



17

**Sandur og ryk móta
náttúru alls landsins**



Mynd 17.1. Hin íslenska sandauðn. Svartir basaltsandar af þessu tagi eiga vart sína líka á jörðinni. Tungnaá í baksýn. Myndin er tekin í grennd við Jökulheima.

17.1. Hvað er sandur?

Hugtakið „sandur“ getur haft fleiri en eina merkingu. Í fyrsta lagi miðast skilgreining á sandi við ákveðna kornastærð sem er 0,05–2 mm í þvermál. En með sandi er líka átt við yfirborðsgerð – sendin svæði – þar sem eru laus jarðefni í yfirborði með háu hlutfalli af sandefnum, yfirborði þar sem vindrof getur átt sér stað. Kornastærðin er iðulega nokkuð breið, eitthvað er um leir, mikið um silt, auk efna sem flokkast undir sand og eru alla jafna ráðandi, en þó eru korn af stærðinni silt meginhluti efnis á sumum söndum. Hér er átt við umhverfi sem nefnt er „sandy deserts“ eða „aeolian environments“ („fokumhverfi“) á ensku. Sand- eða fokumhverfi er viðfangsefni sérstakrar fræðigreinar sem margt fagfólk hefur helgað krafta sína. Alþjóðlega er fokumhverfið einkum að finna á þurrkasvæðum jarðar, en einnig við strendur hafs og vatna sem og á heimskautasvæðunum.

Íslenska sandumhverfið er afar sérstætt á heimsvísu vegna þess að hérlendis er loftslagið fremurrakt og sums staðar ansi

blautt, en einnig er basísk samsetning sandsins fremur óvenjuleg. Sandauðnir landsins eru stærstu basalt-sandauðnir veraldar. Annars staðar í heiminum er kvarssandur yfirleitt ráðandi en einnig finnast sandauðnir sem eru ríkar af gifsi o.fl. (mynd 17.2 til hægri; kalsíumsúlfat). Íslensku sandarnir eru einnig sérstæðir fyrir það hve yfirborðsferlin eru virk; sandfokið er mjög mikið og stöðugt, enda er veðurfar á Íslandi sértaklega vindasamt í miðri lægðabraut Norður-Atlantshafsins. Þá verður stöðugt til nýr sandur sem bætir efni í þær námur sem fyrir eru. Uppfok ryks á Íslandi er með því mesta sem þekktist í heiminum.

17.2. Flokkun sandauðna á Íslandi

Sandauðnir landsins eru samtals yfir 20 þúsund ferkílómetrar. Þær voru kortlagðar þegar unnið var að rannsóknum á jarðvegsrofi á Íslandi og niðurstöður þeirra birtar árið 1997 (ÓA o.fl. 1997). Síðar voru þær kortlagðar frekar með flokkun Nyttjalds (Fanney Gísladóttir o.fl. 2014) og vistgerða-



Mynd 17.2. Svört íslensk sandauðn t.v. og mjallahvítur gifssandur í White Sands National Park í Nýju-Mexíkó í Bandaríkjunum t.h. Myndin til vinstri er frá Tungnaáröræfum. Mynd t.h.: Ása L. Aradóttir.

flokkun Náttúrufræðistofnunar Íslands (Jón Gunnar Ottósson o.fl. 2016). Sandauðnir falla undir lítt gróið land samkvæmt þeirri flokkun sem mótuð var við kortlagninguna á jarðvegsrofi og er skipt í þrjár yfirborðsgerðir: „sanda“, „sandmela“ og „sandhraun“. Að auki má nefna skeljasandsfjörur og meginuppsprettur ryks, sem fjallað er um hér á eftir. Yfirborðinu var jafnframt gefin einkunn eftir virkni rofs, 3 fyrir talsvert rof, 4 fyrir mikið rof og 5 fyrir mjög mikið rof.

Sandar hafa tiltölulega slétt yfirborð sem yfirleitt er mjög hætt við vindrofi (einkunn 4 og 5). Dæmi um sanda eru t.d. Dyngjusandur, Mýrdalssandur og fjöru-sandarnir meðfram suðurströndinni.

„Sandmelar“ (sendnir melar) eru svæði þar sem sandur hefur borist í mela en grjót er ennþá í yfirborðinu, sem vitaskuld minnkar hættu á vindrofi. Þetta er algengasta gerð sendins yfirborðs hérlendis, samtals um 13 000 km², að stórum hluta á hálendi landsins, t.d. við Sprengisandsleið. Frostlyfting á mül stuðlar að þróun svæðanna þar sem hún lyftist jafnharðan og meiri sandur berst út yfir sandmelana með áfoki.

Sandhraun eru svæði þar sem laus sandur hefur borist í hraun, og þá teljast þau sendin hraun – sandhraun. Þau eru algeng á eldvirka belt landsins, t.d. í nágrenni Heklu, sunnan og vestan Langjökuls og á Norðausturlandi, t.d. í Ódáðahrauni. Það er afar misjafnt hversu úfin hraunin eru, en þau geta safnað ókjörum af sandi á meðan þau eru að fyllast, ekki síst apalhraunin. Helluhraun veita minni viðspyrnu gegn ágangi sands. Dæmi um þessar mismunandi yfirborðsgerðir sendins yfirborðs eru sýnd á mynd 17.3 og einnig fylgir kort sem sýnir útbreiðslu þessara svæða (mynd 17.4). Eins og áður sagði finnast tvær sendnar yfirborðsgerðir hér til viðbótar auk

Áhrifaríkar og einstakar íslenskar auðnir

Í riti um mold og þætti sem móta umhverfi landsins er full ástæða til að fjalla um sanda á Íslandi í sérstökum kafla. Áhrif þeirra á mótun vistkerfa eru afgerandi því þeir leggja til stærstan hluta þess áfoks sem hefur lagst eins og teppi yfir mestan hluta landsins.

Moldin hefur síðan þróast í þessa „ábreiðu“ allt frá upphafi nútíma þegar ísa leysti samtímis því sem yfirborð landsins hefur hækkað vegna áfoksins. En þetta er ekki eina ástæðan fyrir því að fjalla sérstaklega um sand – sandauðnir eru afskaplega útbreiddar á Íslandi en teljast um leið sérstæð landform sem eiga sér fáar hliðstæður annars staðar í heiminum. Áhrif foks frá auðnum landsins ná ekki aðeins til moldarinnar; þau eru raunar afar fjölbreytileg.

Rykið er líklegt til að hafa jákvæð áhrif á frjósemi hafsvæðanna í nágrenni landsins. Neikvæð áhrif ryks geta verið mikil; ryk er t.a.m. skaðlegt heilsu fólks. Dökk basísk rykkorn flýta fyrir bráðnun jökla, þau hafa áhrif á skýjamyndun í háloftunum og endurkast sólarljóss í andrúmsloftinu. Segja má að íslenskt ryk hafi áhrif á veðurfar vilt og breitt um norðurhvel jarðar. Nýlegar heimildir um rannsóknir á söndum og ryk á Íslandi er að finna á heimasíðu Rykrannsóknafélags Íslands (IceDust).

sanda, sandmela og sandhrauna. Í fyrsta lagi skeljasandsfjörur sem er einkum að finna á Vesturlandi og Vestfjörðum. Þær geta haft umtalsverð áhrif töluvert út fyrir fjörusandinn vegna foks. Hins vegar eru það „ofuruppsprettur“ svifryks og áfoks (e. dust hotspots), eða „meginuppsprettur“ eins og þær eru nefndar í greinum í Náttúrufræðingnum (ÓA o.fl. 2019a,b). Þar hefur safnast fyrir mjög mikið af fínu seti, einkum silti, sem er einkar hætt við vindrofi.

Eiginlega dugir enginn rofskali til að lýsa ofurvirkni þessara svæða, enda eru þau meðal mikilvirkustu rofsvæða og uppspretta ryks í heiminum. Meginuppsprettur eru merktar inn á kortið á mynd 17.4, en fjallað er um þær sérstaklega síðar í kaflanum, enda eru áhrif þeirra á náttúru landsins mikil.



A



B



C



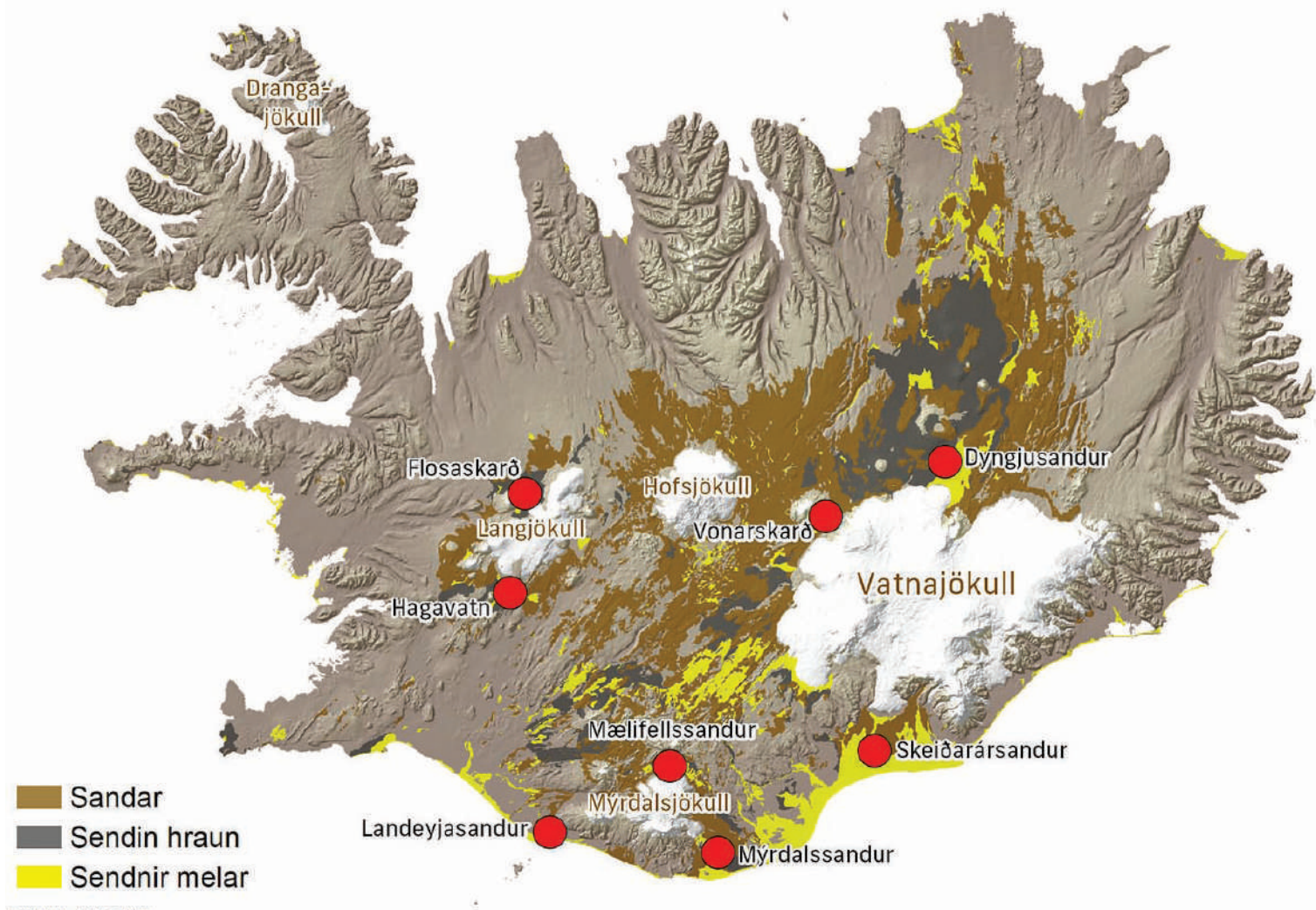
D

Mynd 17.3. **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 þrúka 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.

17.3. Hugtök og ferli

Sendin svæði eru ákaflega dýnamísk, yfirborðið breytist í sífellu. Þar eiga sér stað mörg ferli sem móta nærumhverfið og hafa áhrif á vistkerfi á landi og á sjó, á svæðum sem verða fyrir áfoki. Vindrof er ráðandi ferli á sandsvæðum, en vatnsrof getur einnig verið mjög mikið, ekki síst í snjóbráð og þegar úrkomuatburðir verða á frosinni jörð (sjá kaflann um kulferli). Að auki geta bæst við efni sem áfok eða sem set sem berst með vatni, t.d. í flóðum.

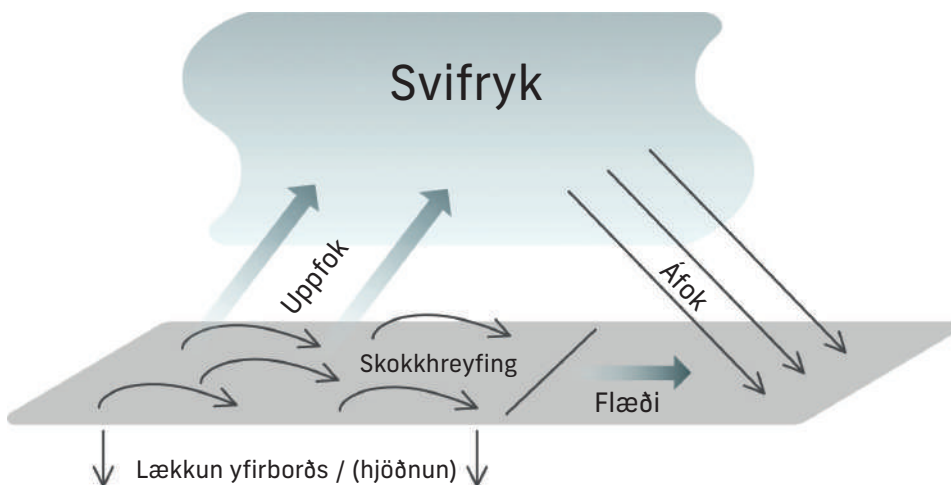
Korn hreyfast með þrenns konar hætti með vindi. Þau minnstu geta borist með lofti (loftborin) og mynda þá svifryk, en stærsti hluti kornanna hreyfist yfirleitt með þeim hætti að þau skoppa á yfirborðinu (stökkhreyfing, skokkhreyfing, e. saltation) vegna sífelldra árekstra þegar þau skella aftur niður á jörðina. Vindurinn ljær kornunum hreyfiorku sem síðan ýtir við mörgum þeirra þegar þau skella á jörðinni á ný. Þetta eru aðallega sandkorn og grófkorna silt. Stærri korn geta mjakast með jörðinni vegna



Mynd 17.4. Útbreiðsla mismunandi yfirborðsgerða sands á Íslandi og meginuppsprettur ryks.

sífelldra árekstra annarra korna, en í frekar litlu magni miðað við þau korn sem ferðast með skokkhreyfingu („skrið“, e. creep). Gerð er tilraun til þess að skýra helstu ferli og hugtök er varða sandumhverfið á mynd 17.5.

Eitt meginéinkenni sandauðna í veröldinni eru sandöldur (mynd 17.6), sem eru í raun hægfara bylgjuhreyfing sands undan þurrum vindáttum þar sem mikill sandur er til staðar og hefur verið lengi. Þær eru fremur óalgengar á Íslandi en finnast þó t.d. á Hólsfjöllum, skammt austan við Dettifoss (við gíginn Kvensöðul), sem og á Hafnarsandi við Þorlákshöfn þar sem þær hafa verið græddar upp að mestu.



Mynd 17.5. Sandfok, helstu ferli og hugtök. Stærsti hluti kornanna hreyfist með skokkhreyfingu (e. saltation). Magn þess efnis sem berst með yfirborðinu í sandfoki er hægt að mæla sem flæði, t.d. sem magn sem berst yfir eins metra breiða línu (kg/m), jafnvel á tilteknum tíma (kg/m/klst). Við sandfok getur yfirborðið lækkað (hjððnun, e. deflation).

Finefnin berast upp í andrúmsloftið (e. suspension) sem uppfok (e. dust emission) og mynda þar svifryk (e. dust eða atmospheric dust) sem síðan verður að áfoki þegar það sest á yfirborðið. Myndin er fengin úr Náttúrufræðingnum (ÓA o.fl. 2019a).

Þröskuldsvindhraði

Vindrof hefst yfirleitt við tiltekinn vindhraða, svokallaðan þröskuldsvindhraða (e. threshold velocity), sem er ákaflega breytilegur eftir yfirborðsgerð. Lægstur er hann á svokölluðum meginuppfoksstöðum (e. dust hotspots) þar sem kornastærðin er að meginhluta fíngert silt, iðulega orðið til við 4–8 m/s vind sem er mældur í 2 m hæð. Á söndunum er þröskuldsvindhraði oft 5–9 m/s en á sandmelum 8–18 m/s eftir aðstæðum. Flæðið stigmagnast eftir því sem vindhraði eykst á hverjum stað (veldisvöxtur).

Með því að kunna skil á kornastærð og yfirborðshrjúfleika sandsvæða er hægt að nýta líkön sem gerð hafa verið fyrir vindrof til að reikna út áætlað sandfok miðað við tilteknar veðurfarsaðstæður. Einnig er hægt að spá fyrir um hugsanlegt magn svífryks, sem nú er einmitt reiknað á alþjóðlegum veðurstofum fyrir flest sandsvæði veraldar, m.a. Ísland, og viðvaranir birtar ef þörf krefur.

17.4. Sandflæði og áfoksgeirar – landið fer í sand

17.4.1. Hvað getur sandflæði verið mikið?

Rannsóknir undanfarna áratugi hafa varpað ljósi á eðli sandfoks í landinu – og það var margt sem kom á óvart. Mælingar víða um landið hafa m.a. sýnt að flæði sands á sandsvæðum nemur iðulega mörg hundruð kílóum yfir eins metra breiða línu á ári hverju.

Á óstöðugustu sandsvæðunum, eins og á Landeyjasandi og Dyngjusandi, nemur flæðið mörgum tonnum yfir eins metra breiða línu á ári (t/m á ári), og sem stundum verður jafnvel í einum stormi. Þetta er vitaskuld mjög háð yfirborðsgerð og aðgengi að fíngerðum sandefnum. Elín Fjóra Þórarinsdóttir og ÓA (2012) gerðu rannsóknir á Heklusvæðinu sem sýndu að flæðið gat numið frá fáum kílóum til nokkurra tonna yfir einn metra á ári og var einna mest þar sem vatn flutti að sandefni sem síðan f auk undan þurrum norðlægum áttum. Svo mikið magn fokefna í sandbyljum verður að teljast nokkurt undrunarefni og sýnir að yfirborð sanda hérlendis eru



Mynd 17.6. „The Great Sand Dunes“ í Kólóradó í Bandaríkjunum. Öldurnar ná yfir 200 m hæð. Þær hafa myndast á þúsundum ára við uppblástur á sléttum með sendnum jarðvegi vestan við öldusvæðið og sandurinn safnast upp í dalsmynni þar sem Klettafjöllin taka að rísa austan við slétturnar. Sandöldurnar eru nú friðaðar og innan sérstaks þjóðgarðs.

meðal virkustu slíkra svæða á jörðinni. Mælingarnar varpa m.a. ljósi á það hve mikil eyðilegging getur orðið af sandbyljum og hvernig sandauðnir geta breiðst út smám saman með tímanum ef uppspretta sands er nægileg, t.d. í nágrenni við jökla, eldfjöll og jökulár.

Gjóska sem fellur á ógróið yfirborð er óstöðug, rétt eins og fínkorna sandur á uppfoxsstöðum. Einn öflugasti sandbylur sem mælst hefur á jörðinni átti sér stað á Skógaheiði í kjölfar eldgossins í Eyjafjallajökli (ÓA o.fl. 2013). Þar náði rokið 22,5 m/s meðalvindhraða og hviður voru allt að 38,7 m/s. Sandflæðið mældist um 6 000 kg/m/klst á meðan stormurinn var hvað ákafastur og sandflæðið virðist hafa mettast við u.þ.b. 30 m á sekúndu (þar sem grafið á mynd 17.7 beygir af). Afar sjaldgæft er að geta framkvæmt mælingar við náttúrulegar aðstæður sem sýna slíka mettun – en hún er í samræmi við líkanagerð fyrir vindrof. Heildarflutningur efnis var um 9 000 kg/m á 6 klukkutímum sem verður að teljast ógnarlega mikill setburður.

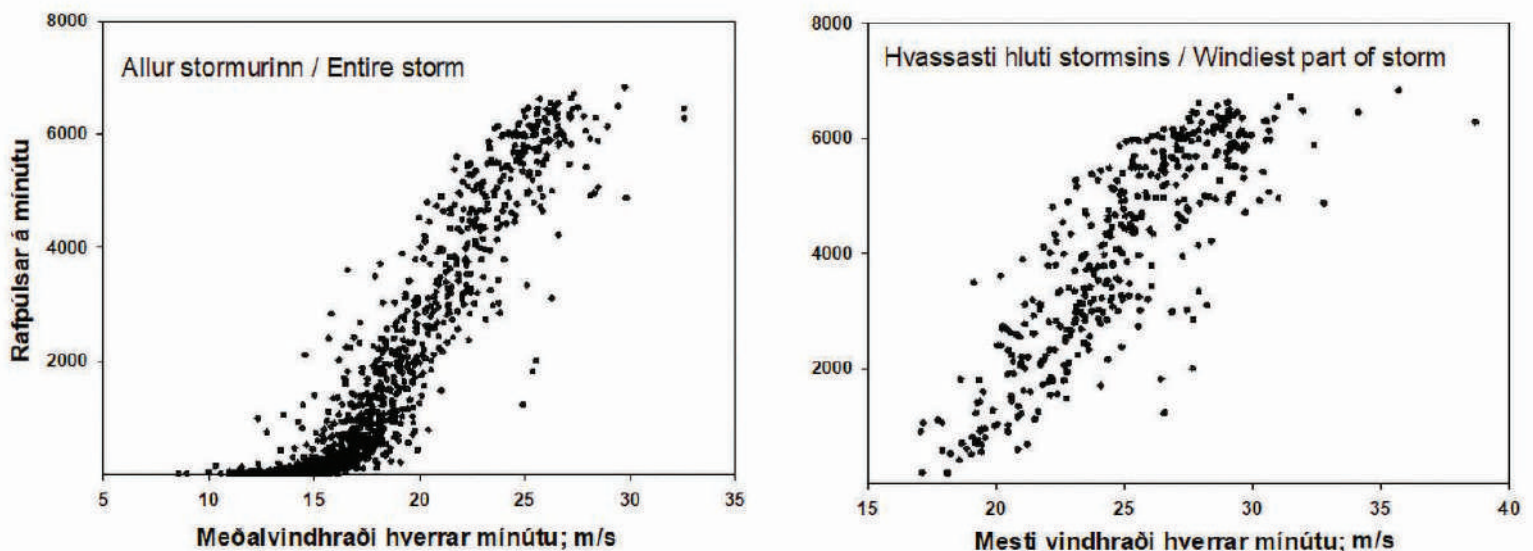
17.4.2. Áfoksgeirar – landið fer í sand

Öflugt sandfok sem berst inn yfir gróið land kæfir gróðurlendið sem fyrir er. Við það bætast jarðvegsefnin sem voru

undir gróðurmottunni smám saman við mengi sandefnanna sem berst áfram undan ráðandi þurrum vindáttum. Yfirborðið lækkar sem nemur þykkt jarðvegsins, oft um 0,5–1,5 metra, þar til jökulurðin eða hraunið sem fyrir var á svæðinu blasir við. Sífelld bætist við meira af jarðvegsefnum eftir því sem braut sandefna og moldar lengist undan vindinum – það verða eins konar snjóboltaáhrif, ferlið vindur upp á sig.

Ferlið myndar svokallaða áfoksgeira, sem eru tungulaga sandsvæði eða auðn sem teygir sig inn í gróið land. Þar sem nóg er af sandefnum og grófum jarðvegsefnum geta þeir gengið ákaflega hratt fram, jafnvel svo nemur tugum eða hundruðum metra á ári þar sem áfoksgeirinn skerst inn í gróðurlendið. Eftir að ferlið hefur tekið sinn toll af vistkerfunum situr sandauðnin eftir.

Landgræðslan var stofnuð í upphafi sem Sandgræðslan árið 1907, einmitt til þess að sporna við ágangi sands, m.a. á Rangárvöllum og í Landsveit. Þar höfðu tugir sveitabæja grafið undir sand og farið í eyði í mögnuðum sandbyljum, ekki síst á ofanverðri 19. öld (mynd 17.8, rústir). Einnig er talað um áfoksgeira í 19. kafla þar sem fjallað er um jarðvegsrof á Íslandi.



Mynd 17.7. Sandbylurinn á Skógaheiði. Graf.



Mynd 17.8. Sandauðn í Landsveit, sunnarlega í megináfoksgeirunum frá Þjórsá. Landið er komið í sand en þó eru leifar moldar sem fyrir var ennþá eftir á svæðinu. Fremst sést bæjarstæðið á Tjörvastöðum. Skarðsfjall er fyrir miðri mynd og Búrfell t.h. Fjöldi bæja „fóru í sand“. Unnin voru mikil afrek á þessum tíma við að stöðva framrás sandsins, m.a. með hleðslu sandvarnargarða, sáningu melgresis o.fl. Ferðamaður nútímans sem á leið um svæðið áttar sig ekki á þeim hamföllum sem þarna áttu sér stað. Mikilvægt er að koma í veg fyrir áföll af þessu tagi með því að klæða sandsvæði sem þessi með birkiskógi. Ljósmynd G.E. Flensborg 1905. Birt með leyfi Skógræktarinnar.

Áfoksgeirarnir

Mikilvægi áfoksgeira við þróun vistkerfa á Íslandi síðasta árbúsundið verður seint ofmetið. Þetta ferli er ábyrgt fyrir stórum hluta þeirrar eyðingar vistkerfa á landinu sem leitt hefur til myndunar auðna.

Eyðing skóga og ofbeit stuðluðu að myndun og þróun áfoksgeiranna. Flestir áfoksgeirar landsins hafa nú verið stöðvaðir, sem verður að teljast meðal mikilvægustu verkefna landsmanna í náttúruvernd á umliðnum öldum. Það var áður gert með sáningu melgresis og fyrirhleðslum, oftast úr grjóti í upphafi en seinna með timbri og bárujárnri og öðru því sem að gagni mátti koma. Ummerki þessara garða sjást ennþá víða þar sem nú er gróið land í Landsveit og á Rangárvöllum (mynd 17.9). Saga baráttunnar við sandinn hefur m.a. verið rakin í bókinni *Sáðmenn sandanna* (Friðgeir Olgeirsson 2007) og í mörgum greinum í árbókum sem Landgræðsla ríkisins gaf út um margra ára skeið í ritstjórn Andrésar Arnalds og nefnast *Græðum Ísland*.

Ummerki um áfoksgeira sjást vel á gervihnattamyndum, leifar þeirra eru iðulega tungulaga svæði með löngum beinum línum sem snúna undan þurru vindáttinni þar sem sandurinn hefur sorfið meðfram börðunum (mynd 17.9). Áfoksgeirar eiga sér yfirleitt uppruna í

gjöfum upptakasvæðum sands, svo sem í lægðum þar sem jökulár skila af sér seti í flóðum eða í lægðum þar sem jarðvegsefni hafa safnast fyrir vegna jarðvegsrofs í umhverfinu.

Íslenskan býr yfir ágætu hugtaki yfir afar mikilvægt ferli landhnignunar þegar land verður sandi að bráð – landið „fer í sand“. Þetta hefur verið nefnt „sandification“ á ensku og lýsir umhverfisbreytingum sem verða þegar gróf fokefni berast inn yfir svæði og breyta eða eyða þeim vistkerfum sem fyrir eru. Þetta getur líka gerst við tap á finefnum á borð við leir vegna endurtekens vind- og vatnsrofs, þannig að sandur verður smám saman meginkornastærð tiltekens svæðis (sjá rammagrein: Að fara í sand).

Við það að landið fer í sand verða miklar breytingar á vistkerfum. Sandur hvorki bindur né miðlar vatni. Breytingum sem verða þegar land fer í sand má lýsa sem fullkomnu hrúni vistkerfa (sjá einnig 20. kafla). Moldin missir hæfileika sinn til þess að miðla vatni og næringarefnum; aðstæður eru sannarlega aðrar en



Mynd 17.9. Gamli sandvarnargarðar hlaðnir úr grjóti.

áður var. Slík svæði eru mjög viðkvæm fyrir raski enda þótt takist að koma á gróðurhulu ofan á sandinn og þau ættu tvímælalaust að njóta sérstakrar verndar fyrir landnýtingu.

Þar sem tekist hefur að stöðva sandinn, t.a.m. á Rangárvöllum, í Landsveit og víðar, er mikilvægt að endurheimta birkiskógana sem áður einkenndu flest þessara svæða. Birkiskógurinn þolir áföll á borð við gjóskufall sem er óhjákvæmilegt á þessum svæðum og hann hefur djúpstætt rótarkerfi sem breytir dreifingu og nýtingu vatns í vistkerfinu. Mikið kolefni safnast fyrir í mold birkiskóga og því breytast slík kerfi smám saman úr því að vera viðkvæm sendin kerfi í öflug vistkerfi með frjóa mold.

17.4.3. Sandleiðir

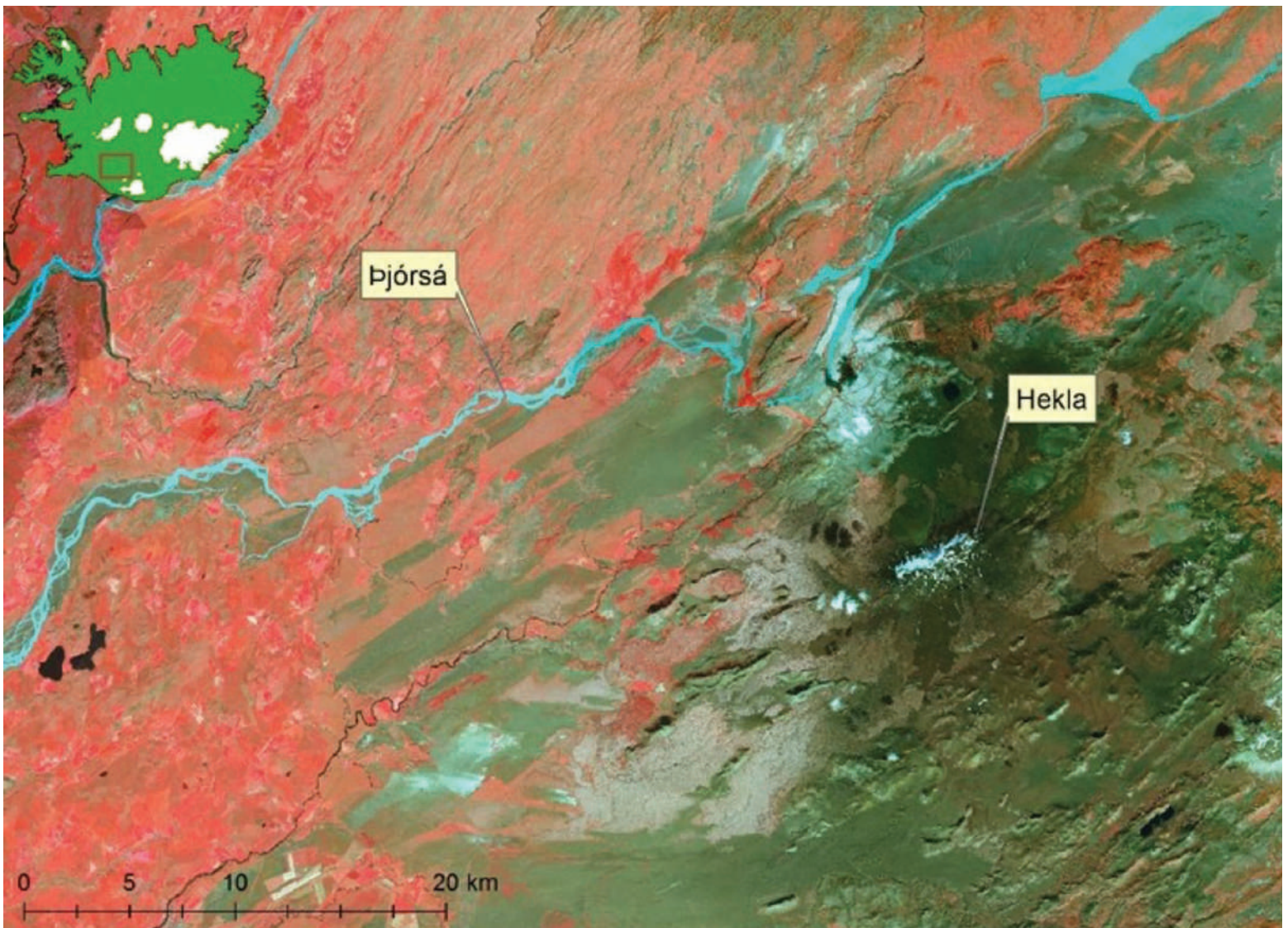
Þar sem sandur er afar óstöðugt efni á yfirborði landsins getur hann flætt langar leiðir undan þurrum vindáttum. Við það geta myndast eins konar farvegir sandflæðis, svokallaðar sandleiðir.

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 manna fyrst að gróðurþáttum, svo sem þekju og tegundum gróðurs, þegar miklar vistkerfisbreytingar eiga sér stað. Moldarþættirnir eru þó ekki síður mikilvægir. 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 alla jafna 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 vatnspurrð 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. 2018 á vistkerfishruni). Því geta áhrif áfoksgæira verið örlagarík og hefur ferlið stundum verið nefnt „sandification“ á ensku.



Mynd 17.10. Útlínur áfoksgeira sjást vel á innrauðum gervihnattamyndum þar sem gróðurinn kemur fram með rauðum lit. Ummerki um nokkra mjög stóra áfoksgeira markast af hinum beinu línunum bæði í Landsveit og á Rangárvöllum. Gervihnattamynd, NASA.

Þær geta orðið æði langar – sandurinn getur borist tugi km frá upprunastað. Þannig eru t.a.m. afar langar sandleiðir sem bera fokefni um Ódáðahraun til Mývatnssveitar.

Sums staðar er rennandi vatn, sem verður til við asahláku á frosinni jörð, hluti af ferlinu, en það skilar sandi niður dali og gilskorninga út á sléttlendi. Þetta kom m.a. vel í ljós í rannsóknum Elínar Fjólú Þórarinsdóttur og ÓA (2012) á Heklusvæðinu. Þar sem vatnið skilar af sér sandburðinum verður til ný uppspretta fokefna þaðan sem þau fjúka síðan áfram. Þannig hagar m.a. til við Dimmuborgir í Mývatnssveit (mynd 17.11) þar sem sandurinn er langt að kominn og vatnsrof er einnig virkur liður í ferlinu.

17.4.4. Kornastærðin breytist

Sem áður sagði hafa sandar ákaflega breytilega kornastærð. Á upprunastöðum sandfoks, t.d. á flæðum framan við jökla, er kornastærðin breið, eitthvað er af leirefnum (<0,002 mm), mikið af siltefnum (0,002–0,05 mm) og talsvert af sandi (0,05–2 mm). Við sandfok skokka stærri efnin (sandur og gróft silt) með jörðinni (e. saltation) en finni efnin takast á loft og mynda ryk.

Eftir því sem lengra dregur frá upptökunum hefur stærri hlutdeild fínefna tapast úr kerfinu með uppfoki, en eftir situr æ stærri hlutdeild sands. Þegar komið er langt frá upptökum (margir km eða tugir km) er kornastærðin að mestu sandur. Þó berst eitthvað af

fínefnum sem áfok inn yfir sandsvæðin, þaðan sem þau geta fokið upp á ný.

Mikil svörfun á sér stað við sandfok, kornin rúnnast smám saman, sem einnig skilar einhverju af fínefnum í mengi fokefnanna. Rannsóknir hafa ennfremur sýnt að örefni sitja utan á silt- og sandkornum sem losna við núninginn sem verður við vindrof (Richards-Thomas o.fl. 2020). Því eru fínefni enn til staðar sem geta fokið upp sem ryk frá sandsvæðum sem eru fjarri upptökum sands, sérstaklega í mjög hvössum vindi, t.d. >25 m/s. En meginuppsprettur ryks eru þó yfirleitt á upprunastöðunum, eins og síðar er vikið að. Þessi breytta kornastærð, sem helgast af því að endurteknir fokatburðir gera sandinn sífelld grófari, gerir yfirborð sanda að ennþá erfiðara umhverfi fyrir gróður því kerfið er án þeirrar vatnsheldni sem aðeins fínefni geta veitt.

Eftir að land er komið í sand getur bæst við meira af sandefnum við eldgos og gjóskufall. Slíkir atburðir stuðla iðulega að viðhaldi sandauðna eftir að þær hafa myndast. Kornastærð gjóskunnar er afar mismunandi, en umhverfi með vikurkenndri gjósku (>2 mm) er alla jafna afar erfitt fyrir gróður, t.d. á Veiðivatnasvæðinu og í nágrenni Heklu. Fínni aska veldur aftur á móti meira vindrofi í kjölfar gosanna.

17.5. Uppfok og áfok

Þegar sandfok á sér stað lyftast minnstu efnin upp fyrir yfirborðið og geta síðan borist langa vegu í andrúmsloftinu, jafnvel þúsundir kílómetra þegar svo ber við. Uppfokið er nefnt ryk eða svifryk og hefur margþætt áhrif á umhverfið. Í fyrsta lagi má telja svifryksmengun sem getur haft afar neikvæð áhrif á lýðheilsu.



Mynd 17.11. Sandur í Dimmuborgum. Sandfok ógnaði þessum einstæðu náttúruminjum og gerir raunar enn, því ekki má mikið út af bregða í þurru tíðarfari til að sandurinn taki á rás á ný. Í forgrunni er gamall sandvarnargarður sem hlaðinn var úr hraunmolum til að hamla fokinu. Sandurinn er langt að kominn eftir sandleiðum. Mikilvægt er að efla gróður á mun stærra svæði en nú er unnið að í umhverfi Dimmuborga og m.a. ætti að breyta öllum Grænavatnsbruna sunnan Dimmuborga í birkiskóg, sem er tiltölulega auðvelt með friðun lands fyrir beit og sáningu birkifræs sem síðan stuðlar að frekari sjálfsáningu birkis.

Þar sem ryk fellur á snjó eða jökla flýtir það fyrir snjóbráð vegna þess að dökk kornin hitna mun örur en hvítt yfirborð snævar (mynd 17.12). Áhrif þessa geta verið afar neikvæð fyrir vatnshag heilu meginlandanna. Rykið hefur einnig áhrif á skýjafar og myndun skýja, inngeislun og útgeislun sólarljóss og er talið auka á hlýnun heimskautasvæðanna (sjá umfjöllun ÓA 2019b og Sanchez-Marroquin o.fl. 2020). Áfok getur á hinn bóginn haft jákvæð áhrif á frjósemi vistkerfa þegar rykið fellur aftur til jarðar.

17.5.1. Hvaðan kemur áfokið – móðurefni moldar á Íslandi?

Náttúrufræðingar á borð við Sigurð Þórarinsson (1961), Guttorm Sigurbjarnarson (1969) og Grétar Guðbergsson (1975) gerðu sér glögga grein fyrir því hvernig íslensk mold verður að áfoksefni. Áfokið leiðir til þess að jarðvegurinn þykknar að jafnaði um 0,01–0,2 mm eftir aðstæðum. Rannsóknir á áfokskornum í mold staðfesta að stór hluti þeirra á rætur að rekja til uppfoks á jarðvegi. Í moldinni sem fýkur upp er

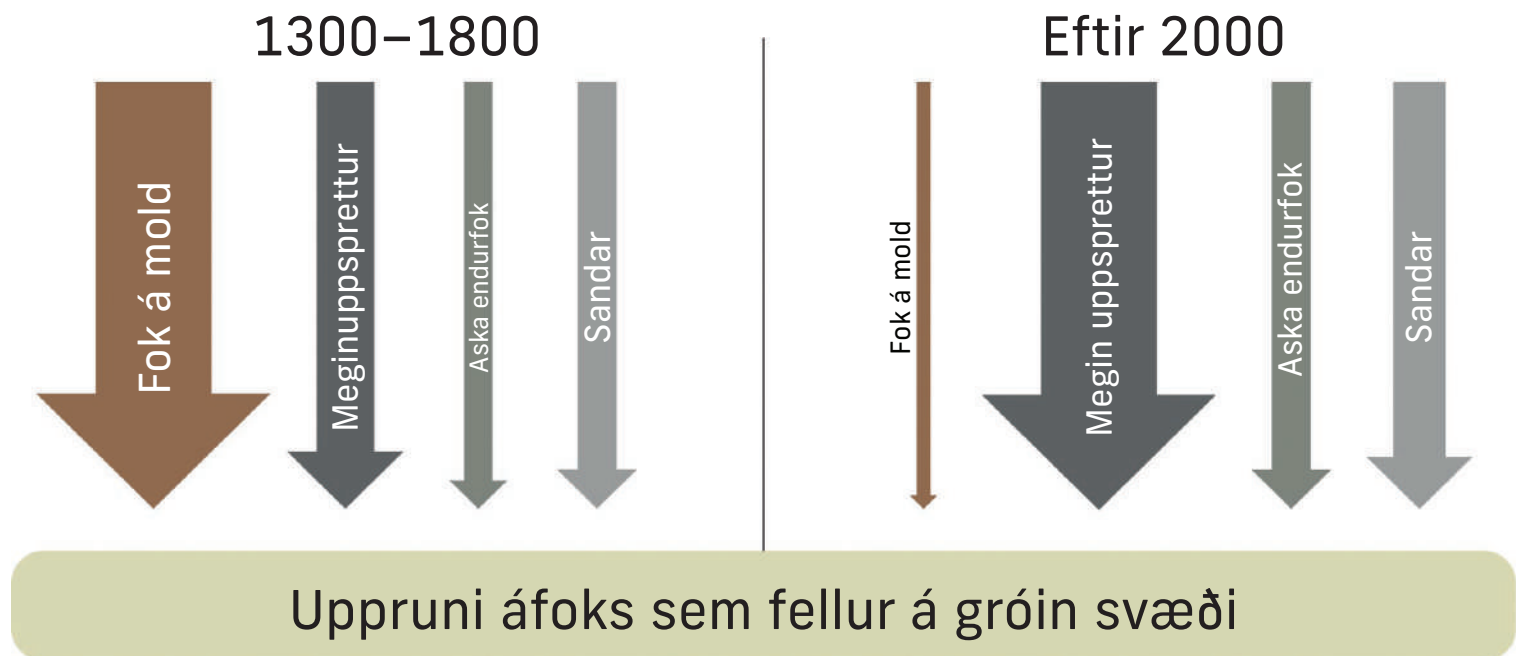


Mynd 17.12. Ryk sem fallið hefur á snjó. Dökk basaltkornin endurkasta nær engu sólarljósi (e. albedo – Meinander o.fl. 2016) og hitna í sólskinu, sem flýtir bráðnun jökla og snævar. Þessi bráðnun hefur veruleg áhrif á afkomu jökla á Íslandi sem annars staðar í heiminum (Andri Gunnarsson o.fl. 2020), en íslenska rykið hefur þó mun meiri áhrif á bráðnun en ljósleitari korn frá sanduppsprettum meginlandanna.

gjarnan auðþekkjanleg ljós gjóska úr Heklu sem staðfestir uppruna áfoksins. Á síðustu árum hefur orðið ljóst að uppruni áfoks hefur breyst mikið á undanförunum áratugum þar sem sérstakar ryk-upsprettur leggja nú til sífellt drýgri hluta þess. Þessar breytingar eru sýndar með tilgátulíkani á mynd 17.13.

Myndin ber með sér að meginhluti uppfoksins er ættað frá svokölluðum meginuppsprettum (e. dust hotspots). Þessi upptakasvæði, sem „framleiða“ mest af rykinu, eru a.m.k. 10 talsins og flest sýnd á kortinu á mynd 17.4. Þó verður einnig uppfok frá öðrum smærri meginuppsprettum, t.d. við farveg Skaftár, Tungnár og víðar, og ennfremur frá öðrum sandauðnum í verstu veðrum sem bætist ofan á rykið frá meginstöðunum. Auk þess bætist við fok í kjölfar eldgosa sem leggja til fingerða ösku á illa gróið land, eins og gerðist í kjölfar eldgossins í Eyjafjallajökli árið 2010. Enn fýkur þó mold frá svæðum þar sem vistkerfi eru að eyðast – eins og fjallað er um í kaflanum um jarðvegsrof á Íslandi – en ryk frá þessum svæðum er orðið minni hluti af heildarframleiðslu ryks á Íslandi. Ástæðurnar fyrir þessum breytingum liggja meðal annars í því að jöklar fóru vaxandi á síðustu 3 000 árum eða svo, þar með mestallan þann tíma sem liðinn er frá landnámi. En á síðustu öld hafa þeir aftur á móti hörfað og þar með opnast æ fleiri virk uppfokssvæði, t.d. hið virka Hagavatnssvæði og Dyngjusandur að hluta.

Flæður (sjá hér aftar) hafa aukist að flatarmáli eftir því sem jöklarnir hafa hörfað, en þær eru einkar mikilvirkar uppsprettur ryks. Að auki er svo önnur ansi athyglisverð orsök fyrir þeim breytingum sem orðið hafa: á stórum svæðum er sú mold sem fokið gat að mestu horfin, t.d. á mörgum afréttarsvæðum á Suður- og Norðausturlandi. Eftir situr mold í vistkerfum sem hafa meiri viðnámsþrótt gegn raski, t.d. í lægðum, votlendi og á

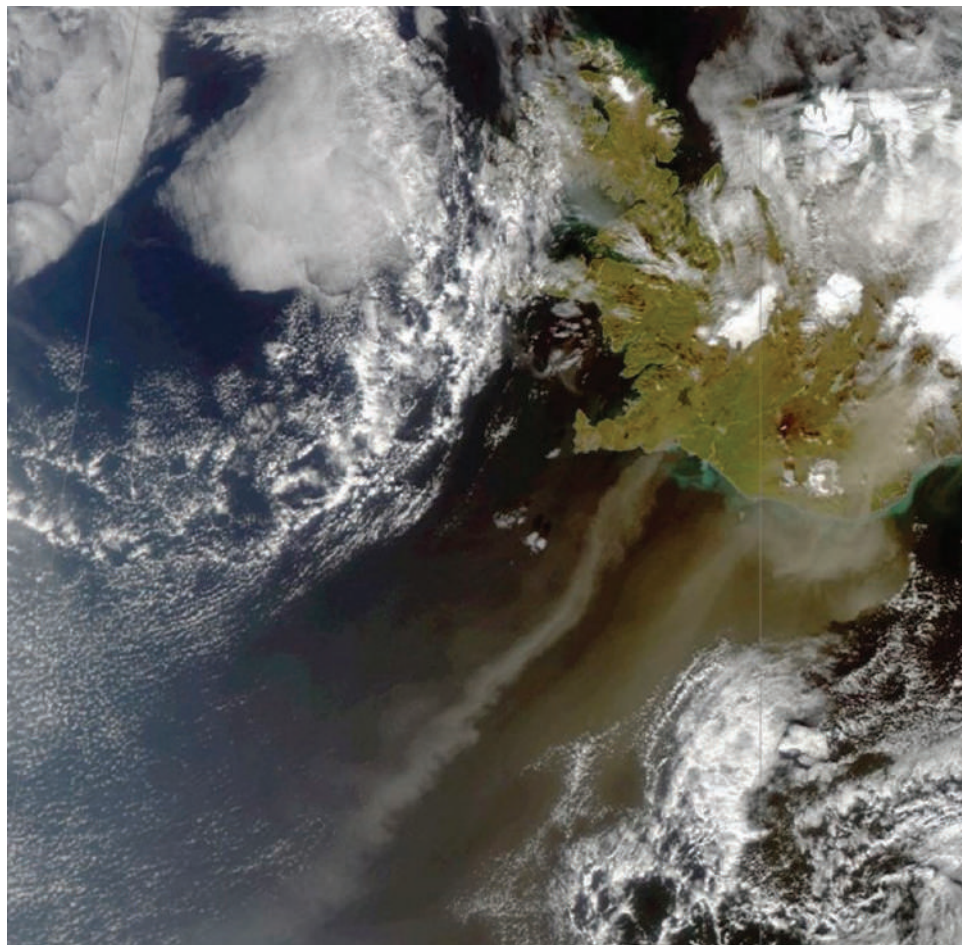


Mynd 17.13. Breytingar á áfoki í tímans rás. Eftir landnámið var uppfok á mold vegna hnignunar vistkerfa aðaluppspretta áfoks. Á síðustu árum eru „heitir reitir uppfoks“ (e. dust hot-spots) – meginuppsprettur – upprunastaðir áfoksins á landsvísi að stórum hluta. Sandsvæðin, bæði heitu reitirnir og sandauðnir, hafa stækkað á síðustu 150 árum vegna uppblásturs og hörfunar jökla. Einnig má segja að meginhluti viðkvæmstu vistkerfanna hafi þegar orðið eyðingu að bráð og því er sú uppspretta áfoks ekki eins virk nú á dögum og áður var.

láglandissvæðum. Niðurstaðan verður því sú að þeir meginuppfoksstaðir sem áður var lýst eru helsta uppspretta ryks á landinu í dag.

En hvar eru þessir meginupprunastaðir uppfoks á Íslandi og hvert er eðli þeirra? Tilvist þeirra var ákvörðuð með kortlagningu á rofi á árunum eftir 1990 (formlega birt í grein ÓA 2010), en gervihnattamyndir (mynd 17.14) hafa staðfest rækilega hversu mikilvirkar þessar afmörkuðu uppsprettur eru. Hér er stutt samantekt um þessa staði sem hafa svo afgerandi áhrif á íslenska náttúru.

Flæður framan við jökla eru ákaflega virkir upprunastaðir ryks (myndir 17.15 og 17.16) eins og áður segir. Jökullænur flæmast vítt um flæðurnar og stór hluti vatnsins hripar niður í sandinn. Þessar lænur bera með sér kynstrin öll af framburði sem að stórum hluta er fingert silt. Mjög lítinn vind þarf til að hreyfa við þessum efnum og frá þessum svæðum geta borist meira en 100 000 tonn af efni í mestu rykbyljunum (e. dust storms,



Mynd 17.14. Strókur frá Hagavatnssvæðinu, sem er ein meginuppspretta ryks á Íslandi, stendur mörg hundruð kílómetra á haf út. Einnig er fok frá tímabundnum uppsprettum á Suðurlandi, einkum aska úr Grímsvatnagosinu 2011 og Eyjafjallajökli 2010. Gervihnattamyndir sem þessar sýna glögglega að slíkar meginuppsprettur (e. dust hotspots) skila langmestu af rykinu sem fýkur upp á Íslandi nú á dögum. Myndin er tekin úr gervihnatti (Aqua) 9. september 2011. Höfundaréttur NASA, Bandaríkin.



Mynd 17.15. Flæður við Hagavatn. Þar flæmast um jökullænur og skilja eftir sig óhemjumagn framburðar sem einkennist af silti. Á svæðinu eru einnig þykkir mjög fínkorna setbunkar sem settust til í jökullóni sem þarna var áður en hefur nú þornað upp vegna þess að vatnsfarvegir breyttust þegar jökullinn hörfaði á síðasta árhundraði (sjá mynd 17.18). Siltefni á flæðunum og í setbunkunum fýkur mjög auðveldlega. Svæði sem þessi eru meðal helstu uppfoksstaða landsins. Þau myndast í auknum mæli þegar jöklar hörfa þar sem hallalítið land er aftan við fremstu jökulgarða eða aðrar landslagseiningar sem tefja frárennsli jökulvatns frá jöklinum.



Mynd 17.16. Flæður við Holuhraun á Dyngjusandi, horft til Kistufells en Dyngjujökull er til vinstri. Nýja hraunið breytti flæði vatnsins frá jöklinum. Hér má sjá vatnsflaum renna niður flæðurnar á hlýjum sumardegjum sem síðan þornar upp í lok dags. Uppfok frá þessum flæðum hefur verið mælt og þær flokkast nú með afkastamestu ryk uppsprettum veraldar.

dust events). Flæður af þessu tagi eru á Dyngjusandi, Mælifellssandi og Mýrdalssandi, í Vonarskarði, Flosaskarði við Eiríksjökul, framan við Vestari-Hagafellsjökul (sunnan við Langjökul) og víðar. Jökullæurnar sjá til þess að ný efni hlaðast upp á svæðunum jafnharðan þótt mikið fjúki frá þeim. Ef sandur fýkur burt frá flæðunum verður hann fljótt grófari, fínu efnin tapast sem ryk. Dyngjusandur telst meðal virkustu ryk uppspretta veraldar og þaðan berst ryk út yfir stórt svæði sem nær allt frá Mið-Norðurlandi til Suðausturlands.

Strandsvæði. Nokkur af mikilvirkustu uppfokssvæðunum eru á strandlengju landsins, ekki síst á Suðurlandi. Jökulárnar bera fram gríðarlegan flaum af fíngerðum efnum sem verða síðan hluti af strandlengjunni sem nær langt út fyrir ósasvæði jökulvatnanna. Svæðið beggja vegna Markarfljóts (Landeyjasandur, Fornusandar o.fl.) er einstaklega mikilvirktt upptakasvæði ryks, sem m.a. berst inn yfir Suðurland og jafnvel inn yfir Reykjavíkursvæðið og veldur þar rykmengun í þurrum suðaustlægum áttum. Eldgosið í Eyjafjallajökli og jökulhlaupið í Markarfljóti sem því fylgdi jók mjög á fok frá ströndinni sem og mikill vatnsflaumur í ám suður frá jöklinum meðan á gosinu stóð.



Mynd 17.17. Fok frá bökkum jökulár.

Jökulár. Jökulárnar geta flæmst víða um flatlendi, ekki síst í stórflóðum og jökulhlaupum, og skila þá af sér gríðarlega miklu magni af fíngerðu seti sem getur verið að fjúka lengi í kjölfar flóðanna. Þannig hagar til með Jökulsá á Fjöllum þar sem jökulhlaup hafa skilað sandefnum á flatlendi sem síðar mynduðu áfoksgeira, m.a. niður Hólsfjöll. Skaftárhlaup hafa vaxið á undanförunum árum, sem hefur aukið á uppfok frá svæðinu og ekki síður frá strandsvæðinu beggja vegna ósa Kúðafljóts.



Mynd 17.18. Á myndinni sést hvar fýkur úr gömlum setbunkum (ljósleit svæði) sem urðu til þegar stórt jökullón var framan við Hagafellsjökla. Seinna þornaði lónið upp og eftir sátu þykkir setbunkar. Efnið er að mestu fíngert silt en þó með grófari efnum saman við. Þurrft fínkorna silt er oft ljósleitt þó að það sé gert úr basalti. Talsvert hefur gengið á setið með vind- og vatnsrofi undanfarinna áratuga. Þessir setbunkar ásamt flæðunum (nær á myndinni) eru meðal mikilvirkustu uppspretta ryks á landinu. Myndin sýnir einnig grunn lón framan við jökla geta fyllst smám saman og orðið að meginuppsprettum ryks í framtíðinni. Læmið (jökullæna sem myndar flæður) er í forgrunni.

Milljónir tonna af ryki

Reynt hefur verið að áætla hve mikið ryk fýkur upp af landinu ár hvert og niðurstaðan er á bilinu 5–40 milljónir tonna eftir því hvaða aðferð er beitt.

Miklar framfarir eiga sér nú stað á sviði „rykvísinda“ og þess er að vænta að unnt verði að reikna magnið mun nákvæmar út en áður var, sem og hve miklu ryki hver rykatburður fyrir sig skilar.

Drjúgur hluti ryksins lendir út á sjó, ekki síst frá söndum Suðurlands, og rykið er líklegt til að hafa áhrif á frjósemi hafsvæðanna allt í kringum landið (sjá ÓA o.fl. 2014). Ryk frá Íslandi er talið berast til Svalbarða, Grænlandsjökuls og Evrópu, eins og rakið er í yfirlitsgrein ÓA o.fl. (2019b).

Gamlir setbunkar – uppboruð lón.

Þar sem myndast lón framan við jökla safnast fyrir ókjörin öll af silti og sandi í lónbotninn. Breytingar á jöklum geta valdið því að þessi lón tæmast. Eftir sitja þykkir bunkar af fínkorna seti sem fýkur mjög auðveldlega (sjá mynd 17.18). Dæmi um þetta er fokið úr lónbotnum framan við Hagafellsjökla á Hagavatnssvæðinu sem skilar afar drjúgu magni áfoks út yfir Suður- og Vesturland. Smám saman gengur á þessa setbunka og þá mun fokið úr þeim minnka. Það getur tekið áratugi, en fer allt eftir því hvað þeir eru þykkir.

Uppboruð vötn og lægðir sem set safnast fyrir í eru víða. Einnig finnast vötn og tjarnir sem þorna í þurrkatíð, t.d. víða á Tungnársvæðinu. Sé mikið af fínu seti í lægðunum getur myndast áfoksgeiri út frá þeim. Sandkluftavatn norðan Ármannsfells við Þingvelli er dæmi um afar virka uppsprettu ryks í þurrkatíð, t.d. árið 2019. Þar mældist styrkur ryks allt að 100 sinnum yfir heilsuverndarmörkum í einum „rykatburði“ (Pavla Dagsson-Waldhauserová, óbirt gögn).

Strendur uppistöðulóna. Þar sem um er að ræða uppistöðulón jökulvatns með breytilega vatnshæð getur orðið mikið fok úr strandlengjum þeirra áður en þau fyllast. Hálslón og Blöndulón eru dæmi um slík virkjanalón. Hætta er á myndun áfoksgeira út frá slíkum lónum, sem hefur raunar gerst bæði við Blöndu og Hálslón – umhverfisáhrif slíkra lóna eru afar mikil.

17.5.2. Dreifing áfoks yfir landið – og á haf út

Gerð hefur verið tilraun til þess að áætla magn ryks sem fýkur upp á landinu þar sem notaðar voru tiltækar upplýsingar um jarðvegssnið, staðsetningu auðna og meginuppsprettur foks, vitneskja um þurrar vindáttir o.fl. Niðurstöðurnar voru birtar á meðfylgjandi korti (mynd 17.20) þar sem áfokið var áætlað í grömmum á fermetra á ári. Þar sem áfokið er mest er það af stærðargráðu sem er sambærileg við það sem mest getur orðið og þekktist á eyðimerkursvæðum jarðar. Mesta áfokið fylgir gosbeltunum, söndunum og nálægðinni við meginuppfoks-



Mynd 17.19. Fok frá ströndum Blöndulóns.

svæði, og þá sérstaklega svæðum sem snúa undan þurrum vindáttum frá meginstöðunum.

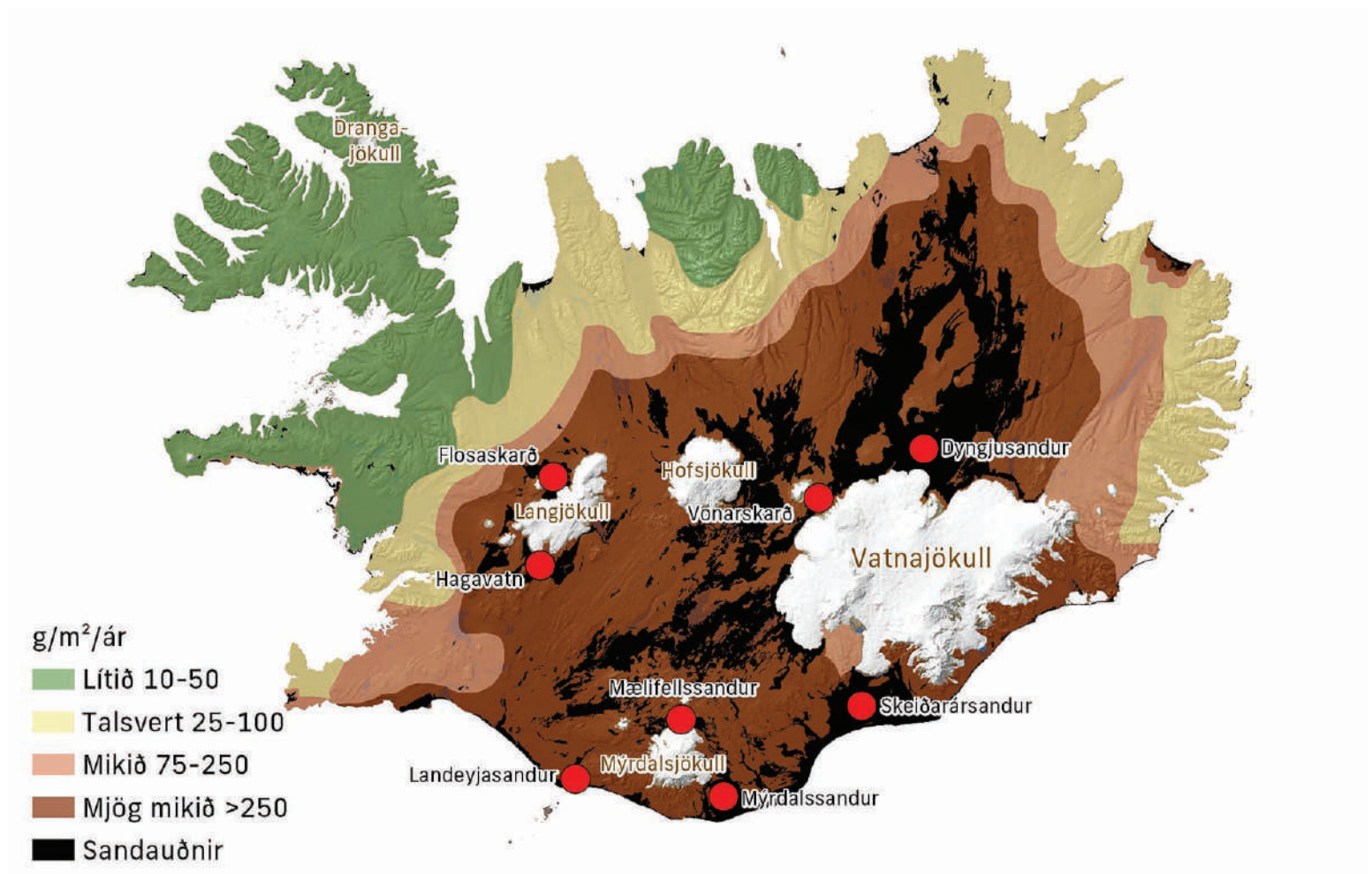
Minnst er áfokið fjærst þessum uppsprettum, einkanlega á hluta Vesturlands, Snæfellsnesi, Vestfjörðum og á ytri hluta Mið-Norðurlands. Fjallað er víða í þessu riti um þau áhrif sem mikið áfok sem fellur að jafnaði hefur á eiginleika jarðvegs, svo sem hvað varðar lífrænt innihald og leirmagn moldarinnar. Það verður því ekki endurtekið hér. Jákvæð áhrif áfoks staðfestast m.a. í meiri þéttleika fugla þar sem áfokið er mest samanborið við svæði þar sem áfokið er hvað minnst (Tómas Grétar Gunnarsson o.fl. 2015).

Tíðni fokatburða er enn fremur einhver sú mesta sem þekktist í heiminum samkvæmt rannsóknum Pövludagsson-Waldhauserová og samstarfsfélaga (2014), eða fleiri en 135 dagar á

ári, og þá eru dagar þegar fýkur af suðurströndinni beint á haf út ekki taldri með. Raunveruleg tíðni rykatburða á Íslandi er líklega >200 ár hvert, sem telst mjög mikið.

17.6. Lokaorð

Hér hefur verið stiklað á stóru um einn meginþátt íslenskrar náttúru: sandsvæðin, sandfok, ryk og áfok. Í umfjöllun um íslenskan jarðveg er víða vísað til þessa kafla, enda er áfokið undirstaða jarðvegsmyndunar á Íslandi. En sandarnir eru einnig heillandi viðfangsefni út af fyrir sig og þeir hylja æði stóran hluta landsins, eða um fimmtung þess. Það er mikilvægt að sum þessara svæða njóti verndar sem merkileg náttúrufyrirbrigði, sem þau gera að nokkru leyti innan núverandi þjóðgarða. Hins vegar er ljóst að koma



Mynd 17.20. Áfok á Íslandi í grömmum á hvern fermetra á ári. Minniháttar gjóskufall og endurfok á nýfallinni ösku eru einnig í þessum tölum, en ekki þykk gjóskulög. Punktarnir sýna stærstu meginuppfoksstaðina, sem skila stórum hluta áfoksins út yfir landið nú á tímum. Sjá ÓA 2010.

þarf í veg fyrir vistkerfishrun sem fylgir því ef land fer í sand þar sem gróður var fyrir. Mikilvægt er að efla gróðurfur í nágrenni sandsvæða, sérstaklega neðan hálandisbrúnarinnar.

Birki er langsamlega öflugasta náttúrulega gróðurfarið til að hindra útbreiðslu sanda og binda gjóskufall, en einnig víðikjarr og vitaskuld endurheimt votlenda á sandsvæðum. Birki breiðist ennfremur hratt út yfir svæði sem er raskað, t.d. vegna flóða, séu öflugir fræberandi skógar í nágrenninu, eins og nú sést glögglega á Skeiðarársandi (sjá Bryndísi Marteinsdóttur o.fl. 2017, Þóru Ellen Þórhallsdóttur 2015 og Þóru Ellen Þórhallsdóttur og Kristínu Svavarsdóttur 2022).

Þar sem vel hefur tekist til við uppgræðslu á sandsvæðum er víða komin samfelld gróðurþekja, oft grösug, svo sem í Landsveit og á Rangárvöllum (sjá 22. kafla). Margir gera sér enga grein fyrir því að stór samfelld svæði í nágrenni Hellu og Gunnarsholts á Rangárvöllum sem og í Landsveit (mynd 17.21) voru áður brunasandar eftir skefjalausa sandstorma á 18. og 19. öld.

Mikið er sóst eftir að fá slíkt land til beitarnytja. Það er mikilvægt að hafa í huga að rofni yfirborðið þannig að opnist fyrir sandinn á ný getur áfoksgeiri tekið á rás með litlum fyrirvara. Helst þarf að hylja öll svæði af þessu tagi með birkiskógi áður en litið er til annarra nytja. Mjög sendin þurr kerfi ætti ekki að nýta til beitar nema í mjög takmörkuðum mæli.



Mynd 17.21. Gamall áfoksgeiri í Landsveit (dökkleita svæðið). Skarðsfjall til vinstri. Til hægri sér móta fyrir hlöðnum sandvarnargörðum. Áfoksgeirinn er ekki gróinn saman og lítið þarf út af að bera til að fok hefjist á ný, t.d. með gjóskufalli úr Heklu. Svæði sem þessi þarf að hylja með kjarrlendi til að sandurinn verði stöðugur og ör jarðvegsmyndun eigi sér stað – sem býr til vistkerfi með þanþol gagnvart áföllum framtíðarinnar. (Myndin er tekin 2020).

Heimildir

Þessi kafli byggist að stórum hluta á yfirlitsgreinum sem birtust í tímaritinu *Aeolian Research* (ÓA o.fl. 2016), í tvennu lagi í Náttúrufræðingnum (ÓA o.fl. 2019a,b) og á grein um heildaruppfök frá Íslandi (ÓA o.fl. 2014).

Þeim sem vilja fræðast meira um sandauðnir á Íslandi er bent á þessar greinar og þær heimildir sem þar eru tilgreindar, en þær verða ekki allar tilteknar hér. Rykrannsóknafélag Íslands (Rykís – Icelandic Aerosol and Dust Association, IceDust) heldur utan um rannsóknir á sandi og ryki á Íslandi á heimasíðu sinni og hluti kaflans byggist á nýlegum greinum sem þar er getið.

Andri Gunnarsson, Sigurður M. Garðarsson, Finnur Pálsson, Tómas Jóhannesson og Óli G.B. Sveinsson 2020. Annual and interannual variability and trends of albedo for Icelandic glaciers. *The Cryosphere* 15:547–570.

Bland, L.M., J.A. Rowland, T.J. Regan, D.A. Keith, N.J. Murray, E.R. Lester, M. Linn, J.P. Rodríguez og E. Nicholson 2018. Developing a standardized definition of ecosystem collapse for risk assessment. *Frontiers in Ecology and the Environment* 16:29–36.

Bryndís Marteinsdóttir, Kristín Svavarsdóttir og Þóra Ellen Þórhallsdóttir 2017. Multiple mechanisms of early plant community assembly with stochasticity driving the process. *Ecology* 99:91–102.

Elín Fjóla Þórarinsdóttir og Ólafur Arnalds 2012. Wind erosion of volcanic materials in the Hekla area, South Iceland. *Aeolian Research* 4:39–50.

Fanney Ó. Gísladóttir, Sigmundur Helgi Brink og Ólafur Arnalds 2014. *Nytjaland*. Rit Lbhí nr. 49. Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.

Friðgeir G. Olgeirsson 2007. Sáðmenn sandanna. *Landgræðslan*, Gunnarsholti.

Grétar Guðbergsson 1975. Myndun móajarðvegs í Skagafirði. *Íslenskar landbúnaðarrannsóknir* 7:20–45.

Guttormur Sigbjarnarson 1969. Áfok og uppblástur. *Náttúrufræðingurinn* 39:68–119.

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

Meinander, O., Pavla Dagsson-Waldhauserová og Ólafur Arnalds 2016. Icelandic volcanic dust can have a significant influence on the cryosphere in Greenland and elsewhere. *Polar Research* 35:31313, <http://dx.doi.org/10.3402/polar.v35.3131>.

Ólafur Arnalds 2010. Dust sources and deposition of aeolian materials in Iceland. *Icelandic Agricultural Sciences* 23:3–21.

Ólafur Arnalds, Elín Fjóla Þórarinsdóttir og Fanney Ósk Gísladóttir 2019a. Sandauðnir, sandfok og ryk á Íslandi I. *Sandar og fok*. *Náttúrufræðingurinn* 89:35–47.

Ólafur Arnalds, Haraldur Ólafsson og Pavla Dagsson-Waldhauserová 2014. Quantification of iron-rich volcanogenic dust emissions and deposition over ocean from Icelandic dust sources. *Biogeosciences* 11:6623–6632.

Ólafur Arnalds, Pavla Dagsson-Waldhauserová og Haraldur Ólafsson 2016. The Icelandic volcanic aeolian environment: Processes and impacts – A review. *Aeolian Research* 20:176–195.

Ólafur Arnalds, Pavla Dagsson-Waldhauserová og Sigmundur Helgi Brink 2019b. Sandauðnir, sandfok og ryk á Íslandi II. *Áfok og ryk*. *Náttúrufræðingurinn* 89:132–145.

Ólafur Arnalds, Elín Fjóla Þórarinsdóttir, Jóhann Þórsson, Pavla Dagsson-Waldhauserová og 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.

Ólafur Arnalds, Elín Fjóla Þórarinsdóttir, Sigmar Metúsalemsson, Ásgeir Jónsson, Einar Grétarsson og Arnór Árnason 1997. *Jarðvegsrof á Íslandi*. Landgræðsla ríkisins og Rannsóknastofnun landbúnaðarins, Reykjavík.

Pavla Dagsson-Waldhauserová, Ólafur Arnalds og Haraldur Ólafsson 2014. Long-term variability of dust events in Iceland. *Atmospheric Chemistry and Physics* 14:13411–13422.

Richards-Thomas, T., C. McKenna-Neuman og I.P. Power 2020. Particle-scale characterization of volcanoclastic dust sources within Iceland. *Sedimentology* 68:1137–1158.

Sanchez-Marroquin, A., Ólafur Arnalds, K.J. Bautistan-Dorsi, J. Browse, Pavla Dagsson-Waldhauserová, A.D. Harrison, E.C. Meters, K.J. Pringle, J. Vergara-Temprado, I.T. Burke, J.B. McQuaid, K.S. Carslaw, B.J. Murray 2020. Iceland is an episodic source of atmospheric ice-nucleating particles relevant for mixed-phase clouds. *Science Advances* 6:eaba8137.

Sigurður Þórarinsson 1961. Uppblástur á Íslandi í ljósi öskulagarannsóknna. *Ársrit Skógræktarfélags Íslands 1960–1961*:17–54.

Tómas Grétar Gunnarsson, Ólafur Arnalds, G. Appleton, V. Méndez og J.A. Gill 2015. Ecosystem recharge by volcanic dust drives broad-scale variation in bird abundance. *Ecology and Evolution* 5:2386–2396.

Þóra Ellen Þórhallsdóttir 2015. *Saga gróðurs og umhverfis á Brunasandi*. *Dynskógur: Héraðsrit Vestur-Skaftfellings*. Bls. 1–70.

Þóra Ellen Þórhallsdóttir og Kristín Svavarsdóttir 2022. The environmental history of Skeiðarársandur Outwash Plain, Iceland. *Journal of North Atlantic* 43(12): 1–21.