



**16**

**„Á Ísa-köldu landi“ –  
frost í jarðvegi og  
ásýnd landsins**



**Mynd 16.1.** Fátt er meira lýsandi fyrir íslenskt landslag en þúfan, svona rétt eins og jöklar og fjöll. Áhrif frosts á mold mótar yfirborð alls landsins. Eitt sinn var stungið upp á því að hafa fisk eða þurruð þorskflök í fána landsins. Þúfan kæmi rétt eins til greina.

## Vantar áherslu á frostið

Nauðsynlegt er að bera skynbragð á eðli frosts og áhrif þess á umhverfið til að skilja íslenska náttúru. Þó er það svo að frosti í mold hefur ekki verið gefinn mikill gaumur héraendis og er iðulega að litlu getið þegar fjallað er um náttúru landsins.

## 16.1. Frost mótast allt yfirborð landsins

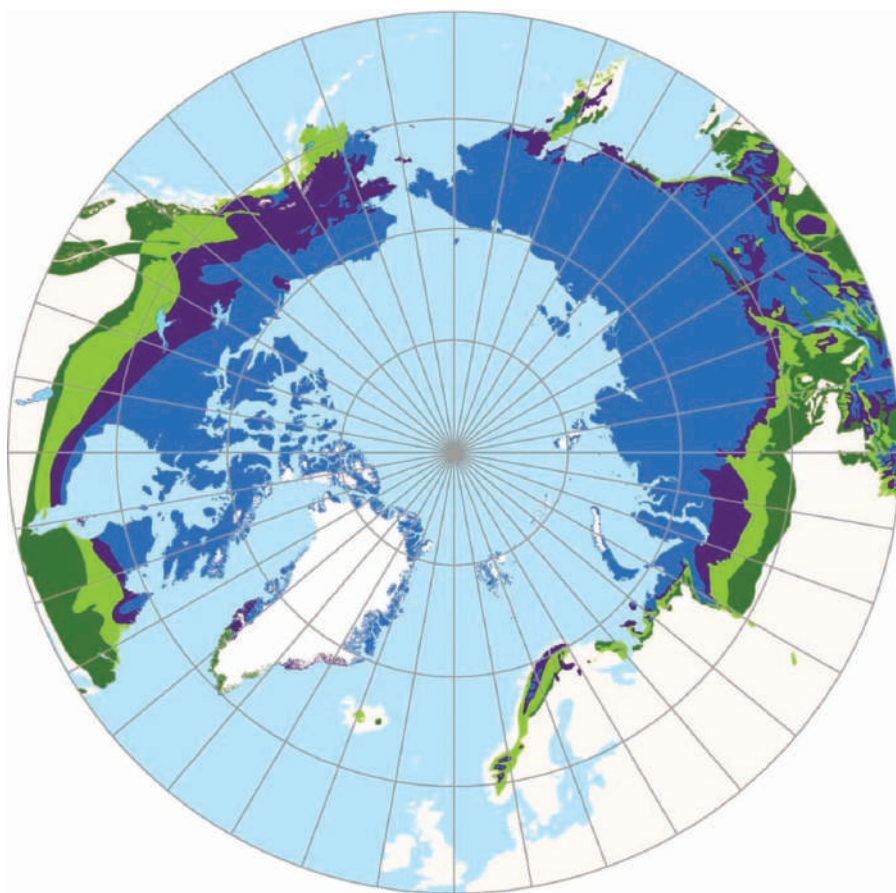
Fátt mótast vistkerfi og yfirborð landsins með eins afgerandi hætti og frost, enda er tungumálið ríkt af hugtökum er tengjast snjó, frosti og ís. Við búum „á klakanum“ er sagt þegar fólk „fær upp í kok“ af ótíð vetrarins. „Frost“ er athyglisvert hugtak sem er skilgreint út frá hitastigi og hegðun vatns, lífsvökvanum eina sanna – það er frost þegar vatn breytist í fast form. Við það verða æði merkilegar breytingar í moldinni. Frostið drífur virk ferli sem þróa yfirborðseinkenni á borð við þúfur og melatígla sem þekja nær allt landið. Frostið hreyfir til moldina og hefur afgerandi áhrif á landnám plantna og viðnám vistkerfa gegn raski og nýtingu. Frostið hefur áhrif á virkni örvera sem og ferð vatns um moldina og getur ýtt undir tímabundin afoxunarferli

sem móta líffræði og efnaeiginleika moldarinnar. Taka verður tillit til mögulegs frosts í jörðu þegar hugað er að ýmsum verklegum framkvæmdum, svo sem lagningu vega, landslagsmótun, byggingum og lögnum í jörð.

Rannsóknir á áhrifum frosts á íslensk vistkerfi eru fremur fáar héraendis. Það sem ritað er í eldri heimildum ber oft merki þess að skilningur á ferlum hafi á tíðum verið heldur lítill. Hugtök eins og „ísnálar“ á yfirborðinu koma mjög seint til skjalanna. Í ljósi þess hve áhrif frosts og þýðu eru mikil héraendis er mikilvægt að varpa ljósi á þau í sérstökum kafla þessa rits.

Á pólsvæðunum helst frost í jörðu árið um kring en þó getur efsta lag jarðvegsins þiðnað á sumrin. Varanlegt frost í jörðu er nefnt sífreri (e. permafrost). Jarðvegur með sífreri í jörð er nefndur Gelisol í bandaríska kerfinu Soil Taxonomy, Cryosol samkvæmt WRB en *frerajörð* í því kerfi sem hér er notað. Áhrif frosts á mold eru afar mismunandi eftir því hve hvar gerðar hún er. Þeir þættir sem ráða mestu eru m.a. vatnsrýmd og vatnsleiðni í moldinni, en einnig einangrun yfirborðsins og inngeslun sem mótast m.a. af gróður- og snjóhulu.

*Frerajörð* hefur mun meiri útbreiðslu en flestir gera sér í hugarlund (mynd 16.2). Talið er að sífreri sé í jörðu á um 23 milljón ferkílómetrum lands á pólsvæðunum utan jökla. Sunnar á norðurhjaranum er frostið árstíðabundið í jarðvegi frost á vetrum en þiðnar á sumrin. Þúfur eru afleiðing frosts í jarðvegi, svo og melatíglar, rústir á hálendinu og ýmis landform í hliðum landsins. Land þar sem frost hefur áhrif er gríðarlega víðfeðmt og nær til stærsta hluta tempraða beltis jarðar. Á ísöld náði þetta svæði mun sunnar og margvísleg ummerki frosts frá þeim tíma er enn að finna í jörðu – og ruglar margt áhugafólk um náttúrufræði.



**Mynd 16.2.** Útbreiðsla sífreri á norðurslóðum í grófum dráttum. Blátt: samfelldur sífreri (91–100%), dimmblátt: ósamfelldur sífreri (51–90%), ljósgrænt: mjög ósamfellt (10–50%), dökkgrænt: einangraðir flákar (<10%). Myndin er fengin úr Soil Atlas of the Northern Circumpolar Region (Jones o.fl. 2010, bls. 20).

## 16.2. Heimskautasvæði, loftslag og Ísland

Rétt er að glöggva sig á nokkrum hugtökum er varða heimskautasvæðin áður en lengra er haldið. Pólsvæði norðursins eru nefnd „Arctic“-svæði (heita eftir „Arktos“ úr grísku sem er nafn á stjörnumerkinu Birninum) en suðrið „Antarctic“ (úr grísku og þýðir andstætt eða öfugt við norður).

Pólsvæðin skiptast í „há-arktísk“ og „lág-arktísk“ svæði, en sunnan þess síðarnefnda eru jarðarsvæði, „subarctic“ landsvæði þar sem sífreri er ekki samfelldur en frostáhrif mikil. Ísland hefur gjarnan verið talið á mótum tempraða beltisins og „sub-arktíska“ svæðisins en þess sub-arktíska og „lág-arktíska“ á hálendinu. Samkvæmt kortum og skilgreiningum sem birtar eru í *The Soil Atlas of the Circumpolar Region* (Jones o.fl. 2010) og byggjast á vistfræði, landslagi og loftslagsþáttum er Ísland staðsett í miðju „sub-

arktíska“ beltinu. Stundum er sagt að 10°C meðalhiti í júlí marki skilin á milli boreal-svæðisins (barrskógabeltið) og heimskautasvæðisins (sub-arktíska svæðið), þ.e. lína sem stundum er notuð til að skilgreina heimskautasvæðin, en hún liggur víða í miðjum hlíðum landsins (sjá m.a. CAFF, 2001). Þó verður að hafa í huga að þessar skilgreiningar eru nokkuð á reiki, t.d. eru pólsvæðin stundum skilgreind við hvarfbaugana (66°66'), en sá nyrðri liggur að norðurströnd landsins. Sú afmörkun er afar gölluð því hún tekur hvorki tillit til lífríkis né loftslags. Þessar skilgreiningar skipta þó ekki öllu máli – heldur miklu fremur áhrif frostsins – en rétt er að hafa þær í huga vegna þess hve oft þær koma fram í rituðu máli um kulferli.

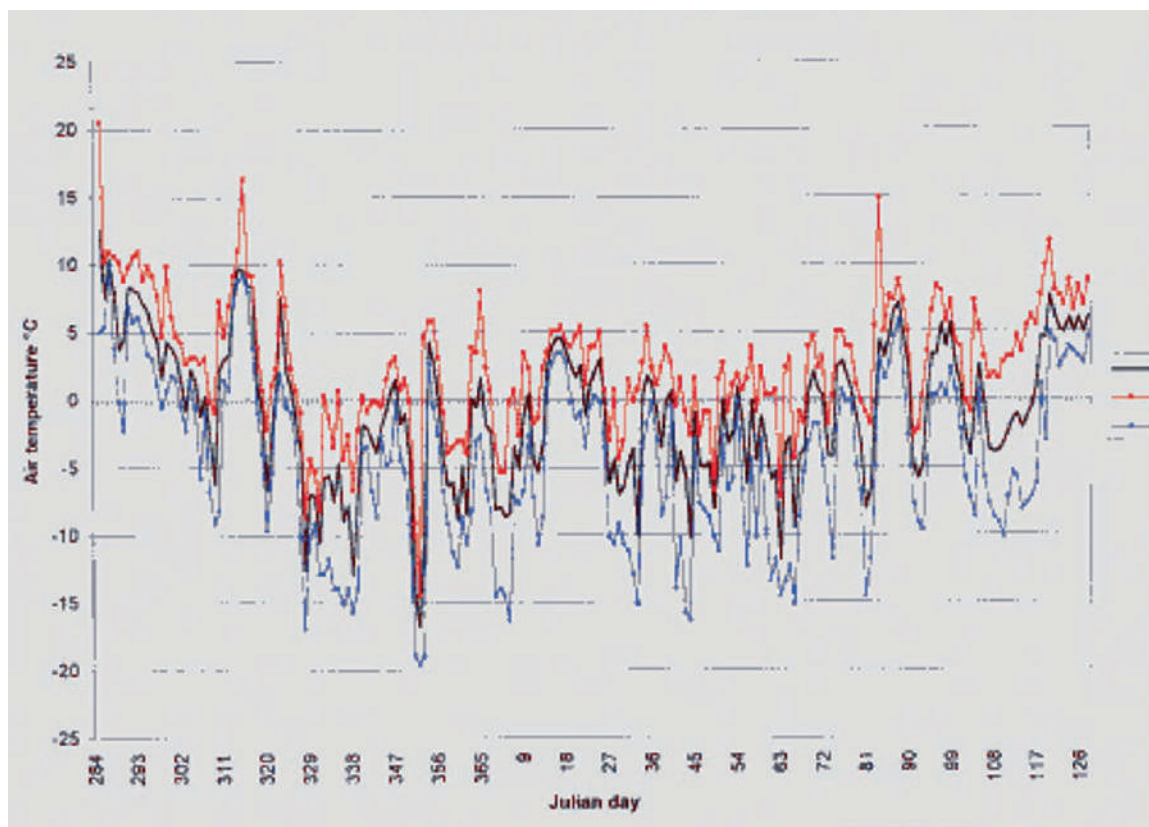
Staða Íslands í heimskautajaðrinum er augljós og sífreri finnst hér víða í jörðu, eins og síðar er fjallað um. En loftslag á Íslandi er þó með umtalsvert öðrum hætti en víðast ríkir á heimskautasvæðunum. Segja má að norðlæg lega landsins, suðlægir loftstraumar með tilheyrandi

### Kulferli

Hugtakið **kulferli** er notað sem samheiti yfir áhrif frosts og þýðu við yfirborð lands. Á ensku er hugtakið „periglacial processes“.

Fræði sem helguð eru kulferlum hafa m.a. verið nefnd „cryology“ eða kulfræði. Reyndar hafa „kulfræðingar“ varið mikilli orku í skilgreiningar og hugtök í sínum fræðum, en þeim þræði verður lítið sinnt hér.

„Periglacial“ er annað hugtak sem er mikið notað og merkir bókstaflega nágrenni jökla, en kulferli eiga sér stað á öllum svæðum þar sem vatn frýs í mold á vetrum.



Mynd 16.3. Línurit sem sýnir yfirborðshita á Geitasandi á Rangárvöllum.

## „The Icelandic cycle“

Segja má að yfirborðið á Íslandi frjósi og þiðni á víxl oftast en nokkurs staðar annars staðar. Þetta hefur stundum verið kallað „the Icelandic cycle“ (Washburn 1980).

lægðagangi („Íslandslægðin“) og Golfstraumurinn – sem flytur gríðarlega mikinn varma í átt til landsins – togist á um völdin. Þetta veldur því að lofthiti er mjög oft nálægt frostmarki langtímum saman og yfirborðið er ýmist að þiðna eða frjósa. Jafnvel yfirborð moldar á hálendinu þiðnar af og til á vetrum þegar orkumiklar lægðir koma langt suður úr hafi og flytja mikinn varma yfir landið. Á mynd 16.3 er línurit yfir yfirborðshita á Geitasandi (Berglind Orradóttir og ÓA, óbirt gögn) sem sýnir vel hvernig hitinn sveiflast langtímum saman í kringum frostmark.

Hiti í mold meginlanda á norðurslóðum einkennist frekar að því að moldin frýs á haustin en þiðnar á vorin – svona í meginráttum.

## 16.3. Útbreiðsla og þykkt sífrera

Kort af landi þar sem sífreri er í jörðu á norðurslóðum er sýnt á mynd 16.2. Samfelldur sífreri einkennir Síberíu sem og norðurhluta Kanada og Alaska. Víðfeðm svæði er einnig að finna í fjalllendi Mongólíu, Himalajafjöllum og í Klettafjöllum Kanada og Bandaríkjanna, sem og í syðri hluta Andesfjalla. Á landsvæðum á Grænlandi sem eru án jökuls er sífreri í jörðu, nema allra syðst, og það sama á við um íslaust land á Suðurskautinu. Samtals eru sífrerasvæðin um 23 milljónir km<sup>2</sup> en land á jörðinni í heild tæplega 150 milljónir km<sup>2</sup> og því er þetta mjög stór hluti lands ofan sjávarmáls.

Sífrerinn í moldinni er afar misþykkur, allt frá því að vera innan við einn metra á þykkt og upp í nokkur hundruð metra djúpur næst pólunum í Síberíu og Kanada. Á undanförunum árum virðist ísþykkt norðurslóða hafa farið minnkandi og á sumum jaðarsvæðum er sífrerinn tekinn að hörfa, sérstaklega eftir

1970. Þessar breytingar eru af völdum loftslagshlýnunar (Tarnocai o.fl. 2009).

## 16.4. Vatn frýs í jarðvegi

### 16.4.1. Frostbylgja, vatnsþurrð og eðlisvarmi

Vatn eykur rúmmál sitt þegar það frýs. Það er fátítt um efni þegar þau fara úr vökvaformi í fast efni – þetta telst meðal sérkennilegustu eiginleika vatns (sjá kaflann um vatn í jarðvegi). Rúmmálsaukningin er nálægt 10%. Breytingin er þó engan veginn nægjanleg ein og sér til þess að skýra hvers vegna þúfur myndast við frost eða annarra einkenna verður vart í yfirborði moldar.

Annar mikilvægur og afar sérstæður eiginleiki vatns sem mótar þróun holklaka í jarðvegi er gríðarlegur eðlisvarmi þess. Þegar vatn frýs losnar eðlisvarminn út í umhverfið sem hamlar á móti áhrifum frostsins sem kælir moldina. Eftirfarandi er mjög einfölduð umfjöllun um þær aðstæður sem leiða til hvað mestar rúmmálsaukningar við það að moldin frýs (mynd 16.4).

Aðstæður sem sýndar eru á myndinni miða við að tiltölulega stutt sé niður á grunnvatn. Við það að lofthiti fer niður fyrir frostmark tekur yfirborð jarðvegsins að kólna uns efsta lagið byrjar að frjósa. Vatnið frýs yfirleitt ekki í samfelldan klump, heldur myndast eins konar frostlinsur í moldinni. Mót frosins og ófrosins jarðvegs eru nefnd frostskeil eða frostbylgja (e. freezing front) og eru bæði þessi hugtök notuð hér. Þegar vatn frýs gefur það frá sér varmaorku, en vatnið hefur einmitt mikla varmarýmd eða eðlisvarma (mikil orka sem vatn getur tekið við og gefið frá sér).

Þessi hiti vegur upp á móti því að frostbylgjan færir neðar í jarðveginn

og getur jafnvel valdið því að frostskeilin stöðvast alveg eða færast afar hægt niður í moldina. Annað mikilvægt atriði er að vatnið „binst“ við frostbylgjuna þegar það frýs. Þá verður vatnsþurrð í næsta nágrenni hennar í samanburði við jarðveginn þar fyrir neðan.

Vatnsspennan er því meiri (hærrí neikvæð tala) en neðar í jarðveginum og því dregst vatn í átt að frostskeilunum til að jafna út spennunum. Standi grunnvatn hátt í jörðu er nægt vatn fyrir hendi og því getur mikið vatn sogast að frostskeilunum sem hafa að öðru leyti staðnæmst. Við það að æ meira vatn frýs við frostskeilin verður umtalsverð rúmmálsbreyting í moldinni: hún lyftist. Þetta ferli skýrir myndun margra þeirra frostfyrirbrigða sem fjallað er um hér á eftir.

### 16.4.2. Varmafleði og frost

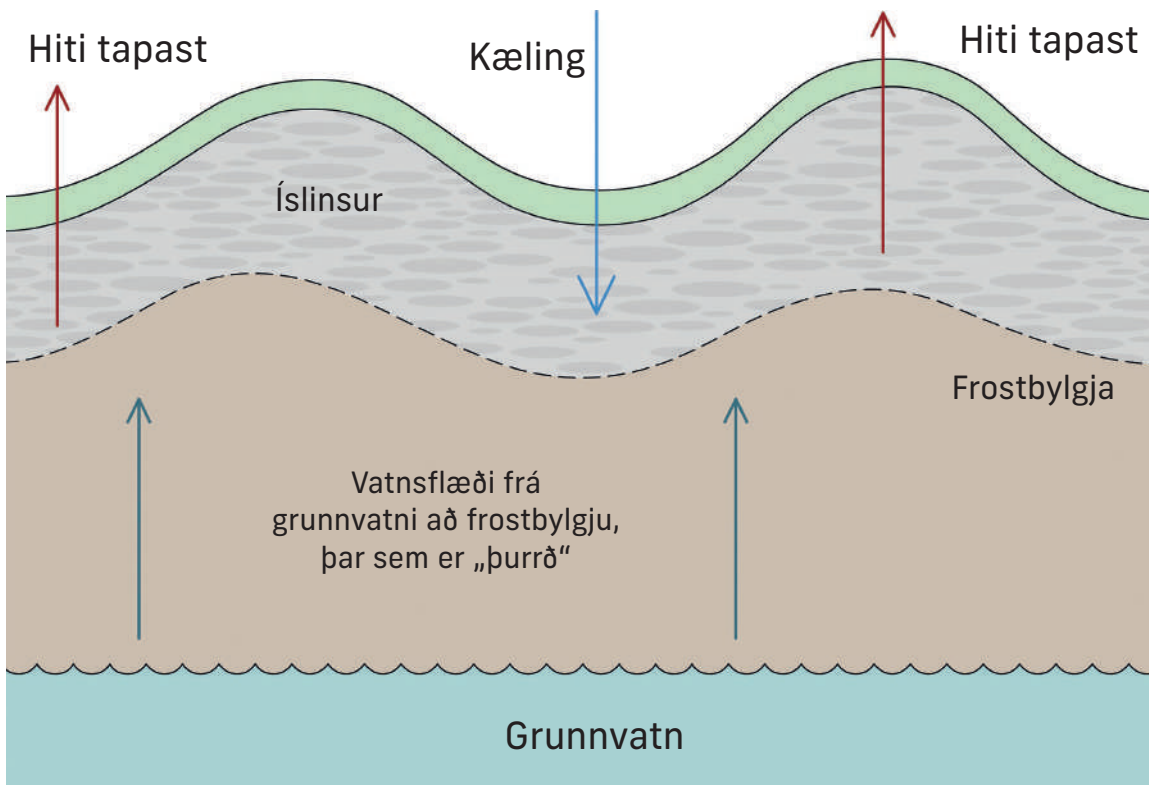
Margir þættir hafa áhrif á þróun frostmyndana í jarðvegi. Hugum fyrst að varmaleiðni. Ýmislegt mótarmanna-

leiðni í moldinni, svo sem magn og gerð lífrænna efna og bergfna, holrými, vatnsinnihald, rúmpyngd og hitastig. Loft leiðir varma illa en vatn aftur á móti mjög vel, og það getur einnig geymt mikinn varma. Því færast frost hraðar niður eftir rökum jarðvegi en þurrum. Mikið vatn getur þó tekið við æði miklum varma án þess að frjósa. Varmaleiðni eykst með aukinni rúmpyngd (hlutfallslega minna loftrými) og vatnsinnihaldi, en hin háa varmarýmd vatns lækkar varmadreifingu (e. diffusion) sem leiðir til þess að:

$$\text{varmadreifing} = \text{varmaleiðni} / \text{varmarýmd}$$

þ.e. mikill kuldi á yfirborðinu berst ekki auðveldlega niður eða hitinn upp; vatnið bæði tefur dreifingu kuldans og gleypir varmann.

Gróður á yfirborði hefur margvísleg áhrif á hitaleiðni jarðvegs og þar með á kulferli. Gróður mótarmanna-



**Mynd 16.4.** Þegar vatn frýs í moldinni verður þurrð á þeim stað sem leiðir til þess að vatn „sogast“ að frostbylgjunni. Vatnið losar mikinn varma þegar það frýs sem hamlar á móti ferð frostbylgjunnar niður í moldina og hún getur verið nánast kyrrstæð um langa hríð. Við það flyst umtalsvert mikið vatn að sama stað í moldinni sem þenst sífellt meira út.

búskap og snjóalög. Eftir því sem meira er af vatni í yfirborðinu eykst varmaleiðnin, en snjór og gróður á yfirborði mynda einangrun sem minnkar hitastigssveiflur. Heildaráhrif snjóлага á yfirborðinu hækka meðalárshita jarðvegsins þar sem einangrunin kemur í veg fyrir varmatap úr honum. Því skipta þeir þættir sem hafa áhrif á snjóalög miklu fyrir jarðveginn.

Lífrænt lag við yfirborðið (O-lag) ásamt mosa á yfirborðinu hægja á þiðnun á vorin og minnka þar með meðalárshita jarðvegs, en ástæðan er m.a. mikil vatnsheldni þessara laga með lágrí varmadreifingu þegar jörðin er ófrosin, en mikil varmaskipti eru milli jarðvegs og lofts þegar jörð er frosin (Berglind Orradóttir 2002).

Hin dökku gosefni sem einkenna yfirborð auðna á Íslandi hafa sérkennileg áhrif á varmaástand yfirborðsins. Þessi efni eru afar einangrandi, enda er vikur notaður sem slíkur í byggingum. Víða á gjóskusvæðum má finna gamlan snjó undir gjósku sem hefur borist með rofi út yfir snævi þakið yfirborð (mynd 16.6). Hins vegar getur yfirborðið hitnað mikið

á sólríkum dögum (>50°C í yfirborði) sem veldur örri uppgufun svo að jarðvegurinn þornar algjörlega í þurrkatíð, en um leið eykst einangrunargildi yfirborðs auðnarinnar.

## 16.5. Viðkvæm og frostnæm íslensk mold

Frost hefur ekki áhrif á moldina nema að vatn sé til staðar sem síðan getur m.a. borist að frostbylgjunni þegar frýs. Moldarefni leiða vatn misgreiðlega, sandur leiðir ekki vatn en vatnsleiðni um leir er mjög hæg. Vatnsleiðni er hröðust í siltefnum. Leir og lífræn efni halda hins vegar best í vatnið, og mold sem er rík af þessum efnum getur innihaldið mikið af vatni sem frýs í frosti. Trefjar í lífrænum efnum hamla hins vegar á móti því róti sem getur orðið þegar moldin frýs.

Jarðvegi sem er ríkur af silti er sérdeillis hætt við áhrifum af frosti; hann er talinn **frostnæmur** (e. frost susceptible). Siltefni skortir jafnframt samloðun sem leir og lífræn efni ljá moldinni. Vatnsósa siltefni ofan á frosnu undirlagi hafa enga samloðun og renna auðveldlega til. Þetta vita þeir sem eiga leið um berangur þegar frost er að fara úr jörðu því auðvelt er að sökkva nokkuð djúpt í yfirborðið í hverju skrefi. Bílar sökkva í moldarvegi á vorin þegar svona hagar til. Þar sem saman fer mikil vatnsrýmd og mikið af siltefnum, svo sem í kornastærðarflokkunum siltleir og leirmold, er hætta á frosthreyfingum og frostskekkjum.

Efni sem halda litlu vatni og leiða ekki vatn sem er bundið jarðvegsögnum (þ.e. ekki laust vatn) verða fyrir litlum frostáhrifum. Þá er gjarnan talað um frostfrí efni. Frostfrí efni eru fyrst og fremst mól og sandur. Verklegar framkvæmdir á norðurslóðum kalla á það að frostnæm efni séu fjarlægð og frostfríum efnum komið fyrir í þeirra stað.



Mynd 16.5. Frostlyfting. Frostfrítt efni, sandur og mól, er undir stéttinni. Frost myndast því ekki undir stéttinni en yfirborð grasflatarinnar lyftist í frostum sökum holklaka og ýtir við stéttinni í jaðrinum. Á sumrin eru stéttin og grasið í sömu hæð.

Þetta gerir margvíslegar framkvæmdir á Íslandi margfalt kostnaðarsamari en þar sem frosts gætir lítið á suðlægari breiddargráðum.

Eðliseiginleikar *eldfjallajarðar* gera moldina alla jafna að frostnæmu efni og því er mikil hætta á áhrifum kulferla á Íslandi. Leirefnin allófan og ferrihýdrit hafa geysilega mikla vatnsheldni, jafnvel >150% miðað við þurrvigt. Að auki hagar leirinn sér þannig að hann myndar stöðuga klasa sem eru af siltstærð. Vatnsleiðni í moldinni er því alla jafna greið, bæði á auðnum (*glerjörð*) og þar sem gróður er á yfirborði (*brúnjörð* og *votjörð*). Ofan á þetta bætist að samloðun moldarinnar við vatnsmettun er ákaflega lítil og víða getur moldin náð **flæðimarki** (e. liquid limit) og sýnir þá jafnvel kvikuhegðun. Það fer semsagt saman að jarðvegurinn haldi miklu vatni, vatnsleiðni sé greið og að hann skorti samloðun.

Allt þetta veldur því að íslensk mold er einstaklega frostnæm. Og þá er komið að þeirri staðreynd að hér frýs og þiðnar oftast en þekkest annars staðar á byggðu bóli. Það er því engin furða að áhrif frosts á íslenska náttúru séu mikil. Því er eins og áður sagði allt kapp lagt á að losna við jarðvegsefni og setja í staðinn möl og sand þar sem unnið er að verklegum framkvæmdum á borð við vegagerð og húsbyggingar.

## 16.6. Frostgerðir

### 16.6.1. Holklaki

Frosið vatn í jarðvegi er mismunandi að gerð. Ísinn getur verið töluvert gegndræpur eða samfelldur gegnþéttur ísklumpur og allt þar á milli. Það skiptir afar miklu máli fyrir **vatnshag** (e. hydrology) hvers svæðis hvernig ís myndast í jarðveginum á vetrum. Sé ísinn gegndræpur nær vetrarbráð að síga smám saman ofan í moldina í stað þess



Mynd 16.6. Ís sem hefur einangrast frá umhverfinu vegna foks á vikri yfir snjó. Myndin er tekin í Öskju. Mynd: Pavla Dagsson-Waldhauserová.



Mynd 16.7. Drulla að vori í mel. Frosið undirlag og vatnsósa siltrík mold. Það getur verið tafsamlegt að fara um illa gróið land þegar frost er að fara úr jörðu. Bílar, mótorhjól og reiðhjól geta valdið afar miklum skemmdum við aðstæður sem þessar.



að renna burt á yfirborðinu. Myndist gagnheill ís kemst vatn ekki ofan í jarðveginn, t.d. þegar þiðnar tímabundið á vetrum. Ísklumparnir eru væntanlega einnig skaðlegir viðkvæmum gróðri með grönnu rótarkerfi.

Rannsóknir á tilraunasvæðunum á Geitasandi á Rangárvöllum sýna vel áhrif gróðurhulu á frostlyftingu (mynd 16.8). Ógrónir viðmiðunarreitir hreyfðust umtalsvert en þar sem tekist hafði að mynda svörð (skán og háplöntur) var frostlyftingin tiltölulega lítil í samanburði, jafnvel þótt stutt væri síðan uppgæðslan hófst.

Sýnt hefur verið fram á að gróðurfur hefur mikil áhrif á hvers konar klaki myndast í mold hérlendis (Berglind Orradóttir 2002, Berglind Orradóttir o.fl. 2008, Zaqout o.fl. 2022), sem er í samræmi við alþjóðlega reynslu. Í jarðvegi laufskóga og gróskumiklu graslendi myndast oftast gegndræpur klaki. Hins vegar myndast 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

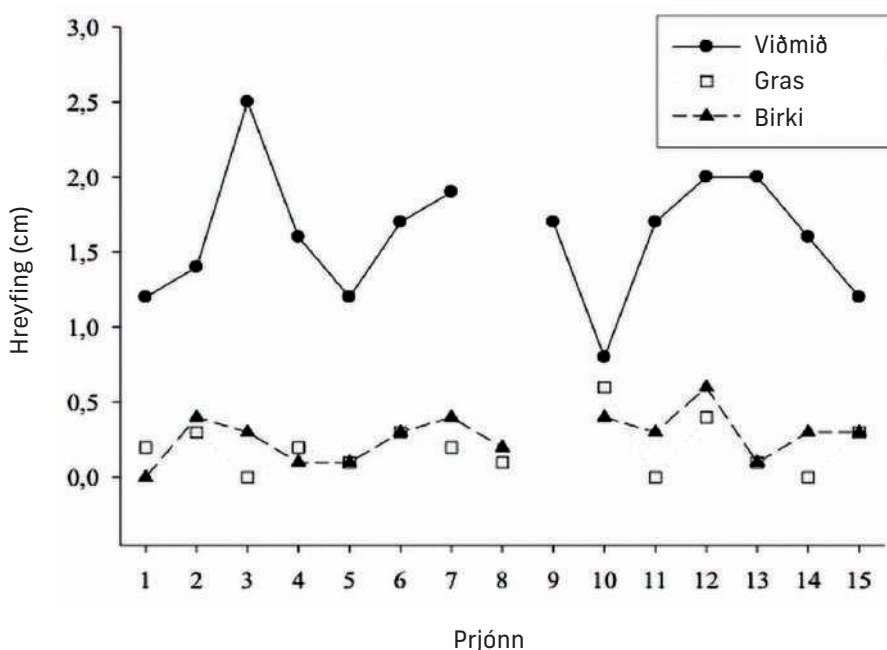
vetrum í birkiskógum og graslendi en síður í barrskógi. Auðnirnar eru þó æði sérstakar að þessu leyti – þar myndast þéttur klaki sem hleypir takmarkaðri úrkomu niður yfir vetrartímann. Þetta leiðir til mikils vatnsaga í hlákutíð, vatnsrof getur orðið mikið og vatn fyllt farvegi þar sem annars sést aldrei vatn (myndir 16.9–16.11). Rannsókn Zaqout o.fl. (2022) bendir til þess að það sama eigi við um lúpínubreiður.

## 16.6.2. Ísnálar

**Ísnálar** (e. needle-ice) eru sérstök tegund holklaka sem myndast efst í yfirborðinu (mynd 16.12). Áhrif ísnála á náttúru landsins verða seint ofmetin. Þær myndast víðast hvar í heiminum þar sem frost kemst að gróðursnauðu yfirborði. Rétt er að benda hér á yfirlitsgrein eftir Lawler frá 1988 um ísnálar sem og ágæta umfjöllun í BS-ritgerð Kathrine Schack Madsen (2013) en hún rannsakaði myndun ísnála á Hvanneyri. Ísnálar eru þráðlaga ískristallar sem tengjast hver öðrum og geta náð umtalsverðri lengd, jafnvel yfir 30 cm. Ísnálar myndast einkum á þurrum frostnóttum í rökum gróðurlausum sverði. Þetta geta verið afskaplega falleg náttúruyrirbrigði. Oft hagar því þannig til að þær bráðna yfir daginn, t.d. í sólbráð, en myndast síðan aftur næstu nótt. Einnig kemur fyrir að þær lengjast nótt eftir nótt og verða þá nálarnar lagskiptar.

Ísnálar eru þó iðulega huldar sjónum undir örþunnu moldarlagi, en þegar stigið er niður á slíkt yfirborð brakar í moldinni og ísnálarnar koma í ljós þegar krakað er í yfirborðið. Ísnálar lyfta upp yfirborðinu af miklu afli sem veldur því að steinar sem eru nokkrir cm í þvermál lyftast upp og sitja síðan ofan á ísnálunum (myndir 16.13 og 16.14) uns ísinn bráðnar á ný.

Þessi kraftur hefur mjög neikvæð áhrif á stöðugleika yfirborðsins. Ísinn losar um



**Mynd 16.8.** Mælingar á frostlyftingu á Geitasandi á Rangárvöllum í ógrónum viðmiðunarreit og 5 ára gömlum uppgæðslum með a) grasi og áburði og b) grasi, áburði og birkiplöntum ásamt c) ómeðhöndluðum ógrónum reitum (viðmið). Gögn: Berglind Orradóttir og ÓA.



**Mynd 16.9.** Klaki í auðn á Vesturöræfum nálægt Kárahnúkum í apríl. Snjór hefur bráðnað í hláku en vatnið kemst ekki niður fyrir þéttum holklaka, og síðan myndast svellalög þegar frýs á ný. Veturinn hefur mikil áhrif á vistkerfi auðna.



**Mynd 16.10.** Bleyta á frosinni *sandjörð* á Geitasandi. Vatnið kemst ekki ofan í moldina. Á sumrin sést varla vatn á yfirborðinu, jafnvel í mikilli úrkomutíð, og jarðvegurinn er oft mjög þurr. Mynd: Berglind Orradóttir.



**Mynd 16.11.** Vatnsagi og bloti við snjóbráð á Heklusvæðinu. Veturinn mótar landslagið á þessum slóðum, en vatn sést alls ekki á yfirborðinu yfir sumartímann. Vatnið flytur til mikinn sand á staði þar sem hann getur fokið til á sumrin. Myndir: Elín Fjóla Þórarinsdóttir.

moldina í efsta laginu og litlar plöntur lyftast m.a. upp með rótum. Frostlyfting af þessu tagi er eitt helsta vandamálið við uppgræðslu á Íslandi og hefur áhrif á möguleika auðna til sjálfgræðslu (sjá t.d. Hrein Óskarsson og Sigríði Júlíu Brynleifsdóttur 2009). Fyrsta stig vistheimtar felst einmitt oft í því að mynda skán á yfirborðinu (sjá kafla um líf og lífræn efni), en skánin kemur í veg fyrir myndun ísnála. Eftir það getur framvinda gróðurs orðið hlutfallslega ör.

Ísnálar hafa áhrif á yfirborðsstöðugleika með margvíslegum hætti. Myndun þeirra getur rofið samloðun á milli korna þannig að moldinni verður ennþá hættara við rofi af völdum vinds og vatns en fyrir myndun ísnálanna. Til dæmis kom í ljós við mælingar á rofi á siltríkum jarðvegi á Hólsfjöllum (ÓA og Fanney Ósk Gísladóttir 2009) að þröskuldsvindhraði (vindhraði þegar vindrof hefst) lækkaði úr u.þ.b. 9 m/s í 6 m/s á einni frostnóttu. Þar sem gróðurhulu hefur verið raskað á



**Mynd 16.12.** Ísnálar í rofdíl í Skorradal. Þar sem moldin er ber á milli þúfnanna myndast ísnálar. Þær eru ríkur þáttur í því að koma í veg fyrir að þessi rofdíll grói upp af sjálfu sér. Það á einnig við um auðnir almennt.



**Mynd 16.13.** Frost lyftir steinvöllum sem eru nokkrir cm í þvermál, en einnig plöntum sem eru að nema land. Þegar þetta yfirborð bráðnar er því mjög hætt við vatns- og vindrofi. Stundum virðist sem þyngdarlögmálið virki ekki sem skyldi þegar ísnálar eru annars vegar.



**Mynd 16.14.** Frostið lyftir steinum og gróðurnál. Á myndinni hafa minni völnar lyfst en ekki stærri hnullungar. Hægt er að nota þyngd og flatarmál steinanna til að reikna út þrýstinginn sem hefur þurft til að lyfta þeim ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) og þá jafnframt við hvaða þunga steinarnir verða stöðugir í þessum frostaburði. Hér hefur þrýstingurinn náð allt að 5 g á hvern  $\text{cm}^2$ .

árbökkum og við læki, t.d. vegna beitar, losa ísnálar um moldina sem eykur á setflutning í læki og önnur vatnsföll (sjá m.a. Yumoto o.fl. 2006).

Eftir að ísnálar hafa myndast í sverðinum (mynd 16.15) verða rofdílar fremur stöðugir að því leyti að gróður á erfitt með að ná fótfestu í þeim á ný. Því valda m.a. ísnálarnar en einnig virðist yfirborðið geta orðið mjög þétt og andsnúið fræplöntum á sumrin. Rofdílar í gróðurlendi geta því verið afar lengi



**Mynd 16.15.** Ísnálar auka áhrif rasks. Á myndinni sést hvar traðk hefur opnað hluta svarðar á nýlegum göngustíg. Ísnálar myndast þar sem gróðurinn er horfinn og til verða varanlegar ógróñar skellur sem smám saman stækka. Tveimur árum eftir að þessar myndir voru teknar var stígurinn orðinn algjörlega ógróinn.

að gróa saman aftur, jafnvel þar sem friðað hefur verið fyrir beit. Ísnálar eru mikilvægur þáttur í því þegar fjölfarnir göngustígar missa smám saman gróðurhuluna.

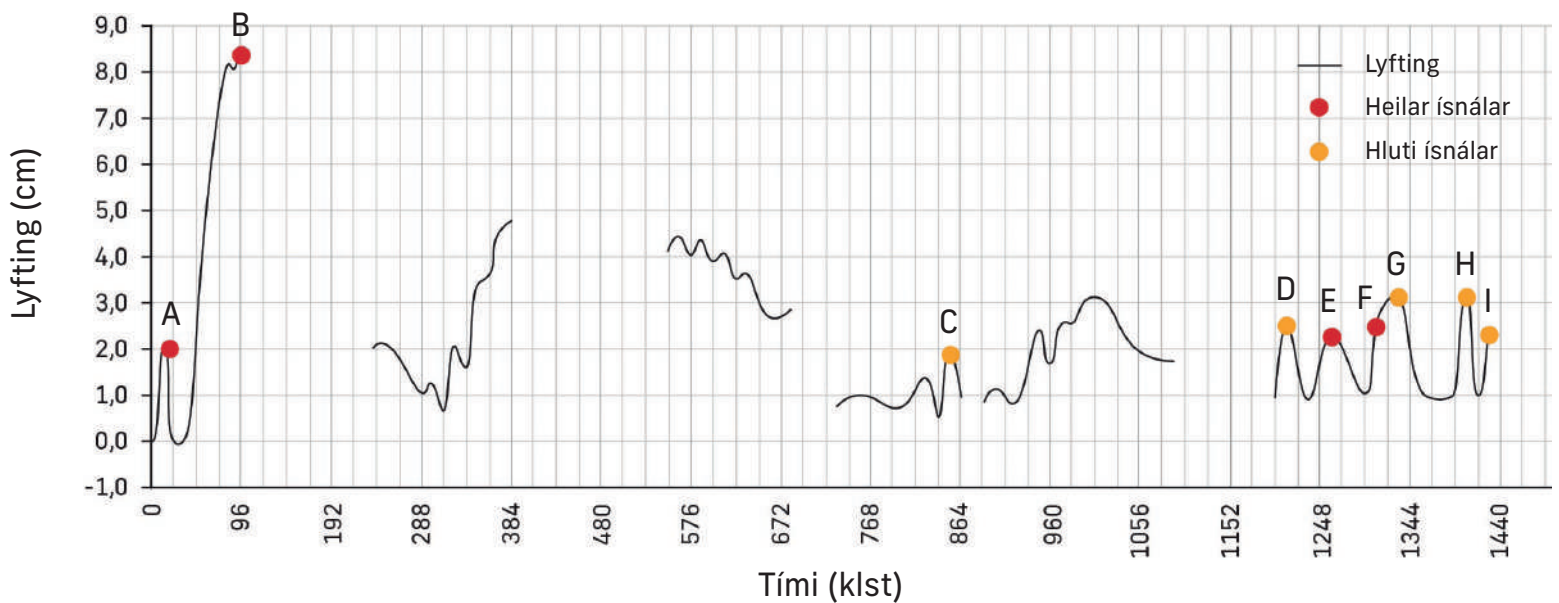
Rannsóknir sem gerðar voru á Hvanneyri sýna vel vöxt ísnála í frosti þegar ekki var snjóhula yfir jörð (Madsen 2013). Ísnálarnar urðu mest um 8 cm langar (mynd 16.16). Í lok tímabilsins mynduðust iðulega 2–3 cm langar ísnálar sem bráðnuðu á daginn. Æskilegt væri að auka rannsóknir á myndun ísnála á Íslandi vegna mikilvægis þessa þátta fyrir náttúru landsins.

## 16.7. Þúfur

Þúfur eru áberandi hluti íslensks landslags – þær geta án vafa talist eitt meginéinkenni íslenskrar náttúru. Þúfa gæti allt eins prýtt fána landsins eins og fiskflak, sem gerð var tillaga um í árdaga sjálfstæðisbaráttu þjóðarinnar (sjá mynd 16.1). Þær finnast nær alls staðar á landinu þar sem gróður er á yfirborði. Listamenn hafa sótt innblástur í þessi formfögru fyrirbrigði, svo sem Steinunn Marteinsdóttir sem gerði þúfur að meginviðfangsefni í mörgum verkum sínum (mynd 16.17).

En þrátt fyrir hversu einkennandi





**Mynd 16.16.** Myndun ísnála um tveggja mánaða skeið 2012. Eyður eru í gögnum þegar snjór hylur yfirborðið. Unnið upp úr BS-verkefni Kathrine Schack Madsen (2013).

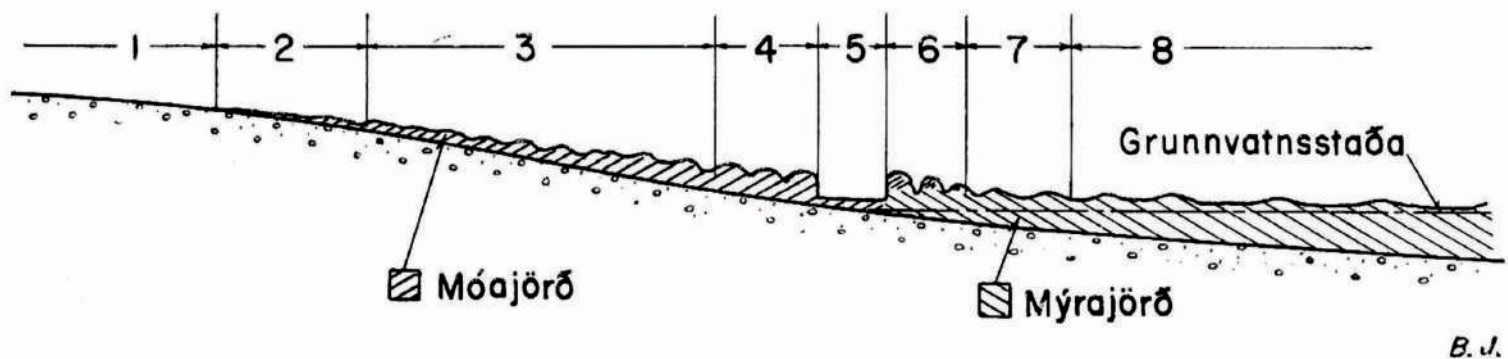
Þúfur eru fyrir landslag á Íslandi eru rannsóknir á þeim ekki margar. Vert er að geta doktorsverkefnis Ekkehard Schunke, sem hefur síðan ritað nokkuð um þúfur á Íslandi (sjá Schunke 1977, Schunke og Zoltai 1988). Íslenska hugtakið „þúfa“ er í æ ríkari mæli notað sem alþjóðlegt hugtak um þessi fyrirbrigði, oftast fleirtölumynd orðsins, þ.e. „thufur“ og jafnvel „thufurs“. Þar má nefna rannsóknir á hlíðum eldfjalls í Kóreu (Kim 2008) og í Suður-Afríku og Lesótó (t.d. Grab 1994, 2005). Svipuð fyrirbrigði finnast víða um heim og ganga undir ýmsum nöfnum eins og „hummocks“ á ensku og „pounus“ í Fennóskandíu – en þau fyrirbrigði myndast ekki síður sem vaxtarform plöntuhópa og ekki endilega vegna frosts.

Björn Jóhannesson (1960) veitti því athygli að þúfur voru alla jafna hæstar á Íslandi í jaðri votlenda og teiknaði meðfylgjandi skýringarmynd (mynd 16.18). Ástæðan er einmitt sú sem áður var skýrð, það dregst vatn upp að frostbylgjunni og þegar grunnvatn er skammt neðan yfirborðs eru aðstæðurnar ákjósanlegastar.

Gerrard (1992) birti svipaðar sviðsmyndir fyrir þúfnamyndun hérlendis.



**Mynd 16.17.** Málverk eftir Steinunni Marteinsdóttur af fugli í skjóli þúfna. Mynd í eigu ÓA, birt með leyfi listamannsins.



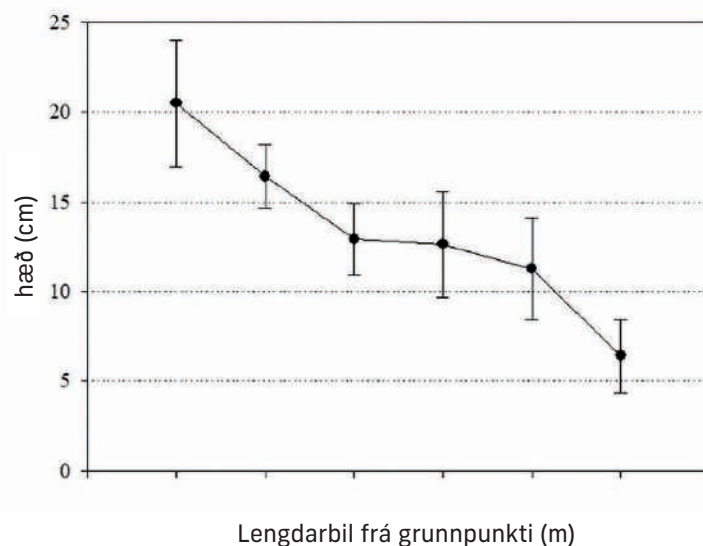
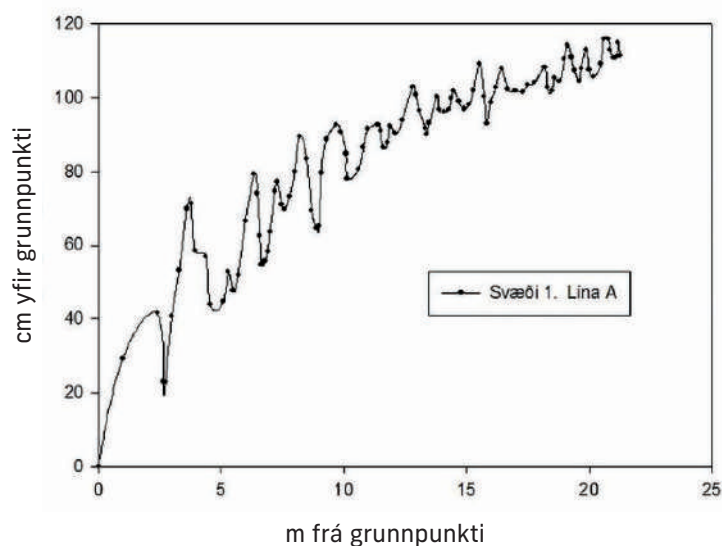
**Mynd 16.18.** Skýringarmynd af afstöðu hæstu þúfna í landslagi í bók Björns Jóhannessonar (1960). Þúfnar eru hæstar þar sem hæfilega langt er niður á grunnvatn en minni á þurrlandi.

Matthildur Sigurjónsdóttir (ÓA og Matthildur Sigurjónsdóttir 2012) gerði könnun á hæð þúfna frá votlendis-yfirborði upp á mólendi á nokkrum stöðum á Mosfellsheiði. Eitt sniðanna er sýnt til vinstri á mynd 16.19 en meðaltal þeirra til hægri ásamt staðalfrávik. Meðalhæðin er yfir 20 cm næst votlendum á þessu svæði en lækkar niður í u.þ.b. 7 cm fjærst grunnpunkti (misjafnt hve það er langt frá). Niðurstöðurnar koma vel heim og saman við hugmyndir Björns Jóhannessonar.

Þúfur eru fljótar að myndast í framræstu votlendi sem tekið er til hrossabeitar í stað ræktunar, en við þær aðstæður er grunnt niður á vatnsborðið og þung beitardýr auka á þúfnamyndunina,

eins og síðar er vikið að. Ástæður þúfnamyndunar þar sem stutt er niður á grunnvatn eru augljósar. En þúfur finnast víðar, m.a. á þurrlandi, og sem dæmi má nefna að þúfur eru algengar og jafnframt sérdeilis stórar í Kelduhverfi þar sem tugir metra geta verið niður á grunnvatn (mynd 16.19). Hvernig má það vera? Margar ástæður eru fyrir því: (Sjá textabox á næstu síðu).

Í yfirlitsgrein um þúfur lögðu Walker o.fl. (2008) áherslu á að mismunandi gróðurfar og mismikil snjóþekja skýrðu breytilega myndun þeirra. Einangrun á yfirborði er mikilvæg fyrir myndun þúfnanna, t.d. virðast brattari þúfur myndast þar sem beit er mikil og sína hefur verið fjarlægð. Í skóglendi safnast



**Mynd 16.19.** Hæð þúfna í sniðum frá grunnpunktum í votlendi upp á mólendi nærri votlendum. Dæmigert snið til vinstri en meðaltöl sniða til hægri, sem skipt er í 6 jöfn lengdarbil óháð lengd sniðanna (ÓA og Matthildur Sigurjónsdóttir 2012).

snjór fyrir í skjóli trjána og veitir mun varanlegri einangrun en gengur og gerist á snjólausum berangri, auk þess sem gróðurhula skóglendisins er yfirleitt mun öflugri og hefur að geyma meira af lífrænum efnum sem auka á einangrun yfirborðsins. Hvað Ísland varðar þá er líklegt að kornastærð og tilvist grófra gjóskulaga sem rjúfa vatnsleiðni séu mikilvægir þættir sem skýra mismunandi þúfnamyndun milli landsvæða, eins og síðar er vikið að – bæði þar sem stutt er niður á grunnvatn og þar sem grunnvatnsborð er hvergi nærri.

Þung beitardýr hafa einnig mikil áhrif á ferlið, en hestar stíga t.a.m. nánast aldrei ofan á þúfur heldur alltaf á milli þeirra, sem veldur því að mold með litla samloðun ýtist æ meira upp í þúfuna (mynd 16.20b).

Mismunandi beitaraðstæður innan og utan girðingar geta veitt góða innsýn í áhrif beitarinnar, eins og sést á mynd 16.21 á næstu síðu frá Hítardal.

Það er athyglisvert að þúfur myndast á Asoreyjum þar sem aldrei frýs, en þar er einmitt *eldfjallajörð* með litla samloðun og feykilega mikla vatnsheldni (Hydric Andosol; >100% vatn við 15 bara togspennu, þ.e. þegar moldin er „þurr“). Landið er notað fyrir beit nautgripa (mynd 16.22). Almenn er talið að beit þúfjár stuðli að myndun þýfis, jafnvel utan þeirra svæða þar sem frost er mikið (sjá Boot o.fl. 2014, þar sem íslenskar þúfur koma við sögu).

Þegar skoðaðar eru tilgáturnar hér að ofan um ástæður fyrir þúfnamyndun á Íslandi má ljóst vera að aðstæður sem draga úr uppdrætti vatns frá grunnvatnsborði ættu að minnka líkur á myndun þúfna. Það á m.a. við þar sem gróf gjóskulög eru skammt neðan yfirborðs, eins og víða á gosbeltinu. Þúfur eru t.d. ekki eins afgerandi hluti landslagsins á grónum heiðum

- Moldin er *eldfjallajörð* með litla samloðun, sem gerir það að verkum að moldarefnin ýtast auðveldlega til. Moldin hefur jafnvel kvikueiginleika sem veldur því að hún nær flæðimarkinu þegar mikið er af vatni og hún verður fyrir raski (t.d. ef þiðnar eftir frost og búfé á leið um svæðið).
- *Eldfjallajörð* getur haldið í sér firnum af vatni sem að hluta koma í stað vatnsdælingar frá neðri lögum að frostbylgjunni.
- Leir í *eldfjallajörð* myndar stöðug samkorn af siltstærð. Vatnsleiðni er því mjög ör, nema að gróf gjóskulög rjúfi vatnsleiðnina. Mismunandi kornastærð og tilvist grófra gjóskulaga í jarðveginum skýrir iðulega mismun á milli landshluta hvað varðar þúfnamyndun.
- Tíðir frost-þýðu-hringir valda því að stöðugt bætist vatn í jarðveginn allan veturinn. Vatn berst bæði upp að frostbylgjunni og niður í moldina í umhleyplingum á vetrum.
- Beit þungra dýra á borð við hross og nautgripi eykur mjög á myndun þúfna, en einnig beit sauðfjár.
- Eftir að þúfur taka að myndast þróast afar mismunandi aðstæður á þúfnakollum (áveðurs frýs hraðar en niðri á milli þúfna) og á milli þúfna (þar myndast skjól, stundum einangrandi snjóhula). Frostbylgja myndast hugsanlega fyrr í þúfunni, þangað berst vatn og hún bólgnar miðað við svæðið milli þúfna.



**Mynd 16.20a.** Þúfur í Kelduhverfi þar sem tugir metra eru niður á grunnvatn. Þúfurnar ná iðulega yfir eins metra hæð (munur á hæsta og lægsta punkti) – kargabýfi sem erfitt er að ganga um).





**Mynd 16.20b.** Þúfur í ofbeittu hrossahólfí. Brattar þúfur sem hafa myndast á fáum árum þar sem áður var tún eins og það sem ennþá sést handan girðingarinnar.



**Mynd 16.21.** Mikið beitt hrossabeitarhólf innan girðingar til hægri en minni beit, einkum af sauðfé, til vinstri. Munurinn er sláandi – hrossabeitin eykur á myndun þúfnanna.



**Mynd 16.22.** Þúfur á Asoreyjum, þar sem frýs sjaldan eða aldrei. Moldin er vatnsósa *eldfjallajörð* (Hydric Andosol) og landið er nýtt til beitar nautgripa.

í Vestur-Skaftafellssýslu og annars staðar, en þar er moldin gróf vegna tíðra gjóskufallsatburða auk þess sem gjóskulög skammt neðan yfirborðs rjúfa vatnsleiðnina. Grófleiki jarðvegsins og tilvist grófra gjóskulaga eru líklega meðal þeirra meginþátta sem skýra mun á milli landshluta hvað varðar myndun þúfna.

Moldin fjærst gosbeltinu er iðulega fremur fínkorna og með dæmigerða sortueiginleika á borð við mikla vatns-heldni, öra vatnsleiðni, kvikuhegðun o.s.frv. Þar vantar einnig gróf gjóskulög sem rjúfa vatnsleiðnina, enda er mörg stórfengleg þúfnasvæði að finna fjarri gosbeltinu, t.d. á nyrsta og austasta hluta Norðaustur- og Austurlands, m.a. í Kelduhverfi, austarlega í Jökulsárhlið og á Víknaslóðum í nágrenni Borgarfjarðar eystri (mynd 16.23). Á þessum slóðum eru hafræn áhrif á veðurfarið einnig áberandi með tíða frost-þýðu-atburði sem auka á frosthreyfingar. Þúfur eru ennfremur afar háar í jöðrum mýrlenda á heiðum á Norðvesturlandi, t.d. á Auðkúluheiði við norðanverðan Kjalveg. Miklar umhverfisbreytingar áttu sér stað hérlendis í kjölfar landnáms.

Loftslag fór ennfremur kólnandi eftir því sem leið á aldirnar þaðan í frá og þúfnamyndun hefur væntanlega aukist með minni einangrun, meira beitarálagi og kólnandi veðurfari á litlu ísöld. Þessa sér víða stað í jarðveggsniðum þar sem þúfur taka ekki að myndast fyrr en eftir 1300 til 1500 (sjá m.a. Van Vliet-Lanoë 1998), eða í kjölfar útrýmingar skóga af stórum landsvæðum.

## 16.8. Jarðsil – jarðskrið

Frost hefur mikil áhrif á yfirborð hlíða á norðurslóðum. Mold og laus jarðefni frjósa og þiðna á víxl, mismikið eftir aðstæðum. Þegar vatnið frýs bólgnar það út – moldin eykur rúmmál sitt. Einnig leitar vatnið í átt til frostbylgjunnar, sem eykur á áhrifin eins og áður hefur

verið lýst. Þegar vatnið í moldinni þiðnar aftur minnkar rúmmálið. En rúmmálsbreytingarnar sem verða með frosti og þýðu virka ekki jafnt í allar áttir; nú leggst þyngdaraflið einnig á árar og úr verður hægfara bylgjuhreyfing moldarinnar niður brekkurnar (sjá yfirlitsgrein Matsuoka 2001). Ferlið hefur verið nefnt jarðsil á íslensku en kallast „solifluction“ á ensku.

Ummerkin sem verða á yfirborðinu hafa fengið ýmis nöfn – en slíkar hlíðar hafa verið nefndar jarðsilsbrekkur og stallarnir paldrar eða jarðsilstallar. Einnig er algengt annað form á jarðsili, jarðsilstungur, eins og síðar er vikið að, sem og svokallaðir rimar í rimamýrum. Benda má á grein Helga Hallgrímssonar (2016) þar sem fjallað er um þessi fyrirbrigði og skrif um þau á íslensku. Raunar telur Helgi að ekki þurfi frost



**Mynd 16.23.** Yfirborð mótað af kulferlum í nágrenni Borgarfjarðar eystri. Sauðféð á myndinni er mælikvarði á stærð fyrirbrigðanna. Þarna eru afar stórar þúfur, jarðsilstallar (paldrar) og jarðsilstungur í bland.

til að koma bylgjuhreyfingunni af stað niður brekkurnar – en jarðsilsstallar eru m.a. áberandi í Vestur-Skaftafellssýslu (mynd 16.24) þar sem hann telur að jarðvegur frjósi sjaldan og lítið í einu.

Þessu til stuðnings má benda á að þúfur geta myndast í sams konar jarðvegi og hér um ræðir beit og þúfnamyndun í hlíðum gætu með öðrum orðum myndað bylgjuhreyfingu jarðvegsins. Að öðru leyti er ekki lagt mat á skoðun Helga hér, en rannsóknir skortir. Í alþjóðlegum fræðum er jarðsil tengt frosti og þýðu (sjá Matsuoka 2001). Fremst í stöllum er iðulega grófara efni (sjá umfjöllun um myndun melatígla) sem verður ekki fyrir jafnmiklum áhrifum frosts og efnið innar í stallinum. Fínna efnið bólgnar út og ýtir á það grófara sem er fremst í tungunni þar sem geta jafnvel verið steinar. Þetta er víða áberandi þar sem gróðurhula er fremur lítil og ekki síst í jarðsilstungum.

**Jarðsilsstallar (paldrar)** eru algengir um allt land, en þó er mismunandi hvað þeir eru áberandi í hlíðum. Þetta geta

verið ákaflega tilkomumikil fyrirbrigði sem mynda samfelldar breiður af stöllum um fjallshlíðar, sbr. mynd 16.25 af Bjarnarhafnarfjalli.

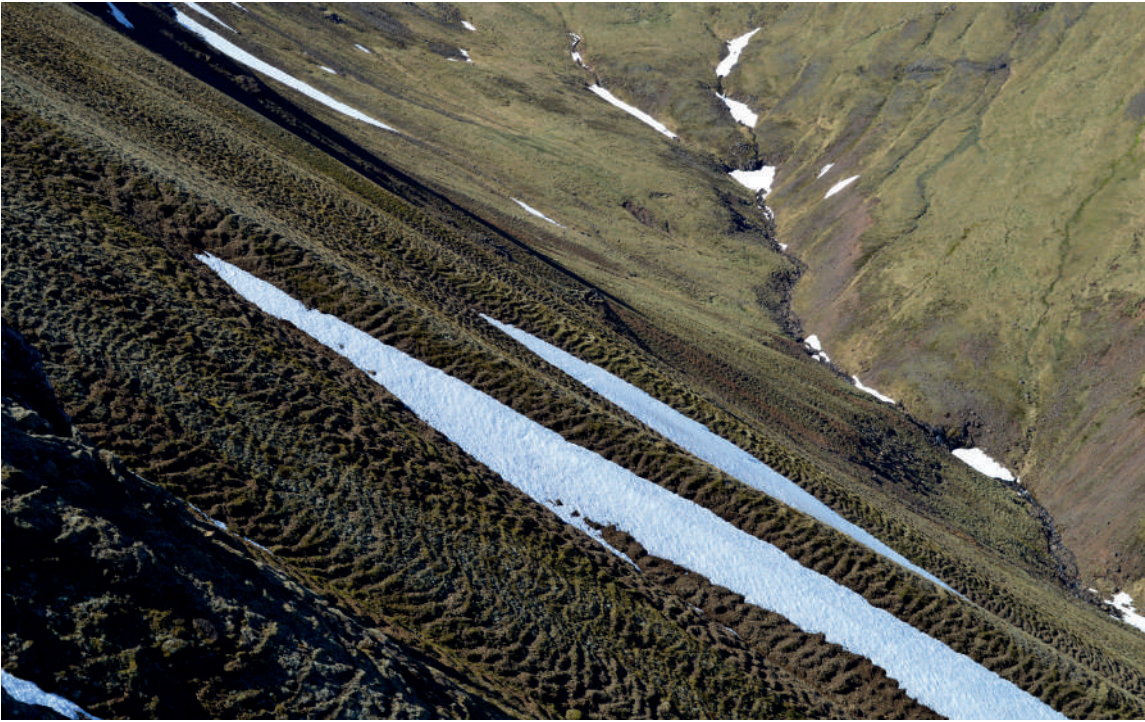
**Jarðsilstungur** eru afar algengar um land allt. Í stað stalla myndast tungulaga bungur undan hallanum, sbr. mynd 16.26 hér að neðan. Myndin til hægri er tekin á Öxnadalshlíð þar sem tungurnar eru einmitt mjög áberandi.

Jarðsilstungur eru ekki síður virk yfirborðsmunstur í ógrónum hlíðum, og þá sést iðulega vel í grjóthrúgu framan í tungunum sem sporna á móti hreyfingunni niður á við. Rétt eins og þróun jarðsilsstalla á margt sameiginlegt með myndun þúfna eiga jarðsilstungur á illa grónu landi margt sameiginlegt með melatígllum, sem fjallað er um hér aftar.

Annað sem einkennir svæði þar sem jarðsilstungur og stallar fara saman með beitarálagi er að gróður á erfitt uppdráttar á „pallinum“ ofan á stöllum og tungunum – þar myndast eins



**Mynd 16.24.** Jarðsilsstallar (paldrar) í Pétursey í Vestur-Skaftafellssýslu. Girðingarstaur neðarlega t.h. til viðmiðunar. Þessir paldrar hafa vakið mikla athygli og hluti brekkunnar er nú kominn á náttúruminjaskrá. Sigurður Þórarinnsson (1981), Helgi Torfason (1984) og Helgi Hallgrímsson (2016) hafa allir ritað um paldra-brekkurnar í Pétursey.



**Mynd 16.25.** Tilkomumiklir jarðsilstallar í Bjarnarhafnarfjalli á Snæfellsnesi. Hér snýr hlíðin í norður en svo virðist sem stallarnir séu algengari í hlíðum sem snúa í suður (Helgi Hallgrímsson 2016) þar sem væntanlega eru tíðari hringir frosts og þýðu og sólin nær að ylja yfirborðið.

konar rofdílar sem gróa illa upp – sbr. umfjöllun um rofdíla og ísnálar hér á undan. Slíkum svæðum er einstaklega hætt við vatnsrofi, enda eru þau í umtalsverðum halla. Oft og tíðum gefur það ranga mynd af svæðum að horfa aðeins upp eftir hlíðum þeirra, þær geta jafnvel virst algrónar frá því sjónarhorni (mynd 16.29 til vinstri). Ef aftur á móti er horft niður sömu hlíðar koma rofdílarnir í ljós (mynd 16.29 til hægri). Slíkar aðstæður eru afar algengar um landið

allt – og því er mikilvægt að horfa niður hlíðarnar þegar ástand landsins er metið.

#### Undursamlegar rimamýrar

Á köldum og mjög blautum svæðum með lítinn halla (t.d. 1–2°) geta myndast afar sérstök fyrirbrigði sem hafa fengið heitið rimamýrar og er ein af vistgerðunum í vistgerðaflokkun Náttúrufræðistofnunar Íslands (Jón Gunnar Ottósson o.fl. 2016).

## Jarðsil og skriðuföll

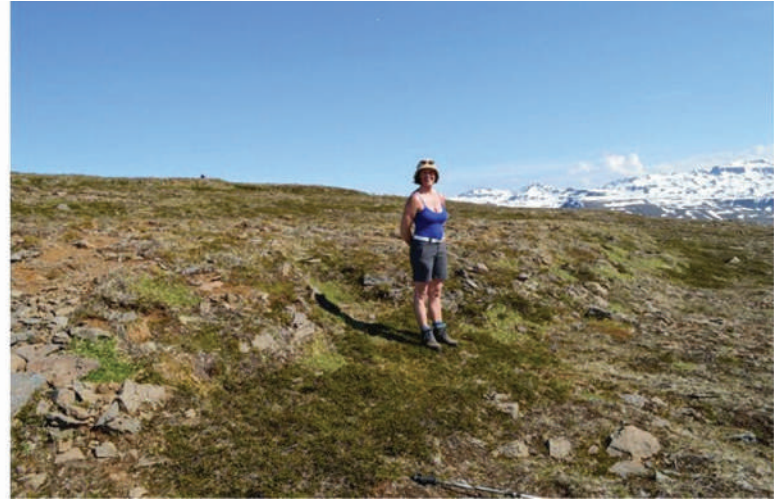
Jarðvegi í jarðsilsbrekkum er mjög hætt við vatnsrofi og skriðuföllum. Þegar mikið vatn hleðst upp í moldinni í miðjum jarðsilstungum getur hún náð flæðimarki þar sem hún situr í halla og valdið skriðuföllum.

Grófara efnið neðst í tungunni heldur á móti en getur þó gefið sig ef þrýstingurinn niður brekkuna verður of mikill þegar moldin er orðin þung og vatnsósa.

Skriðuföll eru algeng á svæðum þar sem jarðsilstungur sitja í hallanum.



**Mynd 16.26.** Jarðsilstungur. Til vinstri sést framan á tungu í Langadal í Austur-Húnavatnssýslu, stórgrýti er fremst í tungunni. Til hægri eru jarðsilstungur á Öxnadalshéiði. Svæðum sem þessum er hætt við skriðuföllum þegar fyrirstaðan fremst í tungunum gefur sig, t.d. við snjóbráð eða úrfelli þegar moldin er mettuð fyrir.



**Mynd 16.27.** Ógróin jarðsilstunga til vinstri (Hrútfell á Kili í um 800 m hæð), en göngustafur er til viðmiðunar. Gróf grjóturð er fremst í tungunni. Tungur af þessari gerð eru mjög algengar á ógrónu landi á heimskautasvæðunum. Til hægri er stór jarðsilstallar í hlíð á Norðurlandi þar sem hver stallurinn tekur við af öðrum með 10–20 m millibili.

Þessi tegund mýra er útbreidd í Finnlandi (aapa mire) og víðar (Koutaniemi 1999). Í rimamýrum myndast bjúglaga garðar þvert á hallann sem nefndir eru rimar. Þeir hreyfast hægt undan hallanum, tugi cm á ári samkvæmt finnskum rannsóknum (Koutaniemi 1999), og hraðast í miðjunni sem gerir þá bogalaga. Íðulega eru tugir metra á milli rimanna og svæðin eru því röndótt og auðgreinanleg á gervihnatta- og loftmyndum. Samkvæmt rannsóknum Náttúrufræðistofnunar (Jón Gunnar Ottósson o.fl. 2016) er moldin á þessum svæðum djúp og afar rík af lífrænum efnum. Rimarnir eru í raun jarðsilstallar – bylgjuhreyfing jarðvegs undan halla fyrir áhrif frosts og þýðu.

Stærstu rimamýrarnar eru Lauffells-mýrar á Síðumannaafreйти og Miklumýrar á Hrunamannaafreйти, en þær finnast víða um landið, m.a. á Norður- og Austurlandi. Borgþór Magnússon og Sigurður H. Magnússon (2021) fluttu afar fróðlegt yfirlitserindi um þessi fyrirbrigði sem er aðgengilegt á netinu (sjá heimildalista). Rimamýrar eru fremur fágætar á Íslandi og ættu að njóta sérstakrar verndar, rétt eins og freðmýrarústirnar sem hér er fjallað um.

#### **Forn ummerki frosts í jarðvegi**

Á jökulskeiðunum náðu áhrif frosts og þýðu á umhverfið mun sunnar en nú er, en ummerkin eru þó víða ennþá til staðar. Það er t.d. nauðsynlegt fyrir landmótunar- og forleifafræðinga nú á dögum að kunna skil á ummerkjum þessara ferla, sem mörg hver eru sjáanleg langt suður eftir Evrópu, rétt eins og þeim ummerkjum sem hafa orðið á norðurslóðum – ummerkin geta t.d. ranglega verið talin til fornleifa.



**Mynd 16.28.** Jarðsilstallar sunnan Nýjadals á Sprengisandi, Tungnafellsjökull í baksýn. Sjá má 5–6 stalla. Litill gróður sem iðulega er einkum við rót hvers þreps, framan við stallinn.

## **16.9. Rústir – freðmýrarústir og ísfell („pingos“)**

Rústir eru afar áhugaverð fyrirbrigði í náttúru norðurslóða. Rúst er í grófum dráttum þúst með ískjarna, oft 1–4 m



**Mynd 16.29.** Jarðsil og rofdílar. Þegar horft er upp hlíðina virðist hún nokkuð vel gróin en þegar horft er niður sömu hlíð koma rofdílarnir ofan á jarðsils-pöllum í ljós. Ástand landsins er slæmt og því er mjög hætt við vatnsrofi. Myndin er tekin við veginn um Fróðárheiði á Snæfellsnesi.

á hæð, sem rís upp úr votlendi vegna kulferla (sjá t.d. Seppala 1988, Pissart 2002). Ofan á hinum frosna ískjarna er misþykkt lag sem er ófrosið, a.m.k. yfir sumartímann, svokallað virkt moldarlag (e. active layer, sjá umfjöllun um *frerajörð*), oft 30–60 cm þykkt á Íslandi. Rústir finnast einnig á öðrum svæðum þar sem gróðurhula er lítil en slíkar rústir hafa ekki verið skjalfestar hérlendis.

Myndun sífrerarústa er háð veðurfari, vatnafari og þáttum sem hafa áhrif á hitaleiðni á yfirborði og í moldinni. Þessir þættir eru m.a. háðir landslagi, jarðvegi og gróðurfari. Áfok hefur væntanlega einnig áhrif á íslensku rústirnar, svo sem lífrænt innihald þeirra, sem er mikið lægra en í dæmigerðum rústum á Norðurlöndum

(sjá Þorstein Sæmundsson o.fl. 2012 og Þóru Ellen Þórhallsdóttur 1994, 1996). Jarðvegseiginleikar á Íslandi eru um margt sérstæðir fyrir myndun rústa, ekki síst vegna þess hve moldin getur bundið mikið vatn og vatnsleiðnin er ör í siltríkri moldinni. Þessir þættir stuðla enn frekar að myndun rústanna séu önnur skilyrði á annað borð fyrir hendi.

*Eldfjallajörðin* hefur einnig mikið einangrunargildi, sem skiptir máli á yfirborðinu, ekki síst vegna þess að lífræna innihaldið er minna en í yfirborði rústa á norðurslóðum almennt. Á hinn bóginn geta gróf jarðvegslög rofið vatnsleiðni og þar með spornað við myndun rústa. Lágur sumarhiti kann að vera mikilvægur fyrir viðhald rústanna, sem fellur vel að hugmyndum Seppala



**Mynd 16.30.** Rimamýrar. Moldarrimar sem velta hægt og sígandi niður lítinn halla í votlendi. Mynd úr Jökulsárhlíð til vinstri en af Holtamannafrétti til hægri. Mynd til hægri: Sigurður H. Magnússon.



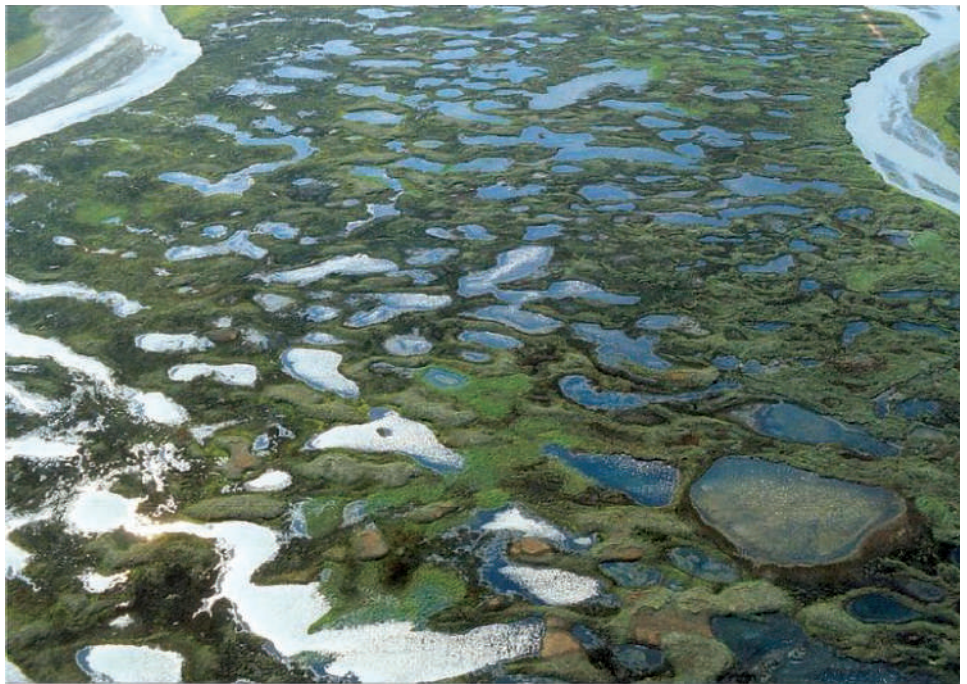
**Mynd 16.31 a & b.** Frá Orravatnsrústum á Hofsafrétti norðan Hofsjökuls. Rústirnar hér eru stórar um sig, háar og tilkomumiklar. Vistkerfið (rústamýravist) er einstaklega fjölbreytt.

(1988) og Pissart (2002) um myndun og viðhald rústasvæða. Luoto o.fl. (2004) notuðu líkön til að sýna fram á að bestu skilyrðin fyrir myndun rústa væru á frekar þurrum svæðum (<450 mm ársúrcoma) þar sem ársmeðalhiti er á milli -3 og -5 °C. Ársúrcoma er talsvert meiri en þetta á Hofsafrétti og víðar norðan og vestan Hofsjökuls þar sem eru merkileg rústasvæði, og hún er mikið meiri á hinu mikilfenglega rústasvæði í Þjórsárverum, sunnan Hofsjökuls.

Rannsóknir Þóru Ellenar Þórhallsdóttur (1994, 1996) í Þjórsárverum benda til þess að vatnafar árla vetrar sé mikilvægt fyrir myndun rústanna, sem og nægt aðgengi að grunnvatni (grunnvatnsrennsli) sem eykur á hæð þeirra. Ætla má að rennsli í gegnum Orravatnsrústalægðina norðan Hofsjökuls sé mikilvægt fyrir viðhald og myndun rústanna. Christof Kneisel hefur mælt ísþykkt með leiðnimælingum á svæðinu og sýna niðurstöðurnar að ísþykkt er um 5–7,5 m (Kneisel o.fl. 2007; Þorsteinn Sæmundsson o.fl. 2012).

Rústasvæði finnast víða á Íslandi en mörg þeirra hafa verið óstöðug í aldanna rás; rústir hafa myndast á köldum tímabilum, svo sem á litlu ísöld, en bráðnað þegar tíðarfar var hlýrra. Helstu rústasvæði landsins er að finna í Þjórsárverum og Orravatnsrústum norðan Hofsjökuls en einnig í Álfgeirstungum og víðar norðvestan og vestan við Hofsjökul. Einnig er afar myndarlegar rústir að finna á Jökuldalsheiði og í gróðurlendi Brúaröræfa.

Ljóst er að rústir á Íslandi láta nú undan síga vegna hlýnandi loftslags og t.d. hefur meðaltalsflatarmál Orravatnsrústa minnkað umtalsvert á örfáum árum (Þorsteinn Sæmundsson o.fl. 2012). Rústasvæði á heiðum á Norðurlandi, svo sem á Auðkúluheiði, hafa mörg hver horfið á undanföllum áratugum. Sama má segja um rústasvæði sem voru á



**Mynd 16.32.** Þjórsárver. Hér er greiður aðgangur að grunnvatni og rústir ýmist rísa eða hníga og skilja þá eftir sig vötn. Svæðið er mjög dýnamískt en afar viðkvæmt fyrir raski, t.d. breytingum á vatnafari svæðisins. Mynd: Þóra Ellen Þórhallsdóttir.

Flijótsdalsheiði og Vesturöræfum við núverandi Háslón.

Rústamýravist í vistgerðaflokkun Náttúrufræðistofnunar er talin hafa mjög hátt verndargildi og er á lista Bernarsamningsins frá 2014 yfir vistgerðir sem þarfnast verndar (Jón Gunnar Ottósson o.fl. 2016). Rústasvæðin í Guðlaugs- og Álfgeirstungum norðvestan Hofsjökuls eru nú friðlýst. Mikilvægt er að freðmýrarústir landsins njóti verndar eins og framast er kostur vegna mikilvægis þeirra með hliðsjón af vistfræði og sem sérstæðra landslagsfyrirbrigða.

„Pingo“ eru eins konar ísfell sem eru meðal mikilfenglegustu fyrirbrigða norðurhjarans – rústir með ískjarna sem geta náð allt að 70 m hæð og eru 500 m í þvermál þegar best lætur. Þær geta orðið árpúsunda gamlar (sjá Jones o.fl. 2010). Ísfell finnast í Síberíu, Kanada, á Grænlandi og í Alaska þar sem yfrið nóg er af grunnvatni en loftslag mjög kalt, ekki síst í óshólmum vatnsfalla eins og Mackenzie-fljóts þar sem nú er þjóðgarður helgaður umhverfi kulferla og menningu slíkra svæða (mynd 16.33).



## Hrossum beitt á Orravatnsrústir

Rústasvæðin eru mikilvæg vistkerfi sem eru einstaklega viðkvæm fyrir raski. Í lok síðustu aldar tókum við, þáverandi starfsfólk Rannsóknastofnunar landbúnaðarins, eftir því að fjöldi hrossa var á sumarreit í Orravatnsrústum. Bóndi neðan úr byggð hafði sumsé ákveðið að beita tugum hrossa á rústasvæðið vegna landleysis heima fyrir. Ekki þarf að fjölyrða um að slík landnýting getur haft afar afdrifaríkar afleiðingar fyrir stöðugleika rústanna. Efni bréfa til fjallskilaneftndar og sveitarfélagsins voru nokkuð harðorð í kjölfarið, enda ljóst að bregðast þurfti við fljótt og fjarlægja hrossin áður en illa færi. Heimamenn tóku vel við sér og það tókst að koma í veg fyrir stórtjón á Orravatnsrústum.

Uppákomur sem þessar verða fyrst og fremst vegna þekkingarleysis – svæðið ætti að merkja sérstaklega til að fræða jafnt ferðamenn sem aðra um mikilvægi þessara einstæðu náttúrufyrirbrigða. Einnig koma hér undarleg lög um lausagöngu búfjár og fjallskil við sögu – en um þann þátt er rætt síðar í þessu riti.

Önnur ógn sem steðjar að svæðinu felst í virkjanahugmyndum og mögulegri myndun lóns nálægt rústasvæðinu með stíflun Austari-Jökulsár, en rústasvæðin eru afar viðkvæm fyrir breytingum á grunnvatnsrennsli sem fóðrar ísmyndun þeirra. Svipuð ógn steðjar að Þjósárverum vegna virkjanahugmynda og áætlana um myndun uppistöðulóns á svæðinu. Vonandi er búið að blása þessar hugmyndir af.

## 16.10. Melatíglar

Tíglar og hringlaga mynstur (e. patterned ground) eru afar algeng fyrirbrigði sem verða til í moldaryfirborði á heimskautasvæðum og í jarði þeirra. Walker o.fl. (2008) birtu ágætt yfirlit yfir þessi mynstur og útskýrðu hvernig sprungumyndun (e. cracking), frostlyfting (e. differential heaving) og þróun gróðurs spila saman og mynda mismunandi mynstur í yfirborðið. Fyrirbrigðin eru áberandi á grónum svæðum norðurhjarans sem og á ógrónu landi.

Mynstrin eru einkum í melum hérlendis og nefnast þá melatíglar (e. sorted patterned ground). Melatíglar myndast smám saman fyrir ólík áhrif frosts á fín- og grófefni jarðvegsins. Nokkur líkön hafa verið lögð fram sem lýsa myndun

þeirra (sjá Feuillet o.fl. 2014) og líklega eiga flest þeirra að einhverju leyti við hérlendis eftir aðstæðum. Þorsteinn Guðmundsson (2018) útlistaði mólél Van Vliet-Lanoë (1991) en nú er oftast vitnað til líkans sem Kessler o.fl. settu fram 2001 og gerir ráð fyrir að grjót ýtist til hliðanna en fína efnið safnist fyrir í miðjunni (einnig Kessler o.fl. 2003). Líkan þeirra gerir ráð fyrir að rendur myndist í halla, sem er einmitt víða áberandi hérlendis. Mikið af heimildum er til um melatígla og má m.a. benda á yfirlitsgreinar Walkers o.fl. (2008) og Harris o.fl. (2009). Sigurður Þórarinsson ritaði talsvert um melatígla, svo sem grein í *Jökli* árið 1981 (sjá einnig Friedman o.fl. 1971).

Eftir að land kemur undan jökli eða jarðvegsrof hefur eytt moldarlaginu ofan á jökulurð tekur grófara efnið, mól og grjót, að ýtast út til hliðanna,



**Mynd 16.33.** Rústir í flá á Jökuldalsheiði. Sífrerarústir hafa minnkað og jafnvel horfið á þessu svæði vegna hlýnunar loftslags.

en fínefnin safnast fyrir í miðjunni. Fínefnin halda meiri raka í sér en grófu efnin svo að ferlið vindur upp á sig, æ meira vatn safnast fyrir í miðju kerfinu en í grófara efninu til hliðanna. Þar sem siltefnin í miðjunni eru mjög frostnæm (e. frost susceptible) bólgnar miðjan út í frosti og verður að hálfgerðu kviksyndi þegar hún þiðnar en jörð er frosin undir, eins og þeir þekkja sem halda á fjöll of snemma á vorin. Þetta miðjusvæði hefur stundum verið nefnt „frost boils“ eða „mud boils“ á ensku („frostpottar“, „frost-suðupottar“ eða „frostkýli“) – mjög óstöðugir drullupottar – það er eins og að frostið komi af stað iðuhreyfingum sambærilegum þeim sem eiga sér stað við suðu í potti.

Melatíglar eru misjafnir að gerð, litlir sem stórir með margvíslega lögun, t.d. sexhyrndir eða hringlaga. Svo virðist sem þeir verði ekki eins áberandi í sendnu yfirborði auðna samanborið við mela, en þeir finnast þó t.d. á Sprengisandi. Ástæðan fyrir þessu er líklega fyrst og fremst sú að sandyfirborðið er óstöðugt og vindrof hefur áhrif á myndun tíglanna, auk þess sem sandur er ekki eins „frostnæmur“ og silt í melunum vegna ólíkrar kornastærðar (myndir 16.35 og 16.36).

Frostlyfting hefur mikilvæg áhrif á yfirborð sendinna auðna því á vetrum

þrýstast hnellingar sem liggja í yfirborðinu upp á við. Mörg auðnasvæði verða fyrir umtalsverðu áfoki á hverju sumri og ef ekki kæmi til frostlyfting myndi hið grýtta yfirborð smám saman grafast í áfokið. En það er öðru nær, grjótið þrýstist smám saman upp á hverjum vetri en fyrir neðan getur myndast sendið jarðvegslag. Bændur á akuryrkjusvæðum sem búa við grýtta mold reyna gjarna að tína burt grjótið, en oft er það heldur vonlaus starfi þar sem aðstæður haga því svo að frostlyfting bætir í sífellu við grjótið á yfirborðinu.



**Mynd 16.34.** Pingo. Risavaxnar rústir á norðurhjaranum. Þessar eru í óshólmum Mackenzie-fljótsins í Kanada. Myndin er fengin af Wikipedia.



## 16.11. Sífreri, frostveðrun og urðarjökjar

Svæði með **sífrera** þar sem frost fer aldrei úr jörðu eru talin útbreidd ofan 800–900 m hæðar, ekki síst þegar norðar dregur á landinu (Etzelmüller o.fl. 2020). Í raun er ekki mikið vitað um útbreiðslu sífrera á Íslandi út frá beinum mælingum en segja má að helstu rústasvæðin séu þekkt. Boranir í auðnum á hálendinu hafa sýnt fram á sífrera í jörðu (sjá t.d. Farbrot o.fl. 2007). Líkanagerð hefur verið notuð til að meta útbreiðslu sífrera héraendis (Harris o.fl. 2009) og einnig hvernig hann hefur þróast í tímans rás (Etzelmüller o.fl. 2020). Sífreri á Íslandi sem annars staðar er viðkvæmur fyrir loftslagsbreytingum.



**Mynd 16.35.** Fyrir ofan: melatíglar í þróun á yfirborði sem hefur nýlega misst moldarhuluna. Mynd tekin að morgni á sólardegi, yfirborðið er tekið að þorna. Innvolsið er úr fínna efni sem heldur í rakann en jaðarinn hefur þornað upp. Ekki er orðin fullkomin aðgreining, en tíglarnir eiga eftir að stækka. Mynd: Sigmar Metúsalemsson. Fyrir neðan: nærmynd sem sýnir vel aðgreiningu, jaðarinn með grófefni en „frostsuðupottur“ í miðjunni með fínni jarðvegsefnum. Svart linsulok fyrir miðri mynd er til viðmiðunar.

Gríðarlegt magn kolefnis er í jörðu sífrerasvæða og undanfarin ár hefur komið í ljós að það er oft vanmetið í útreikningum á kolefnisforða jarðvegs í heiminum. Talið er að jarðvegur norðurslóða geymi um 1672 Pg kolefnis (Tarnocai o.fl. 2009), sem er um þrisvar sinnum meira en allt kolefni í andrúmsloftinu. Mikið af þessu kolefni er á sífrerasvæðum Kanada, Síberíu og Alaska. Við hlýnun jarðar getur hin frosna jörð tekið að bráðna og þá losnar um hluta kolefnisins, sem aftur getur haft mikil áhrif á styrk 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). Margt bendir til þess að slík þróun sé hafin nú þegar.

Þegar vatn kemst í sprungur og holrými bergs og frýs þar myndast gríðarlegur þrýstingur sem losar um bergið og mylur það niður. Þannig geta myndast bergefni sem leggjast til jarðvegs. **Frostveðrun** leggur til mikið af lausum efnum, einkum sandkornum, þar sem

réttar aðstæður eru fyrir hendi og er því meðal mikilvægra kulferla á Íslandi. Það á ekki síst við í fjalllendi eða þar sem mikið af berum klöppum standa upp úr annars grónum sverði, eins og víða á Vesturlandi.

Frostveðrun hefur m.a. áhrif á berghleðslur og vegg, svo sem grjótið í Alþingishúsinu við Austurvöll. Frostveðrun leggur til laus efni, einkum sandefni, fyrir jarðvegsmyndun þar sem þannig hagar til. Jöklar sjá hins vegar náttúru landsins fyrir megninu af siltefnunum sem fjúka og mynda áfoksteppið yfir landinu, eins og áður hefur komið fram.

**Urðarjöklar** (e. rock glaciers) eru mikilfengleg náttúru fyrirbrigði þar sem stórar spildur úr ís og grjóti síga hægt

niður halla. Hraði sigsins er frá nokkrum millimetrum til nokkurra metra á ári eftir aðstæðum. Þeir eru algengir í fjalllendi um allan heim. Það er nokkuð víst að fjöldi slíkra fyrirbrigða eru virk í fjöllum Íslands, t.d. á Tröllaskaga, og enn fleiri urðarjökla voru virkir í lok ísaldar (Ágúst Guðmundsson, 1995, 2005).

Þá eru tilgátur uppi um að mörg þeirra fyrirbrigða sem áður voru talin framhlaup á Íslandi séu í raun merki um urðarjökla. Þeir hafa þá verið virkir á síðjökultíma og við upphaf nútíma þegar loftslag var kaldara en nú er, en um þetta eru deildar meiningar í jarðfræði og í raun erfitt að skera úr um það í mörgum tilfellum. Það fer vel á því að ljúka þessum kafla með mynd af Stóruð við Dyrfjöll, sem er (líklega) einkar tilkomumikill urðarjökull (mynd 16.37)



Mynd 16.36. Melatígla nálægt Nýjadal á Sprengisandi. Munstrið er hér ansi „gróft“ en gróður nær fótfestu í sprungunum.



**Mynd 16.37.** Stóruð við Dyrfjöll er mögulega gamall urðarjökull, þar sem ís og bergurðin mjökuðust smám saman niður hlíðina fyrir löngu þegar loftslag var mun kaldara en nú er.

# Heimildir

Gefin eru út sérstök tímarit helguð kulferlum og frosti í náttúrunni á borð við Permafrost and Periglacial Processes og Frozen Ground á vegum „International Permafrost Association“, en tímaritið Arctic, Antarctic and Alpine Research stendur á gömlum merg og hefur birt margar lykilmargir um framfarir á þessu sviði.

Þá eru einnig til bækur tileinkaðar frosti og áhrifum þess á jarðveg og landslag. Þar má sérstaklega nefna bókina Advances in Periglacial Geomorphology (Clark, 1988), en hún rekur skilmerkilega helstu ferli landmótunar sem tengjast frosti. Í formála stendur: „The project was born in a wooden hut on the Central Plateau of Iceland in the late summer of 1982.“ Er þar átt við Kerlingarfjöll þar sem safnaðist saman afar sterkur hópur vísindamanna þess tíma á sviði kulferla. Ekki er vitað til að Íslendingar hafi komið að þeim fundi. Geta má bókar Bockheim frá 2015, Cryopedology, sem þó er nokkuð gömul í grunninn (endurbætt útgáfa 2015).

Einnig er rétt að benda á góðan kafla um kulferli og norðurslóðir í kennslubók í landmótunarfræði eftir Ritter o.fl. (1996), Process Geomorphology. ÓA gaf út ritið Kulferli, frost og mold árið 2010 sem hér er stuðst við sem og sambærilegan kafla í The Soils of Iceland (2015). Það efni hefur einnig skilað sér í efni annarra höfundar héraðs sem hafa ritað um þetta efni náttúrufræða – sem er auðvitað tilgangurinn.

Ágúst Guðmundsson 1995. Berghlaup eða urðarjökla. Náttúrufræðingurinn 64:177–186.

Ágúst Guðmundsson 2005. Dreifing þykkra urðarbingja í fjalllendi á Íslandi. Vorráðstefna Jarðfræðafélags Íslands, ágrip erinda og veggspjalda. Bls. 10–11.

Berglind Orradóttir 2002. The influence of vegetation on frost dynamics, infiltration rate and surface stability in Icelandic rangelands. MSc-ritgerð, Texas A&M University, College Station, Texas, USA.

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

Þjórn Jóhannesson 1960. The Soils of Iceland. Atvinnudeild Háskóla Íslands, Rit Atvinnudeildar B – No. 13, Reykjavík.

Bockheim, J.G. 2015. Cryopedology. Springer, Dordrecht, Holland.

Booth, D.T., S.E. Cox og J.C. Likens 2014. Fenceline contrasts: Grazing increases surface wetland roughness. Wetlands Ecological Management DOI 10.1007/s 11273-014-9368-0.

Borgþór Magnússon, Sigurður H. Magnússon og Sigmar Metúsalemsson 2020. Rimamyrar. Einkenni, útbreiðsla og verndun. Fyrirlestur, Náttúrufræðistofnun Íslands, 4. nóvember 2020. <https://www.ni.is/frettir/2020/10/hrafnaþing-rimamyrar-a-islendi-utbreiddsla-og-einkenni>.

CAFF (Conservation of Arctic Flora and Fauna) 2001. Arctic Flora and Fauna: Status and Conservation. Edita, Helsinki, Finland.

Clark, M.J. (ritstj.) 1988. Advances in Periglacial Geomorphology. John Wiley, New York, USA.

Etzel Müller, B., H. Patton, A. Schomacker, J. Czekirka, L. Girod, A. Hubbard, K.S. Lilleøren og S. Westermann 2020. Icelandic permafrost dynamics since the Last Glacial Maximum – model results and geomorphological implications. Quaternary Science Reviews 233:106236.

Farbrot, H., B. Etzel Müller, T.V. Schuler, Ágúst Guðmundsson, T. Eiken, O. Humlum og Helgi Björnsson 2007. Thermal characteristics and impact of climate change on mountain permafrost in Iceland. Journal of Geophysical Research – Earth Surface 112:F03S90, doi:10.1029/2006JF000541.

Feuillet, T., G. Certini og F.C. Ugolini 2014. Sorted patterned ground. Encyclopedia of Planetary Landforms. DOI 10.1007/978-1-4614-9213-9\_536-1

Friedman, J.D., C.E. Johansson, Níels Óskarsson, H. Svensson, Sigurður Þórarinnsson og R.S. Williams Jr. 1971. Observations on Icelandic polygon surfaces and palsa areas. Photo interpretation and field studies. Geografiska Annaler 53A:115–145.

Gerrard, J. 1992. The nature and geomorphological relationships of earth hummocks (thufa) in Iceland. Zeitschrift für Geomorphologie 86:173–182.

Grab, S. 1994. Thufur in the Mohlesi Valley, Lesotho, Southern Africa. Permafrost and Periglacial Processes 5:111–118.

Grab, S. 2005. Aspects of the geomorphology, genesis and environmental significance of earth hummocks (thufur, pounus): miniature cryogenic mounds. Progress in Physical Geography 29:139–155.

Harris, C., L.U. Anderson og 22 fleiri höfundar 2009. Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modelling thermal geomorphological and geotechnical responses. Earth-Science Reviews 92:117–171.

Helgi Hallgrímsson 2016. Stallabrekkur (paldrar) – einkum í Vestur-Skaftafellssýslu. Náttúrufræðingurinn 86:144–148.

Helgi Torfason 1984. Jarðsil í Pétursey. Náttúrufræðingurinn 53:160.

Hreinn Óskarsson og Sigríður Júlía Brynleifsdóttir 2009. The interaction of fertilization in nursery and field on survival, growth and the frost heaving of birch and spruce. Icelandic Agricultural Sciences 22:59–68.

Jones, A., V. Stolbovoy, C. Tarnocai, G. Broll, O. Spaargaren og L. Montanarella (ritstj.) 2010. Soil Atlas of the Northern Circumpolar Region. European Commission, Publications Office of the EU, Luxemburg.

Jón Gunnar Ottósson, Anna Sveinsdóttir og María Harðardóttir 2016. Vistgerðir á Íslandi. Fjölrit Náttúrufræðistofnunar nr. 54, Garðabær.

Kessler, M.A. og B.T. Werner 2003. Self-organization of sorted patterned ground. Science 299:380–383.

Kessler, M.A., A.B. Murray, B.T. Werner og B. Hallet 2001. A model for sorted circles as self-organized patterns. Journal of Geophysical Research 106:B7:13287–13306.

Kim, T. 2008. Thufur and turf exfoliation in a subalpine grassland on Mt Halla, Jeju Island, Korea. Mountain Research and Development 28:272–278.

Kneisel, C., Þorsteinn Sæmundsson og A. Beylich 2007. Reconnaissance surveys of contemporary permafrost environments in central Iceland using geoelectrical methods: implications for permafrost degradation and sediment fluxes. Geografiska Annaler 89:41–50.

Koutaniemi, L. 1999. Twenty-one years of string movements on the Liipassou aapa mire, Finland. Boreas 28:521–530.

Kuhry, P., C-L. Ping, E.A.G. Schuur, C. Tarnocai og S. Zimov 2009. Report from the International Permafrost Association: carbon pools in permafrost regions. Permafrost and Periglacial Processes. 20:229–234.

- Lawler, D.M. 1988. Environmental limits of needle ice: a global survey. *Arctic and Alpine Research* 20:137–259.
- Luoto, M., R.K. Heikkinen og T.R. Carter 2004. Loss of palsa mires in Europe and biological consequences. *Environmental Conservation* 31:30–37.
- Madsen, K.S. 2013. Needle ice in Icelandic Andosols: A field experiment in Hvanneyri, Iceland. Bachelor's Project. Landbúnaðarháskóli Íslands og Faculty of Science, University of Copenhagen, Danmörk.
- Matsuoka, N. 2001. Solifluction rates, processes and landforms: a global review. *Earth-Science Reviews* 55: 07–134.
- Ólafur Arnalds 2010. Kulferli, frost og mold. Rit Lbhí nr. 26. Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.
- Ólafur Arnalds 2015. The Soils of Iceland. World Soils Book Series. Springer, Dordrecht, Holland.
- Ólafur Arnalds og Fanney Ósk Gísladóttir 2009. Mælingar á vindrofi á Hólsfjöllum. Rit Lbhí nr. 25. Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.
- Ólafur Arnalds og Matthildur Sigurjónsdóttir 2012. Þúfurnar á Mosfellsheiði. Rit Lbhí nr. 39. Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.
- Pissart, A. 2002. Palsas, lithalsas and remnants of these periglacial mounds. A progress report. *Progress in Physical Geography* 26:605–621.
- Ritter, D.F., R.C. Kochel og J.R. Miller 1996. *Process Geomorphology*. 3. útg. WCB Publishers, Boston, USA.
- Schunke, E. 1977. Zur Genese der Thufur Islands und Ost-Grönlands. *Erdkunde* 31:297–287.
- Schunke, E. og S.C. Zoltai 1988. Earth hummocks (thufur). Í: M.J. Clark (ritstj.), *Advances in Periglacial Geomorphology*. John Wiley, New York, USA. Bls. 231–245.
- Seppala, M. 1988. Palsas and related forms. Í: M.J. Clark (ritstj.), *Advances in Periglacial Geomorphology*. John Wiley, New York, USA. Bls. 247–297.
- Sigurður Þórarinnsson 1981. Sitthvað úr Suðurlandsferðum. *Jökull* 31:65–8.
- Tarnocai, C., J.G. Canadell, E.A.G. Schuur, P. Kuhry, G. Mazhitova og S. Zimov 2009. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochemical Cycles* 23:GB2023, doi:10.1029/2008GB003327.
- Van Vliet-Lanoë, B. 1991. Differential frost heave, load casting and convection: Converging mechanisms; a discussion of the origin of cryoturbations. *Permafrost and Periglacial Processes* 2:123–139.
- Van Vliet-Lanoë, B., O. Bourgeois og O. Dauteuil 1998. Thufur formation in Northern Iceland and its relation to Holocene climate change. *Permafrost and Periglacial Processes* 9:347–365.
- Walker, D.A., H.E. Epstein, V.E. Romanovsky, C-L. Ping, G.J. Michaleson og 16 aðrir höfundar 2008. Arctic patterned-ground ecosystems: a synthesis of field studies and models along a North American Arctic transect. *Journal of Geophysical Research – Biogeosciences* 113:GS3S01, doi:10.1028/2007JG000504.
- Washburn, A.L. 1980. *Geocryology*. John Wiley, New York, USA.
- Yumoto, M., T. Ogata, N. Matsuoka og E. Matsumoto 2006. Riverbank freeze-thaw erosion along a small mountain stream, Nikko volcanic area, Central Japan. *Permafrost and Periglacial Processes* 17:325–339.
- Zaqout, T., Hrunn Ólöf Andradóttir og Ólafur Arnalds 2022. Infiltration capacity in urban areas undergoing frequent snow and freeze-thaw cycles: Implications on sustainable urban drainage systems. *Journal of Hydrology* 607:127495.
- Þorsteinn Guðmundsson 2018. *Jarðvegsfræði*. Myndun, vist og nýting. Háskólaútgáfan, Reykjavík.
- Þorsteinn Sæmundsson, Ólafur Arnalds, C. Kneisel, Helgi Páll Jónsson og A. Decaulne 2012. The Orravatnsrustir palsa site in Central Iceland – Palsas in an aeolian sedimentation environment. *Geomorphology* 167-168:13–20.
- Þóra Ellen Þórhallsdóttir 1994. Effects of changes in groundwater level on palsas in Central Iceland. *Geografiska Annaler Series A – Physical Geography* 76:161–167.
- Þóra Ellen Þórhallsdóttir 1996. Seasonal and annual dynamics of frozen ground in the central highland of Iceland. *Arctic and Alpine Research* 28:237–243.

