Ólafur Arnalds, Elín Fjóla Þórarinsdóttir og Fanney Ósk Gísladóttir

Sandauðnir, sandfok og ryk á Íslandi — I. Sandar og fok

Sandauðnir Íslands þekja rúmlega 20.000 km² og þær hafa víðtæk áhrif á öll vistkerfi landsins vegna áfoks sem frá þeim kemur. Sandauðnirnar eru sérstakar á heimsvísu vegna þess að í þeim eru einkum basísk glerkennd korn. Það er óalgengt annars staðar. Sandauðnirnar skiptast í sanda, sandmela og sandhraun og þær eru flokkaðar í þrjá flokka eftir virkni sandfoks. Virkasti flokkurinn þekur um 5.000 km². Við sandfok skokka (e. jump, bounce) sandefni með yfirborðinu og getur flæðið sem berst yfir eins metra breiða línu á ári numið meira en einu tonni, en er þó oftar minna. Langmest af efnismagninu berst áfram undir 30 cm hæð frá yfirborði. Mestallt efnið fýkur í fáum öflugum sandbyljum því samhengi vindhraða og fokmagns er stigvaxandi fall. Fínni efni, einkum silt, fjúka upp og valda rykmistri sem getur borist gríðarlega langar vegalengdir. Þar sem næg fokefni eru til staðar getur sandur fokið inn yfir gróið land og myndað áfoksgeira. Slíkir geirar hafa valdið hvað mestu um eyðingu gróinna vistkerfa síðustu þúsöldina. Við það „fer landið í sand“, sem er afar alvarlegt form vistkerfisbreytingar – vistkerfishrun. Þekktir eru áfoksgeirarnir í Landsveit og á Rangárvöllum þar sem framrás sandsins var stöðvuð á síðustu öld. Sandur getur borist langar leiðir frá upprunastað og myndað „sandleiðir“ sem eru tugir kílómetra á lengd. Mikilvægt er að efla gróður á svæðum sem verða fyrir sandfoki, ekki síst þar sem gætir öskufalls og flóða í jökulám.

Þetta er fyrri grein af tveimur þar sem fjallað er um sanda, sandfok og ryk á Íslandi, en í þeirri seinni, sem mun birtast í Náttúrufræðingnum síðar á árinu, er fjallað um stærstu uppsprettur uppfoks á landinu og áfok.

INNGANGUR

Auðnir þekja stóran hluta Íslands og áhrif sandauðna ná til nærri allra annarra vistkerfa landsins. Áfok frá sandauðnum myndar móðurefni moldar (bergefnin sem veðrast með tímanum við jarðvegsmyndun; e. parent material) um land allt og mótar eiginleika og frjósemi vistkerfa. Ryk hefur áhrif á bráðnun jökla, veðurfar og heilsufar manna og dýra.[1] Íslensku auðnirnar eru líklega stærstu eyðimerkur sem finnast utan þurrkasvæða jarðar. Þær eru stærstu auðnirnar sem þaktar eru lausum basískum gosefnum og um leið stærstu „svörtu“ eyðimerkur jarðarinnar. Yfirborðsferli (e. surface processes) eru virkari og fjölbreyttari en í flestum öðrum auðnum á jörðinni og hér er að finna einhverjar virkustu rykuppsprettur jarðar. Sandfok var jafnframt meginþáttur í eyðingu vistkerfa á Íslandi, einkum eftir landnámið þegar athafnir manna gerðu vistkerfi viðkvæm fyrir raski.

Á undanförnum áratugum hafa verið gerðar margvíslegar rannsóknir á auðnum landsins, meðal annars á vegum höfunda þessarar greinar og samstarfsmanna þeirra. Þessum rannsóknum hafa einkum verið gerð skil í alþjóðlegum fræðiritum. Töluvert af þessari þekkingu er kynnt í ritinu *The Soils of Iceland*[2] og í yfirlitsgrein í *Aeolian Research*,[3] en ekki hefur verið gerð grein fyrir efninu áður á íslensku. Hér verður tekin saman margvísleg þekking um sandauðnir landsins, áfok og ryk í tveimur greinum. Í fyrri greininni er leitast við að skýra eðli sandauðna og sandfoks. Síðari greinin ber undirtitilinn „Áfok og ryk“ og birtist hún í Náttúrufræðingnum síðar á árinu 2019.[4] Þar er lögð áhersla á að skýra áfok, einkum hvaðan það kemur, hve mikið það er, áhrif þess og hvernig eðli þess hefur breyst á umliðnum öldum.

VINDROF – SAGA

Vindrofsfræði eru nefnd „aeolian sciences“ eða álíka á alþjóðamálum, dregið af heiti Aeolian-eyja undan ströndum Sikileyjar á Miðjarðarhafi. Upphaf þeirra má einna helst rekja til einstæðrar bókar Bretans Ralphs A. Bagnolds, *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*, sem kom út árið 1941.[5] Þar eru leiddar fram jöfnur, líkön og skýringar sem vel hafa staðist tímans tönn. Önnur vatnaskil í vindrofsfræðum fylgdu þróun líkans eða jöfnu sem var ætlað að spá fyrir um vindrof út frá auðmælanlegum þáttum (vindrofsjafnan, e. Wind Erosion Equation), og er kennd við bandarískan hóp undir forystu W.S. Chepils. Ýtarleg yfirlitsgrein um jöfnuna var birt 1963;[6] sjá einnig samantektarverk Skidmores o.fl.[7,8] Jafnan hefur verið endurskoðuð (e. Revised Wind Erosion Equation) sem hefur meðal annars verið notuð í Evrópu.[9,10] Margar afleiður eru til af jöfnum fyrir vindrof, til dæmis áströlsk vindrofslíkön.[11] Þessar jöfnur hafa einkum haft þýðingu fyrir vindrof af ökrum og auðnum, en henta illa fyrir misvel gróinn úthaga.[9,12] Rannsóknir á ryki eru nýrri af nálinni, en þær hafa aukist verulega á undanförnum árum eftir því sem áhrif svifryks á vistkerfi, loftslag, þar á meðal hlýnunaráhrif, og lýðheilsu hafa orðið ljósari.[1]

Í upphafi voru rannsóknir á vindrofi hérlendis einkum bundnar við mælingar áfokshraða til þess að geta rakið umhverfisbreytingar í landinu. Aðferðafræðin felst í því að mæla þykknun jarðvegs á milli öskulaga af þekktum aldri. Sigurður Þórarinsson[13] o.fl. veittu því athygli að áfokshraðinn margfaldaðist (4–10-falt) við landnámið, sem má rekja til hruns vistkerfa og vindrofs í kjölfar nýtingar mannsins. Þorleifur Einarsson,[14] Guttormur Sigbjarnarson[15] og Grétar Guðbergsson[16,17] voru á meðal frumkvöðla á þessu sviði, og síðan hafa fjölmargir fylgt í kjölfarið.

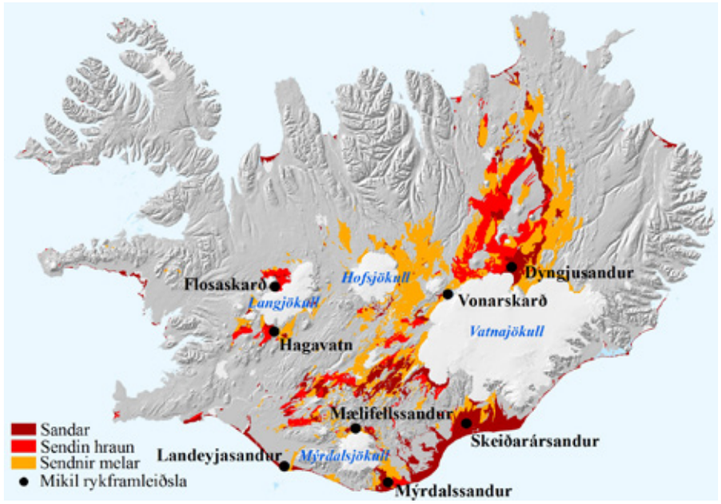
Sandfokið á Rangárvöllum og í Landsveit í lok 19. aldar var vendipunktur hérlendis í baráttu við sandfok. Sandgræðsla ríkisins, sem síðar varð Landgræðsla ríkisins og nú Landgræðslan, var stofnuð til að hefta fokið árið 1907. Þá sögu hafa þeir Arnór Sigurjónsson[18] og Friðrik G. Olgeirsson rakið skilmerkilega.[19]

Allmörg hugtök fylgja vindrofsfræðum og eru þau skýrð í rammagrein á bls. 38.

FLOKKUN SANDAUÐNA

Auðnir ná til margra flokka í vistgerðaflokkun Náttúrufræðistofnunar Íslands,[20] og eru meðal annars flokkaðar undir vistlendunum „melar og sandlendi“. Sú flokkun sem hér er stuðst við er flokkun yfirborðsgerðar sem notuð var við að kortleggja jarðvegsrof á Íslandi.[21] Samkvæmt roflokkuninni er lítt gróið land flokkað í *mela, urðir, hraun* og *moldir*, og síðan sandflokkana *sanda, sandmela* og *sandhraun* sem saman mynda *sandauðnir* landsins. Sandauðnirnar eru um 22.000 km² (1. tafla). Sandfok og uppfok frá þeim er er afar mismunandi. Virkustu svæðin (rofeinkunnir 4 og 5) eru um 15.000 km².

Hér á eftir verða mismunandi flokkar sandauðna skýrðir nánar, Sandsvæðin eru sýnd á 1. mynd.

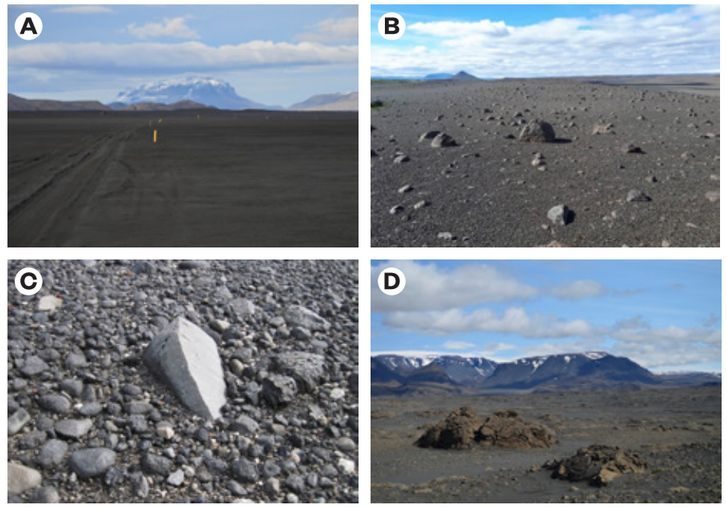


1. mynd. Íslenskar sandauðnir. Svörtu doppurnar sýna hvar mikilvirkustu rykuppspretturnar er að finna. – Icelandic sandy deserts. The dark red-coloured areas are “sandur”, red is “sandy lavas” and yellow represents “sandy gravel” surfaces. The black dots indicate where the hyperactive dust sources are found (general area).

Sandar eru sandsvæði þar sem lítið er af melagrjóti eða hrauni í yfirborði. Meðal helstu sanda á Íslandi eru Mýrdalssandur, Landeyjasandur, Dyngjusandur, hlutar Skeiðarársands, sandurinn sunnan Hagavatns (sunnan Langjökuls) og Mælifellssandur (norðan Mýrdalsjökuls) (2. mynd). Heildarflatarmál sanda er um 4.000 km². Tilvist þeirra er að einhverju leyti háð því að sandur berist aftur og aftur inn á svæðið og þar eru jökulár mikilvirkastar. Annars þróast svæðin yfir í mela þegar gengur á sandbirgðirnar vegna sandfoks og frostlyftingar grófara efnis. Land getur jafnvel gróið upp að nýju ef aðstæður leyfa.

Sandmelar (sendnir melar). Þar sem sandur berst yfir melasvæði binst hann að hluta vegna hrjúfs yfirborðs melanna (2. mynd B). Það sama á við um öskufall. Frost veldur því að grjót og möl lyftast á vetrum og hluti áfoksins grefst niður. Sandurinn safnast því undir malarkenndu yfirborðinu sem rís smám saman, sennilega um 0,1–1 mm á ári eftir aðstæðum. Nóg er þó af sandi í yfirborðinu til að valda sandfoki í miklu roki. Sandsorfnir steinar eru algengir þar sem sandfok hefur varað lengi (2. mynd C). Sandmelar eru víðáttumesta sandyfirborðið (nærri 13.000 km²) og það flokkast einkum með rofeinkunn 3 (um 5.400 km²) og 4 (um 6.200 km²). Þó flokkast talsvert af sandmelum (um 1.300 km²) af sandmelum með rofeinkunn 5, sem sýnir mjög óstöðugt yfirborð.

Sandhraun (sendin hraun) finnast þar sem sandur berst yfir úfin hraunsvæði, sem og þar sem mikil aska hefur fallið á lítt gróin hraun (2. mynd D). Sandurinn sest til í lægðum. Ef sandur berst stöðugt að fyllast hraunin smám saman af sandi og geta að lokum grafist í sand. Sandhraun eru ráðandi landgerð víða í Suður-Þingeyjarsýslu, svo sem í Ódáðahrauni, og einnig á Heklusvæð-

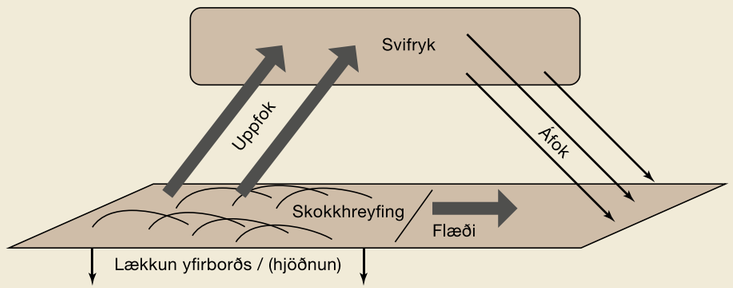


2. mynd A–D. A: Dæmigert sandyfirborð á Dyngjusandi norðan Vatnajökuls. Hér er skokkhreyfing korna áberandi og ekki þarf mikinn vind til að sandfok hefjist. Herðubreið í baksýn. B: Sandmelur á Kjalvegi. Hofsjökull í baksýn (t.v.) ásamt gróðurtorfum sem þrauka í auðninni (t.h.). C: Sandsorfinn steinn (e. ventifact) á sandmel. Svörfunin sýnir vel mátt sandfoksins. D: Sandhraun (sendið hraun). Skjaldbreiðarhraun, horft til Þórisjökuls. Hraunin geta safnað miklum sandi. – A: Typical “sandur” surface at Dyngjusandur north of Vatnajökull Glacier. B: Sandy gravel surface at Kjölur in the Central Highlands. C: A ventifact, showing how erosive sand abrasion is. D: Sandy lava surface. Lava north of Skjaldbreiður shield volcano, Þórisjökull Glacier on the horizon to the left. Ljósm./Photo: Ólafur Arnalds (A, B, D), Fanney Ósk Gísladóttir (C).

1. tafla. Virk sandsvæði, stærðir og yfirborðsgerð. Rofeinkunn endurspeglar stöðugleika yfirborðsins og þar með virkni rofs. 3: talsvert rof, 4: mikið rof; 5: mjög mikið rof. Mikið sandfok á sér stað á svæðum með einkunn 4 og 5, samtals 14.795 km².[21] – Erosion scores represent erosion activity with 3: considerable; 4: severe; 5: very severe. Based on Soil Erosion in Iceland.[21] The combined areas of erosion score 4 and 5 represent the active aeolian areas (14 795 km²).

Yfirborðsgerð / *Surface type*	Rofeinkunn / *Erosion score*			Samtals / *Total*
	3	4	5	
	km²	km²	km²	km²
Sandur / *sand-fields*	318	1.087	2.828	4.233
Sandmelur / *sandy lag-gravel*	5.407	6.217	1.286	12.910
Sandhraun / *sandy lava*	1.366	1.757	1.620	4.743
Samtals / *total*	7.091	9.061	5.734	21.886
Samtals / *total 4+5*		14.795		

Meginhugtök í vindrofsfræðum



Vindrofsferli – nokkur hugtök. Sjá rammatexta. – Schematic drawing illustrating some main concepts associated with wind erosion. Uppfok = *dust emissions,* svifryk = *dust,* skokkhreyfing = *saltation,* áfok = *dust deposition,* flæði = *flux,* lækkun yfirborðs (hjöðnun) = *deflation.*

Sandur – sandar. Hugtakið *sandur* er notað um landlegt fyrirbæri, bæði um óstöðugt yfirborð þar sem vindrof á sér stað og korn af ákveðinni kornastærð (0,05–2 mm). Á yfirborði sandsvæða eru efni sem hafa breiða spönn kornastærðar: sandur, silt (0,002–0,05) og leir (<0,002 mm) í mismunandi hlutföllum, en ekki aðeins korn sem teljast til sands, og veldur þetta stundum misskilningi. Þegar talað er um *sandefni* sem fjúka í þessari grein er bæði átt við sand, silt og að hluta leir. Samsetning sanda er afar breytileg eftir svæðum. Sandkorn og grófari hluti silts eru meginuppistaða skokkefna en silt er meginhluti ryksins ásamt leir þegar hann er til staðar.

Svifryk, ryk (e. dust). Ryk berst um andrúmsloftið (e. suspension), oft langar leiðir. Styrkur svifryks er yfirleitt mældur í míkrógrömmum á rúmmetra (μg/m^3), en einnig sem fjöldi korna í rúmmetra. Hafa ber í huga að svifagnir geta átt margvíslegan uppruna, t.d. í útblæstri frá iðnaði, húshitun og samgöngum, en hér er fjallað um ryk af „náttúrulegum“ uppruna (sandar, mold), sem mætti kalla „náttúruryk“ eða „bergryk“ (e. mineral dust) til aðgreiningar frá annarri rykmengun.

Skokkefni takast á loft við árekstur við önnur korn, skella síðan aftur niður á jörðina og valda fleiri árekstrum (e. saltation). Þau eru of þung til að verða að svifryki. Skokkið er meginferli sandburðar með yfirborðinu. Það er oft mælt sem flæði yfir eins metra breiða línu á einu ári (kg/m/ár) eða flæði í gegnum einn fermetra á ári (kg/m^2/ár), á klukkustund (kg/m/klst) eða jafnvel í einstökum stormi.

Skriðefni (e. creep) eru stærri korn en í skokkefnum. Þau skríða með yfirborðinu undan árekstrum skokkefnanna en takast ekki á loft.

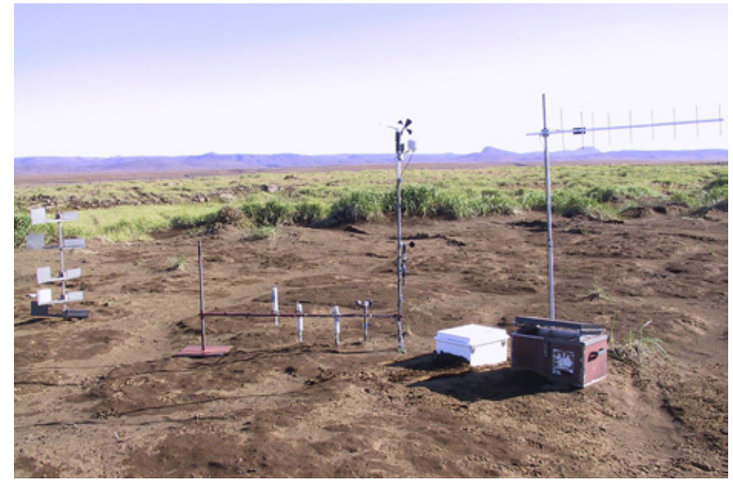
Uppfok og rykmyndun. Smæstu korn takast á loft og haldast loftborin sem ryk (e. dust emission, dust production, dust release). Oft mælt sem þyngdareining efnis, g eða kg, sem tekst á loft frá hverjum fermetra í einstökum stormi eða yfir tiltekið tímabil (kg/m^2/ár; kg/m^2/stormur).

Lækkun yfirborðsins vegna þess að rof fjarlægir efni af yfirborðinu (e. deflation) er mæld í mm eða cm yfir tiltekið tímabil (mm/ár).

Þröskuldsvindhraði (e. threshold velocity). Sandfok hefst við ákveðinn vindstyrk þegar fyrsta kornið tekst á loft vegna togspennu vindsins. Kornið virkjar síðan hreyfiorku vinds áður en það skellur aftur niður á yfirborðið og ýtir þá við mörgum öðrum kornum sem við það takast á loft. Vindstyrkur minnkar eftir því sem nær dregur yfirborðinu, en hve mikið er háð yfirborðshrjúfleika. Þröskuldsvindhraði (U*t) er reiknaður fyrir vind við yfirborðið í mörgum líkönum fyrir vindrof og þá þarf að mæla vindstyrk í mörgum hæðum til að ákvarða vindsniðið. Algengt er að gefa þröskuldsvindstyrk fyrir tilteknar mælihæðir, svo sem 2 m og 10 m.

Áfok (e. aeolian deposition). Magn rykefna sem sest aftur á yfirborðið, mælt sem hækkun yfirborðs (mm eða mm/ár) eða magn (g/m^2 eða g/m^2/ár). Áfok er eitt þeirra meginferla sem mótar íslenska náttúru.

Svifryk (e. particulate matter), mælt sem PM, fínefni ryks. Er gefið upp sem massi á rúmmálseiningu (μg/m^3) eða fjöldi. Gildið aftan við PM gefur til kynna stærðarmörk. PM_{10} táknar korn minni en 10 μm, $PM_{2,5}$ er fyrir korn minni en 2,5 μm.



3. mynd. Tækjabúnaður til fokmælinga á moldum á Hólsfjöllum. Þrír fokstautar eru festir á lárétta slá fyrir miðri mynd. Til vinstri eru fimm Fryrear-gripgildrur í mismunandi hæð. Vindhraði er mældur í þremur hæðum og upplýsingunum safnað í tölvu í hvíta kassanum. Þessi rannsóknastaður á Hólsfjöllum er mjög afskekktur og voru gögn reglulega send með símabúnaði. Hér er verið að safna gögnum til að meta uppfoks- og áfokshættu við Hálslón vegna Kárahnúkavirkjunar árið 2000. – Equipment for measuring wind erosion. Three Sensit instruments are near the surface which count moving grains that hit them. Wind speed, wind direction, temperature and relative humidity are measured simultaneously, the data stored in a data logger and the data sent from this remote location via telephone. Five Fryrear (BSNE) traps mounted on a pole to the left. Ljósm./Photo: Ólafur Arnalds.

inu. Þau eru um 4.700 km^2 að flatarmáli og dreifast nokkuð jafnt á milli rofeinkunna. Hraunin hafa gríðarlega getu til að binda sand og koma í veg fyrir að hann berist lengra.

Sandöldur. Rétt er að geta hér um það fyrirbrigði sem margir tengja einna helst við eyðimerkursanda, sem eru sandöldur (e. dunes). Þær eru fremur óalgengar hérlendis, en finnast þó til dæmis á vesturhluta Hafnarsands við Þorlákshöfn. Austan við eldgíginn Kvensöðul, skammt austan við Dettifoss, eru einna myndarlegustu sandöldur landsins.

SANDFLÆÐI – MAGN

Þeir sem hafa fest bíl í skafbyl furða sig margir á því hve mikill snjór safnast fljótt að bílnum. Það er margt líkt með skafrenningi og sandfoki, sömu lögmál gilda. Áhrif skafbyljarins eru þó smávægileg í samanburði við að festast í sandbyl. Hreyfiorka sandkorna er miklu meiri en snjókorna. Málningin skrapast af bílnum og gluggar verða ógagnsæir. En hvað er mikið efni á ferðinni í sandbyljum? Það er háð efnisgerð, framboði efna, vindstyrk, rakastigi, yfirborðshrjúfleika og fleiri þáttum.[7]

Mæliaðferðir

Allmargar tilraunir hafa verið gerðar til þess að mæla hve mikið sandfok er á margvíslegum yfirborðsgerðum landsins. Tvær meginaðferðir hafa verið notaðar í þessu skyni. Annars vegar eru svokallaðar Fryrear-gripgildrur,[22] sem einnig eru nefndar BSNE-gildrur (3. mynd). Gildrunum er komið fyrir í mismunandi hæð, 3–5 gildrum á stöng. Mest fýkur neðan 30 cm hæðar (skokkefni). Það sem safnast í gildrurnar er síðan notað til þess að reikna út fokið í heild, þ.e. magn sem fýkur yfir 1 m breiða línu (kg/m). Einnig hafa verið notaðir svokallaðir fokstautar, sem á er festur nemi, málmpjatla sem gefur frá sér rafpúls þegar sandkorn lendir á henni. Þessir púlsar eru magnaðir upp og sendir í tölvu sem komið er fyrir á staðnum. Stautarnir gefa ekki eins miklar upplýsingar um heildarmagn fokefna og gripgildrurnar, en með því að koma fyrir vindmælum og rakamæli á staðnum fást miklar upplýsingar um þröskuldsvindhraða og tengsl fokmagns við vindhraða, rakastig og aðra umhverfisþætti.

Magn sands sem berst eftir yfirborði

Niðurstöður mælinga á sandfoki sýndu mun meiri efnisflutning en rannsakendur höfðu gert ráð fyrir. Í 2. töflu eru dæmi úr nokkrum rannsóknum þar sem flæðið hefur verið mælt. Þær gefa skýrt til kynna að þar sem sandur er óstöðugur á yfirborði getur heildarflutningur efna numið nokkrum tonnum yfir eins metra breiða línu á einu ári. Svo mikill verður flutningurinn ekki nema við aðstæður þar sem nýr sandur bætist stöðugt við, annars minnkar fokið fljótt með minnkandi framboði sandefna. Víða er sandflæðið þó hundruð kg/m á ári á dæmigerðum sandmelum og sandhraunum, sem vitaskuld er einnig mikið flæði.

Neðst í töflunni er getið um sandbyl haustið eftir gosið í Eyjafjallajökli 2010 og er hann meðal hinna öflugustu sem mældir hafa verið á jörðinni.[26,27] Búnaður var settur upp á Skógaheiði, sem þakin var nýrri gjósku úr gosinu. Um miðjan september gerði bálviðri og var meðalvindhraði 22,5 m/s (í 2 m hæð) í nokkra klukkutíma með hviðum upp í 38,7 m/s. Þá mældist efnisflutningur allt að 6.000 kg/m/klst í hviðum þegar stormurinn var sem ákafastur, og skiluðu þær meginhluta efnisins (um 9.000 kg/m á um 6 tímum).

Fok eykst stigvaxandi með vindhraða og því ráða nokkrir miklir stormar mun meiru en margir meðalstormar. Þetta sést vel á gögnum sem fengin eru með mælingum með fokstautum og sýnd eru á 4. mynd. Hér eru gögn frá tveimur svæðum; frá Hólsfjöllum[24] og sandbylnum mikla á Skógaheiði.[26] Fyrst ber að líta á þröskuldsvindhraðann sem sést þegar kúrfurnar taka að lyftast. Hann er um 9 m/s (2 m hæð) fyrir moldirnar á Hólsfjöllum en heldur hærri (um 13) fyrir gjóskuna í Skógaheiði. Kúrfurnar stíga mjög ört með vaxandi vindhraða. Kvarðinn fyrir gröfin er nokkuð mismunandi, því Skógastormurinn er öflugur, en ekki náðust mjög hvassir stormar við mælingar á moldunum á Hólsfjöllum. Neðri gröfin sýna tvenns

2. tafla. Mælingar sandfoks á ýmsum stöðum á landinu. Vindhraði í 2 m hæð.
– Sandflux measured at various locations in Iceland. All wind speeds at 2 m height.

Staður / *Location*	kg/m/klst / *kg/m/hr*	kg/ár / *kg/yr*	Athugasemdir / *Comments*	Heimild / *Source*
Landeyjasandur	160–280	>10.000*	Mælt við 11 m/s vind / *11 m/s wind*	23
Geitasandur, sandmelur		120–320	Mælt í þrjú sumur / *over 3 summers*	24
Geitasandur, sandur		300–670	Mælt í þrjú sumur / *over 3 summers*	24
Hólsfjöll, moldir	5–>300	>500	Tvö sumur, fremur kyrrlát / *two summers*	24
Hagavatn, sandur/sandhraun	>1.000	>10.000*	Við 17 m/s vind / *at 17 m/s,*	23
Hekla, sandur		2.000–3.000	Mjög virkt sandsvæði, tvö sumur / *very active surface; two summers*	25
Hekla, sandur		500–1.000	Meðalvirk svæði, tvö sumur / *medium aeolian activity; two summers*	25
Hekla, sandur		100–500	Minna virk svæði, tvö sumur / *Less active surface; two summers*	25
Hekla, vikur og gróf gjóska		2–20	Gróf efni í yfirborði (vikur), tvö sumur / *Pumice surface; two summers*	25
Skógaheiði, Eyjafjallagjóska	1.000–6.000	>10.000	Stormur í um sólarhring / *one storm*	26

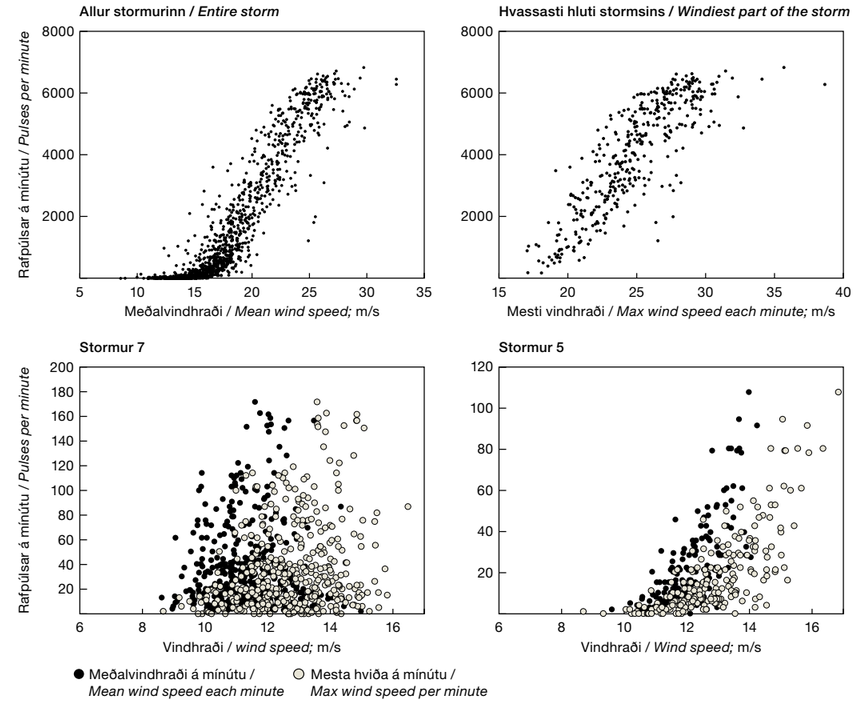
* Áætlað miðað við niðurstöður úr stökum mælingum og Fryrear-mælingum yfir löng tímabil.
– Estimated by combining Sensit and Fryrear dust trap data.

konar vindmælingar, annars vegar miðað við meðalvindhraða (lokaðir hringir) og hins vegar vindhviður (opnir hringir). Á Skógaheiði er stormurinn í heild sýndur til vinstri og síðan hvassasti hluti hans til hægri og þá miðað við mestu hviður. Athyglisvert er hvað stormarnir á Hólsfjöllum dreifast mikið, enda er rakastig að aukast á meðan á þeim stendur, æ meiri vind þarf til að hreyfa við kornunum. Við um 28 m/s í Skógastorminum beygir kúrfan af, sem gefur til kynna að loftið hafi mettast af foki, þ.e. að ekki gat hlaðist meira af fokefnum í loftmassann enda þótt vindstyrkur hefði aukist. Hugsanlega er þetta eina mælingin sem náðst hefur við náttúrulegar aðstæður og sýnir þetta fyrirbrigði. Flæðið hefur náð rúmlega 6.000 kg/m/klst. en en ekki leið á löngu þar til vindur minnkaði á ný.

Mælingar með fokstautum gefa þröskuldsvindhraðann til kynna með skýrum hætti. Hann hækkar með vaxandi rakastigi. Spannir fyrir þröskuldsvindhraða helstu yfirborðsgerða eru sýndar á 5. mynd. Þröskuldsvindhraði er lægstur þar sem fer saman vel þurrt yfirborð og fínn sandur og silt í yfirborði, til dæmis á flæðum, jafnvel allt niður í 4/m (mældur í 2 m hæð). Mikinn vind þarf til að hreyfa kornin þar sem yfirborðið er orðið gróft, svo sem á melum, jafnvel yfir 20 m/s. Upplýsingar af þessu tagi eru mikilvægar fyrir gerð líkana af mögulegu sandfoki við mismunandi aðstæður.

Langmest efni fýkur næst jörðu þar sem kornin skokka með vindinum en skella á yfirborðið þess á milli. Eftir því sem ofar dregur minnkar flæðið, en efst tekur svifrykið við. Á 6. mynd gefur að líta graf sem sýnir dæmigerð gögn fyrir hlutfallslegt magn fokefna eftir hæð. Þarna eru gögn frá fimm gildrum. Sú neðsta er í 10 cm hæð, sú næsta í 30 cm hæð en efsta gildran er í 150 cm hæð. Fyrir hver 100 g efnis sem koma í neðstu gildruna (10 cm, punktur niðri til hægri) koma um 30 g í gildruna í 30 cm hæð en um 13 g í gildruna í 60 cm hæð. Hratt fall kúrfunnar gefur til kynna hvar skokkhreyfing korna er ráðandi. Í efstu gildruna í 150 cm hæð (punktur efst til vinstri) berast bæði svifefni og skokkefni, en innan við 10% af því efnismagni sem berst í neðstu gildruna. Skokkhreyfing korna nær mun hærra hér á landi en almennt gerist erlendis vegna þess hve miklum styrk vindur nær hér, en einnig vegna þess að kornin eru oft hrjúf og sum þeirra eru tiltölulega eðlislétt.

Hlutfall flutnings eftir hæð (þ.e. lögun kúrfunnar á 6. mynd) helst yfirleitt svipað á hverjum stað óháð vindstyrk og rakastigi.[24] Það hefur verið vandamál við mælingar á sandfoki hérlendis að neðstu gildrurnar fyllast oft í einum stormi þar sem yfirborðið er óstöðugt. Þar sem hæðarkúrfan er þekkt getur gripgildra sem sett er frekar ofarlega og fyllist því ekki (t.d. í 1 m hæð) gefið fullnægjandi upplýsingar um fok, raunar yfir langt tímabil þar sem sandbyljir eru tíðir. Þetta nýttu Elín Fjóla Þórarinsdóttir o.fl. sér við rannsóknir á Heklusvæðinu,[25,28] þar sem gildrur voru settar upp á 31 stað yfir tvö sumur (7. mynd). Með þessari aðferð var hægt að fá góða yfirlitsmynd af sandflutningi á víðfeðmu svæði. Rannsóknirnar sýndu að vatnsflutningur efnis inn á svæðið og innan þess er lykilatriði fyrir rofferli á svæðinu. Upplýsingar sem þessar eru mikilvæg undirstaða fyrir skipulag árangursríkra landgræðsluaðgerða.



4. mynd. Tengsl sandflæðis og vindhraða við fok Eyjafjallagjósku (efri myndir) og við fok fínkorna sands í tveimur stormum á Hólsfjöllum (neðri myndir, stormar 5 og 7). Mismunandi kvarðar eru á myndunum. – Relationship between sandflux and wind speed. Sandflux indicated by Sensit instrument pulses (grain impacts). Tephra from Eyjafjallajökull 2011 in a major storm (upper graphs) and silty materials in two moderate storms at Hólsfjöll, NE Iceland. Note different scales between the graphs. Closed circles indicate average wind speed per minute, open circles show maximum gusts within each minute interval.

ÁFOKSGEIRAR

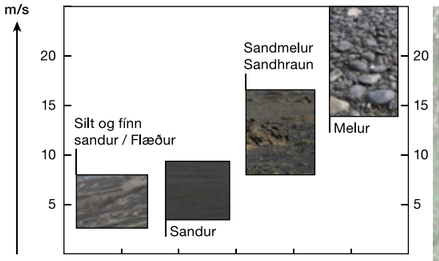
Þegar sandur gengur yfir gróið land á þykkum og grófum jarðvegi getur ferlið undið upp á sig þegar hin grófu moldarefni ganga í lið með áfoksefnunum. Við þetta verða eins konar snjóboltaáhrif, sífellt meiri sandur safnast upp á mótum auðnar og gróðurlendis þar sem hann gengur inn á gróðurinn og kæfir hann. Hugtakið *áfoksgeiri* er notað um sérstaka rofmynd við kortlagningu jarðvegsrofs á Íslandi,[21] og er tungulaga sandsvæði sem gengur inn yfir gróið land. Útlínur rofbakka þar sem áfoksgeirar hafa gengið yfir landið einkennast iðulega af beinum línum í landslaginu, þar sem fokefni rjúfa gróðurbakkann undan meginfokáttinni. Þessar beinu línur sjást vel á gervihnattamyndum (9. mynd). Fokefnin eiga sér yfirleitt uppruna í gjöfulum upptakasvæðum, svo sem í lægðum þar sem jökulár skila af sér miklu seti í flóðum eða í kjölfar hamfarahlaupa. Áfoksgeirar geta líka myndast þar sem jarðvegsefni fylla upp í lægðir vegna vatnsrofs ofan við þær. Jökulár sem renna inn í stöðuvötn valda setmyndun en síðan geta fokefni borist frá ströndum þegar lækkar í vötnunum. Einnig geta miklar breytingar á farvegi jökulvatna og hörfun jökla opnað fyrir miklar námur fokefna (sandur og silt).

Hæð gróðurs og gróðurgerð skiptir meginmáli um áhrif sandflæðis á gróður og möguleika vistkerfa til að þola sandburð og öskufall.[29,30] Rannsóknir Borgþórs Magnússonar og Olgu Kolbrúnar Vilmundardóttur á Blöndusvæðinu beindust meðal annars að þolmörkum gróðurs gagnvart slíku áfoki í um 480 m hæð. Niðurstöðurnar sýna að krítísk þykkt er um 10 cm í fjalldrapamóa.[31,32,33] Mun minna áfok olli varanlegum skemmdum á mosaþembu við Blöndu (0,6 cm) og í mólendi í 625 m hæð við bakka Hálslóns (2 cm).[34,35]

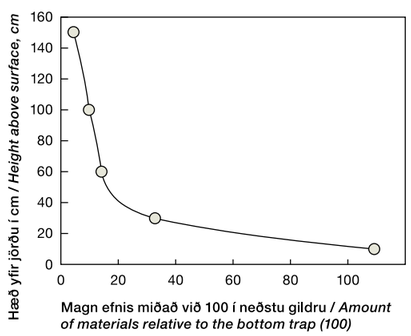
Áhrif áfoksgeira eru hvað alvarlegust þar sem fyrir er grófur jarðvegur með miklum sandi sem bætist við mengi sandfoksefnanna, svo sem við gosbeltin í nágrenni virkra eldstöðva, við jökla

Að fara í sand

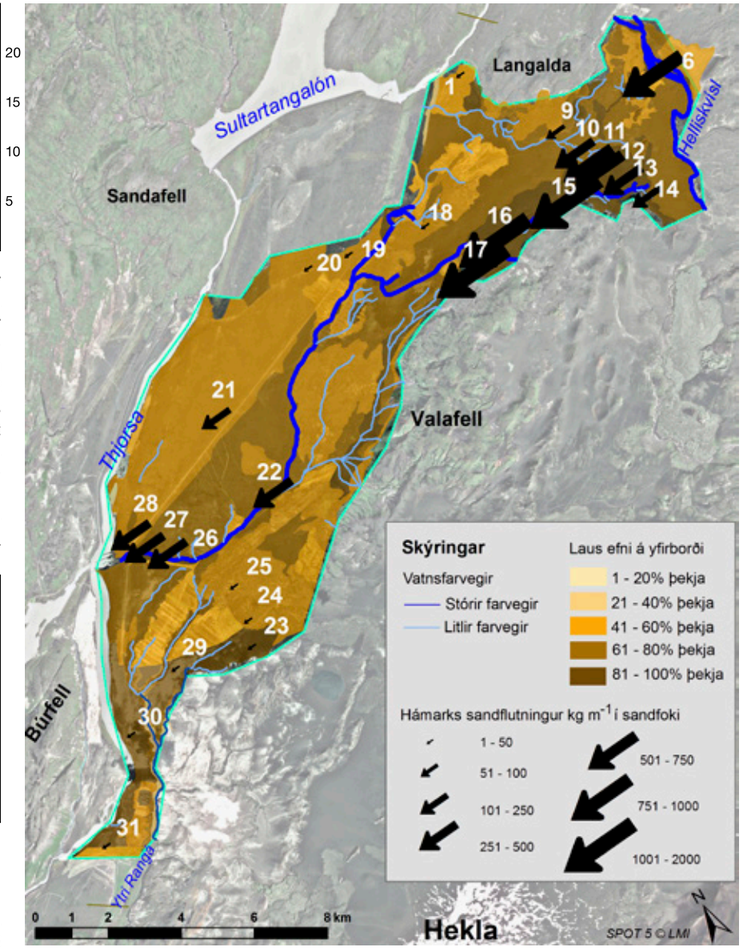
Orðalagið „að fara í sand“ er notað til að lýsa umhverfisbreytingum sem verða þegar fokefni (sandur og silt) eyða þeim vistkerfum sem fyrir voru. Yfirleitt beinist athygli fyrst að gróðurþáttum, svo sem þekju og tegundum gróðurs, þegar miklar vistkerfisbreytingar eiga sér stað. Moldarþættirnir eru þó ekki síður mikilvægir.[36] Þegar sandur verður ráðandi hverfur nær öll næring og orka (kolefni) úr kerfinu og næringarhringrásir rofna. Áhrifin á vatnshringrásina skipta líklega mestu máli, ekki síst þar sem úrkoma er allajafna lítil. Sandur hefur ekki eiginleika til að binda vatn og miðla. Enda þótt úrkoma kunni að vera mikil að meðaltali eru kerfin ákaflega þurr – nokkurra daga þurrkur veldur fullkominni vatnsþurrð og plöntur visna. Þegar þetta allt er lagt saman, skortur á gróðurþekju, tap á orku og næringarefnum og að ekki er lengur til staðar mold sem miðlar vatni, þá hrynur vistkerfið (sbr. skilgreiningar Blands o.fl. á vistkerfishruni[37]). Því geta áhrif áfoksgeira verið örlagarík og hefur ferlið stundum verið nefnt „sandification“ á ensku.



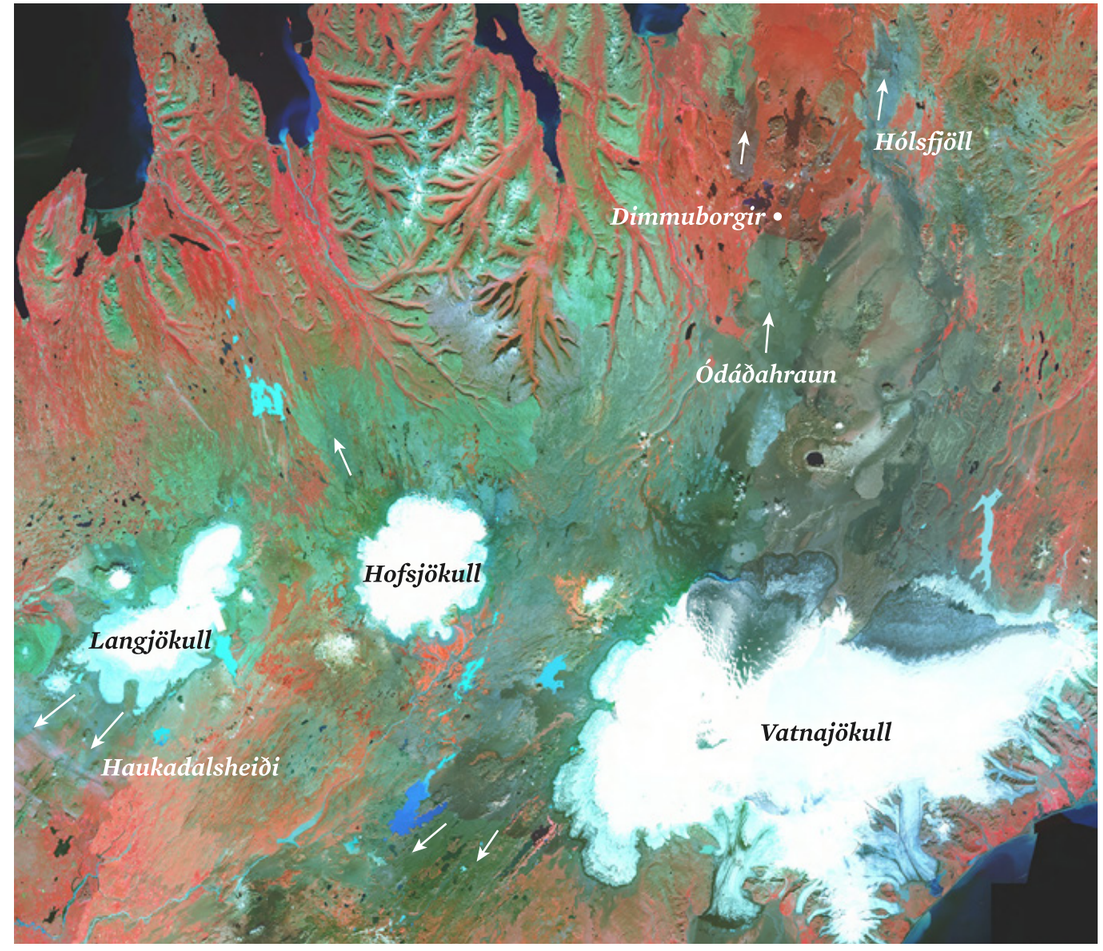
5. mynd. Spönn fyrir þröskuldsvindhraða fyrir fjórar helstu gerðir yfirborðs á sandsvæðum. Miðað er við vindstyrk í 2 m hæð og þurrar aðstæður (hækkar með vaxandi loft- og jarðvegsraka). – Threshold velocities for the main types of sandy surfaces in Iceland (wind at 2 m height). The range represents dry conditions while more humid conditions would result in higher threshold velocities than indicated. From left to right: silt, fine sand and fine glaciofluvial deposits (flæður); sand; sandy lavas and sandy lag-gravels; and lag-gravel surfaces.



6. mynd. Dæmigert hlutfall fokefna eftir hæð. Þegar 100 g hafa borist í neðstu gildruna (10 cm hæð, punktur lengst til hægri) eru um 30 g í næstneðstu gildru (30 cm hæð) o.s.frv. – Typical sandflux relative to height. When 100 g of materials are collected in the lowest dust trap (right), 30 g are collected at 30 cm height but low amounts in the trap at 150 cm height (left). The shape of the curve tends to be stable for each site regardless of storm intensities.



7. mynd. Sandfok norðvestur af Heklu; meðaltal tveggja ára (2008 og 2009). Númerin gefa til kynna mælistöðvar með Fryrear-gripgildrum. Litur gefur til kynna þekju sands í yfirborðinu. Þykkt svartra örva gefur til kynna sandburðarmagn á ári og stefnan átt sandburðar. Mest sandfok er nyrst á svæðinu þar sem vatn flytur sand inn á svæðið. – Sandflux in the area NW of Mt. Hekla, measured at 31 points. Arrows indicate direction and amount of sand each year in kg/m/yr. Sand cover indicated by colour (%). Blue lines indicate seasonally active waterways (major waterways are dark-blue, smaller are light blue). Largest amounts of sand are transported within the NE part of the area.

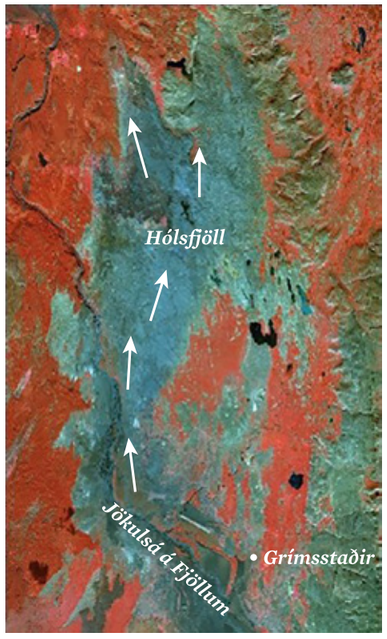


8. mynd. Innrauð gervihnattamynd af hálendi Íslands. Gróður er rauður á myndinni en auðnir grá- eða grænleitar. Örvar sýna suma af þeim áfoksgeirum sem minnst er á í greininni, svo sem sunnan Langjökuls, á Eyvindarstaðaheiði norðvestan Hofsjökuls, í jöðrum Ódáðahrauns og á Hólsfjöllum. – Infrared satellite image of Central Iceland. Arrows indicate some of the advancing sandfronts discussed in the paper.

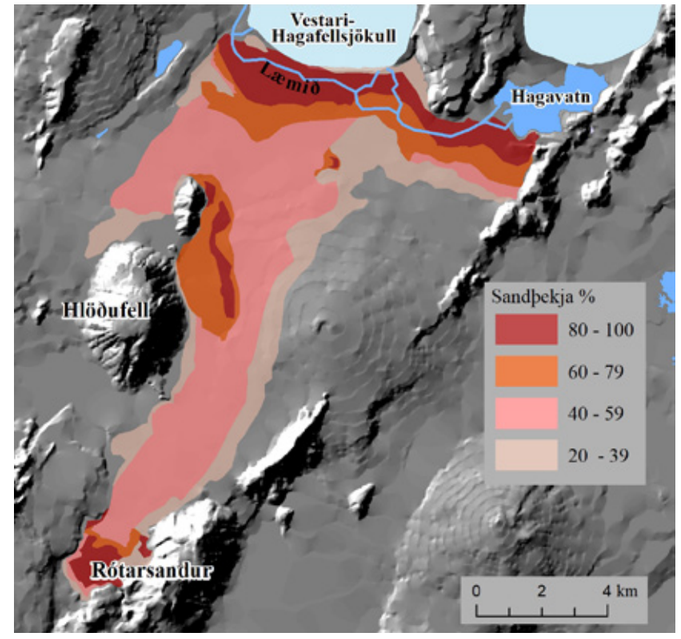
eða þar sem mikið uppfok og áfok á sér stað. Enda eru þessi landsvæði illa gróin nú á dögum, einkum á hálendi, þar sem gróður hefur verið lágvaxinn og veitt litla viðspyrnu. Áfoksgeirar sem hafa gengið suður frá Langjökli sjást vel á innrauðum gervihnattamyndum (8. mynd). Sandur hefur gengið fram beggja vegna Hlöðufells og suður á Rótarsand austan við fjallið.[38] Ummerki um áfoksgeira og sandleiðir liggja sunnan afrennslisleiða frá Hagavatni og suður af Sandvatni, sem ógnaði byggð í Biskupstungum og víðar áður en sandflaumurinn var stöðvaður. Sigurður Greipsson[39] hefur rakið þróun sandfoks á svæðinu, meðal annars með áherslu á mikilvægi mikilla flóða sem komið hafa í Farið sem rennur úr Hagavatni. Áfoksgeirarnir í Landsveit og á Rangárvöllum ollu gríðarlegu tjóni á ofanverðri 19. öld og fram á 20. öld, en þeir hafa nú verið stöðvaðir. Mikil flæmi, svo sem við Hellu og Gunnarsholt, eru nú vel gróin nytjasvæði en áður svartur sandur.[19]

Áfoksgeirar eru víða virkir í Þingeyjarsýslum. Þeir virkustu hafa þó verið girtir af og gripið til aðgerða til að hefta framrás sandsins. Hólsfjallageirinn er hvað víðfeðmastur en hann ógnaði byggð í Öxarfirði um miðja síðustu öld þegar hann var stöðvaður (9. mynd t.v.). Girt var um 300 m norðan við geirann á grónu landi árið 1954 til að friða svæðið fyrir beit. Um haustið var sandurinn kominn norður að girðingunni en var þá haminn með sáningu melgresis og öðrum aðgerðum (Sveinn Þórarinsson, munnl. uppl. 1981). Hólsfjallageirinn myndar í raun samfellda 25–30 km sandleið allt frá Jökulsá á Fjöllum á svæðinu við Grímsstaði á Fjöllum og norður undir byggð í Öxarfirði. Fokefnin hafa borist niður Jökulsá í stórflóðum en sest til þar sem straumhraði í ánni minnkar á sléttum. Síðan hafa gróf jarðvegsefni sem fyrir voru á svæðinu blandast við fokefnin (9. mynd t.h.). Nú berst ekki mikið efni inn á svæðið en sandfokið getur tekið sig upp að nýju í kjölfar flóða í Jökulsá á Fjöllum samfara eldsumbrotum undir Vatnajökli. Miklu skiptir því að efla gróðurþekju meðfram þeim svæðum þar sem fínkorna jökulárset (jökulgor, jökulgormur) sest til í stórflóðum, helst með kjarrlendi. Það er hvað virkast við að brjóta niður vind og þolir meira áfok en lágvaxinn gróður.

Sandefni (sandur og silt) berast með vatni niður á milli Bláfjalls og Sellandafjalls[40,41] og myndaði áfoksgeira sem ógnaði náttúruperlunni Dimmuborgum (sést á 8. mynd). Landgræðslan og heimamenn hafa nú stöðvað framrás þessa áfoksgeira og sums staðar er komin veruleg gróðurþekja.[42] Hólasandur er allt að 7,5 km breið tunga af lítt grónu landi sem nær frá svæðinu norðvestan Mývatns og yfir 20 km til norðurs. Upptök sandfoksins virðast vera í sendnum hjöllum syðst á svæðinu en síðan hefur ferlið undið upp á sig undan hvössum SV-áttum með þróun dæmigerðs áfoksgeira og myndun þessarar víðáttumiklu sandauðnar.



9. mynd. Áfoksgeirinn á Hólsfjöllum til vinstri á innrauðri gervihnattamynd. Hann var stöðvaður í Öxarfirði 1954. Til hægri: Moldir á svæði þar sem áfoksgeiri gekk yfir gróið land á Hólsfjöllum. Gróðurinn er dauður en ennþá fjúka moldirnar. Myndin er tekin 1993. Nú er þarna stórgrýttur melur með öllu ófær ökutæki á borð við jeppann. – Left: Infrared satellite image of the advancing sandfront Hólsfjöll in NE Iceland. The advancement was halted in 1954. Right: Soil remnants in an area where an advancing sandfront (áfoksgeiri) has stripped the vegetation and soil cover in the area. The vegetation is dead, but some soil materials remain. The area is now covered with rocky surface with limited vegetation, the soil on the picture taken 1993 has been blown away. Ljósm./Photo: Ólafur Arnalds.



10. mynd. Sandleiðin austan Hlöðufells. Sandurinn berst frá gömlum vatnsbotni og virkum flæðum jökullænunnar Læmis. Leiðin á Rótarsand er um 16 km löng.[38] – A "river of sand", 16 km long, from the edge of Langjökull to Rótarsandur sandflat.[38] Colours indicate sand cover (%).

Ummerki um áfoksgeira eru æði víða á hálendinu. Gamall áfoksgeiri gengur til dæmis norður eftir Eyvindarstaðaheiði austan Blöndu (8. mynd), en upptök sandsins eru mun sunnar. Á þessum slóðum hagar svo til að vatnsrof getur flutt gróf jarðvegsefni í lægðir, jafnvel þurrkað upp tjarnir, og þá verða til uppsprettur áfoksefna sem vindur getur gert að áfoksgeira. Á Blöndusvæðinu eru nýir áfoksgeirar sem hafa myndast eftir að Blöndulón myndaðist.[31,32] Vatnsborðið er sveiflukennt og lægst er í lóninu á vorin, en Blanda ber jökulgor út í lónið. Áfoksgeirar hafa myndast á nokkrum stöðum við norðanvert vatnið. Sanddreif er nú á um 1 km^2 í fjörum og eyjum lónsins, en mest verður fokið í nokkrum stormum sem ná meira en 20 m/s.[43]

SANDLEIÐIR

Við kortlagningu jarðvegsrofs 1991–1997, ekki síst við rannsóknir á Mývatnsöræfum og í Ódáðahrauni og sunnan Langjökuls,[40,44] varð ljóst að sandur getur fokið afar langar leiðir hér á landi – að upptök sandfoks geta verið víðsfjarri þeim stað þar sem það veldur tjóni á hverjum tíma. Ódáðahraun var mikið til gróið áður en sandur lagðist yfir einhvern tíma á miðöldum, en gjóskufall hafði einnig mikil áhrif, ekki síst öflugt þeytigos í Bárðarbungu um 1480.[44] Sandleiðir í Ódáðahrauni eru trúlega tugir kílómetra að lengd en þær eru lítið rannsakaðar. Gott dæmi um sandleið er við suðurjaðar Langjökuls að Rótarsandi (10. mynd), um 16 km leið.

LOKAORÐ

Sandauðnir eru sannarlega mikilvægur þáttur í náttúru Íslands. Sandfok hefur verið mælt víða á landinu og smám saman hefur byggst upp heildarmynd af sandfokinu. Sandfok stuðlar sums staðar að eyðingu gróðurlenda, meðal annars með myndun áfoksgeira, og veldur því að landið „fer í sand". Sem betur fer hefur tekist að stöðva helstu áfoksgeira landsins, svo sem í Landsveit, á Rangárvöllum, í Öxarfirði, við Dimmuborgir, á Mývatnsöræfum, á Haukadalsheiði og víðar.

Miklu skiptir að efla gróður landsins á þeim svæðum sem eru viðkvæmust fyrir sandfoki og þá sérstaklega þar sem gætir flóða í jökulám og þar sem má vænta gjóskufalls, ekki síst í Rangárþingi, Skaftafellssýslum og Þingeyjarsýslum. Á þeim svæðum er mikilvægt að mynda og efla frægjöfula birkiskóga og annan gróður með markvissum aðgerðum. Þetta kallar á breytta sýn á landnýtingu á viðkvæmustu svæðunum, sem tvímælalaust ætti að friða fyrir beit.

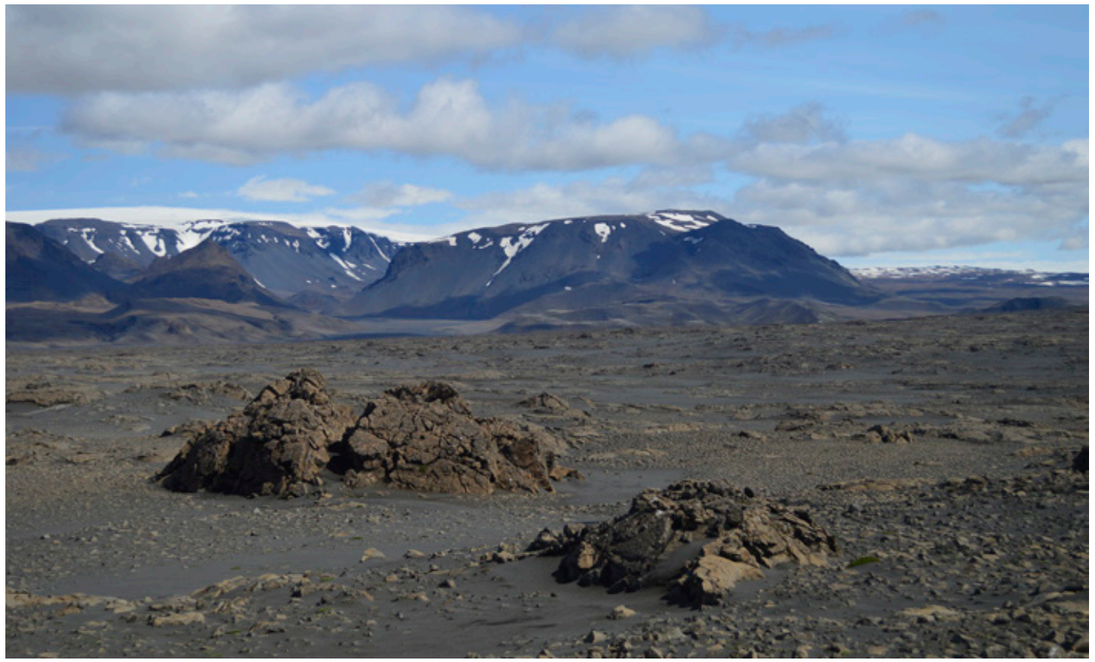
Sandauðnir landsins eru einstakar á heimsvísu. Þar kemur til sérstaða þeirra sem stærstu basaltauðnanna, gríðarlegt sandflæði og uppfok, það að þær eru stærstu auðnir utan þurra eyðimarka jarðar og stærstu auðnir norðurheimskautssvæðisins, og tilvist þeirra í röku og köldu loftslagi. Margar auðnanna eru afleiðing af samspili ágengrar landnýtingar og óblíðrar náttúru. Þar hefur land „farið í sand", sem er mjög alvarleg tegund vistkerfishruns (11. mynd). Koma þarf í veg fyrir ágang sands af fremsta megni og víða þarf að aðhafast enn frekar við endurheimt landgæða á sandsvæðum. Á móti kemur að sumar sandauðnir landsins ættu að njóta sérstakrar verndar, ekki síst þær sem eru á hálendi í nágrenni jökla. Sandauðnir innan marka Vatnajökulsþjóðgarðs eru verndaðar eins og önnur svæði þjóðgarðsins. Söndum mætti gera mun hærra undir höfði sem náttúrufyrirbrigði og landslagsheild.

Fjallað er um nokkur virkustu sandsvæðin enn frekar í annarri grein í þessu riti síðar á árinu.[4] Þar er lögð áhersla á uppfok, ryk, áfok og áhrif áfoks á vistkerfi.

ENGLISH SUMMARY

Icelandic sandy deserts and aeolian processes

This paper is one of two reviewing the nature of sandy deserts and aeolian processes in Iceland. The sandy deserts cover >20,000 km^2 or about 20% of Iceland. They are unique on global scale because of their composition being basaltic, poorly crystalized, glassy, volcanic materials and dark color, their large extent, and their existence under humid cold climates. The sandy surfaces are divided into sand fields (Icel. sandur), sandy lag-gravel, and sandy lavas. The materials of the sandy deserts include sand, silt and some clay. The flux of sand has been measured at several locations on different types of surfaces, revealing flux from a few kg up to several tons of materials that are transported over one m wide line each year or even in a single storm. The finer proportions of the sandur materials, primarily silt, become uplifted and can be transported vast distances (see accompanying paper, in print).[4] Advancing sand fronts can form where there is ample sediment supply near vegetated systems, which can totally destroy fully vegetated systems in their path. This has been one of the major forms of ecosystem collapse during the last millennia, with well documented processes in South Iceland. Sandy materials can be transported long distances (10's of km) from source areas forming unique "rivers of sand" until reaching an obstacle such as a river or a mountain. It is important to maintain strong vegetation cover near active sand sources, where ash is deposited during volcanic eruptions and where sandy materials (sand and silt) are deposited during major flooding in glacial rivers. Details on the major dust sources and dust accumulation in Iceland is given in an accompanying paper.[4]



11. mynd. Dæmigert sendið hraun í norðurhlíðum Skjaldbreiðar. Þórisjökull í baksýn. Sandurinn á upptök í jökullænum úr Langjökli og Þórisjökli. Fokefni berast einkum suður á bóginn í þurrum norðanvindum en vorleysingar bera sand aftur niður undan hallanum til norðurs og vesturs. – Sandy lava surface. Lava north of Skjaldbreiður shield volcano. Sand is also transported down the slope in large snow-thaw events during spring. Þórisjökull Glacier on the horizon to the left. Ljósm./Photo: Ólafur Arnalds.

ÞAKKIR

Þessi samantekt byggist að hluta á rannsóknum sem Rannsóknasjóður styrkti (Rannís-styrkur nr. 152248-051), og á eldri verkefnum styrktum úr Rannsóknasjóði (nr. 050207023) og Vísindasjóði Rannsóknaráðs (nr. 971020098). Landsvirkjun styrkti hluta rannsóknanna í tengslum við hönnun mótvægisaðgerða við Hálslón og rannsóknir á sandfoki við Heklu. Hjalti Sigurjónsson, Ragnhildur Sigurðardóttir, Einar Grétarsson, Haraldur Ólafsson, Pavla Dagsson-Waldhauserová, Agnes Ösp Magnúsdóttir, Sigmundur Helgi Brink, Jóhann Þórsson, Berglind Orradóttir, Ása L. Aradóttir og Harpa Kristín Einarsdóttir hafa komið að ýmsum þeim rannsóknum sem notaðar eru við gerð þessa yfirlits, auk annarra sem hér er getið í heimildalista. Þá hafa margir erlendir samstarfsaðilar komið að rannsóknunum á einhverju stigi. Öllum þessum aðilum er þakkað gott samstarf.

HEIMILDIR

1. Shepherd, G. (ritstj.) 2016. Global assessment of sand and dust storms. UN Environment Program, Nairóbí. 123 bls.
2. Ólafur Arnalds 2015. The volcanic aeolian environments of Iceland. Bls. 139–152 (11. kafli) *í:* The soils of Iceland (ritstj. Ólafur Arnalds). Springer, Dordrecht.
3. Ólafur Arnalds, Pavla Dagsson-Waldhauserová & Haraldur Ólafsson 2016. The Icelandic volcanic aeolian environment: Processes and impacts – A review. Aeolian Research 20. 176–195.
4. Ólafur Arnalds, Pavla Dagsson-Waldhauserová & Sigmundur Helgi Brink 2019. Sandauðnir, sandfok og ryk á Íslandi. II. Áfok og ryk. Náttúrufræðingurinn 2019. Í prentun.
5. Bagnold, R.A. 1941. The physics of blown sand and desert dunes. William Morrow, New York. 226 bls.
6. Chepil, W.S. & Woodruff, N.P. 1963. The physics of wind erosion and its control. Advances in Agronomy 15. 211–302.
7. Skidmore, E.L. 1994. Wind erosion. Bls. 265–293 *í:* Soil erosion research methods (ritstj. Lal, R.), 2. útg. Soil and Water Conservation Society, Ankeny.
8. Skidmore, E.L., Hagen, L.J., Armbrust, D.W., Durar, A.A., Fryrear, D.W., Wagner, L.E., & Zobeck, T.M. 1994. Methods for investigating basic processes and condition affecting wind erosion. Bls. 295–330 *í:* Soil erosion research methods (ritstj. Lal, R.), 2. útg. Soil and Water Conservation Society, Ankeny.
9. Pierson Jr., F.B. 2000. Erosion models: Use and misuse on rangelands. Bls. 67–87 *í:* Rangeland desertification (ritstj. Ólafur Arnalds & Archer, S.). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
10. Borelli, P., Montanarella, L.E. & Panagos, P. 2017. A new assessment of soil loss due to wind erosion in European agricultural soils using a quantitative spatially distributed modelling approach. Land Degradation and Development 28. 335–344.
11. Shao, Y., Raupach, M.R. & Leys, J.F. 1996. A model for predicting aeolian sand drift and dust entrainment on scales from paddock to region. Australian Journal of Soil Research 34. 309–342.
12. SRM 1992. Society for Range Management Position Statements. The Trail Boss News, desember 1992. 5.
13. Sigurður Þórarinsson 1961. Uppblástur á Íslandi í ljósi öskulagarannsókna. Ársrit Skógræktarfélags Íslands 1960–1961. 17–54.
14. Þorleifur Einarsson 1962. Vitnisburður frjógreiningar um gróður, veðurfar og landnám á Íslandi. Saga 162. 441–469.
15. Guttormur Sigbjarnarson 1969. Áfok og uppblástur. Náttúrufræðingurinn 39. 68–119.
16. Grétar Guðbergsson 1975. Myndun móajarðvegs í Skagafirði. Íslenskar landbúnaðarrannsóknir 7(1–2). 20–45.
17. Grétar Guðbergsson 1996. Í norðlenskri vist. Um gróður, jarðveg, búskaparlög og sögu. Búvísindi 1996 10. 31–89.
18. Arnór Sigurjónsson (ritstj.) 1958. Sandgræðslan. Minnzt 50 ára starfs Sandgræðslu Íslands. Búnaðarfélag Íslands og Sandgræðsla ríkisins, Reykjavík. 359 bls.
19. Friðgeir G. Olgeirsson 2007. Sáðmenn sandanna. Saga landgræðslu á Íslandi 1907–2007. Landgræðsla ríkisins, Gunnarsholti. 250 bls.
20. Jón Gunnar Ottósson, Anna Sveinsdóttir & María Harðardóttir (ritstj.) 2016. Vistgerðir á Íslandi. Náttúrufræðistofnun Íslands (Fjölrit Náttúrufræðistofnunar nr. 54), Garðabæ. 299 bls.
21. Ólafur Arnalds, Elín Fjóla Þórarinsdóttir, Sigmar Metúsalemsson, Ásgeir Jónsson, Einar Grétarsson & Arnór Árnason 1997. Jarðvegsrof á Íslandi. Landgræðsla ríkisins og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, Reykjavík. 157 bls.
22. Fryrear, D.W. 1986. A field dust sampler. Journal of Soil and Water Conservation 41. 117–121.
23. Hjalti Sigurjónsson, Fanney Gísladóttir & Ólafur Arnalds 1999. Measurements of eolian processes on sandy surfaces in Iceland. Rannsóknastofnun landbúnaðarins (Rala Report / fjölrit Rala nr. 201), Reykjavík. 27 bls.
24. Ólafur Arnalds, Fanney Ósk Gísladóttir & Berglind Orradóttir 2012. Determination of aeolian transport rates of volcanic soils in Iceland. Geomorphology 167–168. 4–12.
25. Elín Fjóla Þórarinsdóttir & Ólafur Arnalds 2012. Wind erosion of volcanic materials in the Hekla area, South Iceland. Aeolian Research 4. 39–50.
26. Ólafur Arnalds, Elín Fjóla Þórarinsdóttir, Jóhann Þórsson, Pavla Dagsson-Waldhauserová & Anna María Ágústsdóttir 2013. An extreme wind erosion event of the fresh Eyjafjallajökull 2010 volcanic ash. Nature Scientific Reports 3. 1257. doi: 10.1038/srep01257
27. Ólafur Arnalds, Elín Fjóla Þórarinsdóttir, Jóhann Þórsson & Anna María Ágústsdóttir 2011. Hvað varð um öskuna frá Eyjafjallajökli? Fræðaþing landbúnaðarins 2011. 43–49.
28. Elín Fjóla Þórarinsdóttir, Sigríður Þorvaldsdóttir & Þór Kárason 2017. Dimmuborgir. Úttekt á gróðurfari og jarðvegsrofi. Landgræðsla ríkisins (Lr 2017/34), Gunnarsholti. 26 bls.
29. Maun, M.A. 1998. Adaptations of plants to burial in coastal sand dunes. Canadian Journal of Botany 76. 713–738.
30. Ólafur Arnalds 2013. The influence of volcanic tephra (ash) on ecosystems. Advances in Agronomy 121. 331–380.
31. Olga Kolbrún Vilmundardóttir 2009. Umhverfisbreytingar við Blöndulón. Strandrof og áhrif áfoks á gróður. MS-ritgerð í landfræði við líf- og umhverfisvísindadeild Háskóla Íslands.
32. Olga Kolbrún Vilmundardóttir, Borgþór Magnússon, Guðrún Gísladóttir & Sigurður H. Magnússon 2009. Áhrif sandfoks á mólendisgróður við Blöndulón. Náttúrufræðingurinn 78. 125–137.
33. Olga Kolbrún Vilmundardóttir, Borgþór Magnússon, Guðrún Gísladóttir & Þröstur Þorsteinsson 2009. Shoreline erosion and aeolian deposition along a recently formed hydro-electric reservoir, Blöndulón, Iceland. Geomorphology 114. 542–555.
34. Harpa K. Einarsdóttir 2007. Áhrif áfoks á gróður. MS-ritgerð við líf- og umhverfisvísindadeild Háskóla Íslands.
35. Ása L. Aradóttir, Ólafur Arnalds & Harpa Kristín Einarsdóttir 2011. Áfokstilraunir. Bls. 89–110 *í:* Gróðurrannsóknir vegna hættu á áfoki frá Hálslóni (ritstj. Ólafur Arnalds, Ása L. Aradóttir & Kristín Svavarsdóttir). Landbúnaðarháskóli Íslands (rit nr. 27), Hvanneyri.
36. Evans, R.D., Gill, R.A., Eviner, V.T. & Bailey V. 2017. Soil and below ground processes. Bls. 131–168 *í:* Rangeland systems: Processes, management and challenges (ritstj. Briske, D.D.). Springer Open, Cham.
37. Bland, L.M., Rowland, J.A., Regan, T.J., Keith, D.A., Murray, N.J., Lester, E.R., Linn, M., Rodríguez, J.P. & Nicholson, E. 2018. Developing a standardized definition of ecosystem collapse for risk assessment. Frontiers in Ecology and the Environment 16. 29–36.
38. Fanney Ósk Gísladóttir, Ólafur Arnalds & Guðrún Gísladóttir 2005. The effect of landscape and retreating glaciers on wind erosion in South Iceland. Land Degradation & Development 16. 177–187.
39. Sigurður Greipsson 2012. Catastrophic soil erosion in Iceland: Impact of long-term climate change, compounded natural disturbances and human driven land-use changes. Catena 98. 41–54.
40. Ólafur Arnalds 1992. Sandleiðir á Norðausturlandi. Bls. 145–149 *í:* Græðum Ísland IV (ritstj. Andrés Arnalds). Landgræðsla ríkisins, Gunnarsholti.
41. Ragnhildur Sigurðardóttir 1992. Áfok sands í austanverðri Mývatnssveit. Sandburður í Dimmuborgir. BS-ritgerð við jarðfræðiskor Háskóla Íslands.
42. Elín Fjóla Þórarinsdóttir 2010. Landscape scale measurements of wind erosion of volcanic materials in the Hekla area. MS-ritgerð við Landbúnaðarháskóla Íslands. 129 bls.
43. Borgþór Magnússon & Sigmar Metúsalemsson 2017. Vöktun á gróðri og strönd við Blöndulón. Áfangaskýrsla 2017. Náttúrufræðistofnun Íslands (NÍ-17001 og LV-2017/042), Garðabæ.
44. Ólafur Arnalds 1992. Jarðvegsleifar í Ódáðahrauni. Bls. 159–164 *í:* Græðum Ísland IV (Ritstj. Andrés Arnalds). Landgræðsla ríkisins, Gunnarsholti.

UM HÖFUNDA

Ólafur Arnalds hefur lokið BS-prófi í jarðfræði við Háskóla Íslands, MS-prófi í jarðvegsfræði við Montana State University og hlaut PhD-gráðu frá Texas A&M University árið 1990. Hann hefur starfað sem sérfræðingur á sviði jarðvegsfræða, landnýtingar og landhnignunar allt frá 1980. Hann hafði forystu í vinnu við kortlagningu jarðvegsrofs í landinu öllu á árunum 1991–1998 en hefur beint sjónum að ryki á síðustu árum. Ólafur var sérfræðingur hjá Rannsóknastofnun landbúnaðarins með hléum frá árinu 1980, samfellt árin 1990–2005 en síðan sem prófessor við Landbúnaðarháskóla Íslands frá stofnun hans árið 2005.

Elín Fjóla Þórarinsdóttir lauk BS-prófi í landafræði við Háskóla Íslands árið 1993 og MS-prófi í landgræðslufræðum við umhverfisdeild Landbúnaðarháskóla Íslands árið 2010. Elín Fjóla hefur starfað sem sérfræðingur hjá Landgræðslu ríkisins frá árinu 1993 á sviði landupplýsinga og kortagerðar, og unnið að rannsóknum á vindrofi og áfoki.

Fanney Ósk Gísladóttir lauk BS-prófi í landafræði við Háskóla Íslands 1990 og MS-prófi í landafræði við sama skóla árið 2000. Hún er lektor við Landbúnaðarháskóla Íslands og sinnir rannsóknum og kennslu á sviði kortafræða og landupplýsingakerfa. Fanney hefur m.a. sinnt rannsóknum á sandfoki og jarðvegsrofi og vinnur að uppbyggingu gagnagrunna um landnot.

PÓST- OG NETFÖNG HÖFUNDA / AUTHORS' ADDRESSES

Ólafur Arnalds
Landbúnaðarháskóla Íslands
Árleyni 22, Keldnaholti
IS-112 Reykjavík
oa@lbhi.is
www.moldin.net

Elín Fjóla Þórarinsdóttir
Landgræðslunni
Gunnarsholti
IS-851 Hellu
elinfjola@land.is

Fanney Ósk Gísladóttir
Landbúnaðarháskóla Íslands
Árleyni 22, Keldnaholti
IS-112 Reykjavík
oa@lbhi.is