og færa má fyrir því rök að verst sé að nýta landið neðst á kúrfunni, neðan þröskuldarins sem sýndur er á myndinni. Þekking á framvinduferlum er lykilatriði til að skilja uppbyggingu vistkerfa og til að ákvarða markvissar aðferðir og leiðir til að komast yfir þröskulda á leiðinni að settum markmiðum.

Jarðvegsskán er talin geta numið 5–30 kg N/ha í náttúrulegri framvindu og því gegnir hún lykilhlutverki í uppbyggingu næringarforðans. Mikilvægi næringarefna á borð við nitur fyrir framvindu vistkerfa kemur skýrt fram í rannsóknum í Surtsey þar sem mávar flytja samtals tugi kg N/ha á ári til eyjarinnar frá hafi og búa í haginn fyrir gróin vistkerfi. Eftir því sem hreiðrum



Mynd 23.7. Tilgátulíkan fyrir þróun vistkerfa frá illa grónu landi gerir ráð fyrir stigvaxandi falli (línur A og B). Lítið gerist nema þróunin nái upp fyrir ákveðna þröskulda sem halda aftur af henni (lína C), t.d. skortur á yfirborðsstöðugleika, fræframboði o.fl. þættir.

Iðulega er þróunin mjög hæg í fyrstu, t.d. gerist lítið áratugum saman, en síðan verða breytingarnar örar þegar stöðugleika er náð og næringarumsetning og fræframboð verður örara. Gera má ráð fyrir að breytingar á vatnseiginleikum fylgi svipuðum kúrfum, m.a. vatnsmiðlun jarðvegsins. Unnt er að hraða þróuninni með markvissum inngripum (lína A).

fjölgar eykst þessi innflutningur næringarefna (Borgþór Magnússon o.fl. 2020, Aerts o.fl. 2020). Rannsóknirnar sýna einnig að selir flytja umtalsvert af næringu til eyjarinnar.

Leir

Leir tekur árhundruð og árþúsundir að myndast í moldinni við efnaveðrun, jafnvel á Íslandi þar sem efnaveðrun er mjög ör. Lífræn efni og stöðugt umhverfi örva myndun leirs. Gróðurhula getur margfaldað hraða leirmyndunar við íslenskar aðstæður, en gefa verður vistkerfum tíma til að byggja upp þanþol, sem m.a. felst í þeim leir og lífrænu efnum sem safnast fyrir í moldinni.

Hiti, hitasveiflur og einangrun

Miklar hitasveiflur einkenna efstu lög moldar í illa grónum kerfum, en þær sveiflur jafnast út eftir því sem gróður á yfirborðinu veitir betri einangrun.

Landslagið er ekki einsleitt

Þar sem unnið er við endurheimt landgæða er landslagið sjaldnast einsleitt heldur samsett af margvíslegum flákum eða reitum (e. patches) með mismunandi eiginleika. Efnaferlar í mold geta verið mishraðir og framboð á næringarefnum breytilegt. Sum svæði geta haft mun hagstæðari skilyrði en önnur, t.d. fyrir landnám plantna á borð við blómplöntur, grös eða tré og runna. Slík svæði hafa vaxandi áhrif á nærumhverfið og búa í haginn fyrir stærri fláka. Rök svæði þar sem mýrlendi getur myndast hafa þá strax áhrif á vatnshag í nærumhverfinu og heilu vatnasviðanna þegar stundir líða fram. Breytileikinn, sé honum náð með vistheimt á landslagsskala, er síðan afskaplega mikilvægur eiginleiki í náttúrunni og stuðlar að auknum líffjölbreytileika og þanþoli vistkerfa gagnvart áföllum.

Mikilvægt er að efla og miðla skilningi á þeim ferlum sem móta endurheimtina, svo sem hlutverki jarðvegsskánar og öruggra seta, uppbyggingu næringarforða og einnig hvernig hægt er að örva framvinduna. Þannig byggjast stór landgræðsluverkefni á því að unnið er með birkieyjar sem dreifast smám saman út af sjálfu sér. Sú aðferðafræði er notuð í „Hekluskógaverkefninu“ (sjá Ásu L. Aradóttur og Guðmund Halldórsson 2011). Sums staðar nægir friðunin ein og sér, eins og sjá má í nágrenni margra þéttbýlisstaða og í sumarbústaðalöndum vítt um landið. Það hefur verið á brattann að sækja að auka áhuga samfélagsins á endurheimt birkiskóga (Ása L. Aradóttir og Þröstur Eysteinsson 2005) en það er óðum að breytast og á áratugi Sameinuðu þjóðanna um endurheimt vistkerfa mun vægi endurheimtar skóglendis væntanlega aukast ört.

23.4. Náttúra, þéttbýli, votlendi og vegagerð

23.4.1. Vistheimt í þéttbýli bætir og kætir

Hugmyndir um endurheimt landgæða hafa verið áberandi í tengslum við

illa farin vistkerfi í útjörð, ekki síst hér á Íslandi þar sem yfrið nóg er af landi í slæmu ástandi (sjá Bryndísi Marteinsdóttur o.fl. 2021, Isabel C. Barrio og ÓA 2022). Á síðustu árum hafa augu vistfræðinga beinst í æ ríkara mæli að þéttbýlinu. Unnt er að beita margvíslegum aðferðum til að auka náttúrulegt yfirborð í borgum. Slíkar aðgerðir geta haft afar fjölbreytt og jákvæð áhrif sem sjá má í boxi hér til hægri.

Nú er lögð aukin áhersla á borgarvistfræði í kennslu í skipulagi og landslagsarkitektúr við Landbúnaðarháskóla Íslands. Mikilvægt er að verkefni sem miða að því að auka náttúrugæði í þéttbýli styðjist sem mest við aðferðafræði vistheimtar – sem eykur bæði varanleika og gagnsemi slíkra verkefna. Þéttbýliskjarnar ættu m.a. að fara varlega í að nota erlendar ágengar tegundir á borð við lúpínu – sem getur haft veruleg neikvæð áhrif á umhverfið til langframa. Að öðru leyti verður ekki fjölyrt um þessi mikilvægu og jákvæðu áhrif „náttúruvæðingar" í þéttbýli á þessum vettvangi.

23.4.2. Endurheimt votlendis

Eins og fram hefur komið í þessu riti hefur um helmingi votlenda landsins verið raskað með framræsluskurðum og um 70% votlendis á láglendi (ÓA o.fl. 2016). Votlendi eru meðal mikilvægustu vistkerfa jarðar vegna vatnsmiðlunar og fjölbreytts lífríkis auk þess sem þau binda ókjörin öll af kolefni (sjá síðasta kafla). Framræst votlendi losa mikið magn kolefnis – hægt er að miða við 20 t CO_2 á hektara á ári umfram náttúrulega losun – en þetta er þó án efa mjög breytilegt. Við endurheimt stöðvast þessi umframlosun á skömmum tíma, vatnsmiðlun eykst og lífríkið nær fyrri styrk á fáum árum.

Áður hefur verið bent á að íslensk votlendi hafi sérstakan jarðveg sem sé óalgengur utan Íslands þar sem saman

Möguleg jákvæð áhrif af aðgerðum eru m.a. að:

- Bæta vatnshag – minnka yfirborðsrennsli og flóð (m.a. svokallaðar bláar og blágrænar ofanvatnslausnir – sjá 4. kafla um vatnshag).
- Minnka mengun vatns sem berst til tjarna, vatna, grunnvatns og strandsvæða.
- Auka líffjölbreytileika – bæði ofanjarðar og í moldinni.
- Bæta loftgæði – ekki síst vegna mengunar frá útblæstri bíla og sliti á malbiki vegna nagladekkja í íslensku þéttbýli.
- Minnka hávaða, t.d. frá umferð. Umferð þungra flutningabíla veldur iðulega mestum hávaða. Meiri hávaði myndast þar sem umferðin er hröð.
- Mynda og auka skjól. Veðurfar í þéttbýli breytist eftir því sem skógar vaxa upp í þeim. Þetta þekkja þeir sem hafa kynnst því hvernig aðstæður breytast eftir því sem skógarnir hafa vaxið upp í þéttbýli hérlendis, t.d. í Reykjavík og nágrenni. Erlendis er skjól fyrir geislum sólar víða mikilvægt.
- Minnka viðhald á opnum svæðum og bæta nýtingu þeirra. Grasmanir eru dýrar í viðhaldi og þær mynda iðulega slétt yfirborð. Hrjúft yfirborð, t.d. stórgrýti og kjarr, dempar hljóð og vindhraða betur en slétt yfirborð en um leið getur viðhaldskostnaður minnkað verulega.
- Auka dýralíf – t.d. fuglalíf, en einnig skordýralíf á borð við býflugur o.fl. sem er mikilvægt fyrir vistkerfi jarðar.
- Tempra hita og hitasveiflur í borgum, ekki síst á heitum svæðum jarðar.
- Bæta fæðuöryggi (ræktun heima við). Eykur hollustu, börn alast upp við kunnáttu á ræktun og að bera virðingu fyrir náttúrunni.
- Bætt heilsufar borgarbúa. Grænt umhverfi minnkar streitu og hefur áhrif á andlega líðan auk þess að draga úr mengunarvöldum.
- Auka útivistarmöguleika og yndi af umhverfinu. Grænt umhverfi er líklegt til að auka á útivist.
- Auka fegurðargildi, fallegra umhverfi.

Mynd 23.8. Vistheimt í Landsveit. Birkiskógur breiðist út frá nokkrum brúskum sem sáð var til á síðustu öld og sums staðar hefur myndast vöxtulegur skógur með >5 m háum trjám. Þarna var áður sandeyðimörk eftir að áfoksgeirar gjöreyddu vistkerfum á svæðinu. Áætlað er að þekja mörg hundruð ferkílómetra í nágrenni Heklu með birkiskógi (svokallað Hekluskógaverkefni), m.a. til að koma í veg fyrir stóráföll vegna öskufalls í Heklugosum. Mynd tekin árið 2020.

fara sortueiginleikar *eldfjallajarðar* (sjá 10. kafla um *eldfjallajörð*) og eiginleikar *mójarðar* (e. Histosols). Gjóskuefni í íslenskum mýrum veðrast fremur hratt og stuðla að bindingu kolefnis auk bindingar sem hlýst af minni rotnun vegna skorts á súrefni og í sumum tilfellum kulda. Rúmþyngd moldar í votlendi á Íslandi er yfirleitt meiri en í mómýrum Norðurlanda, svo dæmi sé tekið, sem gerir það að verkum að jafnmikið eða meira getur verið af kolefni í íslenskum mýrum enda þótt kolefnishlutfallið (%) sé iðulega lægra en í arktískum mómýrum (sjá 22. kafla).

Mikilvægt er að þekking sé til staðar á vatnseiginleikum jarðvegs sem og lífríki kerfanna þegar votlendi eru endurheimt, sem og verkfræðikunnátta. Þá er æskilegt að mælingar á losun fyrir endurheimt hafi farið fram, en þær eru flóknar og kostnaðarsamar. Með tímanum er þó unnt að fá upplýsingar um breytileika í losun miðað við gerð votlenda og hvar þau eru á landinu. Votlendissjóður stuðlar nú að endurheimt votlendis með fulltingi sérfræðinga Landgræðslunnar og Landbúnaðarháskóla Íslands.

23.4.3. Endurheimt vegna vegagerðar og jarðrasks

Aðferðir vistheimtar eiga ekki síður við í þéttbýli en á útjörð og einnig þegar vanda skal frágang við nauðsynlegar framkvæmdir á borð við vegagerð. Hér verða aðeins tekin dæmi um þá möguleika sem í boði eru – en þetta efni er skylt pælingunum um þéttbýli sem settar voru fram hér á undan.

Skæruliðar í þágu náttúruverndar

Á árunum fyrir 1995 fór fram umfangsmikil efnistaka á möl og sandi í nágrenni Varmárskóla við miðbæ Mosfellsbæjar í Ullarnesbrekkum. Í þurrviðrum barst mikið ryk að skólanum sem spillti loftgæðum þar og í bænum verulega. Varð stundum að loka sundlauginni sem þar er af þessum sökum sem og gluggum á skólastofum. Segja má að á þessum tíma hafi Íslendingar ekki velt loftgæðum mikið fyrir sér eða mjög svo skaðlegum áhrifum svifryks á lýðheilsu. Umhverfissinnar í Mosfellsbæ reyndu ítrekað að fá þessum gryfjum lokað eftir lögformlegum leiðum þar sem leitað var liðsinnis viðkomandi stjórnsýslustofnana. Það bar engan árangur.

Mynd 23.9. Virk námavinnsla veldur rykmengun í Mosfellsbæ sem berst yfir skólasvæðið árið 1991 og 1992. Á myndinni til vinstri sjást íþróttavöllurinn og íþróttahúsið á góðviðrisdegi. Mynd t.h: Andrés Arnalds.

Eitt fallegt sumarkvöld laumuðust nokkrir tugir sjálfboðaliða á aldrinum 4–80 ára inn á gryfjusvæðið með umtalsvert magn af áburði og grasfræi. Á skömmum tíma var þessu efni dreift vítt um námurnar. Landeigandi kallaði til lögreglu og fjölmiðlar sýndu myndir af vettvangi „glæpsins“ og tóku viðtöl við forsprakkana. Aðgerðasinnarnir færðu rök fyrir því að ekki yrði lengur unað við þetta ástand: nauðsyn bryti lög. Málið vakti athygli fjölmiðla og í kjölfarið samdi Mosfellsbær um kaup á gryfjusvæðinu. Það var grætt upp og þar vex nú skógur af ýmsu tagi. Þarna hefur verið útbúið sannkallað ævintýraland í jaðri skólabygginganna í hjarta bæjarins þar sem Varmá liðast niður til sjávar. Á svæðinu er „ævintýragarður“ með góðri aðstöðu til dægradvalar í aðlaðandi umhverfi. Þarna eru m.a. fjölbreytt leiktæki, samkomu- og íþróttaaðstaða, grillhorn á skjólsælum stöðum, frisbí-golfvöllur o.m.fl. Svæðið bindur nú umtalsvert kolefni og er samastaður margra fuglategunda. Jafnframt dregur svæðið úr svifryki og hljóðmengun sem berst frá Vesturlandsvegi.

Mynd 23.10. Ullarnesbrekkur í Mosfellsbæ – hluti svæðisins. Hér voru áður malargryfjur sem ollu því að sandfok og rykmengun gekk yfir byggðina, ekki síst skólann sem hér er í bakgrunni. Þarna er nú fjölnota svæði, vinsælt til útivistar og veitir skólasvæðinu skjól gegn vindi og hávaða frá Vesturlandsvegi. Myndin er tekin árið 2022.

Mynd 23.11. Framengjar í Mývatnssveit – endurheimt votlendi. Endurheimtin hefur jákvæð áhrif á vatnsmiðlun og hið fjölbreytta fuglalíf á svæðinu og um leið dregur mikið úr losun gróðurhúsalofttegunda.

Á þessum vegi (mynd 23.12), sem er innan Þjóðgarðsins á Þingvöllum, voru torfur sem fjarlægðar voru vegna vegagerðarinnar og notaðar eins fljótt og auðið var við frágang í jaðri vegarins. Sú aðferðafræði minnkar umhverfisáhrif vegarins og lætur hann falla betur að umhverfinu. Framkvæmdaaðilar sem læra inn á þessa tækni geta náð mikilli leikni við þetta verklag – sem vonandi verður beitt í æ ríkara mæli hérlendis.

23.5. Framtíðin: vistheimt á stórum samfelldum svæðum

Það er mikið verk óunnið við að endurheimta landgæði á Íslandi. Skilningur á ástandinu og viðurkenning vandans eru mikilvæg fyrstu skref á þeirri leið, en þar eru enn mörg ljónin í vegi, eins og fram hefur komið

Mynd 23.12. Vandaður frágangur eftir vegagerð í Þjóðgarðinum á Þingvöllum. Torfur sem áður voru í vegarstæðinu voru notaðar við endurheimt á náttúrulegu gróðurfari í vegkantinum til að lágmarka umhverfisáhrif vegagerðarinnar. Landbúnaðarháskóli Íslands (Ása L. Aradóttir o.fl.) hefur unnið með Vegagerðinni við að þróa þessa aðferð (sjá Steinunni Garðarsdóttur 2021). Mynd: Ása L. Aradóttir.

Mynd 23.13. Séð inn í Skyndidal í Lóni, Skyndidalsá fyrir miðju. Hér var áður vöxtulegur skógur beggja megin árinnar en það hefur orðið alvarleg skógareyðing sem enn sér stað. Sæmilegar torfur tóra þó enn hér og hvar í dalnum. Einnig er gróður víða ákaflega rýr nema þar sem jarðvegur er rakur og víða er berangur þar sem jarðvegurinn hefur skolast burt. Hlíðin sunnan ár (t.v.) er orðin alveg skóglaus.

Úrelt fjallskilalög hafa valdið nokkru um ósjálfbæra landnýtingu – hér á sér stað beit á víðfeðmu landi að hluta til í einkaeigu gegn því að þeir sem fá að reka á landið sinni fjallskilum. Enda er það ekki á færi einnar fjölskyldu, svo dæmi sé tekið, að sjá um smölun á fé annarra (sem iðulega er beitt án leyfis landeigenda) eins og núverandi túlkun laga gerir ráð fyrir. Hér er auðvelt að endurheimta birkiskóginn á landslagsskala – einvörðungu þyrfti að friða dalinn fyrir beit um tíma en nýta markviss inngrip eftir atvikum, t.d. með því að sá sums staðar í hlíðarnar sunnan ár. Kolefnisuppsöfnun yrði mjög mikil. Myndin er tekin 2021.

Mynd 23.14. Skyndidalsá rennur út úr dalnum sínum; horft til baka miðað við næstu mynd á undan. Mikið rof hefur orðið og skógurinn að eyðast. Torfurnar gefa til kynna horfin landgæði beggja megin árinnar – landgæði sem má endurheimta. Ástandið er sýnu verra sunnan ár (efst t.h.). Auðveldara er að endurheimta landgæði þar sem fræfall er af birki og öðrum gróðri á svæðinu. Aurarnir verða fyrir síendurteknum flóðum en þó má færa fyrir því rök að ef vöxtulegt birki væri í jöðrunum myndu þeir gróa upp að hluta eftir áföllin sem verða við flóð í ánum.

Mynd 23.15. Svæði á Biskupstungnaafrétti sem áður var vaxið vöxtulegum birkiskógi sem var nýttur til kolagerðar. Landið er þjóðlenda – í eigu allra landsmanna. Það hentar ákaflega vel til endurheimtar birkiskóga á landslagsskala, sem myndi skila nærsamfélaginu atvinnutækifærum og tekjum í formi fjölbreyttrar starfsemi í þágu kolefnisbindingar auk jákvæðra umhverfisáhrifa.

Hér ætti hagur þjóðarinnar að vega þyngra en stundarhagsmunir þeirra örfáu sem nytja landið til beitar. Með vistheimt yrði til margbreytilegt nytjaland, birkiskógar, votlendi og móar – með fjölbreyttu lífríki – sem nýta mætti með ýmsum hætti þegar frjósöm mold hefur myndast á svæðinu á ný. Fátt er mikilvægara fyrir fæðuöryggi þjóðarinnar í framtíðinni en að endurheimta frjósöm vistkerfi – m.a. þar sem nú á sér stað ósjálfbær sauðfjárbeit.

í köflunum hér á undan. Rétt er að árétta hér að endurheimt landgæða er í þágu fæðuöryggis þjóðarinnar í framtíðinni. Það er mun mikilvægara að endurheimta vistkerfi á mjög illa förnu landi en að viðhalda slæmu ástandi lands með ósjálfbærri landnýtingu – m.a. með hliðsjón af fæðuöryggi auk umhverfissjónarmiða. En sem betur fer er eðli náttúru landsins með þeim hætti að víðast hvar er hægt að endurheimta landgæði neðan hálendisbrúnarinnar með hagkvæmum hætti. En það tekur sinn tíma (myndir 23.13, 23.14 og 23.15).

Með vistheimt er unnt að ná fjölbreyttum samfélags- og umhverfislegum markmiðum, svo sem auknum líffjölbreytileika, endurbættum vatnsbúskap auk þess sem tækifæri skapast til margs konar nytja í framtíðinni (sjá Ásu L. Aradóttur og Hagen 2013). Talið er að vistheimt hafi þýðingu fyrir öll heimsmarkmið Sameinuðu þjóðanna, sem ofin eru inn í stefnumótun þjóðríkja, sveitarfélaga og fyrirtækja í æ ríkara mæli. Beitarnot og jarðrækt koma vitaskuld til greina á endurheimtum svæðum þegar jafnvægi er náð á ný eftir því sem þörf fyrir fæðu og aðrar afurðir skapast hverju sinni. Sum endurheimt vistkerfi munu jafnvel henta vel til jarðræktar gerist þess þörf í framtíðinni. Mikilvægt er að vistheimt taki til landslagsheilda og þar eru afréttarsvæði eða stór afmarkaður hluti þeirra mjög eðlileg eining.

Mörg af þeim stóru og samfelldu svæðum sem hér koma til álita eru sameiginleg eign þjóðarinnar, þau eru þjóðlendur. Það þýðir að landið er í eigu

Mynd 23.16. Vistheimt á landslagsskala í Þórsmörk. Horft niður í Langadal og inn Krossáraura til hægri. Hér á sér stað mjög ör uppsöfnun kolefnis úr andrúmsloftinu. Stærsti hluti svæðisins sem sést á myndinni voru ógrónar moldir og melar en birkileifar tórðu hér og þar (sjá næstu mynd). Á myndinni sést landnám birkis og víðis en sums staðar var þó sáð grasi o.fl. til að gera yfirborðið stöðugra í upphafi. Kerfinu fylgir mikil fjölbreytni annarra plantna, að ekki sé talað um fjölbreytileika lífsins í moldinni sem einnig byggist upp. Ferðalangur nútímans gerir sér sjaldnast grein fyrir þeim breytingum sem hér eru að eiga sér stað. Í framtíðinni þurfa verkefni af þessu tagi að verða að meginþætti í landverndarstarfi á Íslandi.

Haghafar eru ekki bara fjáreigendur. Þeir eru margir!

Þar koma til álita almenningur, ríkisstofnanir, grunnskólar, framhaldsskólar, rannsóknastofnanir, háskólar, sérfræðingar á ýmsum sviðum, frjáls félagasamtök, faggreinafélög (t.d. sem tengjast vistfræði, fornleifafræði, skógrækt, garðyrkju, fuglum, útivist o.s.frv.), sveitarfélög, ferða- og útivistarfélög og aðrir, auk bænda (sjá Britu Berglund o.fl. 2015, Þórunni Pétursdóttur o.fl. 2013, 2017, 2019, 2020, ÓA 2019a, 2020).

þjóðarinnar allrar en ekki þeirra bænda sem nýta landið til beitar – jafnvel ekki heldur í eigu viðkomandi sveitarfélaga. Hefðbundinn nýtingarréttur á borð við afréttabeit fylgir þá því aðeins að landið sé talið hæft til beitar. Við ákvörðun á nýtingu þessara svæða er beinlínis rangt að líta aðeins til einnar nýtingar – beitarnýtingar – þar sem svæðin hafa mikla þýðingu út frá öðrum sjónarmiðum, t.d. vistheimtar og kolefnisbindingar, en einnig útivistar, ferðaþjónustu o.s.frv. Almenningur á jafnan rétt til þessara svæða og sauðfjárbændur enda þótt nýtingin sé önnur.

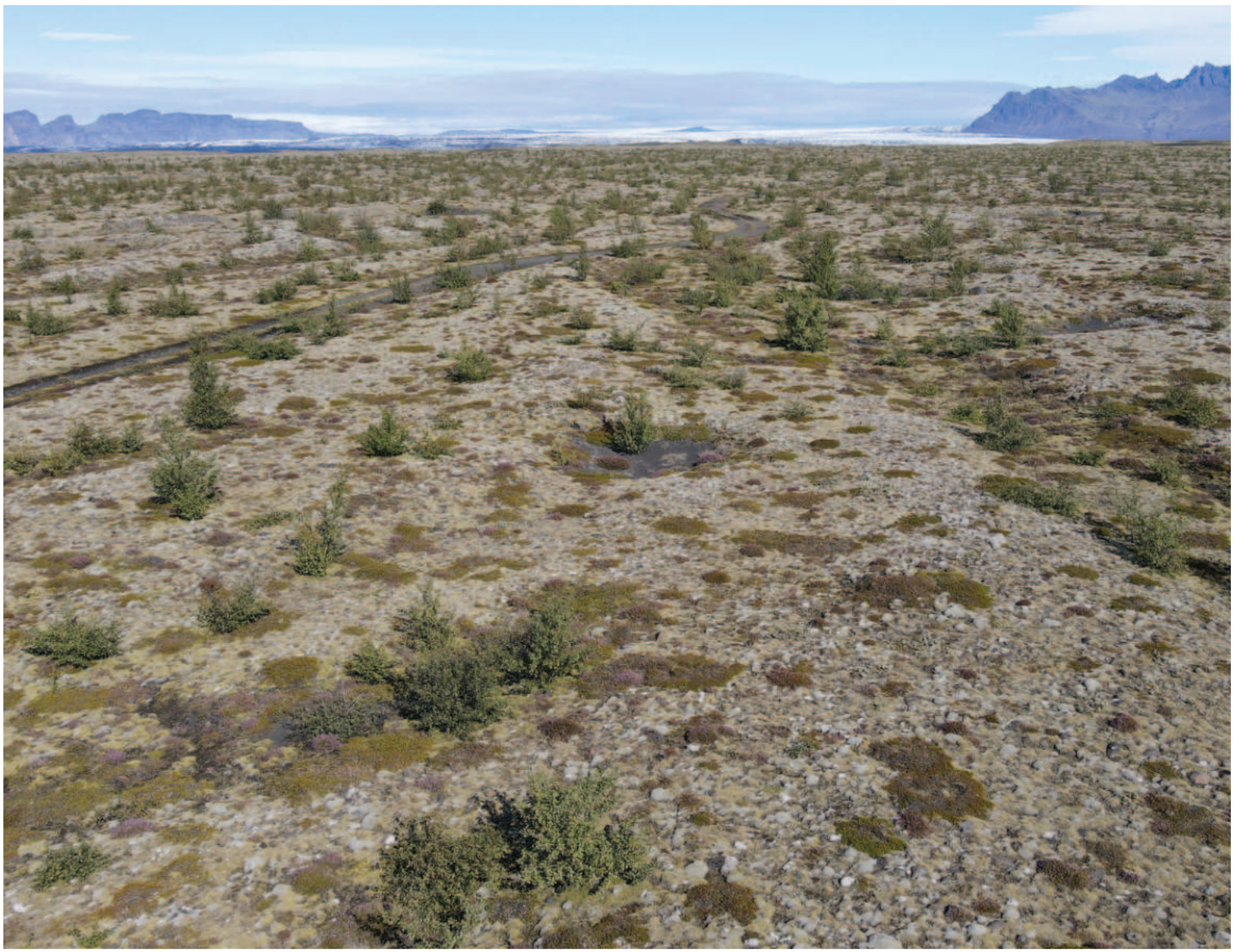
Sem dæmi um vistheimtarverkefni á landslagsskala má nefna aðgerðir til að endurheimta vistkerfi í Þórsmörk (mynd 23.16). Friðun Þórsmerkur fyrir sauðfjárbeit hefur leitt til vistheimtarverkefnis sem á vart sinn líka, en fæstir þeirra ferðamanna sem þangað koma gera sér grein fyrir þeim gríðarlegu breytingum sem orðið hafa á svæðinu. Landið var áður í mjög slæmu ástandi – berangur að mestu (mynd 23.17). Það sama á við um Skeiðarársand þar sem einn stærsti skógur landsins vex nú upp úr sandinum (mynd 21.18).

Mikilvægt er að gera sér grein fyrir þeim tíma sem endurheimt þarf að taka; nitur byggist hægt upp í kerfinu og getur tekið áratugi eða árhundruð að ná því magni sem æskilegt er fyrir öfluga næringarhringrás. Skammtímahagsmunir eiga ekki við, heldur þarf að hugsa í mörgum áratugum og jafnvel árhundruðum þegar komið er upp fyrir láglendið. Uppbygging illa farinna afrétta eftir friðun þeirra tekur aldir en stytta má ferlið verulega með vel ígrunduðum aðgerðum á faglegum grunni. Þessi hugsun þarf að finna sér stað í hugmyndum okkar um nýtingu landsins. Hún endurspeglast nú þegar í lögum er lúta að nýtingu lands, vistheimt og náttúruvernd en síður í framkvæmd laga og reglugerða enn sem komið er (ÓA 2019a,b, 2020). Til dæmis má færa rök fyrir því að beitarnýting svæða í slæmu ástandi fari í bága við náttúruverndarlög (ÓA 2019a) og nýrri lög um landgræðslu. Rannsóknir sýna vel að stuðningskerfi við sauðfjárrækt með tilliti til landnýtingar stenst ekki væntingar (Jónína Þorláksdóttir 2015, Jóhann Helgi Stefánsson 2018, Þórunn Pétursdóttir o.fl. 2019, 2020, ÓA 2019a,b). Beit á illa förnum svæðum felur aftur á móti í sér gríðarlega hátt kolefnisspor á hvert kíló kjöts (hundruð kg CO_2-ígilda á hvert kg kjöts, sjá 22. kafla).

Farsælast er að vistheimtarverkefni á stórum samfelldum svæðum séu byggð á grunni „samlaga“ – að sem flestum greinum samfélagsins sé boðið að borðinu. Reyndar er kveðið á um það í lögum um landgræðslu (155/2018) að virkja beri almenning og hagsmunaaðila til þátttöku í endurheimt og stefnumótun er varðar gróður- og jarðvegsvernd. Hér er einnig mikilvægt að minna á að Árósarsamningurinn svokallaði veitir almenningi rétt til að koma að ákvarðanatöku er varðar náttúruna og að upplýsingum og réttlátri málsmeðferð í umhverfismálum.

Vistheimtarverkefni sem rekin eru á grunni samlaga byggjast ekki á hagsmunagæslu heldur breiðri samvinnu þar sem sett eru markmið með langtímasýn að leiðarljósi í samræmi við bestu mögulegu vísindaþekkingu hvers tíma (Cash o.fl. 2003). „Hekluskógaverkefnið“ sem miðar að endurheimt birkiskóga í nágrenni Heklu (hekluskogar.is) er traustur vísir að verkefni af þessu tagi. Fagleg þekking á ástandi lands og vistheimt verður að ráða för. Mörg dæmi eru um slík samlög um endurheimt landgæða á grunni „þátttökuaðferða“ erlendis, m.a. í suðvesturhluta Bandaríkjanna, þar sem einnig hefur orðið hrun vistkerfa vegna búfjárbeitar, sbr. mynd 23.19 og myndatexta sem henni fylgir (sjá einnig Caves o.fl. 2013, Sheridan o.fl. 2013).

Mynd 23.17. Frá Þórsmörk 1953. Valahnúkssvæðið er gróðurlaus berangur, m.a. svæðið sem sést á myndinni á undan og á mynd 23.20. Mynd: Einar Þ. Guðjohnsen – úr safni Skógræktarinnar.



Mynd 23.18. Birki nemur land á Skeiðarársandi. Súlutindar til vinstri en Skeiðarárjökull efst fyrir miðju. Sum trén eru yfir 4 m á hæð. Myndin er tekin við réttina rétt norðan þjóðvegarins yfir sandinn. Nota má slóða í gegnum svæðið til vinstri sem mælikvarða fyrir myndina (2020).

Mynd 23.19. Dæmi um opinn samráðsfund á grunni þátttökuaðferða á Las Cienegas-verndarsvæðinu suðaustan við Tucson í Arizona. Hér er verið að vernda mjög sérstakar gerðir graslendis sem hlutu ekki sömu örlög og flest önnur í suðvesturhluta Bandaríkjanna vegna ofbeitar. Á fundinn komu um 40 manns, m.a. fulltrúar bænda og annarra íbúa á svæðinu, fulltrúar háskólasamfélagsins (prófessorar og framhaldsnemendur við University of Arizona), aðilar frá opinberum stofnunum á borð við Bureau of Land Management (BLM), USDA-NRCS og USDA-ARS (Landgræðslustofnun og Landbúnaðar-rannsóknastofnun Bandaríkjanna), Forest Service, Department of Fish and Wildlife, sagnfræðingar, sérfræðingar í villidýralífi (allt frá skordýrum og froskum til antilópa) og vel menntaðir sérfræðingar í vatnsvernd og vistkerfum frá sýslunni (Pima County – Tucson) og hreppnum (dalnum). Sem og einn Íslendingur.

Fundinum stýrði menntaður vistfræðingur með sérþekkingu í samráði og „samlögum" (e. participatory and stakeholder management). Hér er verið að ræða sókn „mesquite"-kjarrs (trén í bakgrunni) inn á graslendið en ennfremur eru innfluttar ágengar grastegundir ógnun við kerfið. Fjallað er um þetta samráð í Caves o.fl. 2013.

Stórverkefni á grunni afrétta skapa atvinnutækifæri fyrir menntafólk heima í héraði, m.a. við skipulag, rannsóknir og þróun, kortagerð, framkvæmd, eftirfylgni og mælingu á kolefnisuppsöfnun. Góðir möguleikar eru til tekjuöflunar við sölu á kolefnisbindingu (kolefnisjöfnun) sem getur skilað fjármunum til samfélaga á breiðum grunni. Slíkum verkefnum fylgja gjarnan námsverkefni fyrir nemendur í framhaldsskólum heima í héraði sem og á háskólastigi (BS, BA, MS, MA, ML og PhD) sem iðulega verður til þess að námsfólkið snýr til baka til heimahaganna og fæst við margvíslega nýsköpun í viðkomandi samfélagi.

Stuðningur við vistheimtarverkefni og samlög af þessu tagi er um margt eðlilegri en stuðningur við sauðfjárframleiðslu sem byggist á beit á hrundum vistkerfum. Hann leggur til fleiri þátta mannlífs og byggðar í héraði en stuðningur við þrönga framleiðslugrein sem er iðulega ekki í samræmi við ástand landsins.

Ferðalok

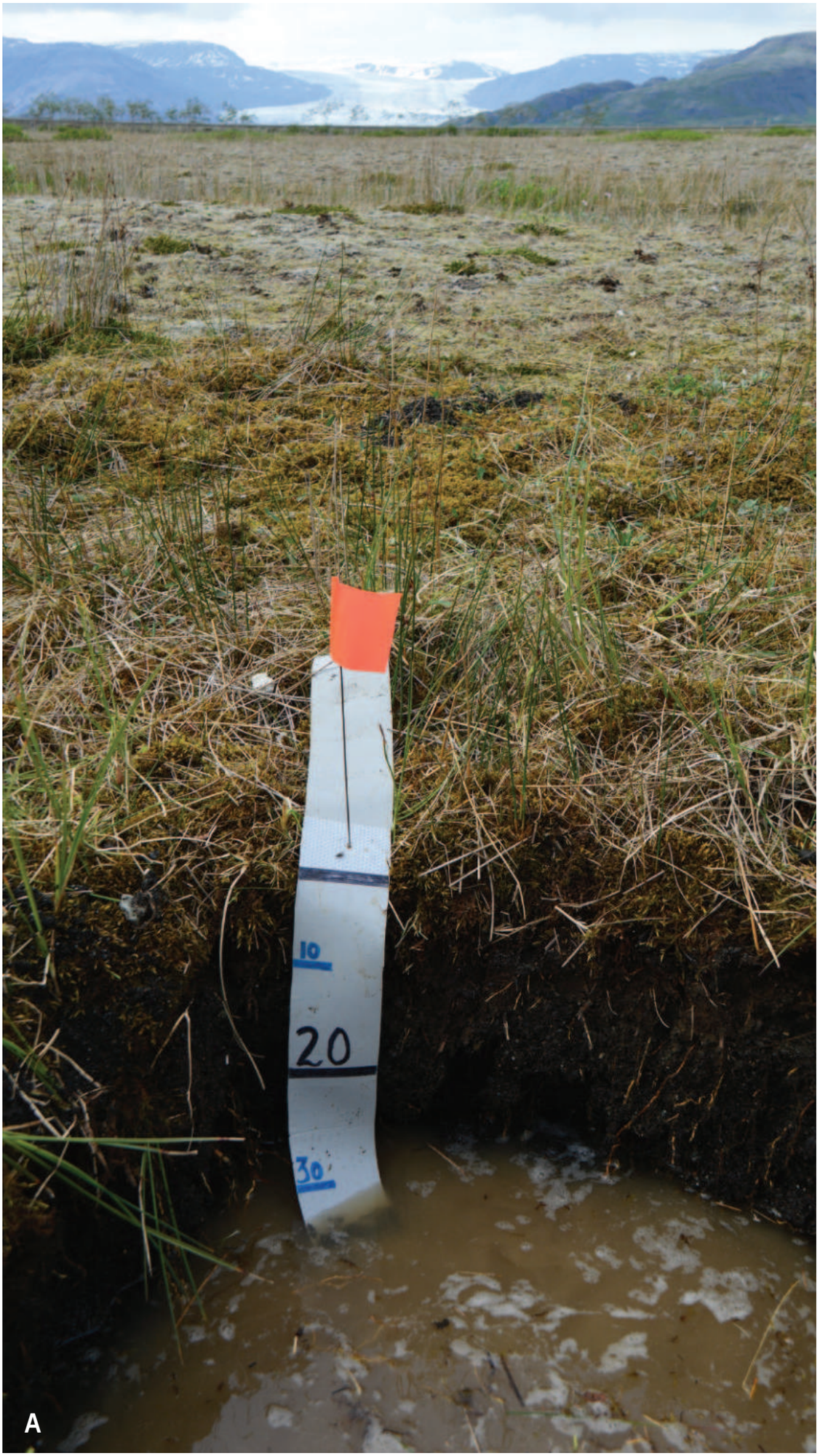
Í þessu riti hefur verið fjallað um grunneiginleika moldar og hlutverk jarðvegs í náttúrunni með áherslu á aðstæður hérlendis. Moldin er mótuð af eldvirkni sem ásamt sandumhverfinu, loftslaginu og miklum áhrifum frosts á moldina gerir náttúru landsins afar sérstæða á heimsvísu. Það má færa rök fyrir því að hvergi séu áhrif frosts á mold og vistkerfi meiri en hérlendis. Það má líka álykta sem svo að sandfok,

Mynd 23.20. Birkið breiðist út í Þórsmörk. Ekki eru nema 10–20 ár síðan þetta yfirborð var þakið melum og moldum (sjá mynd 23.17 hér á undan). Framvindan er orðin mjög ör en hún var mjög hæg í upphafi. Beit, jafnvel mjög lítil, getur hægt á eða stöðvað framvinduna í upphafi og því er mikilvægt að koma þróun vistkerfisins vel af stað án beitar þegar unnið er með landslagsheildir. Hins vegar er unnt að nýta öfluga birkiskóga til margvíslegra nota, m.a. beitar. Endurheimt landkosta í Þórsmörk er stórfenglegt vistheimtarverkefni á alþjóðavísu – og skýr vísbending um hvaða árangri er unnt að ná með samstilltu átaki margra ólíkra aðila með vel skilgreind markmið.

rykmengun og áfok á Íslandi eigi sér vart hliðstæðu í veröldinni vegna mikils magns efna, eðlis þeirra og mótun náttúrunnar í heild. Líklega hafa áhrif mannsins á vistkerfi verið víðtækari og alvarlegri hér á landi en annars staðar á jörðinni. Þó er það svo að mikið vantar upp á skilning okkar á þessari náttúru og fyrirbrigðum hennar.

Með landlæsi greinum við ástand landsins og um leið skynjum við þörf fyrir breytingu á viðhorfum til nýtingar á illa förnu landi. Við þurfum að vera upplýst um áhrif nýtingarinnar á loftslag – á kolefnisspor framleiðslu sem fer fram á raskaðri útjörð eða framræstum votlendum. Fyrri kaflar bókarinnar mynda faglegan grunn þar sem fjallað er um eðli moldarinnar almennt – þekking sem er nauðsynleg til mats á ástandi lands og aðgerðum til að bæta stöðu vistkerfa. Í seinni hlutanum koma undirliggjandi rætur landhnignunar einnig við sögu. Það er síðan mjög vel við hæfi að þessi síðasti kafli bókarinnar sé helgaður landgræðslu og vistheimt. Vonandi hafa lesendur ritsins getað sótt sér þangað fróðleik sem nýtist.

Höfundur elur þá von í brjósti að senn aukist áhugi og skilningur almennings á slæmri stöðu íslenskra vistkerfa og að það fjölgi vel menntuðu fagfólki sem getur tekist það á hendur að auka þekkingu sem nýtist til að endurheimta landgæði með hag komandi kynslóða að leiðarljósi.



Mynd 23.21 A og B.
Jarðvegsmyndun og gróðurframvinda við endurheimt votlendis eftir landgræðsluaðgerðir í Hornafirði. Fjölbreytt vistkerfi eru tekin að myndast á svæðinu – en það telst afar sérstakt á heimsvísu að votlendisjarðvegur myndist þar sem áður var svartur sandur.

C. Jarðvegsmyndun og gróðurframvinda með landnámi birkis á Skeiðarársandi.
Mynd: Ása L. Aradóttir.

B

C

Heimildir

Aerts, R., R.S.P. Van Logtestijn, N.I.W. Leblans og Bjarni D. Sigurðsson 2020. Effects of sea birds and soil development on plant and soil nutritional parameters after 50 years of succession on Surtsey. Surtsey Research 14:85–90.

Arnór Sigurjónsson (ritstj.) 1958. Sandgræðslan. Minnzt 50 ára starfs Sandgræðslu Íslands. Búnaðarfélag Íslands og Sandgræðsla ríkisins, Reykjavík.

Ása L. Aradóttir og D. Hagen 2013. Ecological Restoration: Approaches and Impacts on Vegetation, Soils and Society. Advances in Agronomy 120:173–222.

Ása L. Aradóttir og Guðmundur Halldórsson (ritstj.) 2011. Vistheimt á Íslandi. Landbúnaðarháskóli Íslands og Landgræðsla ríkisins, Reykjavík.

Ása L. Aradóttir og Þröstur Eysteinsson 2005. Restoration of birch woodlands in Iceland. Í: J.A. Stanturf og P. Madsen (ritstj.), Restoration of Boreal and Temperate Forests. CRC Press, London, UK. Bls. 195–209.

Ása L. Aradóttir, Þórunn Pétursdóttir, Guðmundur Halldórsson, Kristín Svavarsdóttir og Ólafur Arnalds 2013. Drivers of restoration – lessons from a century of restoration in Iceland: a review. Ecology and Society 18:Doi: 10.5751/ES-05946-180433.

Borgþór Magnússon, Guðmundur A. Guðmundsson, Sigmar Metúsalemsson og Sandra Granquist 2020. Seabirds and seals as drivers of plant succession on Surtsey. Surtsey Research 14:115–130.

Brita Berglund, Lars Hallgren og Ása L. Aradóttir 2015. Stakeholder in participatory land restoration in Iceland: Environmental officers' challenges and strategies. Environmental Management 56: 519-531.

Bryndís Marteinsdóttir, Elín Fjóla Þórarinsdóttir, Guðmundur Halldórsson, Jóhann Helgi Stefánsson, Jóhann Þórsson, Kristín Svavarsdóttir, Rán Finnsdóttir og Sigþrúður Jónsdóttir 2021. GroLind-Sustainable Land Use Based on Ecological Knowledge. The XXIV International Grassland Congress / XI International Rangeland Congress. Virtual conference, Kenya Agricultural and Livestock Research Organization, Nairobi, Kenya.

Cash, D.W., W.C. Clark, F. Alcock, N.M. Dickson, N. Eckley, D.H. Gutson, J. Jåger og R.B. Mitchell 2003. Knowledge systems for sustainable development. PNAS 100:8086–8091.

Caves, J.K., G.S. Bodner, K. Simms, L.A. Fisher og T. Robertson 2013. Integrating collaboration, adaptive management, and scenario-planning: Experiences at Las Cienegas National Conservation Area. Ecology and Society 18:43. http://dx.doi.org/10.5751/ES-05749-180343.

Crofts, R. 2011. Healing the Land. Landgræðsla ríkisins, Gunnarsholti.

Friðgeir G. Olgeirsson 2007. Sáðmenn sandanna. Landgræðslan, Gunnarsholti.

Gann, G.D., T. McDonald, B. Walder, J. Aronson, C.R. Nelson, J. Jonson, J.G. Hallett, C. Eisenberg, M.R. Guariguata, J. Liu, F. Hua, C. Echeverria, E.K. Gonzales, N. Shaw, K. Decleer og K.W. Dixon 2019. International principles and standards for the practice of ecological restoration. 2. útg. Restoration Ecology 27:S1–S46.

Guðrún Óskarsdóttir, Þóra Ellen Þórhallsdóttir, Anna Helga Jónsdóttir, Hulda Margrét Birkisdóttir og Kristín Svavarsdóttir 2022. Establishment of mountain birch (Betula pubescens ssp. tortuosa) on a glacial outwash plain: Spatial patterns and decadal processes. Ecology and Evolution 2022;12:e9430.

Gústaf M. Ásbjörnsson og Sigríður Þorvaldsdóttir 2021. Landbótasjóður Norðurhéraðs. Ársskýrsla 2021. Landgræðslan, Gunnarsholti.

IPBES 2019. Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. S. Díaz, J. Settele, E.S. Brondízio, H.T. Ngo, M. Guèze, J. Agard, A. Arneth, P. Balvanera, K.A. Brauman og 20 fleiri (ritstj.), Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, IPBES secretariat, Bonn, Þýskaland.

Isabel C. Barrio og Ólafur Arnalds 2022. Agricultural land degradation and ecosystem collapse in Iceland. Í: P. Pereira, I. Bogunovic, M. Munoz Rojas and W. Zhao (ritstj.), Global Agricultural Land Degradation, Volume I, The Handbook of Environmental Chemistry Series. Springer, Berlin, Heidelberg. doi.org/10.1007/698_2022_920.

Jóhann Helgi Stefánsson 2018. Of sheep and men. Analysis of the agri-environmental cross-compliance policies of the Icelandic sheep grazing regime. MA-ritgerð, Félagsvísindasvið, Háskóli Íslands, Reykjavík.

Jónína Þorláksdóttir 2015. Connecting sustainable land use and quality management in sheep farming: effective stakeholder participation or unwanted obligation? MS-ritgerð, Umhverfis- og náttúruvísindasvið, Háskóli Íslands.

Ólafur Arnalds 1988. Uppgræðsla, hugtök, markmið og árangur. Náttúrufræðingurinn 58:81–85.

Ólafur Arnalds 2019a. Á röngunni. Alvarlegir hnökrar á framkvæmd landnýtingarþáttar gæðastýringar í sauðfjárrækt. Rit LbhÍ nr. 118. Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.

Ólafur Arnalds 2019b. Development of perverse environmental subsides for sheep production in Iceland. Agricultural Sciences 10:1135–1151, 10.4236/as.2019.109086.

Ólafur Arnalds 2020. Ástand lands og hrun íslenskra vistkerfa. Rit LbhÍ nr. 130. Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.

Ólafur Arnalds og Ása L. Aradóttir 2015. Að lesa og lækna landið. Landvernd, Landgræðsla ríkisins og Landbúnaðarháskóli Íslands, Reykjavík.

Ólafur Arnalds, Berglind Orradóttir og Ása L. Aradóttir 2013. Carbon accumulation in Icelandic desert Andosols during early stages of restoration. Geoderma 193–194:172–179.

Ólafur Arnalds, Fanney Ósk Gísladóttir og Berglind Orradóttir 2012. Determination of aeolian transport rates of volcanic soils in Iceland. Geomorphology 167–168:4–12.

Ólafur Arnalds, Ása L. Aradóttir og Kristín Svavarsdóttir (ritstj.) 2010. Gróðurrannsóknir vegna hættu á áfoki frá Hálslóni. Rit LbhÍ nr. 27, Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.

Ólafur Arnalds, Hlynur Óskarsson, Jón Guðmundsson, Sigmundur Helgi Brink og Fanney Ósk Gísladóttir 2016. Icelandic inland wetlands: Characteristics and extent of draining. Wetlands 36:759–769.

Sheridan, T.E., N.F. Sayre og D. Sibert 2013. Beyond "stakeholders" and zero-sum game: towards community-based collaborative conservation in the American West. Í: S. Charnley, T.E. Sheridan og G.P. Nabhan (ritstj.), Stitching the West Back Together. The University of Chicago Press, Chicago, USA. Bls. 53–75.

Sigurður Greipsson 2012. Catastrophic soil erosion in Iceland: Impact of long-term climate change, compounded natural disturbances and human driven land-use changes. Catena 98:41–54.

Sigurður Reynir Gíslason, E.H. Oelkers, Eydís Sigurdís Eiríksdóttir, M.I. Kardjilov, Guðrún Gísladóttir, Bergur Sigfússon, Árni Snorrason, Sverrir O. Elefsen, Jórunn Harðardóttir, P. Torssander og Níels Ö. Óskarsson 2009. Direct evidence of the feedback between climate and weathering. Earth and Planetary Science Letters 277: 231–222.

Starfshópur LbhÍ 2016. Að meta landgræðsluland með hliðsjón af því hvort það er „tilbúið til afhendingar" til landbúnaðarnota. Ása L. Aradóttir, Fanney Ósk Gísladóttir, Hlynur Óskarsson og Ólafur Arnalds, Umhverfisdeild Landbúnaðarháskóla Íslands, greinargerð unnin fyrir Landgræðslu ríkisins. Reykjavík.

Steinunn Garðarsdóttir 2021. Endurheimt staðargróðurs á framkvæmdasvæðum. Þingvallavegur. Landbúnaðarháskóli Íslands, skýrsla til Vegagerðarinnar.

UN-CCD 2022. The Global Land Outlook. 2. útg. United Nations Convention to Combat Desertification – UNCCD, Bonn, Þýskaland.

Þóra Ellen Þórhallsdóttir og Kristín Svavarsdóttir 2022. The environmental history of Skeiðarársandur Outwash Plain, Iceland. Journal of North Atlantic 43(12): 1–21.

Þórunn Pétursdóttir 2020. Governing land use and restoration: The long-term progress of environmental and agricultural policies on sustainable rangeland management and restoration in Iceland. PhD-ritgerð, Landbúnaðarháskóli Íslands, Náttúra og skógur, Hvanneyri og Reykjavík.

Þórunn Pétursdóttir, S. Baker og Ása L. Aradóttir 2020. Functional silos and other governance challenges of rangeland management in Iceland. Environmental Science and Policy 105:37–46.

Þórunn Pétursdóttir, Ólafur Arnalds, S. Baker, L. Montanarella og Ása L. Aradóttir 2013. A social-ecological system approach to analyze stakeholders' interaction within a large-scale rangeland restoration program. Ecology and Society 18:29.

Þórunn Pétursdóttir, Ása L. Aradóttir, S. Baker, Guðmundur Halldórsson, B. Sonneveld 2017. Successes and failures in rangeland restoration: An Icelandic case study. Land Degradation and Development 28:34–45.