



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 „frumbersku“ 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 mótaskið 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. Móðurefni 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 sambandviðefni 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 fjölræðinga.

8.1. Jarðvegsmyndandi þættir

Í árdaga jarðvegsfræðinnar í Rússlandi voru heimamenn teknir að ferðast með jarnbrautarlestum 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 endurspeglir efnistöku þessarar bókar, þar sem íslenskir meginþættir á borð við áfok og frost, sem og landnýting, eru áberandi við þróun moldarinnar.

8.1.1. Móðurefni

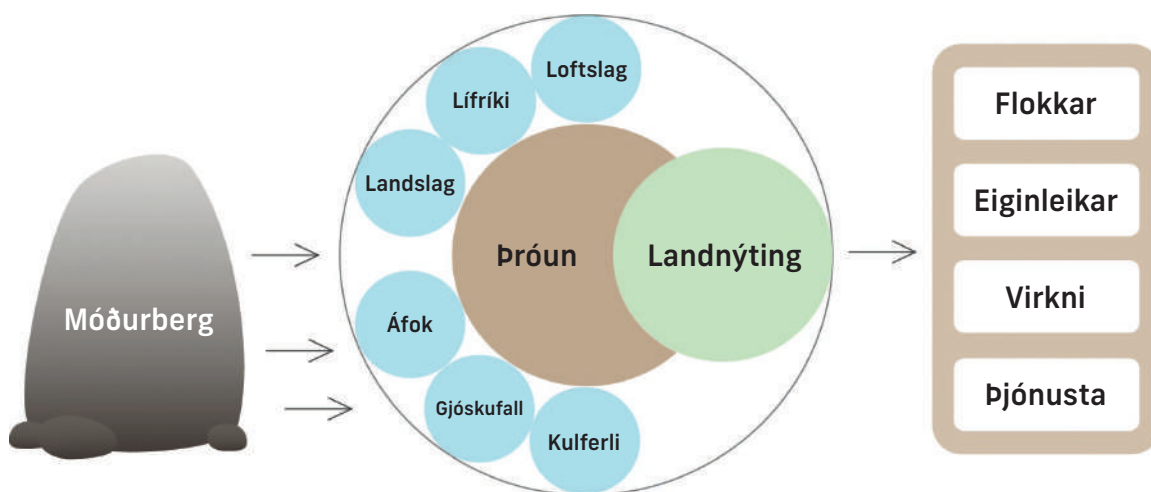
Bergefni í yfirborðinu eru móðurefni jarðvegs (e. parent materials). Þau eru ákaflega misjöfn að gerð, sem áður sagði. Gjóska, hraunlög, jökulurð og

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 gjósकुríkt móðurberg er ríkjandi, það leggst einnig til sem áfok eða með gjósकुfalli. Kulferli (áhrif frosts og þýðu) eru áberandi á Íslandi (sjá sérstaka kafla um þessa þætti síðar). Landnýting er ráðandi þáttur fyrir þróun moldarinnar héraðs 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 gekkyfir og raufniðuryfirborðið. Á Íslandi er gjóska (gler) og basískur bergsalli oft meginuppistaða bergefna 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 nágreppi jöklanna er vatnsósa og óstöðugt. Mikið af seti berst með jökulám til jökuljaðrana, 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 tákna 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. glacio-fluvial 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 undanförunum 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, eyðimerkurmynd-

unar 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 stórflijtanna, 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 þurr, þornar alveg
Udic, frekar blautt, a.m.k. hluta úr ári
Aquic, blautt, mýri
Xeric, Miðjarðarhafsloftslag, vetrarúrcoma, 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

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.

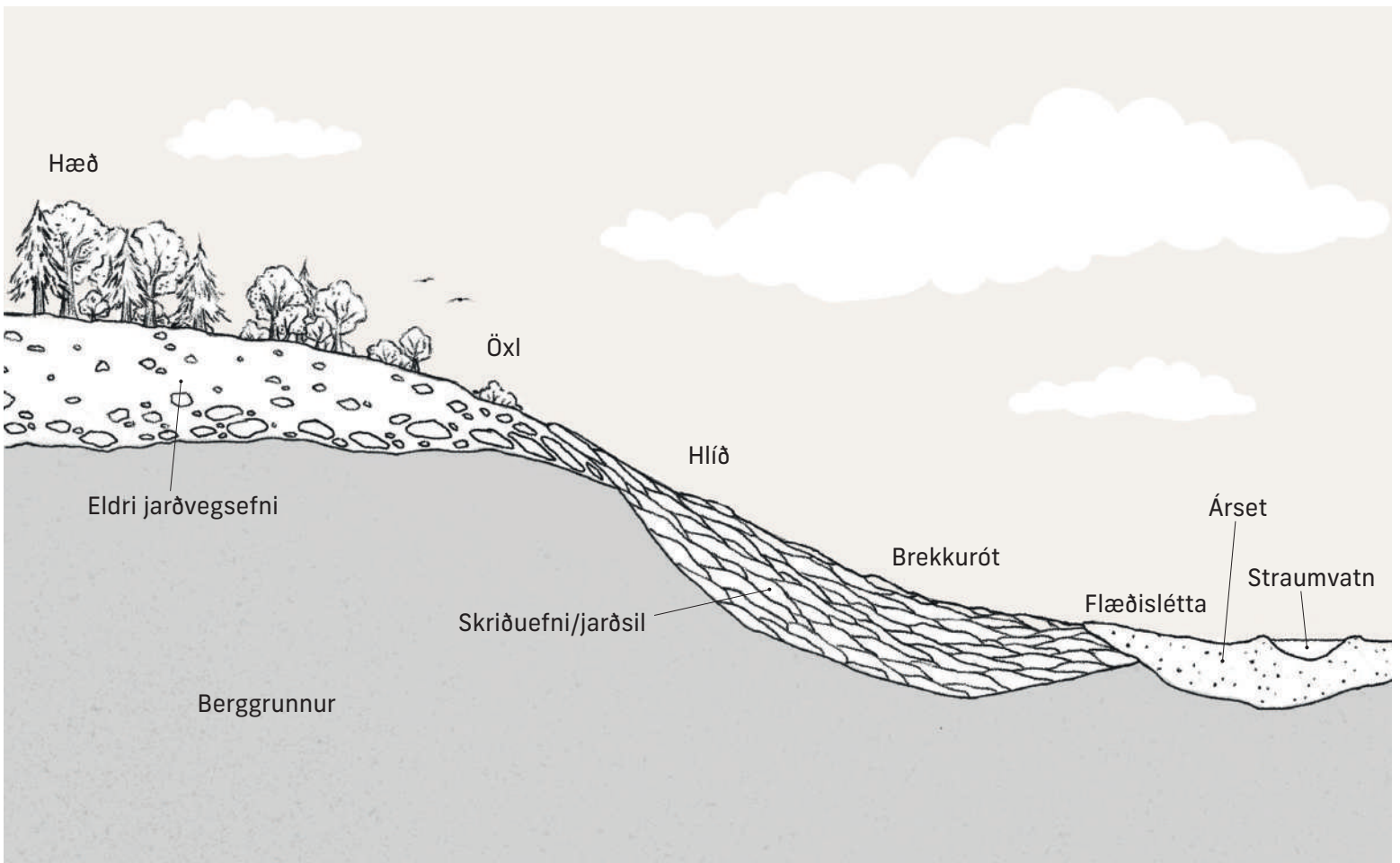
Segja má að jarðvegurinn skrái sögu umhverfis síns og þar með loftslagsins, enda þótt sú saga geti verið nokkuð torræðin. Sem dæmi má nefna að leirríkt Bt-lag getur ekki myndast í jarðvegi í eyðimerkurloftslagi, en þó er slíkt lag algengt í jarðvegi núverandi eyðimarka. Lagið hefur þá myndast þegar loftslag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

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. Enhafaverður 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-



Mynd 8.5. Frjósöm ræktarlönd á áfokslögunum (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 mótast landslagið aldur jarðvegsins en í öðru lagi mótast 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 dalbotnum 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-hraunlagastafli 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 þurr 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 enn fremur mikilvirkir í jarðvegsraski. Smærri lífverur, svo sem sveppapræðir 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-fjöllum í Kaliforníu. Þessi tré eru á meðal elstu lífvera jarðar og þau mestu að rúmmáli, þyngd og hæð. Þau eru tákmynd 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 efna-veðrunar. Fjallað er um jarðvegsgerðir í kaflanum hér á eftir.

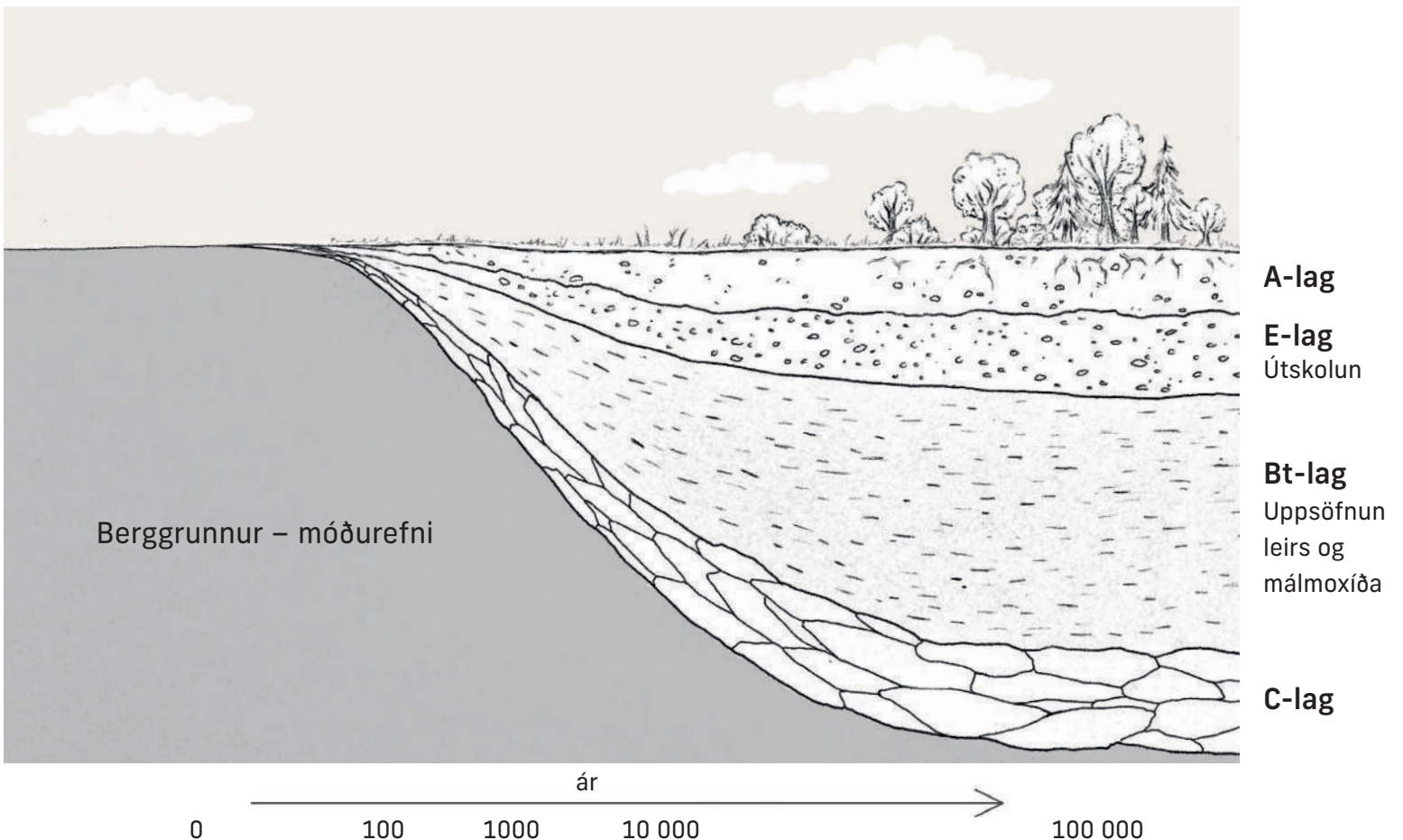
Þar sem jökull gengur yfir land hrærir hann saman yfirborðsefnunum í einn allsherjar graut (sjá umfjöllun um löss hér að ofan) en þegar hann hörfar hefst jarðvegsmyndun á ný í jökulurðinni. Því eru unglíngarnir í hópi jarðvegs mjög útbreiddir á öllum þeim svæðum sem ísaldarjökullinn gekk yfir eða þar sem þykkt 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 eldfjalla-svæðum. 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 löss-svæðunum. 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 umhverfis-þætti 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 jarðvegin, einkum lífræn efni.
4. Efni færast til í jarðveginum, bæði í upplausn (jónir, örefni) og fyrir tilverkað lífvera.
5. Rask: áfok, flóð og önnur setmyndun geta hlaðið nýjum bergefnum við jarðvegin en rof veldur tapi á moldarefnum.



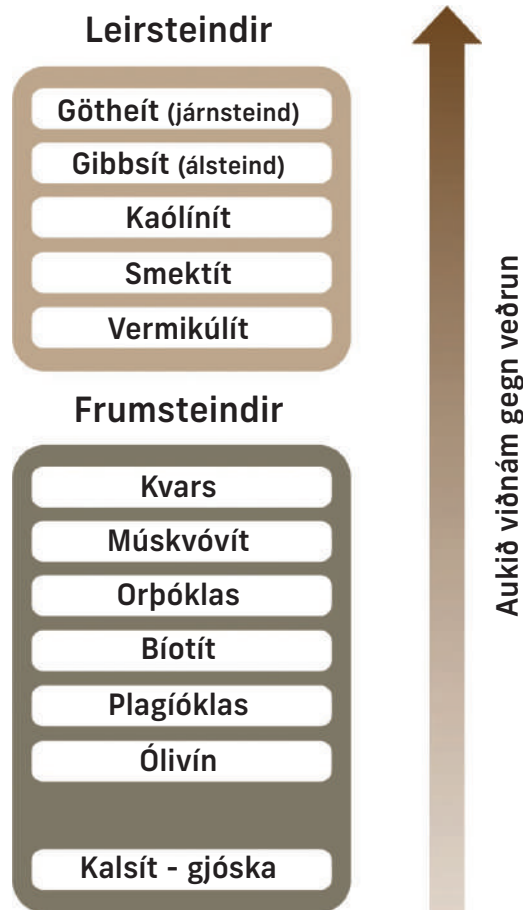
Mynd 8.9. Tíminn er meginþáttur fyrir skilning á þróun jarðvegs. A- og O-lög myndast á fáum árum eða áratugum. Þúsundir ára tekur að mynda þykkt E- og Bt-lög.

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 héraendis. 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 graf götur 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 basalhrauns 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 hægst 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

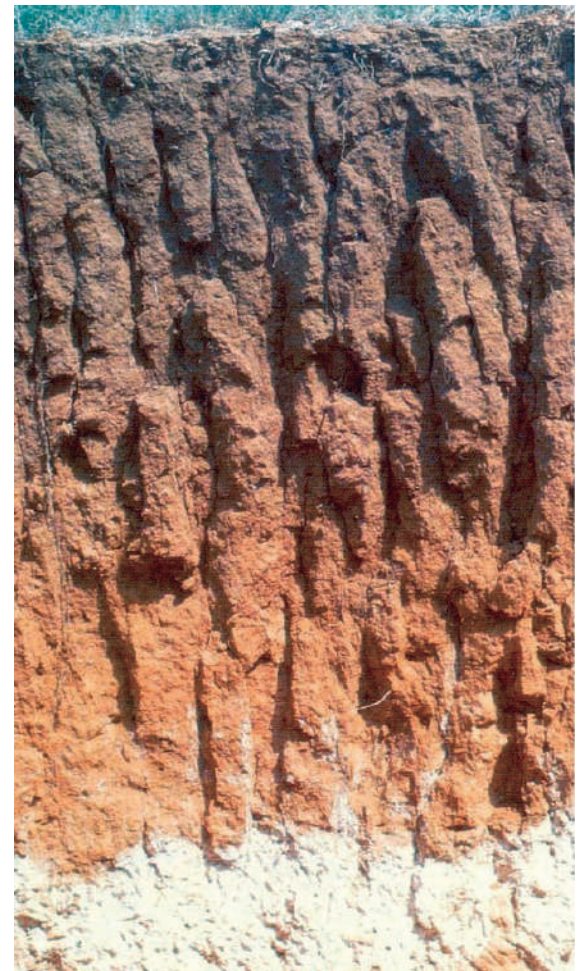
Þau efni sem leysast upp í A- og E-lögum berast niður í B-lagið og

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 álsilíkött 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 ljósliða lag sem einkum er lítað af kvasi – 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 oftast talin til ferla í Evrópu.

Í *eldfjallajörð* eru það allófan, ímógólít, ferrihýdrit og halloysít sem eru aðalsteindirnar sem myndast. Það leiðir þó yfirleitt ekki til þróunar Bt-lags á sama hátt og þar sem blaðsilíkköt 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 ferrihýdrits 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. Titan (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. Samsagt: önnur efni hafa tapast úr moldinni.

Það bákít 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 járn, 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 kvarsí 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 járn. 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 járn 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 grafreitir 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 *mójarðar* 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 mómyrar heimskautasvæðanna einstaklega ríkar af lífrænu efni. Við þessar aðstæður getur myndast margra metra þykk mó mold (mynd 8.15) þar sem safnast hefur geypilegt magn lífrænna efna (jafnvel $>200 \text{ kg/m}^3$).

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 þykkann 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. Philipp, 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 Fjóra 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 meistara verkefni 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