

Þúfurnar á Mosfellsheiði

Ólafur Arnalds og Matthildur Sigurjónsdóttir†



Þúfurnar á Mosfellsheiði

Ólafur Arnalds og Matthildur Sigurjónsdóttir[†]

Janúar 2012
Landbúnaðarháskóli Íslands, umhverfiseild

Formáli

Árin 2007 – 2008 vann Matthildur Sigurjónsdóttir að BS verkefni við Landbúnaðarháskóla Íslands sem fjallaði um þúfur á Mosfellsheiði. Matthildur veiktist meðan á verkefninu stóð og andaðist í mars 2011, langt um aldur fram. Henni entist því ekki aldur til að skrifa ritgerðina um þúfurnar á Mosfellsheiði. Gögnin sem hún hafði aflað eru um margt afar athyglisverð og það er full ástæða til þess að gera þau aðgengileg. Útgáfa þessa rits er ætlað að heiðra minningu Matthildar, en um leið að gera niðurstöður úr verkefni hennar aðgengilegar.

Ritið fylgir ekki formati BS ritgerða og er ekki eins ýtarlegt og ef BS nemi hefði legið yfir sérhverju smáatriði við úrvinnslu og öflun heimilda við samningu ritgerðarinnar. Það er stiklað á meginatriðum, m.a. yfirborðsmælingunum, sem eru um margt einstakar. Að auki hafði Matthildur lýst gróðurfari á línunum en ekki er unnið úr þeim niðurtöðum hér.

Ritið er skrifað í nafni okkar beggja, en sumt af því efni sem hér birtist hefur þegar verið felld inn í kennsluefni Ólafs Arnalds við LbhÍ um kulferli.

Janúar 2012

Ólafur Arnalds

Inngangur

Fátt mótar yfirborð landsins meira en samspil frosts og þýðu, sem stuðlar að margs kyns náttúrulegum ferlum sem hafa áhrif á yfirborðið. Þessi ferli hafa verið nefnd *kulferli* á íslensku (Ólafur Arnalds, 2010). Kulferli móta margvísleg munstur í yfirborð landsins; yfirborðsgerðir á borð við þúfur, melatígla, rústir og jarðsilspaldra. Áhrif holklaka í jarðvegi er sérstök fræðigrein sem er m.a. er kölluð „Cryology“, „Periglacial morphology“ og „Cryopedology“ á ensku. Fræðin taka til svæða þar sem sífreri er í jörðu en einnig svæða þar sem árstíðabundið frost mótar yfirborðið og hefur áhrif á vistfræði, vatnafar og aðra náttúrulega og verkfræðilega þætti. Tímarit sem helguð eru kulferlum eru m.a. „Permafrost and Periglacial Processes“ og „Frozen Ground“, sem gefið er út á vegum alþjóðlegra samtaka um vísindi á þessu sviði: International Permafrost Association (IPA).

Ólafur Arnalds gaf út sérstakt rit um kulferli árið 2010, sem ætlað er til almennrar fræðslu og kennslu á þessu svið, en ritið nefnist *Kulferli, frost og mold* og er Rit Lbhlí nr. 26. Það er aðgengilegt á greinasafni Landbúnaðarháskóla Íslands á netinu (www.lbhi.is – greinasafn).

Þúfur eru meðal ráðandi yfirborðsgerða á landinu. Hugtakið „þúfur“, þ.e. fleirtölu-myndin, er smám saman að verða alþjóðlegt hugtak með vaxandi notkun í vísindaritum (sjá t.d. Grab, 2005; Kim, 2008). Eftir sem áður hefur ekki mikið verið ritað um þúfur á Íslandi, eins og síðar verður vikið að.

Ein meginkenning fyrir myndun þúfna varðar dælingu á vatni frá grunnvatnsborði eða vatnsósa jarðvegi að frostbylgju (neðri mörk klakans í jarðvegi) og því verða þúfur hæstar þar sem hæfilega langt er niður á grunnvatn. Björn Jóhannesson setti þessa kenningu fram 1960 fyrir íslenskar aðstæður en hún var skýrð frekar af Ólafi Arnalds (2010). Matthildur Sigurjónsdóttir fékk mikinn áhuga á þúfum í námi sínu og ákvað að taka þær fyrir í BS verkefni sínu. Hún rannsakaði þúfur og mældi upp snið á nokkrum aðgengilegum stöðum á Mosfellsheiði. Megin rannsóknasurning verkefnisins var að sjá hvernig gerð þúfna breyttist eftir því sem fjær dregur grunnvatnsborði. Þetta rit skýrir frá helstu niðurstöðum.

Almennt um þúfur

Hugtakið

Þúfur mætti skilgreina sem lágar hringlaga þústir í grónu landi. Þær eru yfirleitt kallaðar „earth hummocks“ á ensku, en íslenska hugtakið þúfur (thufur) er æ meira notað um þessi fyrirbrigði (sjá yfirlitsgrein eftir Grab, 2005). Í Fennóskandinavíu er hugtakið „pounus“ notað um þúfur. Athyglisvert er að Grab (2005) telur að þúfum hafi fyrst verið lýst vísindalega af Helga Jónssyni í greinum sem birtust í tímaritinu Frey

árið 1909. Skilningur á myndun þúfna hefur aukist til muna frá því að Helgi skrifaði sínar greinar, en hjá honum kemur frost fremur lítið við sögu. Einnig lýsir Þjóðverjinn Gruner (1912) þúfum ásamt því að birta jarðvegskort, sem byggði að stærstum hluta á kortlagningu danska herforingjaráðsins á landinu. Þorvaldur Thoroddsen skrifar einnig um þúfur í ritum sínum (1913). Hugtakið „earth hummocks“ er mun yngra eða frá 1942, en einnig hafa mörg önnur hugtök verið notuð, sérstaklega í tengslum við hugtakið „hummock“ og þá sem sérstakt afbrigði af „hummock“, eða „tussock“ t.d. „earth-cored turf hummocks“ og „tussock rings“ (Grab, 2005). Schunke og Zoltai (1988) lögðu raunar til að „earth hummocks“ tamörkuðust við sífrerasvæði, en þúfurnar væru þar sem frost væri í jörðu hluta ársins (seasonal frost). Samt sem áður er ljóst að nafngiftir á þúfum eru nokkuð þokukennar í vísindaritum, sem og hvernig beri að skilgreina þúfur. Ástæða þess er m.a. að mjög margir þættir stuðla að myndum þúfna og myndunin er jafnframt afleiðing mismunandi ferla eftir aðstæðum. Grab (2005) skilgreindi þúfur (earth hummocks) með eftirfarandi hætti:

“ miniature cryogenic mounds constitute features that are generally less than 1.5 m height, usually occur in large groups or fields, are capable of forming in seasonally frozen ground (yet this does not exclude permafrost environments) and owe their origin to ground freeze/thaw and/or niveo-aeolian processes. “

Hér er vísað til þess að skaflarof (niveation) og vindrof (aeolian process) geta einnig myndað þúfur. Athyglisvert er í þessu samhengi að dæmigerðar þúfur geta einnig myndast þar sem ekkert þessara ferla er ráðandi, t.d. á Azoreyjum þar sem er hvorki vindrof/áfok né frost, en þar myndar samspil beitardýra og jarðvegsgerðar (Hydric Andosol, þ.e. *eldfjallajörð* sem heldur gífurlega miklu vatni, vatnsósa) (sjá mynd í riti Ólafs Arnalds, 2010).

Myndun þúfna

Margar skýringar hafa verið gefnar á myndun þúfna og líklegt er að afar margvíslegir þætti spili saman, en með misjöfnum hætti eftir aðstæðum. Í þessari ritgerð hefur verið gengið út frá svokölluðu „differential frost heave“ módeli þar sem sífreri er ekki í jörðu, eins og það er í skýrt í riti Ólafs Arnalds (2010), en margt bendir til að það eigi við víðast hvar (Grab, 2005). Vatn berst upp að frostbylgju vegna þrýstingsmunar þegar eins konar vatnsskortur verður við bylgjuna þegar vatnið frýs. Þess vegna er mikilvægt að hafa nægt vatn til staðar í moldinni neðar. Um leið og yfirborðsmynstur er til staðar verður til mismunur sem eykst með tímanum; þúfan er berskjaldaðri fyrir kuldanum en yfirborðið í lægðunum á milli, sem veldur aukinni þúfnamyndun (sjá hér neðar um þúfur á Íslandi). Þúfur myndast bæði á þurrum og rökum svæðum á pólsvæðunum, en myndun þeirra er eigi að síður háð nægum jarðvegsraka (úrkoma eða grunnvatn). Efri eða norðurmörk þúfnanna á norðurhveli virðast fylgja gróðurmörkum (Schunke, 1977). Schunke og Zoltai (1988) nefndu að aukin snjóalög, sem m.a. fylgja

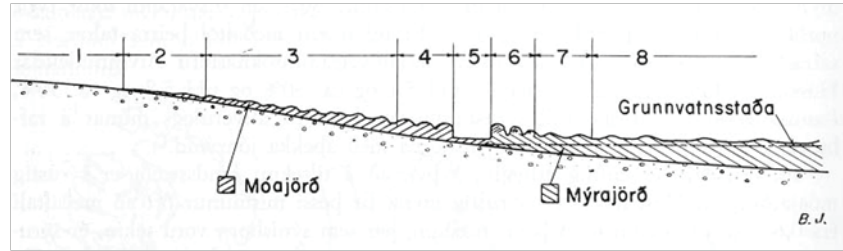
aukinni hæð í landslagi, dragi úr þúfnamyndun. Þetta er vert að hafa í huga varðandi íslenskar aðstæður, þar sem sums staðar, svo sem í Kelduhverfi, eru þúfur minni inni í kjarrlendi, sem safnar snjó, en í mólendinu umhverfis. Þá virðast þúfur sums staðar ekki hafa tekið að myndast fyrr en eftir landnám og jafnvel eftir 14-15 öld, hugsanlega með minnkandi skóglendi og kólnandi veðurfari (sjá van Vliet-Lanoe o.fl., 1998). Þúfur virðast einkum myndast þar sem meðalhiti ársins er lægri en 3-6°C eftir aðstæðum, en sums staðar geta þúfur hafa myndast á kaldari árstíð en nú er, jafnvel fyrir þúsundum ára (sjá Grab, 2005). Þessi meðalhiti er á við víða á láglandi en er þó víðast hvar mun lægri á hálendi á Íslandi. Ýmsir höfundar, t.d Tarnocai og Zoltai (1978) gefa þó upp mun lægri hitatölur fyrir þúfnasvæði (hummocks), m.a. á sífrerasvæðum í Kanada.

Líklega er þáttur traðks beitardýra vanmetinn í alþjóðlegum vísindaskrifum, en á Íslandi er sá þáttur afar mikilvægur (sjá Ólaf Arnalds, 1994). Enda geta þúfur myndast þar sem ekki frýs, og þá fyrir tilstuðlan búpenings, séu aðrar aðstæður til staðar (Hydric Andosols – *eldfjallajörð* á Azoreyjum). Þó er rétt að nefna að ýmsir, m.a. Eldridge o.fl. (2011) benda á að ólífrænis þættir á borð við þúfur og rofdílar séu betri vísar (indicator) um langvarandi ofbeit en ýmsir lífærnir þættir á borð við gróðurfar. Einkenni þúfna er einmitt einn af þeim þáttum sem er notaður við mat á ástandi í hrossahögum á Íslandi (Borgþór Magnússon o.fl., 1997). Beitin mótar einnig gróðurfarið og þar með snjósöfnun. Þessir þættir hafa m.a. áhrif á hvernig holklaki myndast. Þannig kemst vatn yfirleitt mun greiðar ofan í moldina þar sem gróðurfar er öflugt þegar hlánar, t.d. í birkiskógum (sjá Berglindi Orradóttur o.fl., 2008).

Þúfur á Íslandi

Þúfur eru sannarlega meðal algengustu landforma á Íslandi. Þær finnast nær alls staðar þar sem gróður hylur yfirborð landsins. Í hlíðum breytist hins vegar landformið og verður að munstrum sem jarðsil myndar (solifluction). Þetta eru svonefndir paldrar (stallar) og jarðsilstungur (solifluction lobes), sem verða til þar sem þyngdarkrafturinn bætist við sem einn þeirra þátta sem hafa áhrif á kulferlin.

Sem fyrr sagði skrifuðu íslenskir náttúruvísindamenn snemma um þúfur, t.d. Helgi Jónsson (1909) og Þorvaldur Thoroddsen (1913), sem og Sigurður Þórarinnsson (t.d. 1951). Björn Jóhannesson birti bók sína, *Íslenskur jarðvegur* árið 1960, þar sem sýn Björns um áhrif votlendis og grunnvatnsstöðu birtist á meðfylgjandi mynd úr bók Björns (mynd 1). Þar kemur fram að hæstar verða þúfurnar í jaðri votlenda, þar sem stutt er niður á grunnvatn. Þúfur eru ekki áberandi í votlendunum sjálfum. Aðstæður sem þessar eru t.d. mjög áberandi á heiðum norðvestanlands, t.d. á Auðkúluheiði, þar sem fyrsti höfundur þessa rits hefur unnið að rannsóknum, en þúfurnar ná þar auðveldlega > 1m hæð.



Mynd 1. Stærð þúfna í landslagi í bók Björns Jóhannessonar, 1960. Hæstu þúfurnar eru jaðri votlendisins (svæði 6 á myndinni). Þær eru lægri bæði út í votlendinu og í þurrlendinu uppi á hæðinni.

Einna viðamesta rannsóknin sem hefur farið fram á þúfum á Íslandi birtist í doktorsverkefni Þjóðverjans Ekkehard Schunke (1975): Die Periglazialerscheinungen Islands in Abhängigkeit von Klima und Substrat. Ritgerðinni fylgdi hann eftir með greinaskrifum (Schunke, 1977) og síðar m.a. á ensku (Schunke og Zoltai, 1988) í yfirlitsgrein um þúfur í þekktri yfirlitsbók um kulferli (Clark, 1988). Schunke skráði afar vandlega margvíslegar stærðir er varða þúfur, hæð o.s.frv. Gerrard (1992) lýsti þúfum á nokkrum stöðum á Íslandi og taldi að bæði mjög góð framræsla annars vegar og of mikil bleyta hamlaði þúfnamyndun.

Van Vliet-Lanoe og samstarfsfélagar (1998) notuðu m.a. smásjárrannsóknir (micromorphology) til að skoða myndun þúfna á Íslandi, m.a. á Norðausturlandi og þau sáu hve eiginleikar *eldfjallajarðar* eru mikilvægir fyrir þúfnamyndunina, m.a. þar sem langt er niður á grunnvatn. Þau veittu því athygli að þúfur tóku ekki að myndast fyrr en á miðöldum á rannsóknasvæðinu.

Í grein Ólafs Arnalds frá 1994 var lögð áhersla á áhrif beitardýra á myndun þúfna. Stórgripir stíga aðeins niður á milli þúfna sem ýtir efni upp á við í þúfunum, en samloðun er oft takmörkuð í *eldfjallajörð*. Tilvist þúfna á beitarsvæðum þar sem aldrei frýs á Azoreyjum er gott dæmi um mikilvægi stórgripa, með beinum eðlisáhrifum, en beitin hefur einnig mikilvæg áhrif á gróðurhuluna, snjóalög og þar með líka einangrun sem hefur áhrif á hegðan frostsins.

Ólafur Arnalds (2010) lagði áherslu á að myndun þúfna á Íslandi er engan veginn bundin nálægð við votlendi þó stórfenglegustu þúfurnar séu oft að finna í jaðargróðurlendum (við votlendi), t.d. á Norðvesturlandi. Bent hefur verið á að afar stórar þúfur er víða að finna á Norðausturlandi, þar sem geta verið tugir metra í grunnvatnsborðið. Í riti hans er lögð áherslu á frostnæmi jarðvegsins, skort á samloðun og jarðvegsgerðina, mikla vatnsheldni (oft >50% miðað við þurrvigt jarðvegs við visnunarmark, og þá jafnvel >100%_{p_v} við vatnsmettun). Í ritinu eru tilgreind eftirtalin atriði (orðrétt):

- *Moldin er eldfjallajörð með litla samloðun, sem gerir það að verkum að moldarfnin 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 umhleyplingum á vetrum.
- 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.

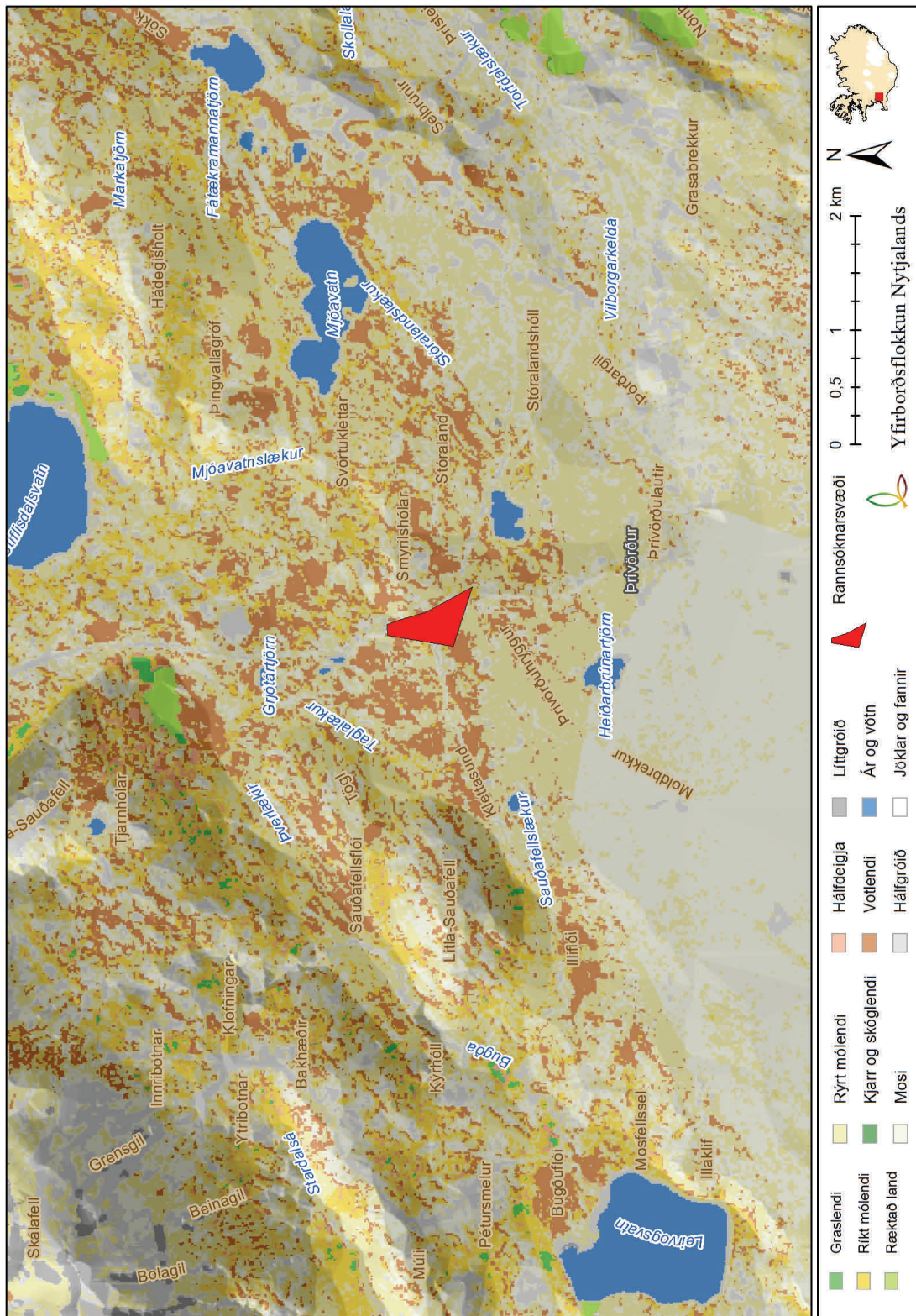
Aðferðir

Staðsetning og línur

Mælingar fóru fram í ágúst og september árið 2007 á Mosfellsheiði. Á Mosfellsheiði skiptast á votlendi og þurrlandismóar, oftast mosapembur eða lyngmóar hins vegar (sjá mynd 2). Þúfur eru áberandi í þurrlandismóunum en ekki í votlendinu. Valin voru þrjú svæði í jaðri votlenda. Tvær línur voru lagðar á hverju svæði frá votlendi 15-33 m upp slakka þar til komið var upp á hæðirnar ofan votlendanna. Sniðin voru öll í um 250 m hæð yfir sjávarmáli. Yfirlit um staðina er sýnt í töflu 1. Samtals voru mældir 136 metrar og 660 mælipunktar til að lýsa yfirborðinu.

Tafla 1. Mæli línur á Mosfellsheiði, lengd þeirra, halli línanna og fjöldi mælipunkta sem mældur var frá línunni sem strengd var og niður á yfirborðið.

Lína	Lengd línu (m)	Halli (°)	Fjöldi mælipunkta
1A	21,3	3	100
1B	33,6	3	161
2A	23,3	8	92
2B	16,7	7	91
2A	26,45	2	142
2B	15,2	5	74



Mynd 2. Kort af Mosfellsheiði. Svæðin eru nærri gatnmótum Þingvallarvegjar og Kjósaskarðsvegjar. Þarna eru votlendi áberandi (brún á kortinu) í lögðum á heiðinni. Kort: Nýjaland-LbhÍ. Sigmundur Brink útbjó kortið.

Á svæði 1 var aflíðandi brekka með litlum halla að blautri grasivaxinni mýri. Á svæði 2 er lítið vatn og mýri sem liggur að því. Upp af mýrinni liggur frekar brött lyngi vaxin brekka og í þá brekkur voru lögð út tvö snið. Svæði 3 var stór lægð með brekku á tvo vegu. Mýrin var þúfuskotin og línur voru lagðar framan við fremstu þúfur og svo upp sinn hvorn hallann.

Tíðarfar sumarmánaðanna 2007, þegar sniðin voru mæld, var almennt mjög hlýtt og þurrt var á svæðinu fram í miðjan ágúst. Olli það lækkun á grunnvatnsborði miðað við venjulegt árferði og því voru votlendin nokkuð þurr á meðan mælingum stóða. Í fréttum á vef Veðurstofunnar er sagt: „Óvenjuþurrt var um mikinn hluta landsins mestallan mánuðinn, jafnvel svo að gróðri hrakaði og vatnsból þornuðu.“ (Trausti Jónsson, 2008, pistill á vef Veðurstofunnar).

Mælingar - þúfnastærðir

Settir voru niður tveir staurar við sitt hvorn enda línunnar. Annar var settur ofan í votlendinu skammt frá jaðri þess, en hinn á hæð ofan votlendisins. Síðan var band strekkt vel með engum slaka á milli stauranna og þannig að það snerti hvergi yfirborðið. Halli línunnar var mældur með hallamáli í áttavita. Síðan var mæld lóðrétt hæð frá bandinu niður á yfirborð landsins með misjöfnu millibili sem fór eftir því hvort yfirborðið reis eða hneig, þannig að góð mynd fengist af ójöfnum í yfirborðinu. Hornafræði var notuð til að varpa yfirborðinu til samræmis við hækkunina í landinu. Þannig fengust x og y hnit hvers punkts miðað við upphafspunkt (0,0 hnit). Þá voru gröf af yfirborðinu teiknuð upp í SigmaPlot og helstu einkenni þeirra mæld, svo sem hæð þeirra.

Innviðir þúfna

Um miðbik hverrar línu var ein þúfa klofin og þrjú til fjögur jarðvegssýni tekin úr þúfu. Valin var þúfa sem var nokkuð vel afmörkuð á allar hliðar svo gott væri að ná sýnum úr sjáanlegri miðju þúfnanna. Í sumum tilfellum var öskulag í innviði þúfu og þá voru tekin fjögur sýni, það fjórða fyrir ofan öskulagið. Jarðvegssýnin voru sett í álbakka og þurrkuð við 60°C í þurrkofni í sólarhring. Síðan var jarðvegurinn sigtaður í gegnum röð sigta með minnkandi kornastærð í mm: 4,75; 2; 1; 0,5; 0,25; 0,125; 0,063 auk pönnu fyrir efni <0,063 mm. Notaður var sjálfvirkur hristari og súlan með sigtunum hrist í 5 mínútur. Gradistat forritið (útgáfa 5.0; Blott and Pye, 2001) var notað til að reikna meðalkornastærð og aðra setlagافرæðilega þætti og notaðir til þess Folk og Ward parametrar. Staðsetning sýnatöku í hverri þúfu er sýnd á mynd 3.



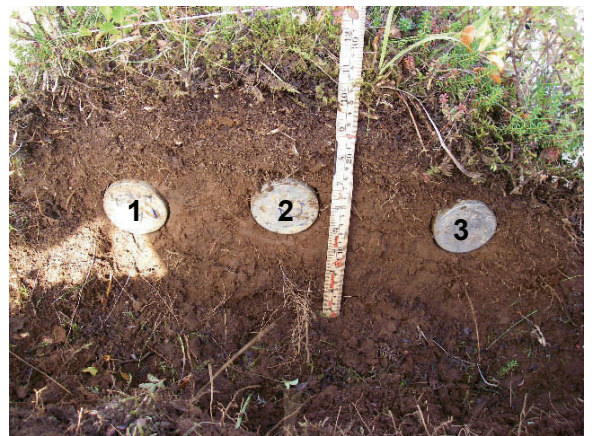
Svæði 1, lína A



Svæði 1, lína B



Svæði 2, lína A



Svæði 2, lína B



Svæði 3, lína A

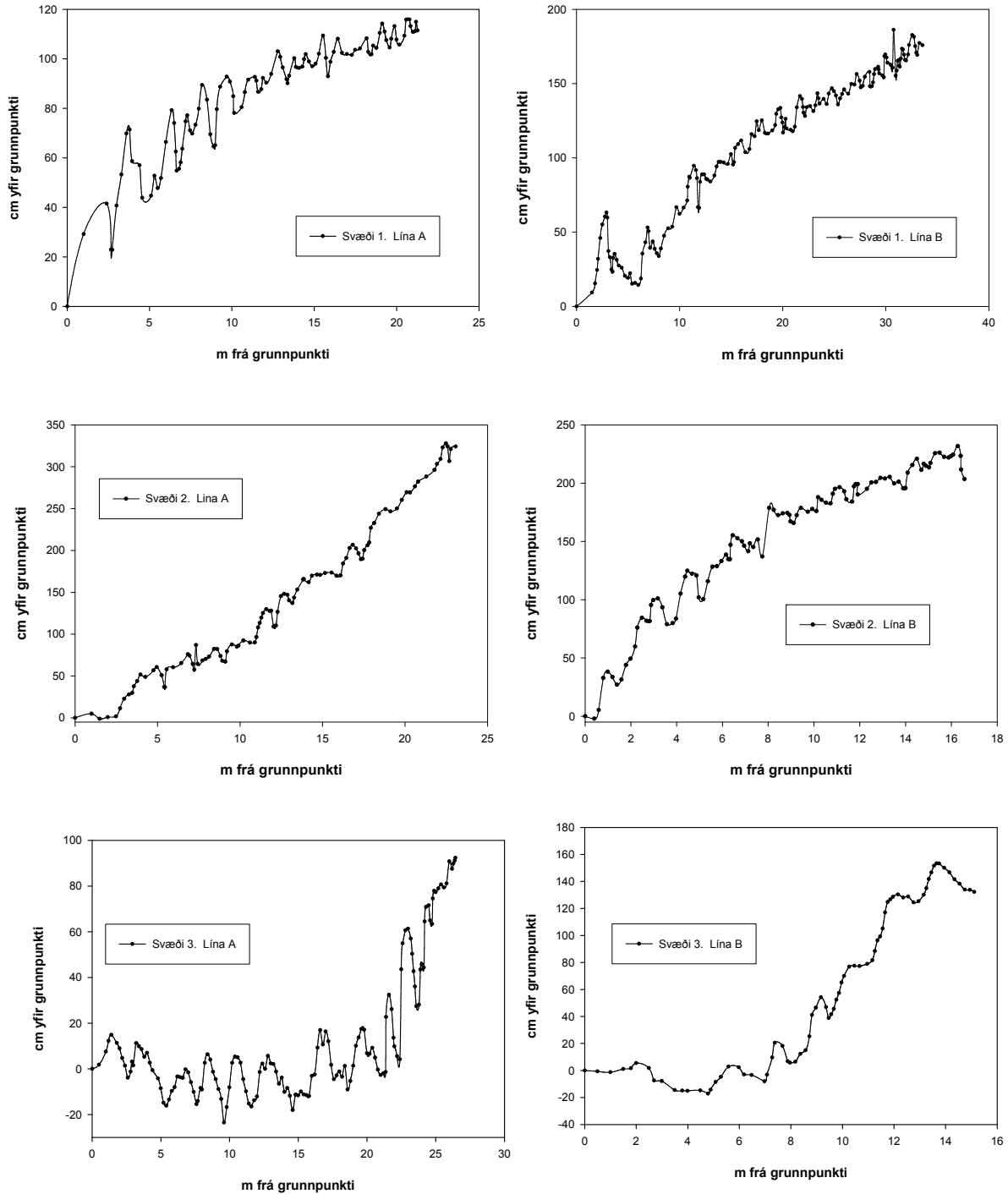


Svæði 3, lína B

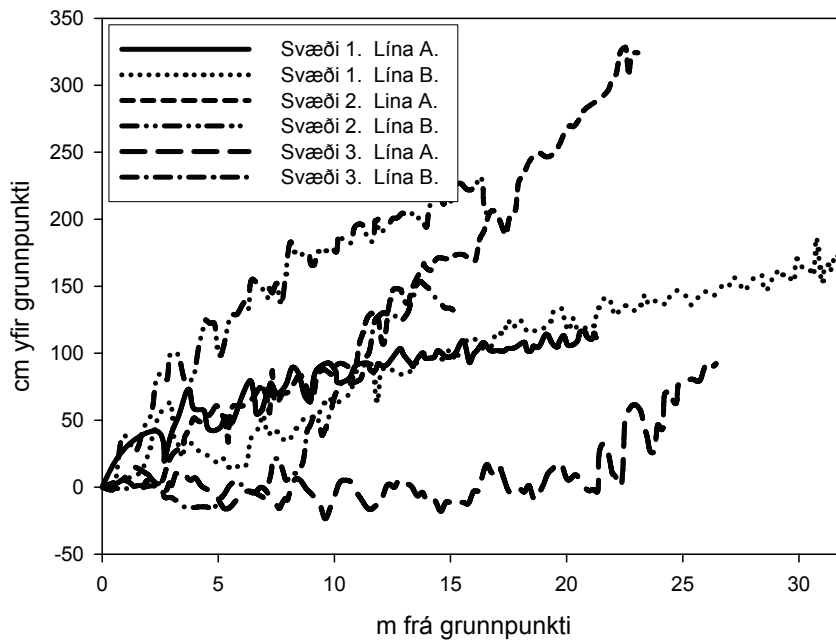
Mynd 3. Staðsetning á jarðvegssýnatöku úr þúfum á Mosfellsheiði.

Niðurstöður

Niðurstöður yfirborðsmælinga á sniðum er sýnd á mynd 4. Gröfin hafa mismunandi mælikvarða fyrir x-og y-ás, m á x-ási en cm á y-ási. Gröfin hafa enn fremur mismundi lengd og hæð á milli grafanna. Byrjað er neðst við í votlendi þar sem þúfnahæð er lítil.



Mynd 4. Yfirborð þúfna á sex mælinum á Mosfellsheiði. Mælikvarðar eru misjafnir fyrir x og y ás og lengd ásanna er einnig misjöfn.

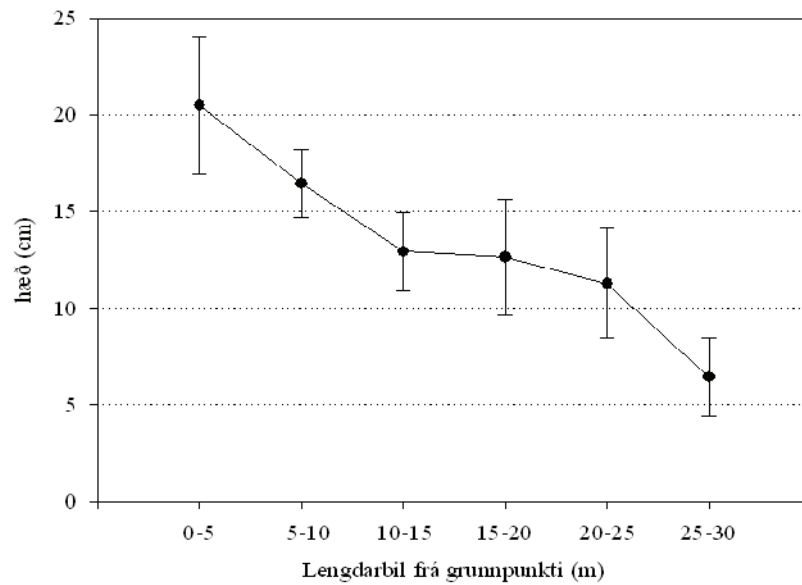


Mynd 5. Öll mæld snið borin saman á sama grafinu.

Öll sniðin eru sýnd saman á mynd 5. Eins og sjá má á myndinni er hallinn afar mismunandi, en hæð þúfna virðist meiri nær votlendinu (upphafspunkti) en fjær. Til að kanna þetta nánar var reiknað meðaltal fyrir hæð þúfnanna fyrir 5 m lengdarbil talið frá upphafspunkti (tafla 2). Hæð þúfna í fyrsta bilinu (0-5 m frá upphafspunkti) var að meðaltali 8,4 -31,2 með meðalgildið 20,5 fyrir allar sex líurnar. Meðaltal allra lína minnkar síðan, en þegar fjær dregur upphafspunkti fækkar mæligildum og aðeins eitt gildi er fyrir lengdarbilið fjærst upphafspunkti (30-35 m).

Tafla 2. Meðalhæð þúfna í 5 m lengdarbilum talið frá upphafspunkti. Mæligildum fækkar eftir fyrstu 15 metrana frá upphafspunkti.

		Lengdarbil, lengd frá upphafspunkti (m)						
	Halli	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35
1A	3°	26,4	18,0	7,4	7,2	6,4		
1B	3°	31,2	11,1	12,0	9,5	9,0	8,5	13,1
2A	8°	12,2	18,0	17,0	24,0	10,2		
2B	7°	23,7	15,4	10,0	12,6			
3A	2°	8,4	12,9	10,6	9,9	19,5	4,4	
3B	5°	21,0	23,2	20,6				
Meðaltal		20,5	16,4	12,9	12,6	11,3	6,4	(13,1)



Mynd 6. Tengsl þúfnahæðar við fjarlægð frá grunnpunkti. Lóðréttar línur sýna staðalfrávik. Síðasta lengdarbilið er ekki sýnt (ein mæling).

Þróun meðtals fyrir hæð á þúfum fyrir þessi 5 m lengdarbil er sýnd á mynd 6. Breytileiki í hæð þúfnanna er mikill, m.a. fyrir fyrsta punktinn, sem einnig tekur til svæðisins næst votlendinu (ört vaxandi þúfnahæð).

Kornastærðareiginleikar

Meðalkornastærð flokkuð eftir staðsetningu í þúfu er sýnd í töflu 3. Mynd 3 sýnir hvar sýnin voru tekin; sýni með staðsetningu 1 og 3 eru úr jöðrum þúfna en 2 og 4 eru úr miðjunni.

Tafla 3. Meðalkornastærð sýna í þúfum (μm , Folk og Ward aðferð) fengin með þurrsigtun.

	Staðsetning í þúfu			
	1 (jaðar)	3 (jaðar)	2 (miðja)	4 (miðja)
	meðalkornastærð, μm			
1A	47,6	47,7	56,8	29,0
1B	23,7	46,8	43,5	61,2
2A	67,5	100,6	88,7	100,6
2B	47,7	39,8	69,2	
3A	29,0	24,4	27,3	
3B	207,5	98,0	53,2	
Meðaltal	70,5	59,4	56,5	63,6

Breytileiki er mikill í meðalkornastærð (frá 24 til 207 μm). Ekki er að sjá skýran mun á milli staðsetninga í þúfu, meðalkornastærðin er ýmist meiri eða minni á milli jaðars og miðju. Hins vegar er kornastærðin mjög svipuð innan hvers sniðs nema í 3B, þar sem annað jaðarsýnið er gróft ($>200 \mu\text{m}$). Hafa ber í huga að þurrsigtun gefur ekki raunverulega kornastærð jarðvegsins, því meðferðin sundrar ekki finum kornum (Maeda o.fl., 1977; sjá Ólaf Arnalds, 1993).

Ekki var að sjá neitt munstur í kornadreifingu (sorting) eða annarra slíkra setfræðilegra eiginleika á milli staðsetninga innan þúfna.

Umræður

Hæð þúfnanna á Mosfellsheiði falla vel að því líkani sem Björn Jóhannesson (1960) dró upp af legu og fjarlægð frá votlendi (sjá mynd 1). Athyglisvert er að sjá að þar sem landið rís hægst út frá votlendinu eru þúfurnar hærri yfir lengri vegalengd frá votlendispunktinum, t.d. á línunum 3A og 3B (styttra niður á grunnvatn). Uppi á hæðunum er síðan oftlega grunnur jarðvegur og gætir stórgrýtis, en sýnt hefur verið fram á að grjót og lítil þykkt jarðvegs minnka hæð þúfna eða hættu á myndun þeirra (cryoexpulsion; Grab, 2005). Hæðin er í meðallagi miðað við mælingar Schunke (1977) á þúfum í landinu öllu. Meðalþúfnahæðin fer frá um 20 cm næst votlendinu í um 5 cm fjærst. Mun stærri þúfur eru t.d. að finna á heiðum Norðvestanlands og víða á Austur- og Norðausturlandi.

Grab (2005) telur að þúfur myndist gjarnan þar sem jarðvegur þróast í laus, vindborin setlög, sem t.d. er blásið frá jöklum (áfok - löss) en nefnir líka gosefni á Íslandi og Nýja-Sjálandi. Á Íslandi fer það saman að jarðvegurinn þróast í gjósku sem berst sem áfok (löss) frá jökulsöndum af ýmsu tagi, sem hefur einmitt ráðandi áhrif á myndun jarðvegsins (Ólafur Arnalds og Hlynur Óskarsson, 2009). Meginkornastærð vindborinna efna á borð við löss er silt. Silt er það sem nefnt er frostnæmt efni (frost susceptible material), sem að hluta skýrir tilvist þúfna á þessum svæðum. Slíkt efni leiðir vatn mjög greiðlega um jarðveginn (unsaturated hydraulic conductivity), sandur leiðir hins vegar lítið vatn undir vatnsspennu og leir leiðir vatnið mjög hægt. Leirrík *eldfjallajörð* hefur einnig eiginleika silts vegna samkornunar allófans í siltklasa (Maeda o.fl., 1977). *Eldfjallajörðin* hefur að auki mikla vatnsheldni og því má telja að eðlilegt að áhrif frosts séu oft mjög sýnileg í íslenskum jarðvegi. Í yfirliti sínu nefnir Grab (2005) að þúfur tengjast einnig oft mójörð (peat), en við þær aðstæður sem ríkja á Mosfellsheiði skiptir dýpt á grunnvatn meira máli en lífrænu efnin, sem hafa einmitt hæsta gildið í votlendinu þar sem þúfurnar eru minni eða eru ekki til staðar.

Skilin á milli sands og silts eru ýmist talin 0,02 mm (International Society of Soil Science) eða 0,05 mm (USDA) sem eru 20 eða 50 μm . Eins og sjá má er meðalkornastærðin í þúfunum nálægt þessum skilum en frekar þó sandmegin (þurrsigtun) og

flokkast ýmist sem mjög finn sandur (very fine sand) eða mjög gróft silt (very coarse silt) samkvæmt flokkun Folk og Ward. Raunkornastærð er finni og telst jarðvegurinn mold (loam) til siltmold (silt loam) samkvæmt kornastærðarþríhyrningi við ákvörðun í handsýni á vettvangi og er þá siltið ráðandi. Nákvæmar mælingar á kornastærðs er til fyrir snið í nágrenninu, þar sem í ljós kemur að leirinnihaldið getur jafnvel náð >30% í einstökum jarðvegslögum, sem allófan og ferrihýdrít (Ólafur Arnalds o.fl., 1995). En sem fyrr sagði raðast þessar leirsteindir í klasa sem hegða sér sem silt. Jarðvegurinn er því fremur eða mjög frostnæmur samkvæmt þessum kornastærðargreiningum.

Við uppgroft á þúfum er algengt að sjá ummerki um að jarðvegur hafi gengið mikið til og stundum er vottur af eins konar poka í miðju þúfunnar þar sem virðast hafa sest grófari efni. Kornastærðargreiningarnar leiða ekkert slíkt í ljós í sex þúfum á Mosfellsheiði, en frekari rannsóknir þyrfti til að kanna hvernig þessu er háttað á landsvísu.

Þakkarorð

Vigdís Guðjónsdóttir fær þakkir fyrir að reikna út hnit punkta út frá mælingum enn fremur Guðrún Þórðardóttir fyrir aðstoð við heimildaleit og Margrét Jónsdóttir fyrir uppsetningu og frágang ritsins.

Heimildir

- 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. Reykjavík.
- Blott S.J. og K. Pye. 2001. GRADISTAT: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms* 26:1237-1248.
- Borghór Magnússon, Ásrún Elmarsdóttir og Björn H. Barkarson. 1997. Hrossahagar, aðferðir til að meta ástand lands. Rannsóknastofnun landbúnaðarins og Landgræðsla ríkisins, Reykjavík.
- Clark M.J. (ristj). 1988. *Advances in Periglacial Geomorphology*. John Wiley, New York.
- Eldridge D.J., J. Val og A.I. James. 2011. Abiotic effects predominate under prolonged livestock-induced disturbance. *Austral Ecology* 36:367-377.
- Gerrard J. 1992. The nature and geomorphological relationships of earth hummocks (thufa) in Iceland. *Zeitschrift für Geomorphologie Supplement* 86:173-182.
- 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.

- Gruner M. 1912. Die Bodenkultur Islands. Archiv für Biontologie 3. (Tilvitnun frá Grab, 200-5).
- Helgi Jónsson. 1909. Þúfur. Freyr VI:13-15 og 69-70.
- Kim T. 2008. Thufur and turf exfoliation in a Subalpine grassland on Mt Halla, Jeju Island, Korea. Mountain Research and Development 28:272-278.
- Maeda T., H. Takenaka og B.P. Wakentin. 1977. Physical properties of allophane soils. Advances in Agronomy 29:229-264.
- Ólafur Arnalds. 1993. Leir í íslenskum jarðvegi. Náttúrufræðingurinn 63:73-85.
- Ólafur Arnalds. 1994. Holklaki, þúfur og beit. Græðum Ísland V:115-120.
- Ólafur Arnalds. 2010. Kulferli, frost og mold. Rit LbhÍ nr. 26.
- Ólafur Arnalds, C.T. Hallmark og L.P. Wilding. 1995. Andisols from four different regions of Iceland. Soil Science Society of America Journal 59:161-169.
- Ólafur Arnalds og Hlynur Óskarsson. 2009. Íslenskt jarðvegskort. Náttúrufræðingurinn 78:107-121.
- Schunke E. 1975. Die Periglazialerscheinungen Islands in Abhängigkeit von Klima und Substrat. Abhandlungen der Akademie der Wissenschaften in Göttingen. Mathematisch-Physikalische Klasse. Folge 3; 30, Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht, 273 bls.
- 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, bls. 231-245.
- Sigurður Þórarinnsson. 1951. Notes on patterned ground in Iceland, with particular reference to the Icelandic 'FLÁS'. Geografiska Annaler 33:144-156.
- Tarnocai C. og S.C. Zoltai. 1978. Earth hummocks of the Canadian Arctic and Subarctic. Arctic and Alpine Research 10:581-594.
- 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.
- Þorvaldur Thoroddsen. 1913. Polygonboden und 'thufur' auf Island. Petermans Geographische Mitteilungen 59:253-255 (vitnað í af Gerrard, 1992 og Grab, 2005).