Ólafur Arnalds, Pavla Dagsson-Waldhauserová og Sigmundur Helgi Brink

Sandauðnir, sandfok og ryk á Íslandi — II. Áfok og ryk

Þessi grein er síðari grein tveggja sem fjalla um sandfok, ryk og áfok á Íslandi. Myndun ryks á Íslandi er með því mesta sem þekkist í heiminum og er um milljónir eða milljónatugi tonna ryks að ræða ár hvert. Tíðni rykveðra á Íslandi er yfir 135 á ári að meðaltali og eru þá margir minniháttar „rykatburðir“ ekki taldir með. Rykið mótar öll vistkerfi landsins með því að leggja til áfokið, sem er móðurefni jarðvegs á Íslandi. Helsta uppspretta ryks var áður uppfok moldar þegar vistkerfi hrundu en nú eru aðaluppspretturnar nokkrar afmarkaðar fínkorna sandauðnir. Auk þess berst fok frá öðrum sandauðnum landsins, meðal annars sem endurfok ösku og rykefna sem þangað berast. Fínefni setjast til í miklum mæli á flæðum framan við jökla, þar sem gætir flóða í jökulám, við jökulhlaup, þar sem breytingar verða á hæð í jökullónum og með ströndum við árósa við mikinn framburð jökulvatna. Dyngjusandur, Mælifellssandur, Hagavatnsaurar, Mýrdalssandur, Skeiðarársandur og sandar beggja vegna ósa Markarfljóts og Kúðafljóts eru einar helstu uppsprettur áfoks á Íslandi. Þaðan berst svifryk um allt land en í mismiklum mæli. Dyngjusandur er meðal virkustu rykuppsprettna jarðar og ryk þaðan berst langt norður í heimskautshöfin. Styrkur svifryks mælist oft langt umfram heilsuverndarmörk, jafnvel í mikilli fjarlægð frá upprunastað. Áfokið er basískt að samsetningu, yfirleitt illa kristallað og veðrast hratt í jarðvegi, sem hefur jákvæð áhrif á frjósemi vistkerfa. Rykið er ennfremur járnríkt og kann að auka frjósemi hafsvæða umhverfis Ísland. Rykið hefur áhrif á ýmsa loftslagsþætti, hindrar endurkast sólarljóss og getur aukið bráðnun á yfirborði snævar, sem hvort tveggja hraðar loftslagsbreytingum á norðurslóðum.

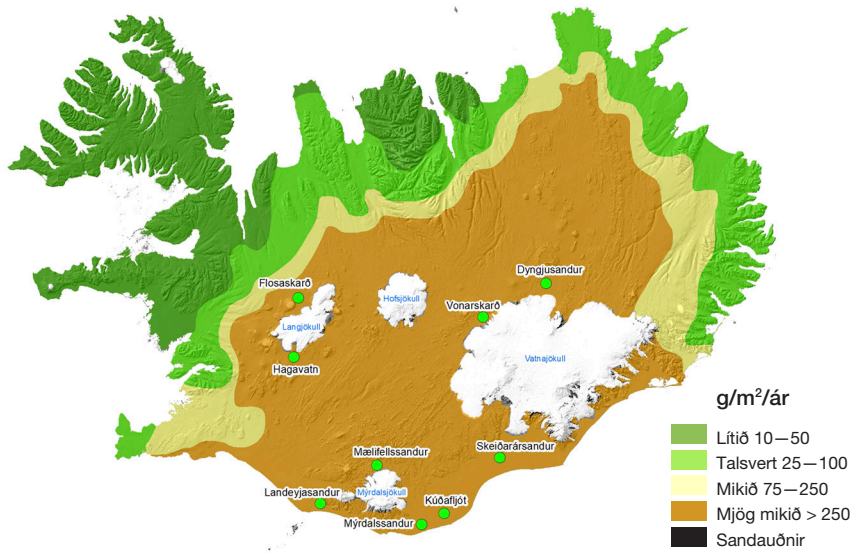
INNGANGUR

Í fyrri grein um sanda og ryk var fjallað um hugtök, eðli sandsvæða á Íslandi, sandflæði og áfoksgeira.[1] Í þessari síðari grein er fjallað um helstu uppfokssvæði landsins, ryk og áfok. Byggt er á nýlegum rannsóknum sem einkum hafa birst í erlendum fræðiritum sem ekki hafa áður komið fyrir sjónir lesenda á íslensku.

Uppfok myndar svifryk sem getur borist langar leiðir uns það fellur til jarðar sem áfok (sjá umfjöllun um hugtök í fyrri grein). Áhrif uppfoks eru afar fjölbreytileg. Það veldur svifryksmengun sem getur haft afar neikvæð áhrif á lýðheilsu.[2] Rykið eykur á snjóbráð því að það hindrar endurkast sólarljóss, ekki síst dökkt íslenskt basaltryk.[3] Ryk hefur áhrif á loftslagsþætti á borð við skýjafar, inngeislun og útgeislun, sem aftur hefur áhrif á á veðurfar og hlýnun á heimskautasvæðunum.[2,4] Áfok er á hinn bóginn afar mikilvægt fyrir frjósemi vistkerfa, hvort heldur á landi eða á hafi úti.[5] Raunar er það svo að áfok mótar flest landvistkerfi Íslands, því það er ráðandi þáttur í jarðvegsmyndun og frjósemi moldarinnar. Það er eitt þeirra atriða sem gerir íslenska mold frábrugðna jarðvegi í nágrannalöndunum og jafnvel einstaka á heimsvísu. Magn áfoks og þykknunarhraði jarðvegs hafa verið notuð til að rekja umhverfisbreytingar á Íslandi allt frá síðustu ísöld. Af öllu þessu er ljóst að það er ákaflega mikilvægt að efla skilning á uppruna, eðli og magni uppfoks og áfoks.

HVAÐAN KEMUR ÁFOKIÐ?

Mestur hluti áfoks á gróið land eftir landnám og fram á 20. öld á rætur að rekja til uppfoks moldar þar sem gróin vistkerfi voru að blása upp. Magn áfoksins, sem kemur fram í þykknun jarðvegs, margfaldaðist í kjölfar landnámsins. Það er til marks um hnignun vistkerfa og uppblástur sem fylgdi í kjölfarið. Sigurður Þórarinsson,[6] Guttormur Sigbjarnarson,[7] Grétar Guðbergsson[8] og fleiri öfluðu viðamikilla gagna um þykknunarhraða jarðvegs, og er hann talinn að jafnaði 0,01–0,2 mm ári. Rannsóknir á áfokskornum í jarðvegi staðfesta að stór hluti þeirra á rætur að rekja til uppfoks á jarðvegi, svo sem auðþekkjanleg ljós gjóska úr Heklugosum sem sest til í jarðvegi og fýkur síðar upp.[6,8–10] Viðamiklar og fjölbreytilegar rannsóknir á hruni vistkerfa á Íslandi staðfesta þessa mynd.[11,12] Við kortlagningu jarðvegsrofs[13] og áframhaldandi rannsóknir á sandfoki varð þó æ ljósara að uppfok og áfok hafa breyst á undanförnum áratugum, þar sem sérstakar rykuppsprettur leggja til sífellt drýgri hluta áfoksins, eins og vikið verður að síðar.



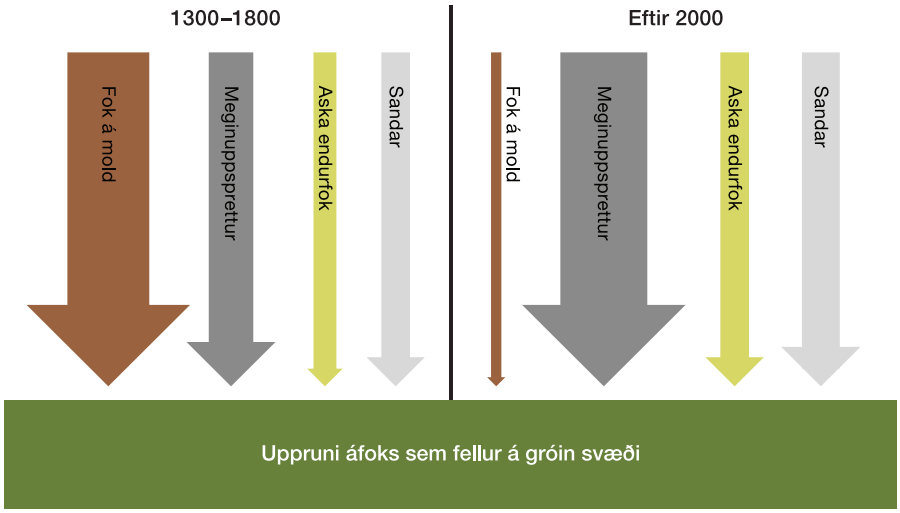
1. mynd. Árlegt áfok á hvern fermetra á Íslandi mælt í grömmum. Tölurnar sýna einnig minniháttar gjóskufall og vindburð nýfallinnar gjósku, en ekki þykk gjóskulög. Grænu punktarnir sýna mikilvirkustu uppfokssvæðin. Endurgert eftir korti frá 2010.[14] – Annual aeolian deposition (g/m²/yr.). Data include small volcanic ash deposition events, but not major tephra layers. Green dots indicate dust hotspots.[14]

Árið 2010 var gerð tilraun til að fá heildarmynd af magni áfoks á Íslandi.[14] Það var gert með því að tengja saman upplýsingar um þykknunarhraða jarðvegs, útbreiðslu sandauðna, legu mikilvirkustu uppfoksstaðanna, landslag og loftslagsþætti. Niðurstöðurnar sýndu að sums staðar er áfokið með því mesta sem þekkist á jörðinni. Yfir 250 g/m² leggjast til að meðaltali ár hvert sem áfok á stórum svæðum (1. mynd). Kortið á sér afskaplega góða samsvörun í landfræðigögnum um magn járns í tildurmosa[15,16] en járnið er einmitt tilkomið vegna áfoks sem sest í mosann. Einnig gefa líkanreikningar byggðir á veðurgögnum og útbreiðslu sanda svipaða dreifingu.[17] Virkustu áfokssvæðin fylgja útlínum gosbeltisins þar sem sandar hafa mestu útbreiðslu. Í gildunum fyrir áfok[14] eru einnig taldar þunnar öskudreifar en ekki þykk öskulög.

Rannsóknir sem kortið byggist á, svo sem kortlagning á auðnum landsins,[13] benda til að áfok sé nú á dögum ekki nema að hluta til mold sem fýkur við rof gróinna vistkerfa. Mun frekar er um að ræða fok frá óstöðugum sandsvæðum. Það staðfestist meðal annars við kerfisbundna skoðun á gervihnattamyndum sem teknar eru daglega yfir landinu.[14,18–20] Að þessu leyti hefur upprúni áfoks á Íslandi breyst í tímans rás. Ein af ástæðum þessa er að vistkerfi sem voru veikust fyrir eru að stórum hluta hrunin og örfoka og eru því ekki lengur jafn-mikilvirkar uppsprettur áfoksefna og áður var.[12] Landgræðsluaðgerðir undanfarinna áratuga, breytt landnot og bættir beitarhættir hafa einnig minnkað til muna uppfok moldarefna. Opnu sandsvæðin eru því orðin meginuppsprettur áfoksins. Á 2. mynd er tilgáta sett fram um þessar breytingar.[12] Þar sést að í stað uppfoks moldar (brúnar örvar) eru sandsvæðin (gráar örvar) tekin við sem virkustu uppspretturnar. Mesta uppfokið er frá nokkrum meginuppsprettum, eins konar „ofurvirkum uppsprettum“ (e. dust hotspots) sem fjallað er um hér á eftir (dökkgráar örvar á 2. mynd). Auk þess hafa sandsvæðin stækkað og rykefni sem falla á þau eru óstöðug og fjúka að hluta upp á ný uns

þau stöðvast aftur á grónu landi. Það magnar áfoksgildi (mælt í g/m²) á þeim stöðum þar sem land er gróið og áfokið stöðvast varanlega. Sömuleiðis fýkur gosaska sem fellur á illa gróin svæði upp aftur og þar sem auðnir hafa stækkað í aldanna rás er gula örin á 2. mynd stærri í nútímanum en á miðöldum. Öskufok í kjölfar gossins í Eyjafjallajökli 2010 er dæmi um slíkt endurfok sem olli rykmistri yfir stórum svæðum.[21] Þessar breytingar hafa vitaskuld áhrif á túlkun gagna um þykknunarhraða jarðvegs. Áfokið gefur ekki endilega til kynna fok á mold frá grónum vistkerfum, heldur er það frekar efni frá auðnum og sérstaklega frá fáum mjög virkum uppfoksstöðum.

Myndin ber með sér að langstærsti hluti ryksins á sér nú uppruna á meginuppsprettunum. Einkenni þessara uppsprettna er gríðarlegt magn uppfoksefna á hverja flatareiningu og að ekki þarf mikinn vind til að koma rykinu af stað. Telja má að minnsta kosti níu meginsvæði uppfoks (grænir punktar á 1. mynd) en að auki er mikið uppfok frá mörgum minni svæðum og mikið en tímabundið uppfok frá enn öðrum svæðum.[14,18] Þá getur orðið uppfok á öllum sandauðnum en þar er uppfokið mun minna á hverja flatarmálseiningu og heildarmagn ryks mun minna en í uppfoki frá meginuppsprettunum. Hafa ber í huga að gosaska og ryk sem sest á auðnir festist ekki nema að hluta, heldur fjúka kornin upp aftur næst þegar hvessir í þurrki. Agnir frá meginuppsprettunum geta því valdið endurteknu rykmistri. Endurfok frá auðnum, ekki síst í kjölfar flóða og öskugosa, getur haft afar neikvæð áhrif á vistkerfi og lýðheilsu. Því er mikilvægt að minnka fokið með því að efla gróðurhulu á svæðum sem óhjákvæmilega verða fyrir gjóskufalli eða miklu foki.[22] Í ofanálag brotna agnir úr stærri kornum við síendurtekið sandfok, og þannig bætast við nýjar agnir sem fjúka síðan upp sem ryk. Vísbendingar eru um að slíkt fokmagn geti verið verulegt á Íslandi[23] og er það verðugt rannsóknarefni. Ætla má að ryk sem berst um landið frá auðnum nú á tímum sé svipað að magni til og fok sem barst vegna uppblásturs á fyrr á öldum því að hraði jarðvegsþykknunar er svipaður nú og þá.



2. mynd. Tilgáta um uppruna áfoks fyrr á öldum (til vinstri) og nú á tímum (hægri). Uppfok moldar frá grónum vistkerfum (brún ör) var stærsti hluti uppfoks á miðöldum, en nú hafa „meginuppsprettur“, – (dökkar örvar) og fok af sandsvæðum (gráar örvar) tekið við.[12] – Changing sources of dust in Iceland from earlier centuries to present. Destruction of vegetated systems was the major source of wind-blown materials while more confined dust hotspots are the major sources today.[12] From left to right: Light brown: soils, dark gray: dust from dust hot-spots, yellowish: re-suspension from deserts, light gray: deserts other than hotspots.

Hinar „ofurvirku“ meginuppsprettur svifryks sjást vel á gervihnattamyndum sem teknar eru í björtu rykveðri. Gervihnattarmynd sem sýnir vel uppfok frá Dyngjusandi er 3. mynd. Myndir af þessu tagi hafa meðal annars verið notaðar til að meta tíðni rykstorma og athuga hvert rykið berst.[14,19,24]

Jökuljaðrar og flæður

Á flæðum framan við jökla flæmast jökullænur í síbreytilegum farvegum um hallalítið land og skilja eftir ógrynni af framburði (4. mynd). Þetta er alþjóðlegt fyrirbrigði; svipað landslag má til dæmis sjá framan við jökla í Alaska og á Grænlandi.[25] Margar flæður eru einstaklega fínkorna með meðalkornastærð innan við 0,05 mm samkvæmt okkar mælingum; efnið tilheyrir þá að megninu til kornastærðarflokknum *silt*. Mjög lítinn vind þarf til að hreyfa við þessum kornum, jafnvel innan við 4 m/s. Flæður eru m.a. á Dyngjusandi, Mælifellssandi, Mýrdalssandi og fleiri svæðum suðaustan og austan Mýrdalsjökuls, á Skeiðarársandi, í Vonarskarði, á Hagavatnsaurum og í nágrenni Eiríksjökuls. Aðstæður á Mælifellssandi eru sýndar á 4. mynd. Vatnið flæmist um flatlendið en hripar að hluta ofan í gljúpan sandinn. Síðan minnkar rennslið þegar kólnar í veðri og jafnframt færast farvegirnir til. Fínkorna framburðurinn situr eftir, þornar fljótt og fýkur við minnsta vind (grá svæði á myndinni). Enda þótt mikið fjúki frá flæðunum, jafnvel milljónir tonna ár hvert, sjá jökullænurnar til þess að sífellt bætist við nýtt efni svo að birgðirnar ganga ekki til þurrðar. Mikill framburður kemur undan jöklunum, ekki síst þar sem undir jökli eru virkar eldstöðvar og fremur auðrjúfanlegt berg. Þannig er talið að aurburður Jökulkvíslar undan austurhluta Mýrdalsjökuls (á áhrifasvæði Kötlu) sé um 1,4 milljónir tonna á ári auk efnis sem sest til ofan við staðina þar sem mælingar voru gerðar.[26] Það myndi nægja til að þekja einn ferkílómetra lands með metraþykku setlagi. Dökkleitt yfirborðið hitnar greiðlega í sól, sem ýtir undir uppfok við lítinn vindstyrk,[27] enda sjást skýstrokkar mettaðir ryki (e. dust devils) iðulega á söndunum. Á Mýrdalssandi eru það flæður Blautukvíslar og fleiri vatnsfalla sem valda uppfokinu (5. mynd). Einnig eru virkar uppsprettur beggja vegna útfalls Kúðafljóts, sem að hluta stafa af hinum miklu hlaupum í Skaftá.

Dyngjusandur

Dyngjusandur og umhverfi er líklega mikilvirkasta uppfokssvæði landsins. Svæðið allt er um 140 km^2 og er gott dæmi um ofurvirka rykuppsprettu framan við jökla. Það nær til Flæðnanna næst jöklinum og sandsvæðisins norður af þeim, sem strangt til tekið er hinn eiginlegi Dyngjusandur. Ryk frá Dyngjusandi berst allt til Eyjafjarðar í norðvestri og getur valdið mikilli svifryksmengun á Akureyri í hvassri suðaustanátt en berst einnig suðaustur til Álftafjarðar í hvassri norðvestanátt. Mesti efnisflutningurinn er þó til norðurs undan þurrum sunnanvindi og getur rykið jafnvel náð langt inn á heimskautasvæðin norður af landinu.[3,28–30] Jökulsá á Fjöllum kemur undan jökli í mörgum lænum sem mynda Flæðurnar framan við Dyngjujökul (6. mynd). Þar er að finna meginuppsprettu ryks á svæðinu (rauðar örvar). Kornastærðin er ákaflega fín (1. tafla). Skokkefni (sandur og gróft silt, sbr. fyrri grein,[1] bls. 38) sem berast með yfirborðinu frá Flæðum mynda hinn eiginlega Dyngjusand norðan þeirra og þar hefur hlutfall fínefna minnkað, meðalkornastærðin er orðin 0,16 mm (1. tafla). Sandur hefur safnast utan í Vaðöldu í mikla setbunka. Greinileg sandleið liggur þaðan til norðausturs meira en 25 km leið og sést sandurinn vel, og þar með sandleiðin, ofan á ljósa vikrinum frá Öskjugosinu 1875. Smám saman minnkar hlutfall fínefna (fínt silt), en skokkefni taka við eftir því sem efnið berst lengra eftir sandleiðinni (1. tafla). Önnur sandleið liggur um Dyngjufjalladal og norður Ódáðahraun. Vatnsflutningur er afar mikilvægur hlekkur í viðhaldi sandleiðarinnar um Dyngjufjalladal (bláar örvar). Gular örvar gefa til kynna rykflutning frá svæðinu og þykktir örvanna gefa gróflega til kynna magnhlutföll. Mestur flutningur er í norður. Rannsóknir Pövlu Dagsson-Waldhauserovu sýna að vænta má 30–40 rykatburða á ári á Dyngjusandi. Þeir valda skertu skyggni á veðurstöðvum í tuga kílómetra fjarlægð frá upptökunum.[24,28] Mestu rykveðrin geta flutt allt að 1 milljón tonna ryks að talið er.[18] Auk þess verða tugir minni rykatburða ár hvert, stundum margir á dag, en þeir eru ekki hafðir með í þessari tölu. Aðeins lítill hluti rykstorma á Dyngjusandi kemur fram á gervihnattamyndum.

Merkilegar breytingar urðu á Dyngjusandi við eldgosið í Holuhrauni 2014–2015 þegar hraun lagðist yfir stóran hluta upptakasvæðanna á Flæðum. Um leið breyttist rennsli jökullænanna sem mynda Flæðurnar. Vestasta kvíslin rennur nú norður með nýja hrauninu en vatnið hripar ofan í sandinn áður

3. mynd. Til hægri: Rykstrókur til norðausturs frá Dyngjusandi í ágúst 2012. Einnig fýkur úr moldum á Vopnafjarðarheiði. Uppfokið á Dyngjusandi olli mikilli rykmengun í Loðmundarfirði í 120 km fjarlægð (myndin til vinstri). Rykstormar frá Dyngjusandi hafa áhrif á vistkerfi allt frá Eyjafirði suður í Álftafjörð. – Dust plume from Dyngjusandur hotspot towards the east coast in August 2012. Visibility was severely reduced at 120 km distance in Loðmundarfjörður (left). Gervihnattarmynd/Satellite image; MODIS (NASA). Ljósm./Photo: Ólafur Arnalds.

en komið er alla leið út fyrir hraunið. Í flóðum myndast lón norðvestan við hraunið en hverfur yfirleitt samdægurs enn sem komið er. Gríðarlegt magn af fínum framburði (silti) verður eftir á yfirborði og þar er að myndast ákaflega virk rykuppspretta sem fróðlegt verður að fylgjast með í framtíðinni.

Strandsvæði

Sum mikilvirkustu uppfokssvæði landsins eru með ströndum. Öll suðurströndin, allt frá Þorlákshafnarsvæðinu austur í Hornafjörð, er virk rykuppspretta, en misvirk.[19] Jökulár Suðurlands, svo sem Markarfljót, Kúðafljót og Gígjukvísl, bera mikið af fínu efni með sér á haf út en aldan skilar hluta þess á land og því getur verið hlutfallslega mikið af fínu efni í fjörusandinum, sem sjálfur er talsvert grófari. Virkasta svæðið er líklega beggja vegna Markarfljóts, á Landeyjasandi vestan þess og á Fornusöndum og Gljá austan ósanna. Fok jókst í kjölfar gossins í Eyjafjallajökli sem lagði til mikið af lausu fínkornóttu efni á strendurnar út frá ósum Markarfljóts.[31] Líklegt er að rykmengun frá ósasvæðum og ströndum nálægt Kúðafljóti aukist verulega í kjölfar mikilla hlaupa í Skaftá. Upptakasvæði á Mýrdalssandi og Skeiðarársandi eru tvíþætt, annars vegar virkar flæður líkt og á Dyngjusandi og Mælifellssandi en hins vegar strandsvæði. Miklar breytingar hafa orðið á Skeiðarársandi síðan 1996 og hafa upptakasvæði ryksins færst til eftir hlaupið í kjölfar Gjálpargossins.

Stór hluti uppfoks á strandsvæðum Suðurlands á sér stað í norðlægum áttum og fokið berst þá fyrst og fremst á haf út. Það getur haldist lengi í andrúmsloftinu og jafnvel lónað aftur inn á land fjarri upptökunum. Þó er það svo að þurrar austlægar áttir eru furðu-algengar með suðurströndinni, ekki síst sem undanfari lægða sem ganga upp að landinu. Við það getur mikið fok borist til norðvesturs frá suðurströndinni og jafnvel valdið svifryksmengun á Reykjavíkursvæðinu.[14,20, 32,33] Uppfok ösku í kjölfar gossins í Eyjafjallajökli sýndi þetta vel.[31] Gott dæmi um mælingu í suðaustan hvassviðri með rykmengun í Reykjavík er sýnt á 7. mynd.[32] Upptök foksins eru beggja vegna Markarfljóts og að einhverju leyti úr Meðallandsfjörum. Hæsta mælda gildi í storminum var 1.260 μg/m^3 (PM_{15}) í Ölfusi, sem telst mjög mikill styrkur. Þar af voru 241 μg/m^3 minni en 1 μm að stærð, og telst svo smátt efni mjög heilsuspillandi (sjá síðar). Styrkur mældur í Reykjavík var 405 μg/m^3, langt yfir heilsuverndarmörkum (50 μg/m^3 á sólarhring), þótt borgin sé í yfir 100 km fjarlægð frá upptökunum.

4. mynd. Flæður á Mælifellssandi norðan Mýrdalsjökuls. Horft af Mælifelli suður til jökulsins. Lænur renna vítt um sandinn en vatnið hverfur að hluta ofan í gljúpt yfirborðið. Framburðurinn verður eftir. Nýlega þornuð svæði eru grá á myndinni og þar er kornastærðin ákaflega fín (silt). Sandfok hefur jafnað út dökkleitu svæðin. Ekki þarf nema örlítinn vind til að sandfok hefjist. – Mælifellssandur, north of Mýrdalsjökull glacier. Glacio-fluvial plains that are dust hot-spots. Gray areas show/are recent (days) deposits primarily made of silt. Darker areas reworked by aeolian processes. Threshold velocities are exceedingly low (4–5 m/s at 2 m height) when dry. Ljósm./Photo: Ólafur Arnalds.

Jökulár og hlaup

Jökulár geta flæmst um á flatlendi í vatnavöxtum, ekki síst í hlaupum. Þannig hagar til meðfram Skaftá þar sem hlaup hafa skilað af sér fínkornóttu seti á stórum svæðum.[34] Framburður Skaftár við Sveinstind, um 25 km frá upptökunum, hefur verið metinn um 5,5 milljónir tonna á ári og eru þá Skaftárhlaup ekki meðtalin.[34] Þetta gefur til kynna hið gríðarlega efnismagn sem berst með jökulám og getur sest til á flatlendi. Talið er að árlega beri jökulár 60–70 milljónir tonna af framburði til sjávar.[35] Hvert Skaftárhlaup getur síðan borið með sér 2,5–7 milljónir tonna (miðað við Sveinstind).[34] Hlaupin í Skaftá hafa vaxið á undanförnum árum og því er líklegt að rykmengun aukist þar í framtíðinni. Hlaup í Kötlu og Skeiðarárhlaup skila miklu efni sem oft er óstöðugt lengi eftir hlaup, svo sem eftir Gjálparhlaupið 1996 niður Skeiðarársand.[36]

Aðrir virkir uppfoksstaðir

Hér hefur verið lögð áhersla á mikilvirkustu uppfoksstaðina, sem eru níu talsins að minnsta kosti (sjá 1. mynd). Að auki geta fjölmörg önnur svæði orðið mikilvirkar rykuppsprettur í þurrum stormum. Áður var minnst á suðurströndina og Skaftársvæðið, allt frá upptökum niður að sjó. Sandkluftavatn norðaustan Ármannsfells er sömuleiðis einn þessara staða, og var mjög virkt uppfokssvæði sumarið 2019. Að auki má nefna Kreppulón og hið nýja manngerða Hálslón. Gervihnattamyndir staðfesta að á Íslandi er fjöldi annarra uppfoksstaða,[19] enda þótt þeir séu ekki eins mikilvirkir og meginuppspretturnar. Þeim þarf að gefa meiri gaum í framtíðinni.

Eðli fokefnanna

Áfoksefni má flokka á marga mismunandi vegu, svo sem eftir efnasamsetningu, kristöllun, kornastærð og kornalögun. Basísk efnasamsetning meginhluta íslenskra fokefna veldur því að járninnihald er yfirleitt mikið (um 10%), en auk þess eru þau rík af katjónum (m.a. Ca^{++}, Mg^{++}, K^{+} og Na^{+}) sem losna við efnaveðrun á kornunum. Kornin eru að stórum hluta illa kristallað glerkennt efni; misvel kristallaðar pýroxen-, plagíóklas- og ólivínsteindir eru oft ráðandi en segja má að margvíslegt gler sé fjórði meginþátturinn í samsetningunni.[37] Ólivín veðrast yfirleitt hratt en bæði léleg kristöllun og mikið holrými í efninu eykur á veðrunarhraða steindanna og glersins.[35] Sandur á Hagavatnssvæðinu er allajafna betur kristallaður en sandur og ryk á öðrum helstu uppfokssvæðum landsins,[37] því þar er um að ræða efni úr hraunum sem hafa rofist við framrás jökla á miðöldum. Illa kristallað gosgler

5. mynd. Uppfok ryks á Mýrdalssandi í nágrenni Blautukvíslar. Myndin er tekin úr sjálfvirkri myndavél í Hafursey. Í miklum stormum fýkur ryk einnig upp af sandsvæðunum í nágrenni flæðnanna og það á við þegar þessi mynd er tekin. – Dust emissions at the Mýrdalssandur dust hot-spot. Photo from surveillance camera above the sand-field. Ljósm./Photo: Landbúnaðarháskóli Íslands.

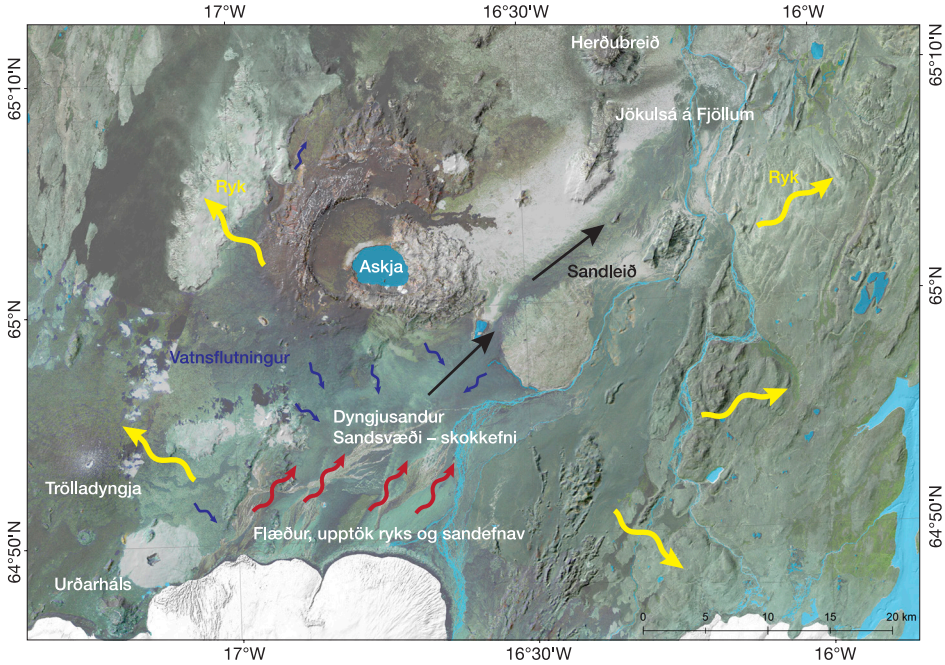
er mun meira áberandi þar sem jökulár hafa borið fram efni frá virkum eldfjöllum undir jökli, svo sem á vatnasviði Bárðarbungu, Grímsvatna og Kötlu. Korn sem koma beint frá meginuppsprettunum eru iðulega mjög óregluleg með hvössum hornum, en korn sem verða fyrir síendurteknu foki rúnnast smám saman.

TÍÐNI RYKSTORMA OG MAGN ÁFOKSEFNA

Miklir rykstormar á meginlöndunum geta komið af stað meira en milljón tonna af ryki.[38] Mat á heildarmagni uppfoks og rykefna í heiminum er mjög á reiki en yfirleitt er það talið nema 500–5.000 milljónum tonna.[2,39] Stærsti hluti ryksins kemur frá norðanverðri Afríku, ekki síst frá Bodélé-lægðinni í Tsjad.[40] Önnur mikilvirk uppfokssvæði eru til dæmis í Mongólíu,[41] við Aralvatnið (uppþornuð svæði),[42] og í Ástralíu.[38,43] Áhugi á uppfoki ryks á Íslandi hefur farið ört vaxandi eftir að ljóst varð hversu mikið það er, og að landið er jafnvel í hópi virkustu rykuppspretta jarðar.[14,18,25,36,44]

Pavla Dagsson-Waldhauserová og samstarfsfólk[24,28] rannsökuðu tíðni rykatburða á landinu og byggðist rannsóknin á því að meta skyggni á mönnuðum veðurstöðvum vítt um landið. Áður hafði Engelstaedter unnið svipaða rannsókn á veðurathugunum með minna en 1 km skyggni frá átta veðurstöðvum.[39] Samkvæmt þessum rannsóknum valda um 135 rykatburðir á Íslandi árlega minnkuðu skyggni á veðurstöðvum.[24,28] Stundum stendur fok undan hvassri norðanátt beint á haf út frá söndum á Suðurlandi án þess að skerða skyggni á veðurstöðvum og því eru þetta lágmarkstölur. Auk þess á fjöldi rykatburða sér stað fjarri veðurstöðvum og koma þeir því ekki fram í veðurfarsgögnum, ekki síst á Dyngjusandi, Mælifellssandi, í Vonarskarði og við Eiríksjökul. Af framansögðu er ljóst að fjöldi rykatburða á Íslandi er gríðarlegur. Lýsingar á skyggni gefa einnig til kynna styrk fokefna í andrúmslofti því að samhengi er á milli skyggnis í km og styrks rykefna í $\mu g/m^3$. Lítið skyggni (<1 km) vegna ryks mælist í um 5% tilfella, í mjög öflugum rykveðrum.

Þremur aðferðum hefur verið beitt til að meta magn rykefna sem fýkur upp á landinu. Í fyrsta lagi hefur magnið verið áætlað út frá jarðvegssniðum. Þau voru notuð til að búa til sérstakt áfokskort þar sem einnig var tekið tillit til veðurfarsþátta og fjarlægðar frá helstu fokuppsprettum (1. mynd).[45] Í öðru lagi hefur verið byggt á tíðni og stærð rykatburða í ofangreindum rannsóknum Pövlu



6. mynd. Umhverfi Dyngjusands, virkustu sanduppsprettu landsins. Rauðu örvarnar eru á Flæðum, meginuppsprettu ryksins. Þaðan berst ryk (gular örvar) einkum til norðurs. Hinn eiginlegi Dyngjusandur er norðan við Flæður en sandleið (svartar örvar) liggur á milli Vaðöldu og Dyngjufjalla. Flutningar með vatni (bláar örvar), einkum í leysingum, eru mikilvægur hluti af færslu efna á svæðinu. – The Dyngjusandur dust-hotspot area. Much of the dust is blown from the glacio-fluvial deposition area next to the glacier (Flæður, red arrows), coarser grained materials accumulate at Dyngjusandur. The dust (yellow arrows) is blown from NW to SE directions, with N and NE most common. A >25 km path of sand drift is indicated by black arrows. Blue arrows highlight the importance of water erosion in the dynamic of the area.

Dagsson-Waldhauserovu o.fl. Notað var efnismagnið 0,1 milljón tonn fyrir lítil rykveður, 0,3 fyrir meðalstóra atburði og 1 milljón tonna fyrir öflug rykveður.[45] Í þriðja lagi hafa verið gerðir líkanreikningar fyrir landið þar sem veðurupplýsingar fyrir heilu árin og gögn sem sýna sandyfirborð landsins eru notuð til að herma uppfokið.[17] Þessar aðferðir gefa nokkuð mismunandi niðurstöður um magn uppfoksefna, en draga þó upp sannfærandi mynd af magni uppfoksins. Aðferðin þar sem stuðst var við jarðvegssnið gaf heildaruppfok upp á 40 milljónir tonna á ári. Í þeirri tölu eru þunnar gjóskudreifar fjarri gosstöðvum, virk foktímabil í kjölfar gjóskugosa, endurfok ösku sem fellur á illa gróið land og að hluta mikið áfok sem fylgdi uppblæstri í kjölfar hruns vistkerfa á miðöldum (sjá umfjöllun um uppruna áfoks). Því má ætla að hér sé uppfokið ofmetið miðað við aðstæður nú á tímum, en hve mikið er óljóst. Aðferðin sem byggðist á meðalfjölda rykatburða sem mælast á veðurstöðvum og stærð þessara storma gaf 30 milljónir tonna á ári. Samkvæmt nýlegum rannsóknum okkar (óbirt gögn) kunna stormar að vera mun fleiri en gert er ráð fyrir í þeim útreikningum en magn ryks í stormum er afar gróft meðaltal byggt á mældum stormum. Þriðja leiðin er líkangerð sem Christine Groot Zwaaftink og félagar[17] beittu. Hún gaf til kynna mun minna árlegt heildarfok eða sem nam um 5 milljónum tonna. Ekki hefur enn tekist að laga uppfokslíkön að hinum sérstöku aðstæðum á helstu rykuppsprettunum, sem myndi leiða til hærri gilda. Tilraunir (óbirt gögn) í samvinnu við Alþjóða-veðurfræðistofnunina (WMO), sem meðal annars sér um að mæla rykmengun og vara við henni, gefa til kynna mun hærri tölur. Þegar allar þessar aðferðir eru lagðar saman fæst mynd af uppfoksmagninu: 5–40 milljónir tonna á ári. Vitaskuld er fokið mjög misjafnt á milli ára og öðru hverju koma afar virk tímabil í kjölfar eldgosa og jökulhlaupa, svo sem fokið eftir Eyjafjallagosið 2010 og eftir jökulhlaupið í kjölfar Gjálpargossins í Vatnajökli 1996. Þá eykst rykmengun þegar veður er mjög þurrkasamt á ákveðnum svæðum, svo sem á Vesturlandi sumarið 2019.

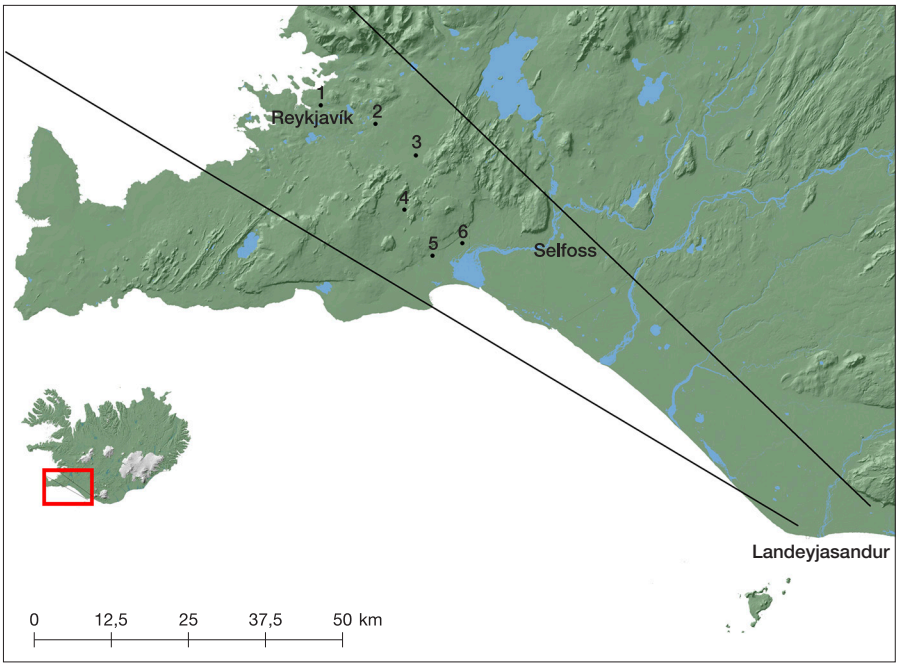
1. tafla. Kornastærðir á Flæðum á Dyngjusandi, á sandsvæði við Vaðöldu og á sandleiðinni frá Flæðum til Herðubreiðar. – Particle-size for the Flæður (area of glacio-fluvial deposition; main dust contribution area), Vaðalda sand area downwind from the Flæður, and near Mount Herðubreið, at 20 km from the source area where the materials are deposited.

Staður / *Location*	km frá Flæðum / *km from Flæður*	Tölur í mm / *Particle size (mm)*			
		% >1	% < 0,045	% 0,045 – 1	Meðal / *Mean*
Flæður	0	0	20	80	0,039
Vaðalda	9,5	0,3	98	1,5	0,16
Nærri / *near* Herðubreið	20,5	11	85	4,0	0,32

ÁHRIF SVIFRYKS

Heilsufar, loftslag og snjór

Svifryk hefur neikvæð áhrif á heilsufar og því neikvæðari sem agnirnar eru smærri (t.d. <1 μm).[2,46] Rannsóknir sýna að svifryk getur haft áhrif á dánartíðni manna mörg hundruð km frá upprunastað ryksins.[47] Gerð korna, stærð og lögun hefur einnig áhrif. Lögun korna í svifryki frá helstu uppfokssvæðum á Íslandi er iðulega mjög óregluleg, með hvössum hornum, sem er skaðlegt starfsemi lungnanna.[48] Þá sýna rannsóknir okkar að hlutfall smárra korna í svifrykinu er óvenju hátt hérlendis og gerir það heilsufarsáhrif enn neikvæðari[2] (sjá kafla um rykveður frá suðurströndinni). Áhersla á rannsóknir á tengslum svifryksmengunar og heilsufars í heiminum hefur vaxið hratt á síðustu árum.[2] Rannsóknir sýna að



7. mynd. Svifryk upprunnið á Landeyjasandi og Fornusöndum, sem eru beggja vegna Markarfljótsósa, mælt á nokkrum stöðum milli Ölfuss og Reykjavíkur. Rykatburður 15. júní 2015, gildin mæld síðdegis. Gildi fyrir sex mælistaði eru gefin uppi í fremri dálki fyrir PM_{15} og aftari dálki fyrir PM_1.[32] – Dust concentrations (measured PM_{15} and PM_1) at six locations during a dust storm (June 15, 2015) originating from the Landeyjasandur dust source. Concentrations are quite high in Reykjavik, >100 km from the source.[32]

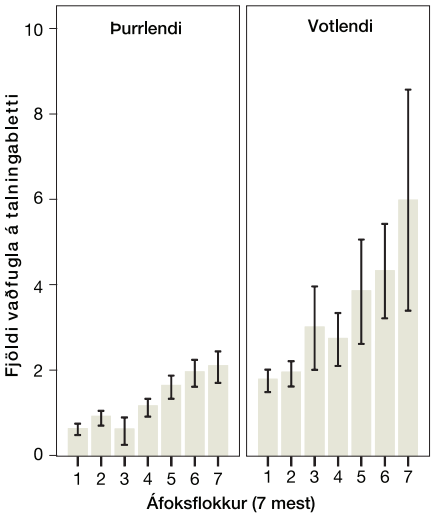
	PM_{15} (µg/m³)	PM_1 (µg/m³)
1	405	108
2	162	97
3	168	99
4	169	102
5	414	181
6	1260	241

svifryksmengun hefur neikvæð áhrif á lýðheilsu hérlendis.[49–51] Rétt er að geta þess að mikil svifryksmengun á sér stað í þéttbýli á borð við Reykjavík af margvíslegum öðrum orsökum en hér eru til umfjöllunar, meðal annars vegna sótmengunar, efna sem nagladekk losa o.fl.[20] Hátt hlutfall malbiks, þakefna og fleiri sléttra yfirborðsgerða magnar líkast til upp mengun af þessum völdum – efnin fjúka upp aftur og aftur. Þannig er yfir 95% yfirborðs í Skeifunni í Reykjavík slétt, en þar hefur svifryksmengun einmitt mælst mikil. Við þessa mengun bætist ryk frá sandsvæðum landsins. Meiri gróðurþekja nærri umferðarmannvirkjum og aukinn yfirborðshrjúfleiki með trjám og runnum geta dregið verulega úr rykmengun í þéttbýli. Mikilvægt er að auka rannsóknir á áhrifum rykmengunar á lýðheilsu hérlendis.

Áfok og vistkerfi

Áfok rykefna hefur áhrif á vistkerfið þar sem rykið fellur, jafnvel þótt það sé órafjarri upprunastaðnum. Þannig hefur ryk frá Sahara áhrif á mold á Amason-svæðinu í Suður-Ameríku, sem og í Evrópu.[52–55] Áhrif áfoks á vistkerfi eru líklega meiri á Íslandi en annars staðar á jörðinni. Yfirborð gróins lands rís smám saman – mishratt eftir því hve mikið áfokið er. Áfoksefnin veðrast í jarðveginum, örast efst, þar sem ný áfoksefni bætast í sífellu ofan á kerfið. Samsetning áfoksins á Íslandi gefur jarðveginum jafnframt afar sérstæða eiginleika. Sem fyrr segir er efnið basískt, illa kristallað og veðrast hratt. Raunar er það svo að efnaveðrun í jarðvegi hérlendis er með því örasta sem þekkist,[35,56] öfugt við það sem ætla mætti vegna kuldans. Veðrunin losar katjónir á borð við Ca^{++}, K^{+}, Na^{+} og Mg^{++}. Þær viðhalda hagstæðu sýrustigi í moldinni og nýtast sem næringarefni fyrir lífríkið. Við efnaveðrun á basískum áfokskornum myndast nýjar steindir á borð við allófan, ferrihýdrít og imógólít, sem eru einkennissteindir jarðvegs á eldfjallasvæðum. Slíkur jarðvegur nefnist *eldfjallajörð* eða *sortujörð* á íslensku (e. Andosol).[57] Þar sem áfokið er mikið verður hlutdeild lífræns innihalds í jarðveginum minni, meðal annars í votlendi. Íslensk votlendi eru að þessu leyti nokkuð sérstök. Þó er heildarmagn kolefnis í hverjum rúmmetra þar sem áfok er mikið svipað því sem þekkist til dæmis í mómýrum Fennóskandinavíu, þar sem lífræna hlutdeildin er meiri. Því veldur meiri rúmþyngd jarðvegsins þar sem áfokið er mikið (lægra kolefnishlutfall en þyngri mold). Mjög lífrænn votlendisjarðvegur, *mójörð*, finnst einkum þar sem áfokið er minnst. Segja má að áfokið og eðli þess sé ráðandi þáttur við mótun íslenskra vistkerfa, en vitaskuld hafa jarðvatnsstaða og fleiri þættir áhrif.

Fuglar sitja efst í fæðukeðjunni og eru um margt næmur mælikvarði á frjósemi og stöðu vistkerfa, meðal annars með tilliti til frjósemi þeirra, ástands og hnignunar. Tómas Grétar Gunnarsson og samstarfsmenn[55] lögðu saman gögn um þéttleika varpfugla og magn áfoks á grónu landi. Íslandi var þar deilt upp í sjö flokka eftir áfoki. Þá kom fram ákaflega athyglisvert mynstur: Þéttleiki



8. mynd. Tengsl áfoks og þéttleika vaðfugla á þurrlendi. Áfoksmagni er skipt í sjö flokka, frá litlu áfoki (1) til mjög mikils áfoks (7), í þurrlendi annars vegar og votlendi hins vegar.[55] – The relationship between number of waders and average dust deposition category, from low (1) to high rates (7) in both drylands (left) and wetlands (right).[55]

varpfugla var mun meiri þar sem áfokið var mikið, bæði í votlendi og þurrlendi (8. mynd). Niðurstöðurnar sýna afgerandi áhrif áfoks á frjósemi landsins. Gögn sem sýna svo skýrt samband frjósemi og áfoks hafa okkur vitanlega ekki verið sett fram annars staðar.

Ryk hefur ekki aðeins áhrif á frjósemi landvistkerfa, heldur einnig á frjósemi sjávarvistkerfa. Til dæmis hefur rykið frá Sahara áhrif á vistkerfi Atlantshafsins.[58–60] Ryk getur aukið framboð á næringarefnum í sjó, sérstaklega þar sem framboð steinefna (s.s. járns) telst takmarkandi, hækkað sýrustig og bundið CO_2, meðal annars á heimskautasvæðunum.[61] Frjósemi hafsvæðanna umhverfis Ísland er talin takmarkast af framboði á járni[62,63] og vísindamenn eru nú teknir að rannsaka áhrif járns á vistkerfi á norðurheimskautssvæði Atlantshafsins.[64] Íslensku fokefnin eru óvenju járnrík, með um 10% Fe, mun járnríkari en kísil- og kalkrík efni sem berast frá söndum meginlandanna. Því er líklegt að fokið frá Íslandi hafi jákvæð áhrif á frjósemi hafsvæða umhverfis landið.[45] Vitaskuld skila jökulárnar einnig ógrynni af járni í sjó fram, en rykefnin eru hins vegar mun fínkornóttari að meðaltali og dreifast í yfirborðslög á margfalt stærra hafsvæði, sem eykur líkur á því að þau hafi áhrif á lífkerfið í sjó.

RYKIÐ OG ANDRÚMSLOFTIÐ

Ryk hefur margvísleg áhrif á lofthjúp og veðurfar. Ryk dregur í sig sólarljós sem hefur áhrif á hegðun veðurkerfa og veldur aukinni hlýnun jarðar.[2,65,66] Rykagnir stuðla að myndun ískristalla og auka á skýjamyndun og hafa með þeim hætti einnig áhrif á veðurfar.[67,68] Því er lögð vaxandi áhersla á að taka tillit til ryks í loftslagslíkönum.[2,69] Þá er talið að ryk eigi þátt í því að áhrif loftslagsbreytinga eru hvað mest á heimskautasvæðum (e. Arctic amplification).[4] Hinn dökki litur ryks frá Íslandi veldur því að kornin draga í sig sólarljós sem eykur á hlýnun lofts á heimskautasvæðunum.[70] Þegar ryk frá Íslandi sest á snjó minnkar endurkast frá yfirboði og bráðnun eykst, sem hefur áhrif á afkomu vetrarsnævar, jökla og hafíss.[3,61,71] Ryk berst meðal annars upp á íslensku jöklana og getur valdið aukinni bráðnun svo nemur tugum prósenta, enda þótt þurrar vindáttir standi yfirleitt frá jöklum og meginhluti ryksins berist frá jöklunum.[72] Talið er að ryk frá Íslandi hafi fundist við svifryksmælingar á Svalbarða,[30] og styður það tilgátur um mikil áhrif ryks frá Íslandi á náttúrufar norðurslóða. Ætla má að það ryk sé einkum komið frá Dyngjusandi. Þá hefur ryk frá Íslandi fundist í Grænlandsísnum[73] og á Írlandi.[74] Dökkur litur íslensku rykefnanna eykur mjög áðurnefnd áhrif á geislun í andrúmsloftinu og áhrifin á yfirborð íss og snævar. Áhrif ryksins á veðurfarsþætti er hins vegar mál sem bíður ýtarlegri umfjöllunar.

LOKAORÐ

Uppfok ryks hérlendis er með því allra mesta sem þekkist á jörðinni. Það veldur áfoki á landið allt og hefur með því afgerandi áhrif á mótun vistkerfa landsins. Rykið viðheldur meðal annars frjósemi jarðvegs og hefur að líkindum sömu áhrif á hafi úti en mikil rykmengun hefur neikvæð áhrif á lýðheilsu. Rykframleiðslan hefur breyst í tímans rás og er nú að stórum hluta bundin við sandauðnir landsins en ekki uppblástur gróinna vistkerfa eins og áður var. Þetta hefur áhrif á túlkun gagna um þykknunarhraða moldarinnar. Rykframleiðslan er mest á svæðum þar sem mikið af fínefnum (silti) safnast saman, svo sem framan við jökla og með suðurströndinni, sem eru eins konar „ofur-uppsprettur“ ryks og áfoks. Líkön fyrir uppfok ná enn sem komið er ekki utan um þær sérstæðu aðstæður sem þar ríkja.

Helstu rykuppsprettur á Íslandi skipa afar sérstakan sess í náttúrufari landsins, svo sem Dyngjusandur, Mælifellssandur og Hagavatnsaurar, vegna þeirra víðtæku áhrifa sem rykið hefur. Þessir

ÞAKKIR

Þessi samantekt byggist að hluta á rannsóknum sem Rannsóknasjóður styrkti (Rannís-styrkir nr. 152248-051 og nr. 050207023). Hjalti Sigurjónsson, Einar Grétarsson, Fanney Gísladóttir, Haraldur Ólafsson, Agnes Ösp Magnúsdóttir, Tómas Grétar Gunnarsson og Lea María Lemarquis hafa, auk höfunda greinarinnar, komið að ýmsum þeim rannsóknum sem notaðar eru við gerð þessa yfirlits. Þá hafa margir innlendir og erlendir samstarfsaðilar komið að rannsóknunum á einhverju stigi. Öllum þessum aðilum er þakkað gott samstarf.

HEIMILDIR

1. Ólafur Arnalds, Elín Fjóla Þórarinsdóttir & Fanney Ósk Gísladóttir 2019. Sandauðnir, sandfok og ryk á Íslandi. I. Sandar og fok. Náttúrufræðingurinn 89. 34–47.
2. Shepherd, G. (ritstj.) 2016. Global assessment of sand and dust storms. Umhverfisáætlun SÞ (UN Environment Program), Nairobi. 125 bls.
3. Meinander, O., Pavla Dagsson-Waldhauserová & Ólafur Arnalds 2016. Icelandic volcanic dust can have a significant influence on the cryosphere in Greenland and elsewhere. Polar Research 35. doi:10.3402/polar.v35.31313
4. Lambert, F., Kug, J.-S., Park, R.J., Mahowald, N., Winckler, G., Abe-Ouchi, A., O'ishi, R., Takemura, T. & Lee, J.H. 2013. The role of mineral-dust aerosols in polar temperature amplification. Nature Climate Change 3. 487–491.
5. Field, J.P., Belnap, J., Breshears, D.D., Neff, J.C., Okin, G.S., Whicker, J.J., Painter, T.H., Ravi, S., Reheis, M.C. & Reynolds, R.L. 2010. The ecology of dust. Frontiers in Ecology and the Environment 8. 423–430.
6. Sigurður Þórarinsson 1961. Uppblástur á Íslandi í ljósi öskulagarannsókna. Ársrit Skógræktarfélags Íslands 1960–1961. 17–54.
7. Guttormur Sigbjarnarson 1969. Áfok og uppblástur. Náttúrufræðingurinn 39. 68–119.
8. Grétar Guðbergsson 1975. Myndun móajarðvegs í Skagafirði. Íslenskar landbúnaðarrannsóknir 7(1–2). 20–45.
9. Ólafur Arnalds, Hallmark, C.T. & Wilding, L.P. 1995. Andisols from four different regions of Iceland. Soil Science Society of America Journal 59. 161–169.
10. Stoops, G., Gérard, M. & Ólafur Arnalds 2008. A micromorphological study of Andosol genesis in Iceland. Bls. 67–90 *í:* New Trends in Micromorphology (ritstj. Kapur, S., Mermut, A. & Stoops, G.). Springer, Heidelberg.
11. Dugmore, A.J., Newton, A.J., Guðrún Larsen & Cook, G.G.T. 2000. Tephrochronology, environmental change and the Norse settlement of Iceland. Environmental Archaeology 5. 21–34.
12. Ólafur Arnalds 2015. Collapse, erosion, condition, and restoration. Bls. 153–180 (12. kafli) *í:* The soils of Iceland (ritstj. Ólafur Arnalds). Springer, Dordrecht.
13. 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.
14. Ólafur Arnalds 2010. Dust sources and deposition of aeolian materials in Iceland. Icelandic Agricultural Sciences 23. 3–21.
15. Sigurður H. Magnússon 2013. Þungmálmar og brennisteinn í mosa á Íslandi 1990–2010: Áhrif iðjuvera. Náttúrufræðistofnun Íslands (NI-13003), Reykjavík.
16. Sigurður H. Magnússon 2018. Vöktun þungmálma og brennisteins í mosa á Íslandi 1990–2015: Áhrif frá iðjuverum og eldvirkni. Náttúrufræðistofnun Íslands (NI-18006), Reykjavík.
17. Groot Zwaaftink, C.D., Ólafur Arnalds, Pavla Dagsson-Waldhauserová, Eckhardt, S., Prospero, J.M. & Stohl A. 2017. Temporal and spatial variability of Icelandic dust emissions and atmospheric transport. Atmospheric Chemistry and Physics 17. 10865–19878.

staðir hafa sérstöðu á heimsvísu, vegna virkni foksins og eðlis fokefnanna. Það er mikilvægt að fylgjast vel með þróun þessara svæða, meðal annars í tengslum við hörfun jökla vegna hlýnunar jarðar og breytinga í kjölfar jökulhlaupa. Miklu skiptir að efla rannsóknir á uppfoki á ryki og áhrifum þess á vistkerfi, loftslag og lýðheilsu, svo dæmi séu tekin.

Þar sem auðnir landsins hafa stækkað verulega á síðustu þúsöld hefur endurfok efna sem falla á ógróið land aukist mjög. Það hefur margvísleg neikvæð áhrif, bæði vegna efna frá meginuppsprettum ryks og vegna öskufalls, meðal annars á lýðheilsu. Það er full ástæða til að huga betur að vistkerfum í nágrenni virkra eldstöðva á borð við Heklu og Kötlu út frá þessu sjónarmiði.[22,75] Öflugir fræberandi birkiskógar ættu að vera markmið vistheimtar á þessum svæðum, því slíkt gróðurfar þolir áföllin vel og birkiskógar dreifast ört út aftur eftir náttúruleg áföll, sé fræframboð mikið og sauðfjárbeit takmörkuð.[76,77] Einnig þarf að draga sem verða má úr sléttu yfirborði, svo sem úr steypu og malbiki, í þéttbýli nærri umferðarmannvirkjum og auka tré- og runnagróður sem bindur rykefni og dregur úr loftmengun.

ENGLISH SUMMARY

Icelandic sandy deserts and aeolian processes – II. Dust

The paper is one of two in this journal reviewing the nature of sandy deserts and aeolian processes in Iceland with this one primarily focused on dust. Iceland rates among the most productive dust areas on Earth with annual dust production of the order of >10 million tons per year. The frequency is >135 dust storms per annum, and most likely much higher than that. Dust deposition is a major factor shaping all ecosystems as the dust is the primary component of the soil parent materials together with volcanic ash deposited during eruptions. The sources of dust have changed over the last millennia from being primarily soil materials due to man-induced ecosystem collapse to being primarily more confined dust desert areas of continuous silty sediment accumulation. These areas are floodplains in front of glaciers, areas along glacial rivers subjected to major flood events, glacial lakes with fluctuating water levels, and shorelines close to the outlet of major glacial rivers. These areas include Dyngjusandur, Mælifellssandur, Hagavatnsaurar, Mýrdalssandur, areas at both sites of the outlets of the Markarfljót and Kúðafljót rivers, and Skeiðarársandur. Dyngjusandur, north of Vatnajökull glacier, rates among the most productive dust sources on Earth and the dust is blown 100's and even 1000's of km into the Arctic areas. Dust pollution often exceeds health limits in Iceland, even at great distances from the major dust sources. The dust often has a high component of very fine particles (PM_1) and dust grains of that size are often elongated with sharp edges which is also negative from the health aspect. The basaltic composition of the dust leads to rapid soil weathering rates that enhances the fertility of ecosystems in Iceland. The high iron content may also enhance fertility of oceans around Iceland. The dust has influence on atmospheric conditions such as formation of clouds and albedo. Dust increases rates of snow and glacial melt and may enhance climate warming.

18. Ólafur Arnalds, Pavla Dagsson-Waldhauserová & Haraldur Ólafsson 2016. The Icelandic volcanic aeolian environment: Processes and impacts – A review. Aeolian Research 20. 176–195.
19. Gunnhildur Ingibjörg Georgsdóttir 2012. Sandfok á Íslandi 2002 til 2012: Tíðni, upptakasvæði og veðuraðstæður. MS-ritgerð við jarðvísindadeild Háskóla Íslands, Reykjavík.
20. Þröstur Þorsteinsson, Guðrún Gísladóttir, Bullard J. & McTainsh G.H. 2011. Dust storm contributions to airborne particulate matter in Reykjavík, Iceland. Atmospheric Environment 45. 5924–5933.
21. Leadbetter, S.J., Hort, M.C., von Löwis S., Weber, K. & Witham, C.S. 2012. Modeling the resuspension of ash deposited during the eruption of Eyjafjallajökull in spring 2010. Journal of Geophysical Research 117(D20). doi.org/10.1029/2011JD016802
22. Guðmundur Halldórsson, Anna María Ágústsdóttir, Ása L. Aradóttir, Ólafur Arnalds, Nilsson, C., Hreinn Óskarsson, Mortensen, L., Pagneux, E., Pilli-Sihvola, K., Raulund-Rasmussen, K., Kristín Svavarsdóttir & Tolvanen, A. 2017. Ecosystem restoration for mitigation of natural disasters. TemaNord 2017. 546.
23. Bistrow, C.S. & Moller, T.H. 2018. Dust production by abrasion of aeolian sands: Analogue for Martian Dust. Journal of Geophysical Research – Planets. doi:10.1029/2018JE005682
24. Pavla Dagsson-Waldhauserová, Ólafur Arnalds & Haraldur Ólafsson 2014. Long-term variability of dust events in Iceland. Atmospheric Chemistry and Physics 14. 13411–13422.
25. Bullard, J.E. 2013. Contemporary glacigenic inputs to the dust cycle. Earth Surface Processes and Landforms 38. 71–89.
26. Esther Hlíðar Jensen, Davíð Egilsson, Svava Björk Þorláksdóttir, Snorri Zóphóníasson & Gunnar Sigurðsson 2017. Mælingar á aurburði og rennsli í Jökulkvísl árin 2015 og 2016. Landsvirkjun og Orkusalan (LV –2017–126, ORK–1702), Reykjavík.
27. Pavla Dagsson-Waldhauserová, Ólafur Arnalds, Haraldur Ólafsson, Skrabalova, L., Guðmunda María Sigurðardóttir, Branis, M., Hladil, J., Skala, R., Havratil, T., Chadimova, L., von Lowis of Menar, S., Þröstur Þorsteinsson, Carlsen, H.K. & Ingibjörg Jónsdóttir 2014. Physical properties of suspended dust during moist and low wind conditions in Iceland. Icelandic Agricultural Sciences 27. 25–39.
28. Pavla Dagsson-Waldhauserová, Ólafur Arnalds & Haraldur Ólafsson 2013. Long-term frequency and characteristics of dust storm events in Northeast Iceland (1949–2011). Atmospheric Environment 77. 117–127
29. Pavla Dagsson-Waldhauserová, Ólafur Arnalds & Haraldur Ólafsson 2017. Long term dust aerosol production from natural sources in Iceland. Journal of the Air & Waste Management Association 67. 173–181.
30. Moroni B., Ólafur Arnalds, Pavla Dagsson Waldhauserová, Crocchianti, S., Vivani R. & Cappelletti, D. 2018. Mineralogical and chemical records of Icelandic dust sources upon Ny-Ålesund (Svalbard Islands). Frontiers in Earth Science 2018. 187–219, doi:10.3389/feart.2018.00187
31. Þröstur Þorsteinsson, Þorsteinn Jóhannsson, Stohl A. & Kristiansen, N. 2012. High levels of particulate matter in Iceland due to direct ash emissions by the Eyjafjallajökull eruption and resuspension of deposited ash. Journal of Geophysical Research. 117 (B00C05).
32. Pavla Dagsson-Waldhauserová, Agnes Ösp Magnúsdóttir, Haraldur Ólafsson & Ólafur Arnalds 2016. The spatial variation of dust particulate matter concentrations during two Icelandic dust storms in 2015. Atmosphere 7(6), 3–18. doi:10.3390/atmos7060077 7. 77
33. Lea María Lemarquis 2018. Frequency and origin of dust events in Fljótshlíð, South Iceland, in 2017. BS-ritgerð við jarðvísindadeild Háskóla Íslands, Reykjavík.
34. Esther Hlíðar Jensen, Davíð Egilson, Emmanuel Pagneux, Bogi B. Björnsson, Snorri Zóphóníasson, Snorri Páll Snorrason, Ingibjörg Jónsdóttir, Ragnar H.

Þrastarson, Oddur Sigurðsson & Matthew J. Roberts 2018. Hættumat vegna jökulhlaupa í Skaftá: Mat á setflutningi með sögulegu yfirliti. Veðurstofa Íslands (VÍ 2018–005), Reykjavík.
35. Sigurður Reynir Gíslason 2008. Weathering in Iceland. Jökull 56. 387–408.
36. Prospero, J.M., Bullard, J.E. & Hodgkins, R. 2012. High-latitude dust over the North Atlantic: Inputs from Icelandic proglacial dust storms. Science 335. 1078–1082.
37. Baratoux, D., Mangold, N., Ólafur Arnalds, Bardintzeff, J.-M., Platevoët, B., Grégoire, M. & Pinet, P. 2011. Volcanic sands of Iceland – Diverse origins of aeolian sand deposits revealed at Dyngjusandur and Lambahraun. Earth Surface Processes and Landforms 36. 1789–1808.
38. Leys, J.F., Heidenreich, S.K., Strong, C.L., McTainsh, G.H. & Quigley, S. 2011. PM10 concentrations and mass transport during "Red Dawn" – Sydney 23 September 2009. Aeolian Research 3. 327–342.
39. Engelstaedter, S., Kohfeld, K.E., Tegen I. & Harrison, S.P. 2003. Controls of dust emissions by vegetation and topographic depressions: An evaluation using dust storm frequency data. Geophysical Research Letters 30(6). 1294. doi:10.1029/2002GL016471
40. Gherboudj, I., Beegum, S.N. & Ghedira, H. 2017. Identifying natural dust source regions over the Middle-East and North-Africa: Estimation of dust emission potential. Earth Science Reviews 165. 342–355.
41. Natsagdorj, L., Jugder, D. & Chung, Y.S. 2003. Analysis of dust storms observed in Mongolia during 1937–1999. Atmospheric Environment 37. 1401–1411.
42. Singer, A., Zobeck, T., Poberezsky, L. & Argaman, E. 2003. The PM10 and PM2.5 dust generation potential of soils/sediments in the Southern Aral sea basin, Uzbekistan. Journal of Arid Environments 54. 705–728.
43. Ekstrom, M., McTainsh, G.H. & Chappell, A. 2004. Australian dust storms: Temporal trends and relationships with synoptic pressure distributions (1960–1999). International Journal of Climatology 24. 1581–1599.
44. Blechschmidt, A.-M., Jón Egill Kristjánsson, Haraldur Ólafsson, Burkhart, J.F. & Hodnebrog, Ø. 2012. Aircraft-based observations and high-resolution simulations of an Icelandic dust storm. Atmospheric Chemistry and Physics 12. 7949–7984.
45. Ólafur Arnalds, Haraldur Ólafsson & Pavla Dagsson-Waldhauserová 2014. Quantification of iron-rich volcanogenic dust emissions and deposition over ocean from Icelandic dust sources. Biogeosciences 11(4). 6623–6632. doi:10.5194/bg-11-6623-20145941–5967
46. Colls, J. & Tiwary, A. 2010. Air pollution measurement, modelling and mitigation. (3. útg.). Routledge, London og New York.
47. Perez, L., Tobias, A., Querol, X., Künzli, N., Pey, J. & Alastuey, A. 2008. Coarse particles from Saharan dust and daily mortality. Epidemiology 19. 800–807.
48. Donaldson, K., Stone, V., Faux, S. & MacNee, W. 2006. Testing new particles. Bls. 163–195 *í:* The impact of air pollution on respiratory health (ritstj. Ayres, J., Maynard, R. & Richards, R.). Imperial College Press, London.
49. Carlsen, H.C., Þórarinn Gíslason, Forsberg, B., Meister, K., Þröstur Þorsteinsson, Þorsteinn Jóhannsson, Ragnhildur Finnbjörnsdottir & Oudin, A. 2015. Emergency hospital visits in association with volcanic ash, dust storms and other sources of ambient particles: A Time-Series study in Reykjavík, Iceland. International Journal of Environmental Research and Public Health 12. 4047–4059.
50. Carlsen, H.C., Arna Hauksdóttir, Unnur Anna Valdimarsdóttir, Þórarinn Gíslason, Gunnlaug Einarsdóttir, Halldór Runólfsson, Haraldur Briem, Ragnhildur Guðrún Finnbjörnsdóttir, Sigurður Guðmundsson, Þórir Björn Kolbeinsson, Þröstur Þorsteinsson & Guðrún Pétursdóttir 2012. Health effects following the Eyjafjallajökull volcanic eruption: A cohort study. BMJ Open. doi:10.1136/bmjopen-2012–00185
51. Ragnhildur Guðrún Finnbjörnsdóttir, Helga Zoëga, Örn Ólafsson, Þröstur Þorsteinsson & Vilhjálmur Rafnsson 2013. Association of air pollution and use of glyceryl trinitrate against angina pectoris: A population-based case-crossover study. Environmental Health 12:38. doi: 10.1186/1476-069X-12-38
52. Chadwick, O.A., Derry, L.A., Vitousek, P.M., Huebert, B.J. & Hedin, L.O. 1999. Changing sources of nutrients during four million years of ecosystem development. Nature 397. 491–497.
53. Vitousek, P.M., Chadwick, O.A., Matson, P., Allison, S., Derry, L.A., Kettley, L., Luers, A., Mecking, E., Monastra, V. & Porder, S. 2003. Erosion and rejuvenation of weathering derived nutrient supply in an old tropical landscape. Ecosystems 6. 762–772.
54. Lequy, E., Conil, S. & Turpault, M.P. 2012. Impacts of Aeolian dust deposition on European forest sustainability: A review. Forest Ecology and Management 267. 240–252.
55. Tómas Grétar Gunnarsson, Ólafur Arnalds, Appleton, G., Méndez, V. & Gill, J.A. 2015. Ecosystem recharge by volcanic dust drives broad-scale variation in bird abundance. Ecology and Evolution 5. 2386–2396.
56. Ólafur Arnalds 2015. Genesis and mineralogical characteristics. Bls. 107–117 (9. kafli) *í:* The soils of Iceland (ritstj. Ólafur Arnalds). Springer, Dordrecht
57. Ólafur Arnalds & Hlynur Óskarsson 2009. Íslenskt jarðvegskort. Náttúrufræðingurinn 78. 107–121
58. Prospero, J.M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S.E. & Gill, T.E. 2002. Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product. Reviews of Geophysics 40.(1). doi:10.1029/2000RG000095
59. Jickells, T.D., An, Z.S., Andersen, K.K., Baker, A.R., Bergametti, G., Brooks, N., Cao, J.J., Boyd, P.W., Duce, R.A., Hunter, K.A., Kawahata, H., Kubilay, N., LaRoche, J., Liss, P.S., Mahowald, N., Prospero, J.M., Ridgewell, A.J., Tegen, I. & Torres, R. 2005. Global iron connections between desert dust, ocean biogeochemistry, and climate. Science 308. 67–71.
60. Langmann, B., Zaksek, K., Hort, M. & Duggen, S. 2010. Volcanic ash as fertiliser for the surface ocean. Atmospheric Chemistry and Physics 10. 3891–3899.
61. Bullard, J.E., Baddock, M., Bradwell, T., Crusius, J., Darlington, E., Gaiero, D., Gassó, S., Guðrún Gísladóttir, Hodgkins, R., McCulloch, R., Neuman, C.M., Mockford, T., Stewart, H. & Þröstur Þorsteinsson 2016. High latitude dust in the Earth system. Reviews of Geophysics 54(2). 447–485. doi.org/10.1002/2016RG000518
62. María C. Níelsdóttir, Moore, C.M., Sanders, R., Hinz, D.J. & Achterberg, E.P. 2009. Iron limitation of the postbloom phytoplankton communities in the Iceland basin. Gobal Biogeochemical Cycles 23. GB3001.
63. Ryan-Keogh, T.J., Macey, A.I., María C. Níelsdóttir, Lucas, M.I., Steigenberger, S.S., Stinchcombe, M.C., Actherberg, E. P., Bibby, T.S. & Moore, C.M. 2013. Spatial and temporal development of phytoplankton iron stress in relation to dynamics in the high-latitude North Atlantic Ocean. Limnology and Oceanography 58. 533–545.
64. Achterberg, E.P., Steigenberger, S., Marsay, C.M., LeMoigne, F.A.C., Painter, S.C., Baker, A.R., Connelly, D.P., Moore, C.M., Tagliabue, A. & Tanhua T. 2018. Iron biogeochemistry in the high latitude North Atlantic Ocean. Nature Scientific Reports 8. 1283. DOI:10.1038/s41598-018 19472-1.
65. IPCC 2013. Climate change 2013: The physical science basis. *Í:* Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge og New York. 1535 bls. Slóð: http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/#.UlvUNVPfShM
66. Kok, J., Ridley, D., Zhou, Q., Miller, R., Zhao, C., Heald, C., War, D., Albani, S., Haustein, K. 2017. Smaller desert dust cooling effect estimated from analysis of dust size and abundance. Nature Geoscience 10. doi:10.1038/NGEO2912
67. Boose, Y., Sierau, B., García, M.I., Rodríguez, S., Alastuey, A., Linke, C., Schnaiter, M., Kupiszewski, P., Kanji, Z.A. & Lohmann, U. 2016. Ice nucleating particles in the Saharan air layer. Atmospheric Chemistry and Physics 16. 9067–9087.
68. Ullrich, R., Hoose, C., Möhler, O., Niemand, M., Wagner, R., Höhler, K., Hiranuma, N., Saathoff, H. & Leisner, T. 2017. A new ice nucleation active site parametrization for desert dust and soot. Journal of the Atmospheric Sciences 74. 669–717.
69. Washington, R. & Wiggs, G.F.S. 2011. Desert dust. Bls. 517–538 *í:* Arid zone geomorphology: Process, form and change in drylands (3. útg.) (ritstj. Thomas, D.S.G.). Wiley, New York.
70. Kylling, A., Groot Zwaaftink, C.D. & Stohl, A. 2018. Mineral dust instantaneous radiative forcing in the Arctic. Geophysical Research Letters 45. doi:10.1029/2018GL077346
71. Peltoniemi, J.I., Gritsevich, M., Hakala, T., Pavla Dagsson-Waldhauserová, Ólafur Arnalds, Anttila, K., Hannula, H.-R., Kivekäs, N., Lihavainen, H., Meinander, O., Svensson, J., Virkkula, A. & de Leeuw, G. 2015. Soot on snow experiment: Bidirectional reflectance factor measurements of contaminated snow. The Cryosphere 9. 3075–3111.
72. Wittmann, M., Groot Zwaaftink, C.D., Steffensen Schmidt, L., Sverrir Guðmundsson, Finnur Pálsson, Ólafur Arnalds, Helgi Björnsson, Þröstur Þorsteinsson & Stohl, A. 2017. Impact of dust deposition on the albedo of Vatnajökull ice cap, Iceland. The Cryosphere 11. 741–754.
73. Drab, E., Gaudichet, A., Jaffrezo, J.L. & Colin, J.L. 2002. Mineral particles content in recent snow at Summit (Greenland). Atmospheric Environment 36. 5365–5376.
74. Ovadnevaite, J., Ceburnis, D., Plauskaite-Sukiene, K., Modini, R., Dupuy, R., Rimselyte, I., Ramonet, R., Kvietkus, K., Ristovski, Z., Berresheim, H. & O'Dowd, C.D. 2009. Volcanic sulphate and arctic dust plumes over the North Atlantic Ocean. Atmospheric Environment 43. 4968–4974.
75. Anna María Ágústsdóttir 2015. Ecosystem approach for natural hazard mitigation of volcanic tephra in Iceland: Building resilience and sustainability. Natural Hazards 78. 1669–1691.
76. Bryndís Marteinsdóttir, Kristín Svavarsdóttir & Þóra Ellen Þórhallsdóttir 2017. Multiple mechanisms of early plant community assembly with stochasticity driving the process. Ecology 99. 91–102.
77. Þóra Ellen Þórhallsdóttir 2015. Saga gróðurs og umhverfis á Brunasandi. Dynskógar: Héraðsrit Vestur-Skaftfellinga. 1–70.

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.

Pavla Dagsson-Waldhauserová lauk MS-prófi í eðlisrænni landfræði við Karlsháskólanum í Prag í Tékklandi og doktorsprófi við Háskóla Íslands og Landbúnaðarháskóla Íslands árið 2014. Hún hlaut rannsóknastöðustyrk við Háskóla Íslands að loknu doktorsprófi og síðan nýdoktorsstyrk. Rannsóknir hennar hafa beinst að rykmyndun og afdrifum ryks frá Íslandi. Hún starfar nú sem sérfræðingur við Landbúnaðarháskóla Íslands.

Sigmundur Helgi Brink lauk BS-prófi í náttúrufræðum við Landbúnaðarháskóla Íslands árið 2009 og hefur lagt stund á landupplýsingafræði við Háskólann í Lundi í Svíþjóð. Sigmundur hefur forystu um vinnu við margvísleg landupplýsingakerfi, m.a. við þróun landupplýsinga í tengslum við losun gróðurhúsalofttegunda frá landi. Sigmundur hefur unnið við Landbúnaðarháskóla Íslands frá 2008.

PÓST- OG NETFÖNG HÖFUNDA / AUTHORS' ADDRESSES

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

Pavla Dagsson-Waldhauserová
Landbúnaðarháskóla Íslands
Árleyni 22, Keldnaholti
IS-112 Reykjavík
pavla@lbhi.is

Sigmundur Helgi Brink
Landbúnaðarháskóla Íslands
Árleyni 22, Keldnaholti
IS-112 Reykjavík
brink@lbhi.is