

Kulferli, frost og mold

Ólafur Arnalds



Kulferli, frost og mold

Ólafur Arnalds

Febrúar 2010
Landbúnaðarháskóli Íslands, umhverfiseild

Efnisyfirlit

Formáli	2
Inngangur	3
1. Heimskautasvæði, loftslag og Ísland	5
2. Útbreiðsla og þykkt sífera	6
3. Vatn frýs í jarðvegi	6
4. Varmaleiðni	8
5. Vatnsleiðni, vatnsrýmd, samloðun, frostnæm efni, frostfrítt efni.....	9
6. Íslenskur jarðvegur er mjög frostnæmur.....	9
7. Frostgerðir.....	10
7.1. Holklaki, ísig og afrennsli	10
7.2. Ísnálar	12
8. Þúfur.....	13
9. Meltíglar og frostlyfting á möl.....	16
10. Rústir – freðmýrarústir og pingo	18
10.1. Rústir	18
10.2. Pingo.....	20
11. Jarðsil - skriður	20
12. Urðarjökklar.....	23
13. Frostveðrun	23
14. Útbreiðsla sífrera á Íslandi.....	24
15. Framkvæmdir og frost á Íslandi.....	24
16. Gildi sífrerasvæða fyrir loftslag jarðar.....	25
Heimildir	26

Formáli

Höfundur þessa rits hefur kennt jarðvegsfræði í mörg ár, fyrst við Háskóla Íslands, en síðar við Landbúnaðarháskóla Íslands. Einn meginþátta í þeirri kennslu hefur verið að fræða nemendur um kulferli – áhrif frosts og þýðu, enda er fátt sem mótar yfirborð landsins og moldina meira en kulferli. Því er ástæða til að leggja ríkulegri áherslu á kulferli við kennslu á jarðvegsfræði héraendis en tíðkast almennt annars staðar. En það skortir yfirleitt mikið á umfjöllun um kulferli í kennslubókum í jarðvegsfræði. Þá hefur höfundur ritsins komið að kennslu í námskeiðum er lúta að vatnshag (hydrology), landgræðslu og vistheimt, vistfræði Íslands o.fl. greinum, þar sem þekking á kulferlum er mikilvæg, en aðgengilegt kennsluefni vantar.

Rannsóknir á áhrifum frosts og þýðu mynda nokkuð fjölskrúðuga fræðigrein sem tekur til jarðvegsfræði, landmótunar, vistfræði, verkfræðigreina o.fl. Áhrif kulferla eru meiri á Íslandi en víðast hvar, eins og rakið er í ritinu, en þó má segja að ekki hafi skapast nægjanleg ríkuleg rannsóknahéfi á þessu sviði héraendis og verulega hefur skort á að íslenskir vísindamenn hafi tekið virkan þátt í alþjóðlegu rannsóknastarfi á þessu sviði. Á því eru þó undantekningar.

Hér er reynt að tæpa á sem flestu er lýtur að kulferlum þannig að fáist sæmilegt yfirlit um hvernig vatn frýs í jarðvegi og hvaða áhrif það hefur á landmótun. Ritið er fyrst og fremst ætlað til kennslu í þeim

námsgreinum þar sem þekking á kulferlum er mikilvæg. Jafnframt er vonast til þess að áhugi nemenda á þessu fjölbætta og spennandi sviði rannsókna aukist.

Ritið byggir m.a. að hluta á óbirtri námsritgerð sem ég skrifaði árið 1988 meðan ég var í námi við Texas A&M háskólann, ritgerð sem fjallað þó meir um eðlisfræði og verkfræðilega þætti en hér er greint frá. Ýmsir nemendur og samstarfsmenn hafi fengið aðgang að þeim skrifum, en jafnframt kvartað yfir því að ekki hafi komist í verk að birta þá ritsmíð. Annars er víða leitað fanga við gerð þessa rits, m.a. í almennar kennslubækur og vísindagreinar, bæði nýjar og gamlar. Myndir eru flest teknar af höfundi, nema annars er getið. M.a. eru nokkrar myndir fengnar að láni af Wikipedia og mikilvægt kort af sífrera á Íslandi er fengið úr nýlega birtri yfirlitsgrein Harris o.fl., og norðurskautskort af heimasíðu International Permafrost Association, og er þessum aðilum þakkað lánið.

Í ritinu er eflaust margt sem betur mætti fara, en ég vona að notendur virði góðan ásetning með þessum skrifum. Allar ábendingar sem gætu orðið til að bæta efni ritsins eru vel þegnar.

Febrúar 2010

Ólafur Arnalds

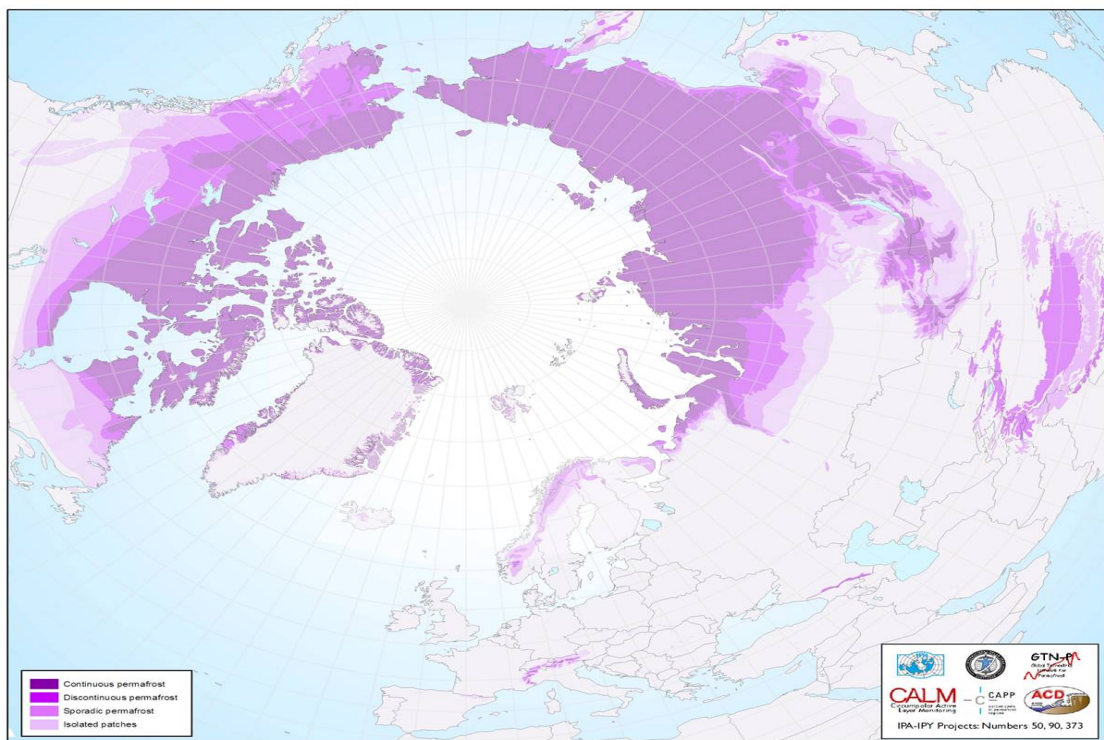
Inngangur

Samspil frosts og þýðu hefur afgerandi áhrif á yfirborð landsins en einnig virkni vistkerfa svo sem vatnshag (hydrology). Frostið mótar yfirborðseinkenni, á borð við þúfur og melatígla, en hefur einnig mikil áhrif á landnám plantna og viðnám vistkerfa gegn roföflum. Fátt hefur haft meiri áhrif á ásýnd landsins, því nánast allt yfirborð þess ber ummerki kulferla.

Það er mikilvægt að huga að holklaka þegar hugað er að ýmsum verklegum framkvæmdum, svo sem lagningu vega, ýmiss konar landslagsmótun og byggingum og lögnum í jörð. Jarðvegur hefur afar mismunandi eiginleika með tilliti til þess hvernig frost hegðar sér í moldinni, en þeir þættir sem ráða vatnsrýmd og vatnsleiðni eru þar mikilvægastir, en einnig skiptir samloðun

jarðvegsins miklu máli. Þá má einnig nefna þætti sem hafa áhrif á einangrun og inngeslun á yfirborðinu, en þar eru gróðurhula og snjóhula mikilvægustu liðirnir.

Kulferli eiga sér stað á öllum þeim svæðum þar sem vatn frýs í jarðvegi. Á suðlægari breiddargráðum frýs aðeins á vetrum og frost er í jörðu hluta ársins. Á pólsvæðunum þiðnar aðeins efsta lag jarðvegsins á sumrin (active layer) en frost helst í jörðu allt árið. Varanlegt frost í jörðu er nefnt sífreri („permafrost“ á ensku). Jarðvegur með sífrera í jörðu er nefndur Gelisol í bandaríska flokkunarkerfinu fyrir jarðveg (Soil Taxonomy), en Cryosol samkvæmt WRB. Á íslensku hefur slíkur jarðvegur verið nefndur frerajörð (Ólafur Arnalds og Hlynur Óskarsson,



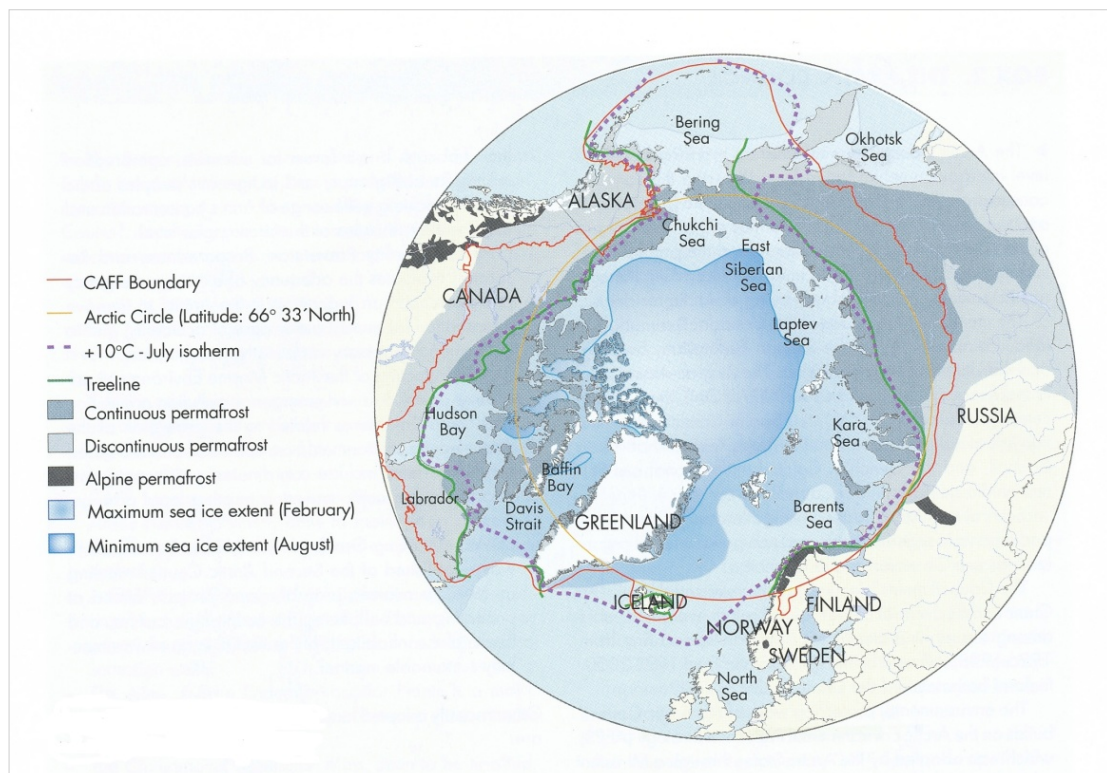
Mynd 1. Útbreiðsla sífrera í heiminum. Kortið sýnir hvar sífreri er samfelldur (continuous), ósamfelldur (discontinuous), dreifður (sporadic) eða sjaldséður (isolated). Mynd af heimasíðu IPA.

2009). Frerajörð hefur mun meiri útbreiðslu en margir gera sér í hugarlund (myndir 1 og 2). Talið er að sífreri sé í jörðu á um 23 milljón ferkílómetra svæði á norðurslóðum (heimasíða IPA; sjá einnig Soil Atlas of the Northern Circumpolar Region).

Sunnar er frostið árstíðabundið í jarðvegi, frost á veturnum en þiðnar á sumrin. Á þessum svæðum hefur holklaki mikil áhrif á jarðveginn og yfirborðið, ekki síður en þar sem sífreri er í jörð. Þúfur eru afleiðing frosts í jarðvegi, svo og melatíglar, rústir á hálandinu og ýmis landform í hlíðum landsins. Land þar sem frost hefur áhrif er gríðarlega stórt og nær til stærsta hluta tempraða beltis jarðar. Á ísöld náði þetta svæði ennþá lengra til suðurs og mörg ummerki frosts frá þeim tíma eru enn að finna í jörðu og á yfirborðinu.

Rannsóknir á frosti í jarðvegi og áhrifum

þess á umhverfið má heita sérstök fræðigreini, sem m.a. er kölluð „Cryology“, „Periglacial morphology“, og „Cryopedology“ á ensku. Gefin eru út sérstök tímarit á borð við „Permafrost and Periglacial Processes“ og „Frozen Ground“ sem er tímarit á vegum „International Permafrost Association; IPA“, 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 að „The project was born in a wooden hut on the Central Plateau of Iceland in the late summer of 1982“ og er þar átt við Kerlingarfjöll, en þar safnaðist saman afar sterkur hópur vísindamanna á



Mynd 2. Ýmsar skilgreiningar á norðurslóðum og pólsvæðum. (CAFF, 2001).

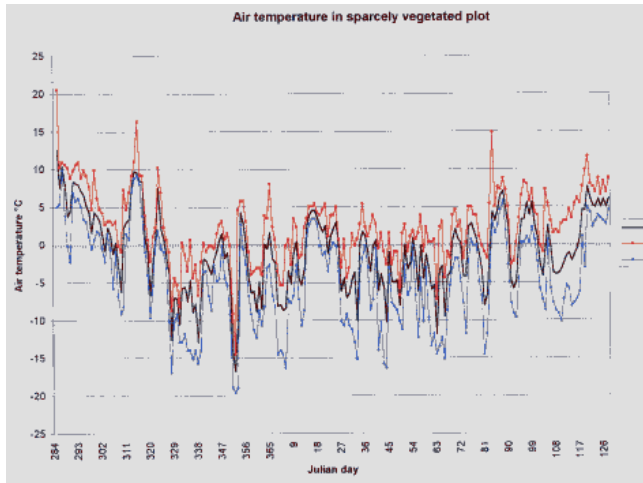
sviði kulferla. Höfundur veit ekki til þess að Íslendingar hafi komið að þessum fundi. Einnig er rétt að benda á góðan kafla um kulferli og norðurslóðir í kennslubók í landmótunarfræði eftir Ritter o.fl. (1995), „*Process Geomorphology*“. Segja má að miðað við þau áhrif sem frost í jarðvegi hefur á íslenskt umhverfi hefur rannsóknum á sviði kulferla furðu lítið verið sinnt á Íslandi. Þó er rannsókna Schunke á þúfum (fyrir 1980) og Lewis á skaflarofi (fyrir 1940; niviation) oftlega getið í alþjóðlegum skrifum um kulferli.

1. Heimskautasvæði, loftslag og Ísland

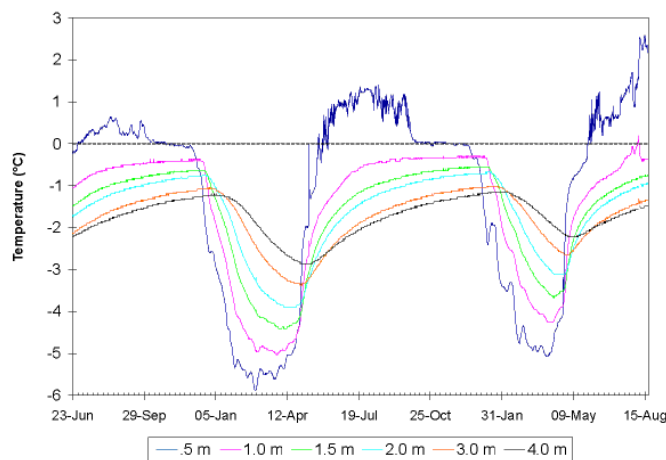
Það eru nokkur hugtök er varða loftslag sem mikilvægt er að hafa í huga. Pólsvæði norðursins eru nefnd Arctic á alþjóðamálum (heita eftir „Arktos“ úr grísku sem er nafn á stjörnumerkinu Björninn), en suðrið vitaskuld Antarctic (sjálfsagt er merkileg þróun á bak við þessar nafngiftir). Pólsvæðið skiptist í „High-Arctic“ og „Low-Arctic“, eða há-arktísk og lág-arktísk svæði, en sunnan þeirra er stórt jarðarsvæði, „Sub-Arctic“, þar sem sífreri er ekki samfelldur en frostáhrif mikil. Ísland hefur gjarna verið talið á mótum tempraða beltisins og „Sub-arktíska“ svæðisins. Þannig er stundum sagt að 10°C hiti í júlí marki skilin á milli „boreal“ svæðisins (barrskógabeltið) og heimskautasvæðisins (Sub-arktísk), þ.e. lína sem skilgreinir heimskautasvæðin, en sú lína liggur víða í miðjum hlíðum landsins (sjá m.a. CAFF, 2001). Þessar línur (boreal-arktísk skil og skógarmörkin) eru oft notuð til að skilgreina

heimskautasvæðin. Hafa verður þó í huga að þessar skilgreiningar eru nokkuð á reiki, t.d. eru pólsvæðin einnig stundum skilgreind við hvarfbaugana (66°33'), en sá nyrðri liggur að norðurströnd landsins. Þessi skilgreining er afar gölluð því hún hvorki tekur tillit til lífríkis eða loftslags. Ýmsar útgáfur skilgreiningu pólsvæða norðursins er sýnd á mynd 2. (CAFF, 2001).

Staða Íslands í heimskautajaðrinum er augljós og sífreri finnst víða í jörðu á Íslandi (sjá síðar). En loftslag á Íslandi er þó með umtalsvert öðrum hætti en víðast ríkir á heimskautasvæðunum. Segja má að norðlæg lega landsins og þar með kuldi heimskautasvæðanna annars vegar og hins vegar Golfstraumurinn, sem flytur gríðarlega mikinn varma í áttina til Íslands togist á um völdin. Þetta veldur því að hitastig 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 veturna þegar orkumiklar lægðir koma langt sunnan úr hafi og flytja mikinn varma yfir landið. Því má segja að á Íslandi frjósi og þiðni á víxl oftast en nokkurs staðar annars staðar. Þetta hefur stundum verið kallað „the Icelandic cycle“ (Washburn, 1980). Á mynd 3. er sýnt línurit fyrir yfirborðshita á Geitasandi (Berglind Orradóttir, óbirt gögn), sem sýnir vel hve oft hitinn sveiflast í kringum 0°C. Mynd 4 er hins vegar dæmigert línurit fyrir þróun hita á meginlandi á norðurslóðum, þar sem frýs á haustin en þiðnar á vorin. Munurinn á þessum gröfum er sláandi.



Mynd 3. Hitastigssveiflur á Geitasandi á Rangárvöllum (Berglind Orradóttir, óbirt gögn).



Mynd 4. Hitastigsbreytingar yfir árið á norðurslóðum á meginlandinu. Hitinn sveiflast sjaldan kringum frostmarkið á hverju ári.

2. Útbreiðsla og þykkt sífrera

Sífreri á norðurslóðum var sýndur á mynd 1. Samfelldur sífreri einkennir Síberíu, norðurhluta Kanada og Alaska, 23 milljónir km², en land á jörðinni í heild er 130 milljón km² og því er þetta mjög stór hluti lands ofan sjávarmáls á jörðinni. Stór svæði eru einnig að finna í fjalllendi Mongólíu og Himalaya, í Klettafjöllum Kanada og Bandaríkjanna og syðri hluta Andes fjalla. Land án jökuls á Grænlandi (nema syðst) og á Suðurskautslandinu hefur sífrera í jörðu.

Þykkt íssins er afar mismikil, allt frá < 1m upp í nokkur hundruð metra á landi næst

pólunum í Síberíu og Kanada. Á undanförunum árum virðist ísþykkt norðurslóða fara mjög minnkandi og á sumum jaðarsvæðum er sífrerinn að hörfa, sérstaklega eftir 1970, og telja menn að þessar breytingar af völdum loftslagshlýnunar séu örari á norðurslóðum en annars staðar (Tarnocai o.fl., 2009). Fjallað er um sífrera á Íslandi hér aftar.

3. Vatn frýs í jarðvegi

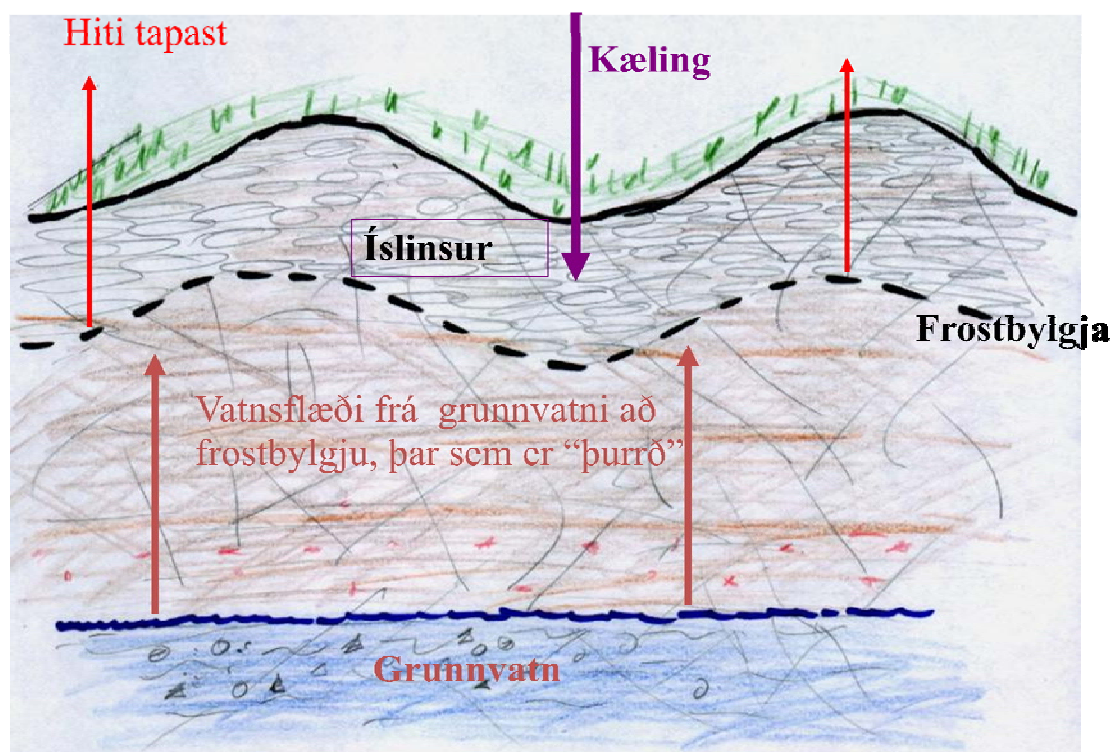
Vatn eykur rúmmál sitt þegar það frýs. Það er fátítt um efni að þau auki rúmmáli

við það að fara frá vökvaformi yfir í fast efni, og þetta telst meðal sérkennilegustu eiginleika vatns. Rúmmálsaukningin er nálægt 10%. Þessi aukning rúmmáls er engan veginn nægjanleg ein og sér til þess að skýra myndun þúfna og annarra einkenna sem myndast við frost. Annar sérstæður eiginleiki vatns sem er afar mikilvægur við myndun frosts í jarðvegi er gríðarlegur eðlisvarmi vatnsins. Vatn getur bundið feykilega mikinn varma (sem betur fer), mun meiri varna en flest önnur efni. Þetta kemur m.a. fram í þeim gríðarlega varma sem Golfstraumurinn flytur með sér á norðurslóðir. Þegar vatnið frýs gefur það eftir hluta þessa eðlisvarma út í umhverfið. Niðurstaðan er myndun frostbylgju á mótum vatns í vökvaformi og vatns í föstu formi.

Eftirfarandi er mjög einfölduð umfjöllun um þær aðstæður sem leiða til hvað mestrar rúmmálsaukningar við það að

jarðvegur frýs.

Þær aðstæður sem sýndar eru á myndinni eru þar sem tiltölulega stutt er niður á grunnvatn, en þar myndast einmitt hæstu þúfurnar. Þegar lofthiti fer niður fyrir frostmark kólnar yfirborð jarðvegsins uns efsta lagið byrjar að frjósa. Vatnið frýs yfirleitt ekki í samfelldan klump, heldur myndast eins konar linsur – íslinsur (ice lenses). Mót frosins og ófrosins jarðvegs eru nefnd frostskil eða frostbylgja („freezing front“). Þegar vatn frýs gefur það frá sér mikla varmaorku, (mikil orka sem vatn getur tekið við og gefið frá sér). Þessi hiti vegur upp á móti færslu frostbylgjunnar niður eftir jarðveginum og veldur öðru mikilvægu einkennum, frostskilin geta stöðvast eða færst afar hægt niður á bóginn. Ofan við frostbylgjuna binst vatnið við það að frjósa. Þá verður vatnsþurrð í næsta nágrenni hennar, miðað við jarðveginn þar fyrir neðan. Vatnspennan



Mynd 5. Vatn frýs í jarðvegi. Sjá texta.

er því lægri (lægri neikvæð tala), en neðar í ófrosnum jarðveginum og því dregst vatn í átt að frostskilunum. Standi grunnvatn hátt í jörðu er nægt vatn fyrir hendi og mikið vatn getur sogast að frostskilunum,

sem hafa að öðru leiti staðnæmst. Þá verður veruleg rúmmálsbreyting í jarðveginum: hann lyftist. Þetta ferli skýrir myndun margra þeirra frostfyrirbrigða sem skýrð eru hér á eftir.



Mynd 6. Frostlyfting. Að sumri er grasbalinn jafnhár stéttinni. Undir stéttinni er frostfrítt efni (möl og sandur). Í frostum myndast holklaki undir grasinu og grasflötin lyftist, en stutt er niður á grunnvatn.

4. Varmaleiðni

Þegar er hugað að kulferlum í jarðvegi er mikilvægt að velta fyrir sér varmaleiðni jarðvegs. Margir þættir hafa áhrif á varmaleiðni í jarðvegi. Þar má nefna magn og gerð lífrænna efni, bergefna, vatnsinnihald jarðvegsins, rúmpýngd og hitastig. Loft leiðir varma illa, en vatn aftur á móti mjög vel, en getur einnig geymt mikinn varma. Því færast kuldi hraðar niður um blautan jarðveg en þurran, sé nógu kalt. Varmaleiðni eykst með aukinni rúmpýngd (hlutfallslega minna loftrými) og vatnsinnihaldi, en hin mikla varmarýmd vatns minnkar varmadreifinguna („thermal diffusion“ = varmaleiðni / varmarýmd), þ.e. mikill kuldi á yfirborðinu berst ekki auðveldlega niður (eða hitinn upp, vatnið tefur kólnun og gleypir varmann).

Gróðurinn á yfirborði hefur margvísleg áhrif á hitaleiðni jarðvegs og þar með kulferli. Gróður mótar t.d. vatnsbúskap og snjóalög. Eftir því sem meira er af vatni í yfirborðinu eykst varmaleiðnin, en snjór og gróður á yfirborði minnka hitastigssveiflur. Heildaráhrif snjóлага á yfirborðinu er að hækka meðalárshita jarðvegsins, þar sem einangrunin kemur í veg fyrir varmatap úr jarðveginum (svo lengi sem hann bráðnar og sólarorka vermur moldina á sumrin). Því skipta þeir þættir miklu fyrir jarðveginn sem hafa áhrif á snjóalög. 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 (sjá t.d. Berglindi Orradóttur, 2002).

Hin dökka gjóska sem einkennir yfirborð auðna á Íslandi hefur sérkennileg áhrif á varmaástand yfirborðsins. Hún er afar einangrandi (enda notuð sem slík í byggingum) og víða á gjóskusvæðum má finna gamlan snjó undir gjósku sem hefur borist með margvíslegu rofi út yfir snævi þakið yfirborð. Hins vegar getur yfirborðið hitnað afar mikið á sólríkum dögum (>50°C í yfirborði) sem veldur mjög örri uppgufun svo jarðvegurinn verður mjög þurr í þurrkatíð.

5. Vatnsleiðni, vatnsrýmd, samloðun, frostnæm efni, frostfrítt efni

Til þess að áhrif frosts verði veruleg er mikilvægt að annaðhvort sé mikið af vatni í jarðveginum eða vatn geti borist að frostbylgjunni. Jarðvegsefni leiða vatn afskaplega misvel (sjá kafla í kennslubókum um vatn í jarðvegi). Alla jafna leiða moldarefni sem hafa mikið af kornum sem eru af silt stærð vatnið best. Leir og lífræn efni halda hins vegar mest af vatni og geta því orðið mikil frostáhrif í vatnsmettuðum leirjarðvegi eða lífrænum jarðvegi. Á móti kemur að trefjar og rætur hamla á móti frostrótinu. Þar sem silt leiðir vatnið mjög hratt er talað um að siltjarðvegur sé sérstaklega frostnæmur (frost-susceptible). Jafnframt hafa siltefni afar litla samloðun og vatnsósa siltefni ofan á frosnu undirlagi hafa því enga mótstöðu og jarðvegurinn rennur auðveldlega til. Þar sem fer saman mikil vatnsrýmd og mikið af siltefnum t.d. í siltleir (silty clay) og leirmold (clay loam) kornastærðar-

flokkum er mikil hættu á frosthreyfingum og frostskeppingum.

Þau efni sem halda litlu vatni og leiða ekki vatn sem er undir spennu (þ.e. bundið vatn) eru efni sem verða fyrir litlum frostáhrifum. Þetta eru vitaskuld mól og sandur. Þegar lagt er í verklegar framkvæmdir á norðurslóðum á borð við vegagerð þarf að losna við öll efni sem eru frostnæm, en setja í staðinn frostfrí efni. Þessu fylgir gríðarlegur kostnaður og rask sem veldur umtalsverðum umhverfisspjöllum.

6. Íslenskur jarðvegur er mjög frostnæmur

Eðliseiginleikar *eldfjallajarðar* eru með þeim hætti að mikil hættu er á miklum áhrifum kulferla og á frostskeppingum. Á Íslandi hagar þannig til að leirefni allófan og ferrihýdrít geta haldið gríðarlega miklu vatni við vatnsmettun (oft >100% og jafnvel >150% miðað við þurrvigt). Að auki hagar leirinn sér þannig að hann festist saman í korn sem eru af siltstærð. Vatnsleiðni í íslenskri mold er því alla jafna mjög greið, bæði á auðnum (*glerjörð*) og jarðvegi undir gróðri (t.d. *brúnjörð*, *votjörð*). Ofan á þetta bætist að samloðun jarðvegsins við vatnsmettun er ákaflega lítil og víða getur moldin auðveldlega náð flæðimarki (liquid limit) og sýnir jafnvel kvikuhegðun (phixotrophy). Samsamt: jarðvegurinn heldur miklu vatni, vatnsleiðni er mjög greið og hann skortir samloðun. Allt þetta veldur því að íslenskur jarðvegur er mjög frostnæmur, enda er allt kapp lagt á að losna við jarðvegsefni og setja mól og sand þar sem unnið er að verklegum framkvæmdum á borð við vegagerð og húsbyggingar.

Vert er að geta þess að við þessa þætti sem gera íslenska mold að mjög frostnæmu efni bætast loftslagsþættir, en eins og áður sagði frýs og þiðnar oftast á Íslandi en þekkest annars staðar á byggðu bóli. Það er því engin furða að áhrif frosts á íslenska náttúru séu mjög mikil.

7. Frostgerðir

7.1. Holklaki, ísig og afrennsli

Það frost sem myndast í jarðveginum er afar mismunandi af gerð. Ísinn getur verið allt frá því að vera nokkuð gegndræpur að því að vera samfelldur gegnþéttur ísklumpur. Það skiptir afar miklu máli fyrir vatnshag (hydrology) hvers svæðis hvernig ís myndast í jarðveginum á veturnum. Sé ísinn gegndræpur getur vetrarbráð smám saman sigið ofan í jarðveginn, bundist þar og nýst gróðri þegar þiðnar og þornar, eða að hluta lekið til grunnvatns. Sé ísinn þéttur rennur vatnið burt á yfirborðinu. Myndist gagngheill ís er vatnsbráð ekki hleypt niður í jarðveginn, t.d. þegar þiðnar tímabundið á veturnum. Ísklumparnir eru væntanlega einnig skaðlegir viðkvæmum gróðri.

Sýnt hefur verið fram á að gróðurfur hefur mikil áhrif á hvernig ís myndast í jarðvegi (Berglind Orradóttir 2002; Berglind Orradóttir o.fl., 2008). Í jarðvegi laufskóga og þar sem er rík graslendisjörð myndast oftast gegndræpur klaki. Hins vegar myndast oftast 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 veturnum í birkiskógum og graslendi, en síður í barrskógi. En það eru auðnirnar sem eru ansi sérstakar, þar sem myndast þéttur klaki sem hleypir takmörkuðu magni af úrkomu niður. Þetta leiðir til að mikill vatnsagi getur myndast í hláku, vatnsrof getur orðið mikið og vatn fyllt farvegi þar sem annars aldrei sést vatn. Þetta kemur m.a. vel fram í rannsóknum á Geitasandi (Berglind Orradóttir, óbirt gögn).

Hinn massífi klaki sem myndast á auðnum hefur afar afgerandi áhrif á vatnshag (hydrology), því auðnir þekja stóran hluta landsins. Þetta gerir það að verkum að stór hluti vetrarúrkomu sem annars sigi niður í jarðveg og til grunnvatns þar sem það á við, rennur burtu sem afrennsli. Það vatn sem berst til grunnvatns þar sem aðstæður eru með eðlilegum hætti skilar sér aftur út neðar á vatnasviðunum sem lindarrennsli, sem stuðlar enn frekar að jöfnu rennsli í ám. Jafnt rennsli bætir framleiðslugetu vatnakerfa. Mikið afrennsli á sér einkum stað í flóðum þegar snjór bráðnar þegar hlýnar snögglega, oft með mikilli úrkomu (myndir 8, 9). Þannig geta myndast flóðatoppar á mjög skömmum tíma eins og meðfylgjandi línurit (mynd 10) fyrir flóð í Norðurá í Borgarfirði ber með sér. Þetta mikla flóð bendir m.a. til þess að gróðurfur á vatnasviðinu sé ekki með æskilegasta móti, en öflugur gróður og frjósöm mold miðla vatninu mun betur.



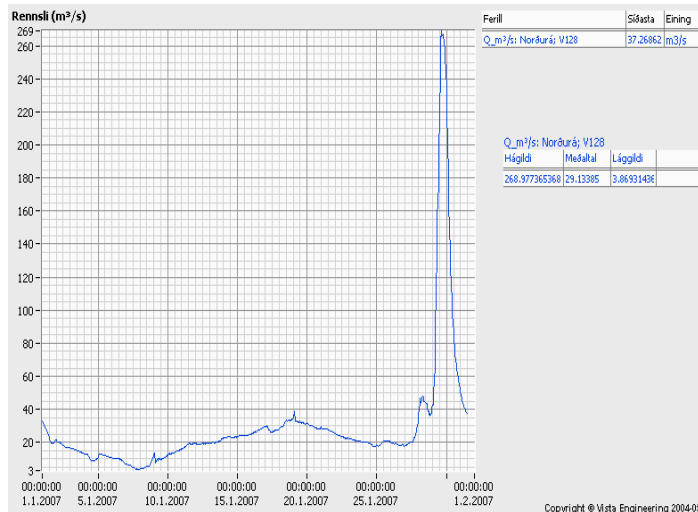
Mynd 7. Klaki í auðna á Vesturöræfum nálægt Kárahnúkum í apríl. Snjór hefur bráðnað í hláku en vatnið kemst ekki niður fyrir þéttum holklaka, og síðan mynduðust svellalög þegar frysti á ný. Veturinn hefur mikil áhrif á vistkerfi auðna.



Mynd 8. Bleyta á frosinni jörð á Geitasandi. Vatnið kemst ekki ofan í jarðveginn. Á sumrin sést vart örla á vatn á yfirborðinu, jafnvel í mikilli rigningatið, og jarðvegurinn er oft mjög þurr. Mynd: Berglind Orradóttir.



Mynd 9. Vatnsósa auðna á Heklusvæðinu að vetrarlagi. Þéttur holklaki hamlar ísigi. Þarna sést vatn sjaldan eða ekki á yfirborði yfir sumartímann. Mynd: Elín Fjólá Þórarinsdóttir.



Mynd 10. Vatnsrennsli Norðurá í Borgarfirði í janúar 2007. Meðalrennslið fram eftir mánuðinum sveiflast frá 4 til 40 rúmmetra á sekúndu ($m^3 s^{-1}$) en í lok mánaðarins gerir mikla úrkomu á frosna jörð sem leiðir til flóðs í ánni (um $270 m^3 s^{-1}$). Sjá nánar í texta.

7.2. Ísnálar

Ísnálar (needle-ice) eru sérstök tegund holklaka sem hafa mikil áhrif í náttúru Íslands. Þetta eru þráðlega ískristallar sem tengjast hver öðrum og mynda eins konar mottu við yfirborðið. Ísnálar geta náð umtalsverðri lengd, jafnvel >30 cm. Þeir myndast einkum á þurrum frostnóttum í rökum sverði. Oft hagar því þannig til á daginn að þeir bráðna aftur, t.d. í sólbráð, en myndast þá gjarnan aftur að morgni. Einnig kemur fyrir að þeir lengjast meira, nótt eftir nótt og verða þá þræðirnir lagskiptir.

Við myndun ísnála geta efstu millimetrar jarðvegsins lyfst upp og af miklu afli. Ísnálar geta því verið huldar sjónum undir örþunnu moldarlagi, en þegar gengið er yfir slíkt yfirborð brakar í moldinni og ísnálarnar koma í ljós þegar krakað er í yfirborðið. Hið mikla afl sem fylgir ísnálum getur valdið því að steinar sem eru nokkrir cm í þvermál lyftast upp ofan ísnálanna. Þessi kraftur hefur mjög neikvæð áhrif á stöðugleika yfirborðsins. Litlar plöntur lyftast m.a. upp með rótum

og það er eitt helsta vandamálið við uppgræðslu á Íslandi og hefur áhrif á möguleika auðna til sjálfgræðslu. Fyrsta stig vistheimtar felst einmitt oft í að mynda skán á yfirborðinu sem kemur í veg fyrir myndun ísnála, en eftir það getur framvinda gróðurs orðið hlutfallslega ör. Moldir, t.d. rofdílar innan um gróinn svörð, gróa afar hægt upp af þessum orsökum, jafnvel þótt landið sé friðað, og oft gerist það þannig að jarðlægur gróður vex út yfir dílanna, en sáðplöntur ná sér ekki á strik fyrr en yfirborðið er að mestu lokað.

Ísnálar hafa áhrif á yfirborðsstöðugleika með margvíslegum hætti. Myndun þeirra getur rofið samloðun á milli korna, sem gerir síðan moldina ennþá hættara við rofi af völdum vinds og vatns. Til dæmis sást í mælingum á moldum á Hólsfjöllum (Ólafur Arnalds og Fanney Ósk Gísladóttir, 2009) að þröskuldsvindhraði (vindhraði þegar vindrofi hefst) lækkaði úr $9-10 m s^{-1}$ í $6 m s^{-1}$ á einni frostnóttu (minni vind þarf til að valda vindrofi).



Mynd 11. Ísnálar í rofdíl í Skorradal. Þar sem moldin er ber á milli þúfnanna myndast ísnálar. Þær eru ríkur þáttur í því að koma í veg fyrir að þessi rofdíll grói upp að sjálfu sér.



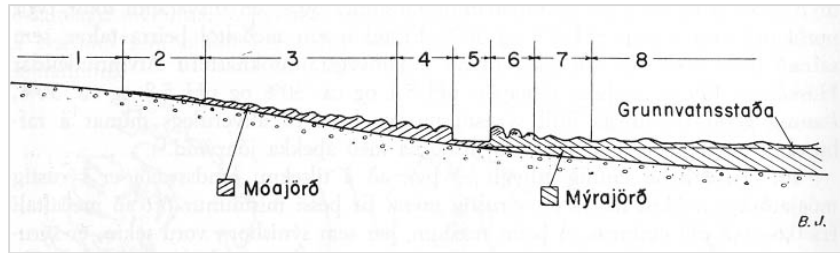
Mynd 12. Frost lyftir steinvöllum sem eru nokkrir cm í þvermál, en einnig plöntum sem eru að nema land. Þegar þetta yfirborð bráðnar er því mjög hætt við vatnsrofi og vindrofi.

8. Þúfur

Þúfur eru afar áberandi hluti íslensks landslags. Þær finnast nær alls staðar á landinu.

Björn Jóhannesson (1960) veitti því athygli að þúfur voru alla jafna hæstar á Íslandi í jaðri votlenda og teiknaði meðfylgjandi skýringarmynd, (sjá mynd 13). Ástæðan

er einmitt sú sem áður var skýrð, það dregst vatn upp að frostbylgjunni og á ákveðnu vatnsdýpi eru aðstæðurnar ákjósanlegastar. Ástæður þúfnamyndunar þar sem stutt er niður á grunnvatn eru því augljósar. Þúfur eru m.a. fljótar að myndast í framræstu votlendi sem tekið eru til hrossabeitar í stað ræktunar.



Mynd 13. Skýringarmynd af stærð þúfna í landslaginu í bók Björns Jóhannessonar (1960). Hæstu þúfurnar eru í jaðri votlendisins (svæði 6 á myndinni). Þær eru lægri bæði út í votlendinu og í þurrlendinu uppi í hæðinni.



Mynd 14. Þúfur í Jökulsárhlíð á Austurlandi í jaðri votlendis þar sem stutt er niður á grunnvatn. Svo þýft yfirborð getur verið erfitt yfirferðar.

En þúfur er að finna víðar, m.a. á þurrlandi. Sem dæmi má nefna að þúfur eru algengar og geta verið mjög stórar í Kelduhverfi, jafnvel þótt tugir metra geti verið niður á grunnvatn. Hvernig má það vera? Margar ástæður má nefna fyrir myndun þúfna á Íslandi þar sem langt er niður á grunnvatn, en þær tengjast m.a. því hve íslensk mold er frostnæm eins og áður var rakið.

- Moldin er *eldfjallajörð* með litla samloðun, sem gerir það að verkum að moldarefnin ýtast auðveldlega til. Hún hefur jafnvel kvikueiginleika sem veldur því að moldin nær flæðimarkinu

þegar mikið er af vatni og hann raskast (t.d. frýs).

- *Eldfjallajörð* getur haldið í sér gríðarlega miklu vatni, sem að hluta kemur í stað vatnsdælingar frá neðri lögum.
- Leir í *eldfjallajörð* myndar stöðug samkorn af silt-stærð. Vatnsleiðni er því mjög ör, nema að gróf gjóskulög rjúfi vatnsleiðnina.
- 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 veturnum.

- Beit þungra dýra á borð við hross og nautgripi ýtir mjög á eftir þúfna-myndunarferlinu, en þessi dýr stíga ávallt niður á milli þúfnanna.
- Eftir að þúfnamyndunarferlið er komið af stað myndast afar mismunandi aðstæður á þúfnakollum annars vegar (áveðurs, frýs) en á milli þúfna hins vegar (myndast skjól). Frostbylgja myndast hugsanlega fyrir í þúfunni og þangað berst vatn og hún bólgnar miðað við svæðið milli þúfna.

Í nýlegri yfirlitsgrein leggja Walker o.fl. (2008) áherslu á að munur í gróðurfari og snjóþekju valdi breytilegri einangrun sem hafi áhrif á hita og vatnsflæði innan frostsveðanna. Einangrun á yfirborði er afar mikilvæg með hliðsjón af myndun þúfna, brattari þúfur virðast m.a. myndast þar sem beit er mikil og sinan fjarlægð. Í skóglendi safnast snjór fyrir á milli trjáanna og veitir mun varanlegri einangrun en er til staðar á opnu landi, auk þess sem gróðurhula skóglendisins er yfirleitt mun öflugri og meira er af lífrænum efnum (meiri einangrun). En þung beitarýr hafa einnig mjög mikil áhrif á ferlið, en hestar

stíga t.a.m. nánast aldrei niður ofan á þúfur heldur alltaf á milli þeirra, sem veldur því að mold með litla samloðun ýtist æ meira upp í þúfuna.

Beit þungra húsdýra beinir athyglinni að sérstæðum þúfum sem eru á Azoreyjum þar sem aldrei frýs. Þar er einmitt *eldfjallajörð* með litla samloðun og gríðarlega vatnsheldni (Hydric Andosol; >100% vatn við 15 bara togspennu, þ.e. þegar jarðvegurinn er „þurr“) og afar mikil og langvarandi beit nautgripa.

Þegar skoðaðar eru tilgátur um ástæður fyrir þúfnamyndun á Íslandi þá má ljóst vera að aðstæður sem draga úr drætti vatns frá grunnvatnsborði ættu að minnka líkur á myndun þúfna. Það á m.a. við þar sem gróf gjóskulög eru í yfirborðinu eins og víða á gosbeltinu. Þá er mold fjærst gosbeltinu oft án slíkra grófra öskulaga, almennt einnig fínni og með ríkulegum sortueiginleikum (mikil vatnsheldni, ör vatnsleiðni, kvikuhegðun o.s.frv.). Enda eru mörg eftirminnileg þúfnasvæði að finna fjarri gosbeltinu, t.d. á nyrsta og/eða austasta hluta Norðausturlands og Austurlands, m.a. í Kelduhverfi, austarlega



Mynd 15. Þúfur í ofbeittu hrossahólfi. Brattar þúfur sem hafa myndast á fáum árum þar sem áður var tún.



Mynd 16. Þúfur á Azoreyjum, þar sem frýs sjaldan eða aldrei. Moldin er eldfjallajörð og landið er mikið beitt af nautgripum.

í Jökulsárhlíð (mynd 14) og á Víkurslóðum í nágrenni Borgarfjarðar Eystri. Þúfur eru ennfremur afar háar í jöðrum mýrlenda á heiðum á Norðvesturlandi, t.d. á Auðkúluheiði við norðanverðan Kjalveg.

Hugtakið þúfa er tekið að festast í sessi í alþjóðlegum rannsóknum og er m.a. getið í tengslum við rannsóknir í hlíðum eldfjalls í Kóreu (Kim, 2008) og í Suður-Afríku (Grab, 2005). Svipuð fyrirbrigði finnast víða um heim og ganga undir ýmsum nöfnum, svo sem „hummocks“ (enska), og „pounus“ (Fennoscandia). Svipuð fyrirbrigði má sjá af myndum frá mjög ofbeittu votlendissvæði í fjallendi í Kyrgistan. Hér á landi var Þjóðverjinn Schunke leiðandi í rannsóknum á þúfum fyrir nokkrum áratugum (sjá t.d. Schunke, 1977; Schunke og Zoltai, 1988). Þúfurnar geta geymt upplýsingar um fornveðurfar, eins og Vilet-Lanoe o.fl. (1998) notuðu til að sýna loftslagsbreytingar í Kelduhverfi. Þannig má telja að vöxtulegur gróður í birkiskóglendi ásamt skjólinu sem þar ríkir geti minnkað líkur á myndun þúfna og mörg sníð benda til þess að svo sé (öskulög lágrétt fram á miðaldir), en þá er einnig rétt að hafa í huga að mjög kólnaði á Íslandi á miðöldum.

9. Melatíglar og frostlyfting á möl

Melatíglar (patterned ground) eru afar algeng fyrirbrigði á norðurslóðum. Melatíglar myndast smám saman við það að frost verkar mismunandi á fínefni og grófefni jarðvegsins. Eftir að land kemur undan jökli eða þegar jarðvegsrof hefur eytt moldarlaginu ofan á jökulurð tekur grófara efnið, mól og grjót, að ýtast út til hliðanna, en fínefnin sitja eftir í miðjunni.

Þau halda meiri raka en grófu efnin svo ferlið vindur upp á sig, æ meira vatn verður í kerfinu í miðjunni miðað við í grófara efninu til hliðanna. Þar sem siltefnin í miðjunni eru mjög frostnæm (frost susceptible) bólgnar miðjan út og verður að hálfgerðu kviksyndi þegar 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 („frost-suðupottar“ eða frostkýli), mjög óstöðugir drullupottar; það er eins og að frostið valdi iðuhreyfingum sem annars fylgja suðu. Mikið af heimildum er til um melatígla og má m.a. benda á yfirlitsgreinar Walker o.fl. (2008) og Harris o.fl. (2009), en þess má geta að oft á tíðum telja menn ekki full ljóst hvernig mörg þeirra fyrirbrigða sem rekja má til kulferla myndast.

Melatíglar geta verið með margvíslegum hætti, litlir sem stórir, og af ýmiss konar lögum svo sem sexhyrningar eða hringlaga. Á mynd 17 er skemmtileg myndasería af ungum melatígllum að myndast á Vesturlandi. Á jöðrum melatígla geta þróast sprungur eða fleygar (ice wedge) og finnast t.d. góð dæmi um slík form á Tjörnesi (mynd 18), en þeir eru þó taldir myndast fyrst og fremst á sífrerasvæðum (permafrost, sjá Ritter o.fl., 1995).

Svo virðist sem erfiðara sé að finna melatígla í sendnu yfirborði auðna en í melum, en þeir finnast þó t.d. á Sprengisandi. Ástæða þessa er líklega fyrst og fremst að óstöðugt sandyfirborðið og vindrof sem hefur áhrif á myndun tíglanna.



Mynd 17. Mögnuð myndasería af melatíglum á byrjunarstigi myndunar á Vesturlandi. Stutt er síðan jarðvegsrof fjarlægði moldina ofan af þessum mel. Myndirnar eru teknar snemma morguns, tekið er að þorna á en vel sést hvernig siltlag í miðju tíglanna heldur ennþá í raka (dökk svæði) á meðan grófara lagið til hliðanna (ljós) eru orðin þurr. Á neðri myndinni til vinstri sést enginn munur á yfirborðinu þegar allt yfirborðið er orðið þurrt. Á neðri myndinni til hægri sést hvernig þyngdaraflið (holan) hefur áhrif á þróun tíglanna, ekki ósvipað og svarhol í miðju vetrabrauta. Myndirnar tóku Sigmar Metúsalemsson og Fanney Gísladóttir.



Mynd 18. Frostsprunga á Tjörnesi.



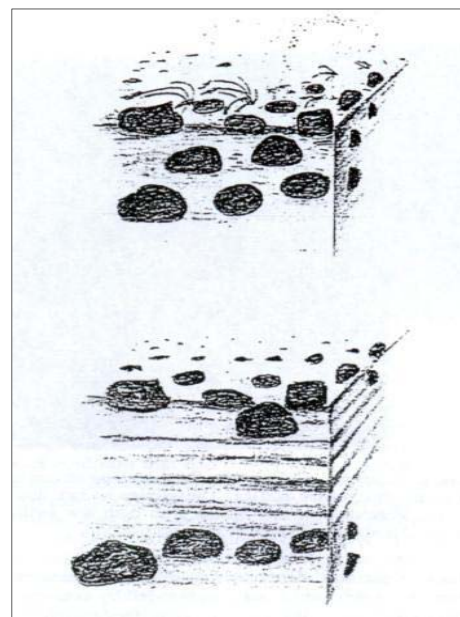
Mynd 19. Stórgert munstur af melatígllum eða ísfleygum (ice-weges) á Hofsafrétti norðan Hofsjökuls.

Frostlyfting hefur mikilvæg áhrif á yfirborð sendinna auðna, því á vetrum er hnallungum sem liggja í yfirborðinu þrýst upp á við. Flest sandsvæði verða fyrir umtalsverðu sandfoki á hverju sumri og ef ekki kæmi til frostlyftinga myndi hið grýtta yfirborð smám saman grafast í sandi. En því er öðru nær, grjótið þrýstist upp á hverju sumri (mynd 20) en fyrir neðan getur smám saman myndast mjög þykkt sandlag. Bændur á akuryrkjusvæðum sem búa við grýtta mold reyna gjarna að týna burt grjótið, en oft er það heldur vonlaust starf, þar sem aðstæður haga því svo að frostlyfting bætir í sífellu við grjótið á yfirborðinu.

10. Rústir – freðmýrarústir og pingo

10.1. Rústir

Rústir eru afar áhugaverð fyrirbrigði í náttúru norðurslóða. Ekki er nein ein rétt skilgreining á hvað er „rúst“ (t.d. Pissart, 2002), en rúst er í grófum dráttum þúst, oft 1-4 m á hæð, með ískjarna sem rís upp úr votlendi vegna kulferla (sjá t.d. Seppala, 1988). Ofan á hinum frosna ískjarna er



Mynd 20. Frostlyfting í sendnu umhverfi. Áfokið sest til í grýttu yfirborðinu, en á vetrum er grjótinu lyft upp, svo yfirborðið hækkar, en neðan þess geta myndast þykk sandlög.

misþykkt lag sem er ófrosið, a.m.k. yfir sumartímann, stundum nefnt hið virka lag (active layer), oft 30-60 cm þykkt á Íslandi.

Myndun sífrerarústa er háð veðurfars-, vatnafars- og hitaleiðniþáttum, sem aftur eru háðir landslagi, jarðvegi og gróðurfari. Áfok hefur væntanlega einnig áhrif á íslensku rústirnar, m.a. lífrænt innihald þeirra (verður lægra). Jarðvegseiginleikar

á Íslandi eru margt aðrir en annars staðar, vegna þess að moldin getur bundið mjög mikið vatn og vatnsleiðni er afar ör. Þessir þættir stuðla enn frekar að myndun rústanna séu önnur skilyrði á annað borð fyrir hendi. Á hinn bóginn geta gróf jarðvegslög slitið vatnsleiðni og þar með spornað við myndun rústa. Lágur sumarhiti kann að vera mikilvægur fyrir viðhaldi rústa á Íslandi, sem fellur vel að hugmyndum Seppala (1988) og Pissart (2002) um myndun og viðhald rústasvæða. Luoto o.fl. (2004) notuð líkanareikning til að sýna að bestu skilyrðin fyrir myndun rústa eru á frekar þurrum svæðum (<450 mm) með ársmeðalhita á milli -3 og -5 °C. Ársúrkomu er mun hærrí á Hofsafrétti (Orravatnsrústir), og ennþá meiri í Þjórsárverum. Rannsóknir Þóru Ellenar Þórhallsdóttur (1994, 1996) benda til þess að vatnafar árla vetrar sé mjög mikilvægt, sem og nægt aðgengi að grunnvatni (grunnvatnsrennsli), sem eykur hæð rústanna. Cristof Kneisel hefur mælt ísþykkt með leiðnimælingum í Orravatnsrústum og sýna niðurstöðurnar að ísþykkt er um 5 – 7,5 m (Kneisel, 2007; óbirt gögn).



Mynd 21. Í Orravatnsrústum á Hofsafrétti, norðan Hofsjökuls. Rústirnar eru háar en flatar að ofan, en umhverfið einkennist mjög af vatni, enda vatnsrennsli í gegnum rústasvæðið.

Allmörg rústasvæði eru á Íslandi, en mörg þeirra hafa verið óstöðug í aldanna rás. Rústir myndast á köldum tímabilum svo sem á litlu ísöldinni, en bráðna þegar tíðarfar er hagstætt. Helstu rústasvæði Íslands eru að finna í Þjórsárverum sunnan Hofsjökuls og í Orravatnsrústum norðan Hofsjökuls, en einnig eru afar myndarlegar rústir að finna á Jökuldalsheiði og í gróðurlendi Brúáröræfa. Rústasvæði á heiðum á Norðurlandi, svo sem á Auðkúluheiði hafa mörg horfið á undanföllum árum. Sama má segja um rústasvæði sem voru á Fljótsdalsheiði og Vesturöræfum við núverandi Háslón.

Rústum má í meginráttum skipta í tvo flokka: rústir sem myndast í lífrænan jarðveg og rústir sem myndast í ólífrænt set eða jarðveg. Á Íslandi eru rústir fyrst og fremst að finna þar sem er gróðurhula en þó er líklegt að ummerki um rústir finnist í lækjarfarvegum víða á hálendi, t.d. á Vestfjörðum. Ljóst er að rústir á Íslandi láta nú undan síga vegna hlýnandi loftslags og hafa t.d. Orravatnsrústirnar minnkað um 10-20% að ummáli á örfáum árum (Ólafur Arnalds og Þorsteinn Sæmundsson, 2009).



Mynd 22. Orravatnsrústir. Yfirlitsmynd. Rústirnar eru ákaflega tilkomumiklar og samspil tjarna, votlendis og þurrlendis á toppi rústanna mynda ákaflega fjölbreytt mósaík vistkerfa sem næra fjölbreytt lífríki. Mynd: Þorsteinn Sæmundsson.

10.2. Pingo

Orðið „pingo“ merkir hæð á máli frumbyggja í Norður-Kanada. Þessar hæðir eru mun stærri útgáfur af rústum, stórar hæðir með frosnum ískjarna. Þessi fyrirbrigði geta náð allt að 70-80 m hæð (50 m sú hæsta í Kanada) og yfir 500 m í þvermál og orðið allt að 1000 ára gamlar.

Eins og á við um freðmýrarústir, þá verður að vera nægur aðgangur að vatni til að

pingo-hæðirnar geti myndast, gjarnan í eða við árfarvegi eða þar sem er mikið grunnvatnsrennsli. Þær eru einvörðungu að finna við mjög kaldar loftslagsaðstæður, m.a. nyrst í Kanada, á Grænlandi, Alaska og Síberíu. Fyrirbærin Pingo eru meðal sérstæðustu náttúrusmíða jarðarinnar; þær geta verið mjög fagrar ásýndum, reglulegar og svipar stundum til eldgíga.



Mynd 23. Pingo á Tuktoyaktuk svæðinu (Þjóðgarður – „National Landmark“), sem tileyra Norvestursvæðunum í Kanada. Svæðið er eitt best þekkt Pingo svæði heimsins með >1300 þekkt Pingo fyrirbrigði. Myndin er úr Wikipedia.

11. Jarðsil – skriður

Meðal megineinkenna norðurslóða er áhrif frosts á hlíðar. Moldarefni og laus jarðefni frjósa á vetrum en þiðna á sumrin. Þegar vatnið frýs bólgnar það út um tæp 10% og einnig meira ef vatn flyst að frostbylgjunni, eins og skýrt var hér áður. Þegar þiðnar minnkar rúmmálið á ný. Þyngdarkrafturinn verkar á þessar rúmmálsbreytingar sem veldur togi á

jarðvegsefnum undan hallanum. Þetta verður til þess að smám saman myndast bylgjuhreyfing jarðvegsefna niður brekkuna. Ferlið hefur verið nefnt *jarðsil* á íslensku en heitir „solifluction“ á alþjóðamálum, en einnig „gelifluction“. Hér á landi eru bæði *jarðsilstungur* (mynd 24) og *stallar* sem einnig eru nefndir *paldrar* algeng fyrirbrigði í grónum

hlíðum. Jarðsil er þó alls ekki einvörðungu bundið við grónar hlíðar, það á sér einnig stað í ógrónum hlíðum.

Jarðsilstungur hafa oft grófari efni, mól og grjót í jöðrum tungunnar, sem m.a. hafa hamlandi áhrif á færsluna niður á bóginn, en að baki bólgnar tungan upp þegar frostnæmt efni frýs og þrýstir á fyrirstöðuna. Fyrirstaðan getur gefið sig þegar þrýstingurinn verður of mikill, t.d. í mikilli rigningartíð og þá geta orðið skriðuföll. Skriðuföll eru algeng á svæðum þar sem jarðsil er áberandi. Hlíðarnar eru einstaklega viðkvæmar á vorin og haustin þegar þær eru vatnsósa. Þá er beint samhengi á milli beitarálags og tíðni skriðufalla, þeim mun þyngri beit, þeim mun meiri hætta er á skriðuföllum. Þung beitarðýr, svo sem hross og nautgripir,

hafa meiri áhrif en þau léttari.

Jarðsil hefur verið mikið rannsakað, m.a. í Klettafjöllum Ameríku, Ölpunum og á Norðurlöndum. Hraði jarðsils er afar breytilegur, allt frá örfáum mm á ári upp í nokkra cm. Efsta lagið hreyfist hraðast en það hægist hratt á hreyfingunni með dýpi. Jarðsil getur orðið þrátt fyrir halli lands sé ákaflega lítill, jafnvel sem nemur aðeins 1°. Þá geta myndast sérkennileg fyrirbæri, svo sem það sem sést á mynd 27.

Jarðsil hafði áhrif á yfirborð lands langt suður eftir Evrópu á ísöldinni og skildi eftir ummerki sem ennþá sjást. Því er mikilvægt að skynja og skilja þau ummerki sem jarðsil skilur eftir sig á svæðum þar sem frostáhrif eru takmörkuð nú á dögum, svo sem í Mið-Evrópu.



Mynd 24. Jarðsilstungur við veginn yfir Hellisheiði Eystri.



Mynd 25 Jarðsilstungur á Öxnadalshéiði milli Skagafjarðar og Eyjafjarðar. Rafmagnsstaur á miðri mynd gefur mælikvarða.



Mynd 26. Jarðsil í hlíðum Langadals í Austur-Húnavatnssýslu. Moldin bylgjast hægt og sígandi niður brekkuna, líklega örfáa mm á ári.



Mynd 27. Jarðsil veldur þessari bylgju, eins konar pulsu, í litlum halla í votlendi í Jökulsárhlíð á Austurlandi. Ofar eru fleiri tungur eða pulsar.

12. Urðarjökklar

Urðarjökklar (rock glaciers) eru ákaflega mikilfengleg fyrirbrigði þar sem stórar spildur gerðar af ís og grjóti síga hægt niður halla, frá nokkrum mm til nokkurra metra á ári. Þeir eru algengir í fjalllendi um allan heim. Það er nokkuð víst að slík fyrirbrigði eru virk í fjöllum Íslands, t.d. á Tröllaskaga (Ágúst Guðmundsson, 1995, 2005). Þá eru tilgátur uppi um að mörg

þeirra fyrirbrigða sem áður voru talin framhlaup á Íslandi séu í raun ummerki um urðarjökla. Þeir hafa þá verið virkir á síðujökultíma og upphafi nútíma þegar loftslag var kaldara en nú er, en um þetta eru ákaflega deildar meiningar í jarðfræðinni og í raun erfitt að skera úr um það í mörgum tilfellum.



Mynd 28. Hin mikilfenglega Stóraurð undir Dyrfjöllum hefur mörg einkenni gamals urðarjökuls.

13. Frostveðrun

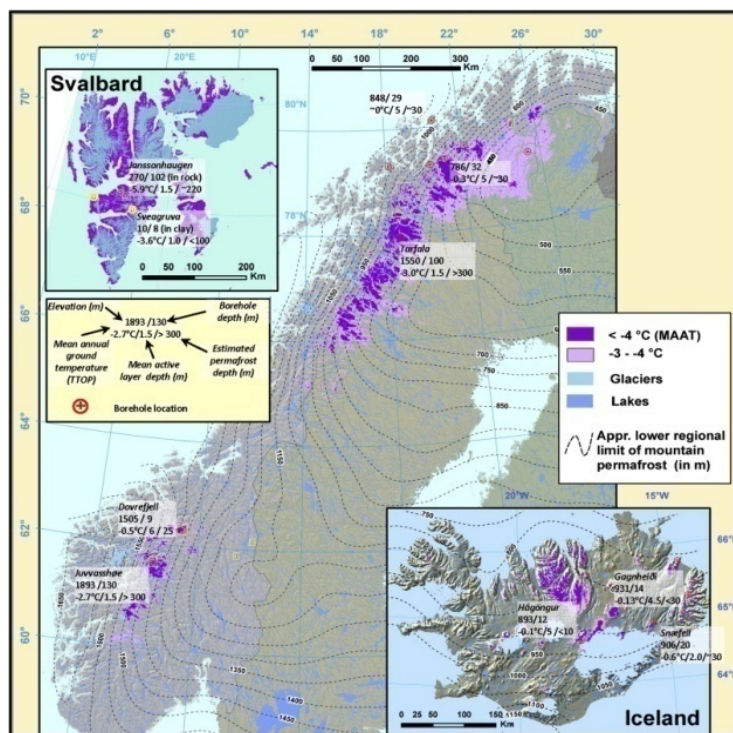
Þar sem vatn kemst í litlar sprungur og frýs myndast mikill þrýstingur sem auðveldlega getur molað harðasta grjót. Þannig losnar um umtalsvert efni sem síðan getur lagst til jarðvegsins og haft áhrif á myndun hans. Kornastærð sem myndast við frostveðrun er fyrst og fremst sandur. Frostveðrun hefur ábyggilega

mikil áhrif á myndun bergfna í jarðvegi á Íslandi, ekki síst 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 veggj, svo sem grjótið í Alþingishúsinu við Austurvöll.

14. Útbreiðsla sífrera á Íslandi

Í raun er ekki mikið vitað um útbreiðslu sífrera á Íslandi nema að helstu rústasvæði eru þekkt. Ekki hefur verið fylgst með hvaða rústasvæði hafa myndast eða horfið á umliðnum áratugum með skipulögðum hætti en rannsóknir hafa helst beinst að rústasvæðunum í Þjórsárverum (Þóra Ellen Þórhallsdóttir, 1994; 1996) og í Orravatnsrústum (sjá t.d Ólaf Arnalds og Þorstein Sæmundsson, 2009). Sem fyrr sagði fylgja rústasvæðin einkum grónu landi. Þó hafa boranir í

auðnum á hálandinu sýnt fram á sífrera í auðnum sem standa hátt (sjá t.d. Farbrót o.fl., 2007). Ole Humlum o.fl. hafa notað líkanagerð til að reikna út hvar sífreri er að finna á Íslandi og eftirfarandi mynd birtist í nýlegri grein um líkanagerð á sífrera (sjá Harris o.fl., 2009). Telja má víst að sífreri sé í jörðu þar sem land stendur hæst, t.d. á Tröllaskaga og Nýjabæjarfjalli (eins og myndin ber með sér), en sjálfsgagt víða á Vestfjörðum og jafnvel neðar í landinu á Norðausturlandi.



Mynd 29. Kort sem sýnir útbreiðslu sífrera á Norður-löndum (Harris o.fl., 2009). Útbreiðslan á Íslandi byggir á líkanagerð og gögnum frá mælitæjum sem komið hefur verið fyrir á Gagnheiði og við Hágöngur (sjá einnig Farbrót o.fl., 2007).

15. Framkvæmdir og frost

Verkfræði er lýtur að lausnum á vandamálum vegna kulferla er mikið þróuð á norðurslóðum. Hér verður ekki farið út í þá sálma að sinni. Þó er vert að geta þess að í byggð nær frost oft niður á um 30 -50 cm dýpi á veturna en stundum dýpra, allt eftir aðstæðum og árferði.

Mikilsvert er að koma því sem á að vera sæmilega stöðugt á yfirborðinu „niður fyrir frost“. Mikill kostnaður fylgir því að losna við frostnæmt efni undan vegstæði og bílplönnum og annars staðar sem á að koma fyrir mannvirkjum. En sá kostnaður er fljótur að borga sig upp miðað við þann

kostnað sem hlýst af frostskegmdum. Þá er ennfremur mikilvægt að gæta þess að frostfrítt efni sé undir og yfir lögnum, því kraftar sem fylgja frostinu eru annars fljótir að skaða þær.

Það er gott að hafa í huga að allt sem eykur á lyftigetunni frosts, t.d. spísslaga staurar sem ekki ná niður fyrir frost,

auðvelda mjög áhrif holklaka. Hins vegar getur verið gott að negla nagla neðst í staura sem steypdir eru niður fyrir skjólveggi, sem eykur festu staurana neðst í holunni. Ennfremur er gott að láta steypuna banga út neðst því þá er jarðvegurinn ofan á neðsta svæði staurans nýttur sem aukafarg.



Mynd 30. Frostskegmdir í malbiki. Það er afar mikilvægt að allt efni undir steypu og malbiki sé „frostfrítt“ efni, þ.e. mól og sandur. Mynd: Jóhann Þórsson.

16. Gildi sífrerasvæða fyrir loftslag jarðar

Gríðarlegt magn kolefnis er í jörðu sífrerasvæða og undanfarin ár hefur komið í ljós að það magn kolefnis 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 3x meira en allt kolefni í andrúmsloftinu. Mikið af þessum kolefni er á sífrerasvæðum Kanada, Síberíu og Alaska. Við hlýnun

jarðar getur hin frosna jörð tekið að bráðna og þá losnar um hluta þessa kolefnis, sem aftur getur haft mikil áhrif á styrk gróðurhúsalofttegunda 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).

Heimildir

- Ágúst Guðmundsson. 1995. Berghlaup eða urðarjökklar. Náttúrufræðingurinn 64:177-186.
- Ágúst Guðmundsson. 2005. Dreifing þykkra urðarbingja í fjalllendi á Íslandi. Vorráðstefna Jarðfræðifélags Íslands, ágríp erinda og veggspjalda. Bls. 10-11.
- Berglind Orradóttir. 2002. The influence of vegetation on frost dynamics, infiltration rate and surface stability in Icelandic rangelands. M.Sc. thesis, Texas A&M University, College Station, Texas.
- Berglind Orradóttir, S.R. Archer, Ólafur Arnalds, L.P. Wilding and 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. Íslenskur jarðvegur. Atvinnudeild Háskóla Íslands, endurútgefin af Rannsóknastofnun landbúnaðarins 1988.
- CAFF (Conservation of Arctic Flora and Fauna). 2001. Arctic Flora and Fauna: Status and Conservation. Edita, Helsinki, Finland.
- Clark, M.J. (ristj). 1988. Advances in Periglacial Geomorphology. John Wiley, New York.
- Farbrot, H, B. Etzelmuller, 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.
- 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 o.fl. (22 höfundar). 2009. Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modelling thermal geomorphological and geotechnical responses. Earth-Science Reviews 92:117-171.
- 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., Sæmundsson, Th., & Beylich, A. 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.
- Kuhry, P., C.L. Ping, E.A.G. Schuur, C. Tarnocai og S. Zimov. 2009. Raport from the International Permafrost Association: Carbon pools in Permafrost Regions. Permafrost and Periglacial Processes 20:229-234.
- Luoto, M., Heikkinen, R.K., & Carter, T.R. 2004. Loss of palsa mires in Europe and biological consequences. Environmental Conservation 31:30-37.
- Ólafur Arnalds. 1994. Holklaki, þúfur og beit Græðum Ísland V:115-120.
- Ólafur Arnalds og Þorsteinn Sæmundsson. 2009. Orravatnsrústir á Hofsafrétti. Fræðaping landbúnaðarins 2009:457-460.
- Ólafur Arnalds og Fanney Ósk Gísladóttir. 2009. Mælingar á vindrofi á Hólsfjöllum Rit LbhÍ nr. 25.
- Ólafur Arnalds og Hlynur Óskarsson. 2009. Íslenskt jarðvegskort. Náttúrufræðingurinn 78:107-121.
- Pissart, A. 2002. Palsas, lithalsas and remnants of these periglacial mounds. A progress report. Progress in Physical Geography 26:605-621.
- Seppala, M. 1988. Palsas and related forms. Í: Advances in Periglacial Geomorphology M.J. Clark (ed). John Wiley, New York 247-297.
- Schunke, E. 1977. Zur Gesnese 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 231-245.
- Soil Atlas for the Northern Circumpolar Region. European Commission 2010.

Ritter, D.F., R.C. Kochel og J.R. Miller. 1995. *Process Geomorphology*. 3.útg. WCB Publishers, Boston, USA.

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.

Þóra Ellen Þórhallsdóttir. 1994. Effects of changes in groundwater level on palsas in Central Iceland. *Geografiska Annaler Series A – Physical Geography* 76 (3):161 -167.

Þóra Ellen Þórhallsdóttir. 1996. Seasonal and annual dynamics of frozen ground in the central highland of Iceland. *Arctic and Alpine Research* 28 (2):237-243.

van Vliet-Lanoe, B, O. Bourgeois og O. Dauteuil. 1998. Thufur formation in northern Iceland and its relation to Holocene climate change. *Permafrost and Periglacial Processes* 9:247-365.

Walker, D.A. og 12 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.

Washburn, A.L. 1980. *Geocryology*. John Wiley, New York, USA.