



14

**Foldin próast –
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 móðurefni 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 efnunum. 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 kornastærðargreiningar 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. Leirefni

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, götheit 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

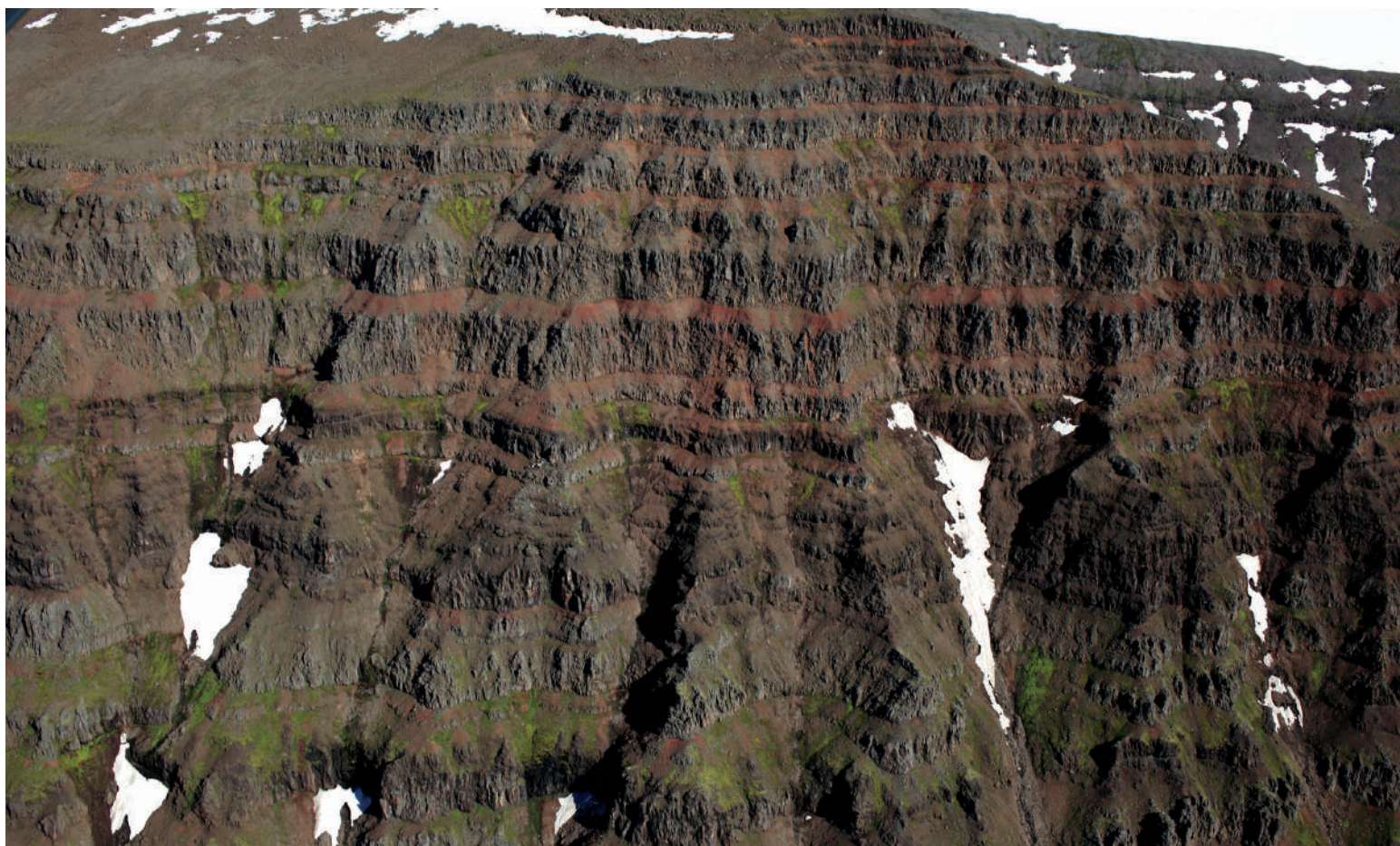
getur verið að finna, jafnvel námur þar sem fá má efni til leirbrennslu og annarra nota. Margvíslegar leirsteindir er einnig að finna í hinum svonefndu rauðu millilögum sem víða eru einkennandi fyrir tertíer hraunlagastaflann (mynd 14.2). Aflræn veðrun með frosti og þýðu, vatnsrennsli og skriðuföllum 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 blaðsilíkköt í jarðvegi hér og þar. Athyglisvert er að Bonatotsky 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 (Bonatotsky o.fl. 2019) ummerki um smektít og jafnvel fleiri lagsilíkköt 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 blaðsilíkköt 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 lagsilíkköt á borð við smektít, sem geta síðan borist í jarðveginn fyrir neðan við veðrun og rof. Ljósmynd: Birgir V. Óskarsson.

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 landbúnaðarfolk þar sem einn fundargesta mótmælti harðlega niðurstöðunum – efnaveðrun í íslensku 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 íslensku mold á framfæri héraendis, 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.

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 blaðsilíköti í mun minna mæli og stundum ekki sem neinu nemur.

14.2.2 Hversu mikið er af leir í íslensku 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 blaðsilíköti ljá jarðvegi.

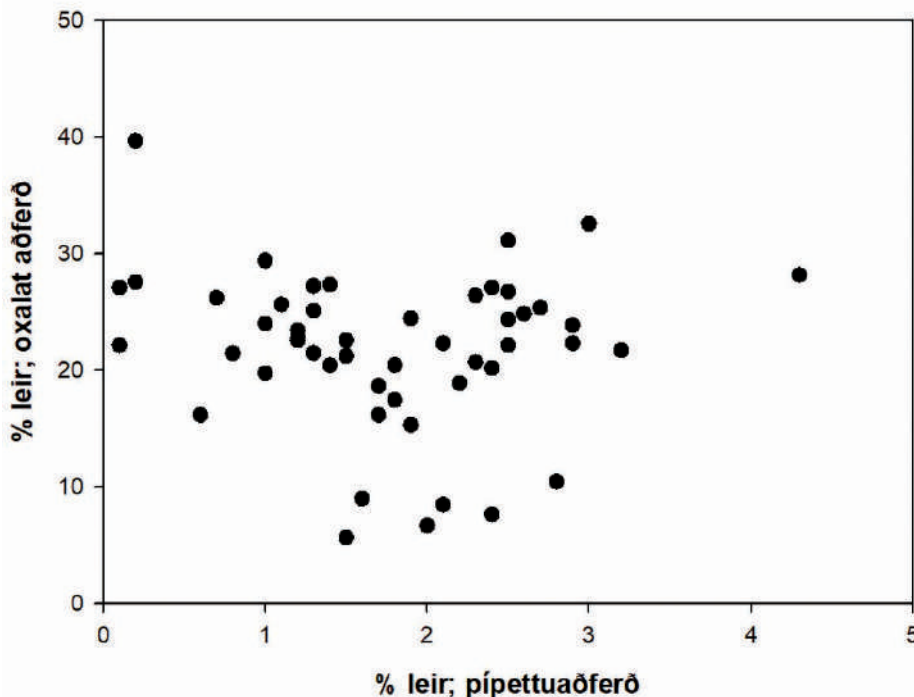
Þeir erfiðleikar sem við er að eiga þegar mæla á leir með hefðbundnum aðferðum í íslensku mold koma vel fram á meðfylgjandi grafi fyrir sýni sem hafa bæði verið mæld með algengustu aðferðinni (pípettu-aðferð) og oxalat-skoli (mynd 14.3). Lóðrétti ásinn gefur

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 íslensku 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 jarðvegssgerða og á landsvísu. Lítum t.d. á magn allófans í fjölda jarðvegssýna úr gagnagrunni Lbhí, en þar er magn leirs sýnt á lóðréttu ásnum en kolefnisinnihald á láréttu ásnum (mynd 14.4).

Grafið á mynd 14.4 spannar nokkra jarðvegsslag: *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*,



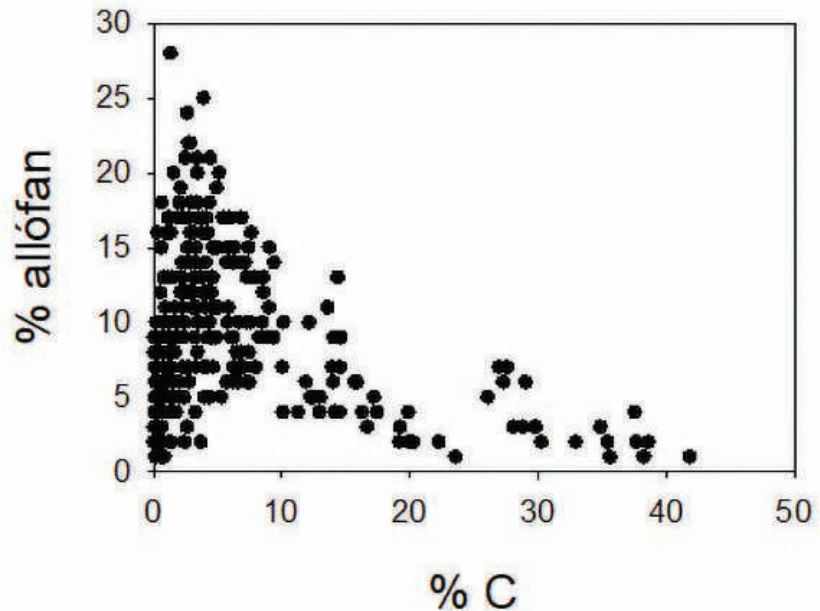
Mynd 14.3. Dæmi um mælingu á leirinnihaldi með oxalat-skoli og hefðbundinni aðferð (pípettu-aðferð) frá sömu íslensku sýnunum. Leirinn kemur ekki fram með þessari hefðbundnu aðferð (láréttur ás) en mælist allt að 40% með oxalat-aðferðinni í þessum sýnum (lóðréttur ás).

með meðalgildi kolefnis 1–10% C, en *svartjörð* og *mójjörð* hafa mun minna af allófan. 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 allófan 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 Havaií, en við þær aðstæður er ferrihýdrítið ekki stöðugt mjög lengi, það umbreytist smám saman í götheit og aðrar járnsteindir. Aðgengileg umfjöllun um járnsteindir í íslenskum jarðvegi eftir Þorstein Guðmundsson birtist í *Fræðapingi landbúnaðarins* (2009).

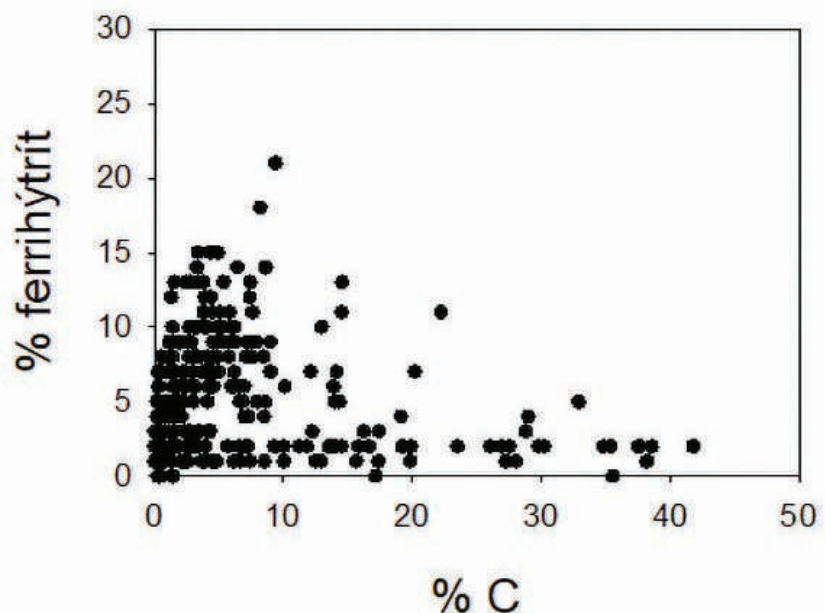
Besta leiðin til að meta heildarmagn leirs í íslenskri mold er að leggja saman



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 oxalat-aðferðin 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 láglandi 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 áfök 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 örðuð af jarðvegsörverum.

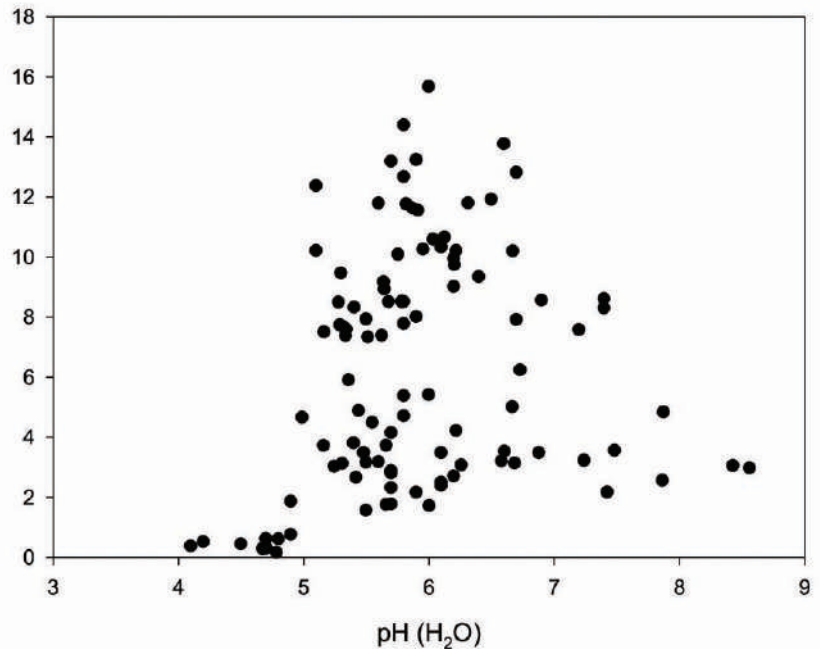
Al/Si í íslenskri mold er yfirleitt á bilinu 0,8–2, en athyglisvert er að hlutfallið er yfirleitt afar lágt í *glerjörð*, eða nálægt 1. Töluvert er um mold með allófani með Al/Si-hlutfall um 1,2. Hlutfallið er því almennt séð fremur lágt í íslenskri mold miðað við annan jarðveg eldfjallasvæða, sem m.a. 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-knipa 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.

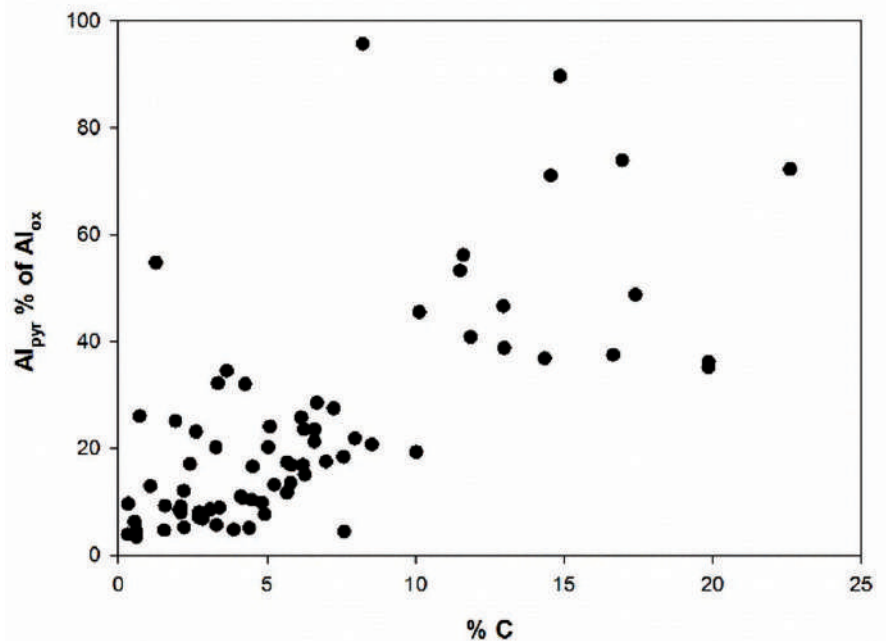
14.2.4. Um ferrihýdrít

Leirsteindin ferrihýdrít er almennt mjög virk og hefur mikið yfirborðsflatarmál og mikla vatnsheldni. Ferrihýdrít er



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).

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 14.8. 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 Lbhl.

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 (García-Rodeja o.fl. 2007). Stoops o.fl. (2008) tóku eftir því að sumt af ferrihýdrítinu var á fyrsta stigi þess að þróast yfir í götheit, 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; þykkun 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 áhrifapáttum jarðvegsmyndunar sem tekur einnig og kannski frekar til þess sem gerist ofan í moldinni. Á undanförunum árum hefur þekking á jarðvegsmyndun aukist verulega héraendis 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. Þrjú 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

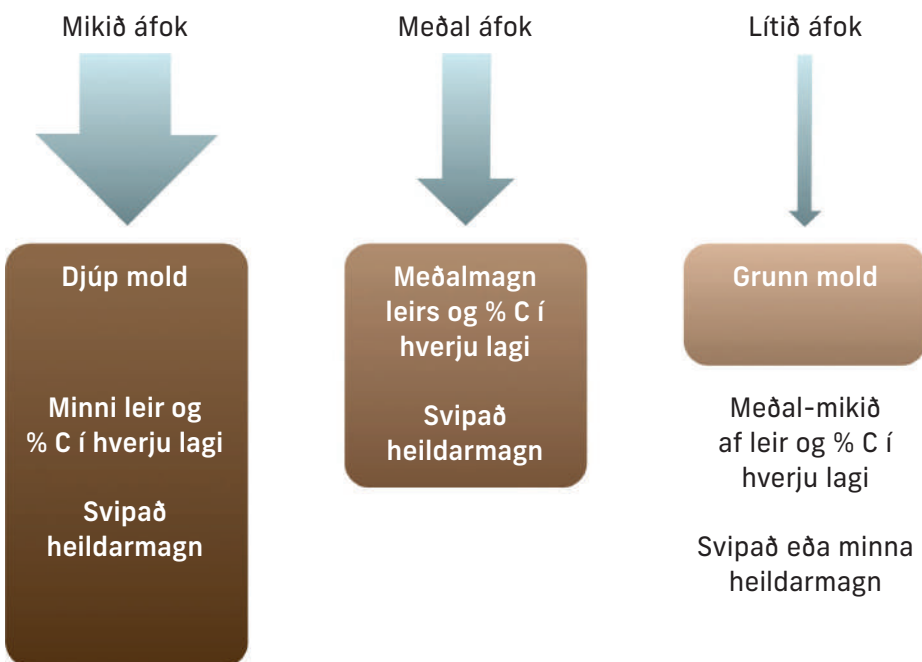
- **Stöðugt áfok glerefna** sem leggst eins og teppi yfir landið og verður móðurefni moldarinnar sem þykkar í samræmi við áfokið.
- **Gjóskufallsatburðir – öskulög**, allt frá fínum þunnum öskulögum til þykkra grófra öskulaga sem eru mismunandi að samsetningu og veðrast misjafnlega hratt. Þykk og gróf 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 meginþættir *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 jarðvegsþykkun.
- **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 líparítikorn, 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 Örafajökli frá 1362 er lítið veðrað á láglandi Suðausturlands, enda þótt hitastig þar sé fremur milt og úrkoma mikil á svæðinu (sjá Bonatotsky o.fl. 2019).

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 hærrí 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)

Mynd 14.9. Samspil áfokshraða, myndunar leirs og uppsöfnunar kolefnis.

og er oft mælt í tonnum sem berast af hverjum ferkílómetra eða öðrum svipuðum einingum (t/km² á ári). Hröð efnaveðrun í moldinni endurspeglar á 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 óvísða 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 jarðvegsmýndun 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 þróunina er uppsöfnun lífrænna efna, sem eru á bilinu 4–7% C, en þó er mun minna af þeim í gjóskulögum

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.

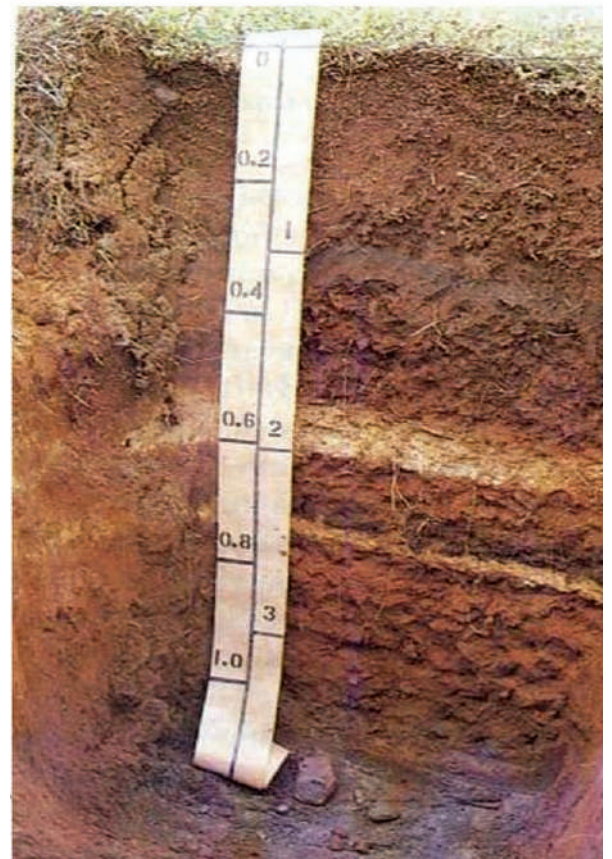
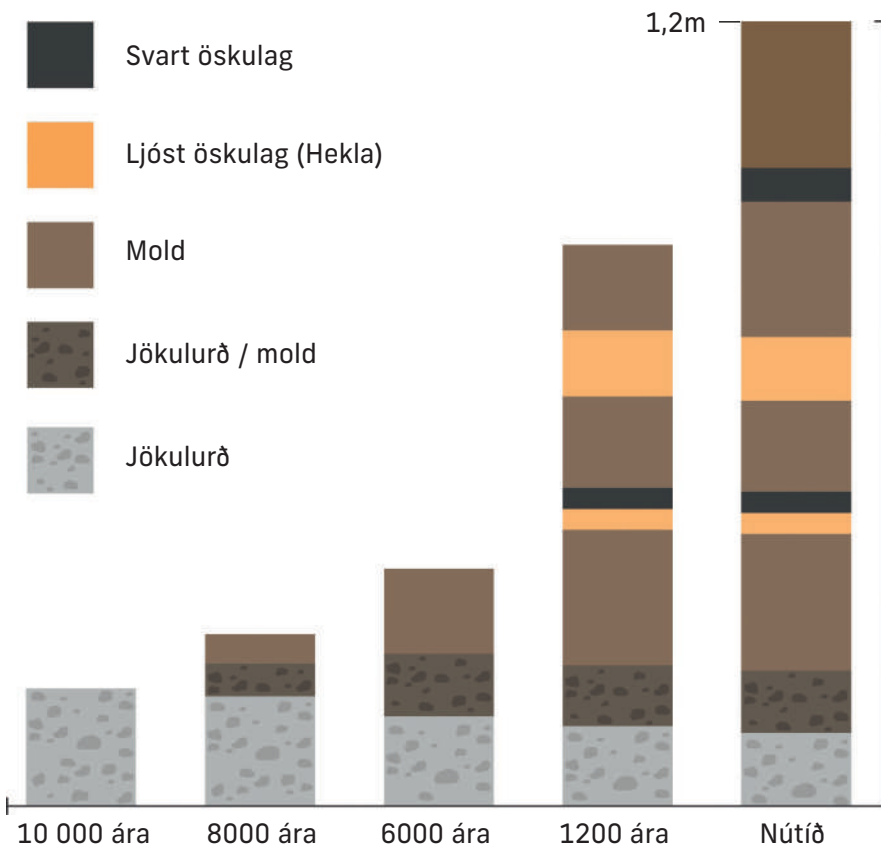
Fjöldi annarra rannsókna og vísindagreina hafa fylgt í kjölfarið, svo sem grein Guðrúnar Gísladóttur o.fl. (2010) um Krísuvíkursvæðið. Fjallað verður nánar um þessar og fleiri rannsóknir þar sem áfok kemur við sögu í 20. kafla um hrun íslenskra vistkerfa.

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 hægstur, 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 örrari 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 örrari eftir að gjóskulag „a“ fellur í goshrinu í Bárðar-

bungukerfinu um 1480. Það gos hefur valdið verulegu tjóni á vistkerfum á Norðausturlandi sem þá voru orðin veikari fyrir vegna landnýtingar í sam-
anburði við tímamann fyrir landnám. Þessi öri þykknunarhraði er dæmigerður fyrir mikið áfok á og við gosbelti landsins og í nálægð mestu ryk uppsprettanna, 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 hægst. 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, kristöllumar 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 Veidivatnagosinu frá því um 1480 (Bárðarbungos). 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 örrari 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. Þykkun og mælikvarðar á efnaveðrun í sniðinu við Goðafoss. Vísar til sniðs á mynd 14.10. AD: ártal; BP: aldur í árum.

TÍMABIL	ALDUR	ÞYKKUN [§]	LEIR ^{&}
		<i>mm á ári</i>	<i>g/m² á ári</i>
„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 fæðuframléiðslu 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 hérlandis er að finna í doktorsverkefni Þorsteins Guðmundssonar (1978) og niðurstöðum rannsókna COST 622-hópsins (ÓA 2007). Bonatutzky 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 áréttta 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 láglandis 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 Atvinnudeilda B – No. 13*, Reykjavík.

Bonatzky, 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.

Bonatzky, 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.

Bonatzky, 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 Cosmochimica Acta* 107:65–81.

Eydís Salome Eiríksdóttir, P. Louvat, Sigurður R. Gíslason, Niels Óskarsson og Jörunn 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. Ponteverta, 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 ísländska 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. Nanzyo, 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 í eoliske sedimenter og tefraavsetningar på Island*. Hovedopgave (thesis), Norges landbrukshøgskole, 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. Oelkers, Eydís Salome Eiríksdóttir, M.I. Kardjilov, Guðrún Gísladóttir, Bergur Sigfússon, Árni Snorrason, Sverrir O. Elefsen, Jórunn Harðardóttir, P. Torssander og Niels Óskarsson 2009. Direct evidence of the feedback between climate and weathering. *Earth and Planetary Science Letters* 277:213–222.

Sigurður Þórarinnsson 1961. Uppblástur á Íslandi í ljósi öskulagarannsóknna. *Ársrit Skógræktarfélagss 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 floccs 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. *Fræðapeningur landbúnaðarins* 2009:433–437.

