NÍ-19002

Vöktun mosaþembugróðurs við Hellisheiðarvirkjun og Nesjavallavirkjun

Niðurstöður gróður- og efnamælinga 2017

Járngerður Grétarsdóttir, Ágústa Helgadóttir og Rannveig Thoroddsen

Unnið fyrir Orku náttúrunnar

NÁTTÚRUFRÆÐISTOFNUN ÍSLANDS

Vöktun mosaþembugróðurs við Hellisheiðarvirkjun og Nesjavallavirkjun

Járngerður Grétarsdóttir, Ágústa Helgadóttir og Rannveig Thoroddsen

NÍ-19002 Garðabær, apríl 2019

NÁTTÚRUFRÆÐISTOFNUN ÍSLANDS

Mynd á kápu: Vöktunarreitur á mælisniði við Nesjavallavirkjun. Merkingar fyrir smáreiti sjást í reitnum. Ljósm. Ágústa Helgadóttir, 20. júlí 2017.

ISSN 1670-0120

Urriðaholtsstræti 6-8 212 Garðabæ
Sími 590 0500 Fax 590 0595
http://www.ni.is ni@ni.is

Borgum
við Norðurslóð 602 Akureyri
Sími 460 0500 Fax 460 0501
http://www.ni.is nia@ni.is

Skýrsla nr.
NÍ-19002

Dags, Mán, Ár
Apríl 2019

Dreifing
Opin

Upplag
14

Fjöldi síðna
60

Kort / Mælikvarði
Yfirlitskort 1:95.000

Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill
Vöktun mosaþembugróðurs við Hellisheiðarvirkjun og Nesjavallavirkjun. Niðurstöður gróður- og efnamælinga 2017

Höfundar
Járngerður Grétarsdóttir, Ágústa Helgadóttir og Rannveig Thoroddsen

Verknúmer 3992
Málsnúmer 2017070014

Unnið fyrir
Orku náttúrunnar

Samvinnuaðilar

Útdráttur
Að ósk Orkuveitu Reykjavíkur hóf Náttúrufræðistofnun Íslands langtímavöktun á mosaþembugróðri við jarðvarmavirkjanir á Hellisheiði og Nesjavöllum árið 2012. Fimm árum síðar, sumarið 2017, var farið í annað sinn, að beiðni Orku náttúrunnar, til að skoða gróðurinn og mæla styrk brennisteins og þungmálma í sýnum af mosanum hraungambra. Í skýrslunni er gerð grein fyrir niðurstöðum árið 2017.

Gróður var endurmældur í vöktunarreitum á sniðum sem lágu út frá stöðvarhúsum virkjananna. Reitir voru staðsettir í 250–4000 m fjarlægð frá virkjun, á fjórum sniðum við Hellisheiðarvirkjun og á þremur við Nesjavallavirkjun, alls 30 reitir. Ástand hraungambra var skráð og mosasýni tekin úr vöktunarreitum á tveimur sniðum á hvorum stað til efnamælinga og einnig sérstök sýni af skemmdum mosa. Í ljós kom að mosaþekjan var að miklu leyti heil en á báðum stöðum voru þó einnig merki um skemmdir og hafði tíðni skemmda aukist frá fyrri mælingu. Mosaskemmdir voru mjög mistíðar í vöktunarreitum og breytileiki þeirra lítið tengdur fjarlægð frá virkjunum en algengari í vesturátt frá þeim. Litlar breytingar voru á meðalfjölda æðplöntutegunda og tíðni einstakra tegunda milli vöktunarára og ekki sjáanleg tengsl við fjarlægð eða stefnu frá virkjun.

Við efnagreiningar kom í ljós að styrkur brennisteins (S, bæði snið), bórs (B, SA-snið), kvikasilfurs (Hg, SV-snið) og nikkels (Ni, SV-snið) í mosasýnum féll marktækt með aukinni fjarlægð frá Hellisheiðarvirkjun og bendir dreifingarmynstrið til að þau berist frá virkjuninni. Sömu sögu var að segja af brennisteini (bæði snið), bór (V-snið), kopar (Cu, V-snið) og antímon (Sb, V-snið) við Nesjavallavirkjun. Uppsöfnun efna var mismikil en yfirleitt meiri í vesturátt, þ.e. undan algengustu vindátt á svæðinu. Þekkt er að brennisteinn, bór, kvikasilfur og antímon berist frá jarðvarmavirkjunum með útblæstri en hugsanlegt er að nikkel og kopar berist í mosann frá framkvæmdasvæðum við virkjanirnar eða vegna annara umsvifa. Brennisteinn, bór og kvikasilfur voru í nokkuð háu magni miðað við rannsóknir á hraungambra í nágrenni annarra iðjuvera á landinu.

Fylgni fannst milli mosaskemmda og styrks nokkurra efna við Hellisheiðarvirkjun, þ.e. arsens (As), blýs (Pb), króms (Cr), járns (Fe), nikkels (Ni), vanadíns (V) og sinks (Zn). Ef blý er undanskilið voru þessi efni, auk brennisteins, í 30–75% meiri styrk í sýnum af skemmdum mosa en í almennum mosasýnum. Efnamagn blýs, nikkels og sinks var þó lágt samanborið við mosasýni í nágrenni iðjuvera. Líklegt er að hár styrkur efna valdi skemmdum á mosa en þolmörk hraungambra fyrir efnunum eru ekki þekkt.

Lykilorð
Hellisheiðarvirkjun, Nesjavallavirkjun, jarðvarmavirkjanir, vöktun, hraungambri, þungmálmar, brennisteinn, mosaskemmdir, efnamælingar

Yfirfarið
María Harðardóttir

EFNISYFIRLIT

1 INNGANGUR **7**

2 AÐFERÐIR 8
2.1 Rannsóknarsvæði 8
2.2 Gróðurmælingar 9
2.2.1 Mosalykill 10
2.3 Mosasýni 11
2.3.1 Söfnun mosasýna 11
2.3.2 Efnagreiningar á mosasýnum 12
2.4 Úrvinnsla gagna 12

3 NIÐURSTÖÐUR 13
3.1 Ástand mosaþekju og tengsl mosaskemmda við fjarlægð og stefnu frá Hellisheiðarvirkjun 13
3.1.1 Heilbrigður mosi (A) 13
3.1.2 Mismunandi útlitsflokkar mosa (flokkar B–F) 13
3.1.3 Útlitsflokkar aðrir en heilbrigður mosi (allir flokkar B–F) 14
3.1.4 Mosaskemmdir af flokkum B, C, D2, E eða F 14
3.1.5 Þykkt mosalagsins 17
3.2 Ástand mosaþekju og tengsl mosaskemmda við fjarlægð og stefnu frá Nesjavallavirkjun 17
3.2.1 Heilbrigður mosi (A) 17
3.2.2 Mismunandi útlitsflokkar mosa (flokkar B–F) 17
3.2.3 Útlitsflokkar aðrir en heilbrigður mosi (allir flokkar B–F) 18
3.2.4 Mosaskemmdir af flokkum B, C, D2, E eða F 18
3.2.5 Þykkt mosalagsins 21
3.3 Annar gróður í vöktunarreitum við Hellisheiðarvirkjun og Nesjavallavirkjun 21
3.4 Brennisteinn og þungmálmar í mosasýnum í vöktunarreitum og tengsl við stefnu og fjarlægð frá virkjun 23
3.4.1 Styrkur efna við Hellisheiðarvirkjun 23
3.4.2 Styrkur efna við Nesjavallavirkjun 28
3.4.3 Um skýringarhlutfall efna og fjarlægð frá virkjunum 33
3.5 Tengsl efnamagns í mosasýnum og skemmda á mosa í vöktunarreitum 34
3.6 Efnamagn í sýnum af skemmdum mosa (flokkur C og B) við Hellisheiðarvirkjun og Nesjavallavirkjun og samanburður við mosasýni úr vöktunarreitum 34

4 UMRÆÐUR 38
4.1 Ástand mosaþekju og annars gróðurs 38
4.2 Efnamagn brennisteins og snefilefna í mosasýnum og tengsl við stefnu og fjarlægð frá jarðvarmavirkjun 39
4.3 Tengsl efnamagns í mosasýnum og mosaskemmda 43

5 LOKAORÐ 45

6 ÞAKKIR 45

7 HEIMILDIR 46

8 VIÐAUKAR 48
1. viðauki, a. Meðaltíðni plöntutegunda í smáreitum í vöktunarreitum við Hellisheiðarvirkjun árin 2012 og 2017 48
1. viðauki, b. Meðaltíðni plöntutegunda í smáreitum í vöktunarreitum við Nesjavallavirkjun árin 2012 og 2017 49
2. viðauki, a. Meðalstyrkur brennisteins og þungmálma í mosasýnum í vöktunarreitum eftir fjarlægð og stefnu frá Hellisheiðarvirkjun 50
2. viðauki, b. Meðalstyrkur brennisteins og þungmálma í mosasýnum í vöktunarreitum eftir fjarlægð og stefnu frá Nesjavallavirkjun 53
3. viðauki. Ljósmyndir af vöktunarreitum við Hellisheiðarvirkjun og Nesjavallavirkjun 56

1 INNGANGUR

Sumarið 2012 hóf Náttúrufræðistofnun Íslands langtímavöktun á gróðri við jarðvarmavirkjanir á Hellisheiði og Nesjavöllum að beiðni Orkuveitu Reykjavíkur (OR). Starfsemi samstæðu OR við virkjun jarðvarma leiðir óhjákvæmilega til þess að efni eins og jarðhitalofttegundir losna út í andrúmsloftið (Hólmfríður Sigurðardóttir og Þorsteinn Ari Þorgeirsson 2016). Efnin sem losna geta haft áhrif á umhverfið, þ.m.t. gróðurinn, og eftir að vart varð við skemmdir á mosa í námunda við virkjanirnar tvær var ákveðið að koma upp fastri gróðurvöktun til að fylgjast með þróun mála. Mosaþembur eru ráðandi í gróðurfari í umhverfi virkjananna og því var mest áhersla lögð á að fylgjast með ástandi og þróun þeirra.

Mosar hafa ekki rætur eins og æðplöntur þó margar tegundir hafi rætlinga sem festa þá við undirlagið. Þeir taka vatn og næringarefni beint til sín úr andrúmslofti, í gegnum laufblöð og aðra plöntuvefi, með úrkomu og ryki sem á þá fellur (Salemaa o.fl. 2001). Mosar, og fléttur sem taka efni upp á sama hátt, eru því viðkvæmir fyrir loftbornum efnum, safna þeim í sig og hafa verið notaðir við lífvöktun (e. *biomonitoring*) í nokkra áratugi til að fylgjast með þungmálmum og öðrum efnum í andrúmslofti (Loppi o.fl. 1999, Sigurður H. Magnússon 2013, González og Pokrovsky 2014). Gróðurskemmdir og gróðurbreytingar geta orðið á svæðum með háum styrk mengandi efna og eru mosar viðkvæmasti plöntuhópurinn hvað þetta varðar (Salemaa o.fl. 2001). Sú mosategund sem myndar mosaþemburnar á Hellisheiði og Nesjavöllum er hraungambri (*Racomitrium lanuginosum*) og er hann mjög algengur á stórum svæðum hérlendis (Sigurður H. Magnússon o.fl. 2016), sérstaklega á úrkomumiklum svæðum á Suður- og Suðvesturlandi og setur þar mikinn svip á landslagið (Svanhildur Jónsdóttir Svane 1963).

Þó virkjun jarðvarma sé hreinn orkugjafi samanborið við brennslu á kolum og olíu (Kristmannsdóttir og Ármannsson 2003) geta mengunarefni borist út í umhverfið með útblæstri jarðvarmavirkjana (Bargagli o.fl. 1997), bæði frá borholum á tilraunatíma og frá kæliturnum í orkuverunum sjálfum. Samsetning gufunnar er misjöfn milli virkjana en í henni geta m.a. verið brennisteinsvetni (H_2S), kvikasilfur (Hg), bór (B), arsen (As) og antímon (Sb), auk þess sem hiti og gufa geta haft staðbundin áhrif (Bargagli o.fl. 1997, Kristmannsdóttir og Ármannsson 2003). Jarðvarmavirkjunin á Nesjavöllum (120 MW) tók til starfa 1990 og Hellisheiðarvirkjun (303 MW) sextán árum síðar eða árið 2006. Við nýtingu jarðvarma á Hellisheiði og Nesjavöllum losnar m.a. brennisteinsvetni en mjög hefur þó dregið úr losun á því undanfarin ár. Losunin var mest um 12.200 tonn/ári frá Nesjavallavirkjun árið 2009 og 13.300 tonn/ári frá Hellisheiðarvirkjun árið 2010, en var komin niður í um 6.600 tonn/ári á Nesjavöllum og um 2.900 tonn/ári frá Hellisheiðarvirkjun árið 2017 (Hólmfríður Sigurðardóttir og Þorsteinn Ari Þorgeirsson 2016, Ársskýrsla OR 2017, Sigurður H. Magnússon 2018).

Megintilgangur gróðurvöktunarinnar var að kanna ástand hraungambra og annars gróðurs í mosaþembum í nágrenni jarðhitavirkjananna, lýsa skemmdum á mosa ef þær væru til staðar og leggja þannig grunn að vöktun til að geta fylgst með hvort breytingar verða með tíma. Ráðgert var að endurtaka mælingar á fimm ára fresti. Niðurstöður mælinga árið 2012 birtust í skýrslunni *Vöktun mosaþembugróðurs við Hellisheiðarvirkjun og Nesjavallavirkjun* (Ágústa Helgadóttir o.fl. 2013). Í mælingum þá komu fyrir skemmdir á mosa við virkjanirnar sem voru að hluta taldar stafa af mengun frá virkjununum. Mosaskemmdirnar voru í mjög mismiklum mæli og algengari við Nesjavallavirkjun en Hellisheiðarvirkjun en ekki sást ákveðið mynstur eftir fjarlægð eða stefnu frá virkjun. Algengast var að skemmdirnar væru bundnar við einstaka reiti sem voru ýmist næst virkjununum eða lengra frá (Ágústa Helgadóttir o.fl. 2013). Í framhaldi af þessari fyrstu vöktunarúttekt var ákveðið, að beiðni Orku náttúrunnar, að auk endurtekins mats á ástandi

mosaþekjunnar og annarra gróðurmælinga, yrði safnað sýnum af mosa úr vöktunarreitum til efnagreininga til að gefa möguleika á að kanna tengsl mosaskemmda og efnamagns í mosa.

Í skýrslunni er greint frá niðurstöðum gróðurvöktunar og efnamælinga árið 2017 með það að markmiði að skoða ástand mosaþekjunnar og kanna hvort breytingar hafa orðið á mosaþekjunni milli mælinga, þ.e. frá árinu 2012 til 2017. Einnig að kanna hver áhrif fjarlægðar og stefnu frá virkjun eru á styrk efna, þ.e. brennisteins og þungmálma í hraungambra, og skoða tengslin á milli efnamagns í mosasýnum og skemmda sem sjást á mosanum. Þungmálmarnir sem um ræðir eru arsen (As), bór (B), kadmín (Cd), króm (Cr), kopar (Cu), járn (Fe), kvikasilfur (Hg), nikkel (Ni), blý (Pb), antímon (Sb), vanadín (V) og sink (Zn).

2 AÐFERÐIR

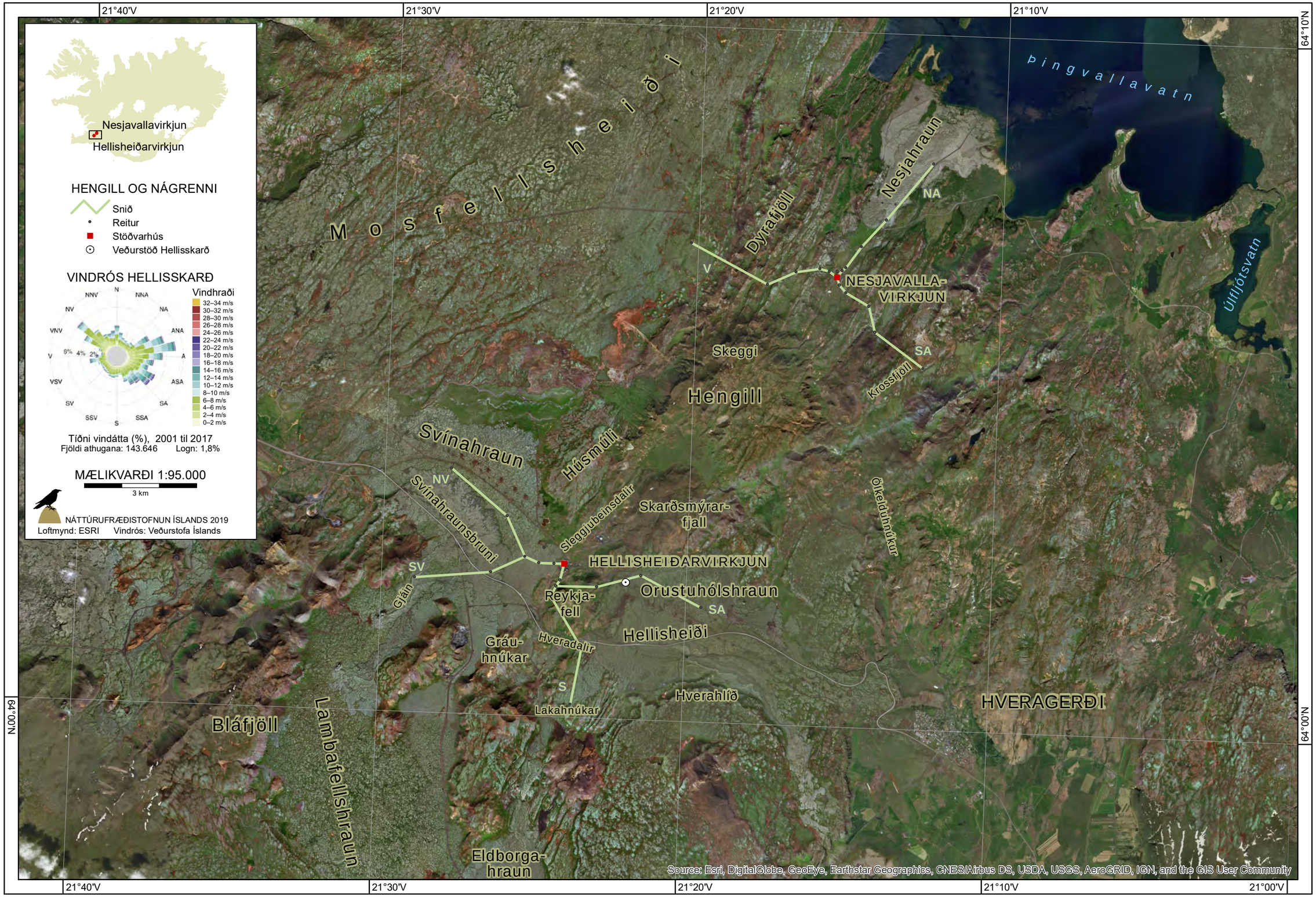
Hér er lýsing á helstu aðferðum og aðstæðum varðandi gróðurvöktunina en nánari lýsingu má finna hjá Ágústu Helgadóttur o.fl. (2013).

2.1 Rannsóknarsvæði

Rannsóknin var unnin við jarðvarmavirkjanirnar á Hellisheiði og Nesjavöllum. Árið 2012 höfðu, á hvorum stað, verið valin hringlaga rannsóknarsvæði umhverfis virkjanirnar með miðju í stöðvarhúsum virkjananna, rétt við kæliturna. Hvort svæði var um 9 km að þvermáli og svæðin því samtals um 130 km² að flatarmáli (Ágústa Helgadóttir o.fl. 2013). Svæðin eru á virku háhitasvæði við Hengil og ná yfir nokkur jarðhitakerfi, frá Nesjavöllum til suðvesturs í Hveradali og Hverahlíð. Einkennist landslagið af gosmyndunum eldstöðvarkerfisins með víðáttumiklum hraunbreiðum frá nútíma og móbergshryggjum frá síðasta jökulskeiði (Kristján Sæmundsson 2003).

Algengasta gróðurlendið á svæðunum er mosaþemba með mosanum hraungambra (*Racomitrium lanuginosum*) ríkjandi. Hann er oft einráður á hraunbungum en í lægðum er gróður fjölbreyttari og æðplöntur algengari (Ágústa Helgadóttir o.fl. 2013). Mosaþemban þekur stóran hluta hraunsins í nágrenni Hellisheiðarvirkjunar en meira er um gras og lynggróður með mosagróðrinum við Nesjavallavirkjun. Veðurfarsmælingar við Hellisskarð, en sú veðurstöð er um 1–2 km austan við Hellisheiðarvirkjun, sýna að austanátt og norðvestanátt eru algengustu vindáttir á Hengilsvæðinu og að vindáttir með úrkomu eru algengastar úr suðaustri (1. mynd). Ársúrkoma 2001–2017 var að meðaltali 2341 mm við Hellisskarð (meðaltal 11 mælinga þar sem vantaði í mælingar fyrir nokkur ár) og 2830 mm við Nesjavelli (Veðurstofa Íslands, gögn fengin 15. janúar 2019).

Þegar Nesjavallavirkjun tók til starfa árið 1990 var útblæstri virkjunarinnar sleppt út um háf á stöðvarhúsinu en eftir stækkun árið 2003 var kæliturn tekinn í notkun. Útblástur gufu frá Hellisheiðarvirkjun kemur frá sjö kæliturnum en jarðhitalofti er sleppt á einum kæliturni við Sleggju og einum við Reykjafell. Borholur eru einnig látnar blása á prófunartíma þeirra, allt frá tveimur vikum upp í eitt ár. Í lok árs 2017 höfðu verið boraðar 28 vinnsluholur við Nesjavallavirkjun og um 60 holur við Hellisheiðarvirkjun en á árinu voru að jafnaði 19 holur tengdar við Nesjavallavirkjun og 35 við Hellisheiðarvirkjun (Bergur Sigfússon o.fl. 2018).



1. mynd. Yfirlitskort af rannsóknarsvæðinu við gróðurvöktunina á Hellisheiði og Nesjavöllum. Vöktunarreitir voru staðsettir á fjórum mælisniðum (SA, S, SV, NV) út frá Hellisheiðarvirkjun og þremur sniðum (SA, V, NA) við Nesjavallavirkjun.

2.2 Gróðurmælingar

Við upphaf vöktunar árið 2012 voru lögð út mælisnið út frá virkjununum og vöktunarreitir staðsettir á þau, sem síðan voru endurmældir sumarið 2017 (1.–5. ljósmynd í 3. viðauka). Við staðsetningu sniða var m.a. stuðst við loftmyndir og gróðurkort til að sjá útbreiðslu mosaþemba og var talið mikilvægt að reitirnir yrðu lagðir út á einsleitum svæðum (Ágústa Helgadóttir o.fl. 2013). Valdar voru mosavaxnar hraunbungur þar sem hraungambrinn var a.m.k. 10 cm þykkur og myndaði samfellda breiðu eða mosaþembur þar sem æðplöntuþekja var lítil. Sneitt var hjá röskuðum svæðum eins og borsvæðum og næsta nágrenni vega. Einnig var tekið tillit til deiliskipulagsáætlana fyrir svæðin til að forðast hugsanlegt rask á komandi árum og stuðst við dreifingarspá fyrir brennisteinsvetni á svæðinu (Ágústa Helgadóttir o.fl. 2013).

Við Hellisheiðarvirkjun lágu mælisniðin í suðaustur (SA), suður (S), suðvestur (SV) og norðvestur (NV) frá miðju stöðvarhúsi og voru vöktunarreitir til gróðurmælinga staðsettir í 250 m, 500 m, 1000 m, 2000 m og 4000 m fjarlægð (1. mynd). Undantekning á þessu var að reitir í 250 m og 500 m voru sameiginlegir sniðum SA og S og reitir í 250 m, 500 m og 1000 m sameiginlegir sniðum NV og SV. Á Nesjavöllum lágu sniðin í suðaustur (SA), norðaustur (NA) og vestur (V) og vöktunarreitir staðsettir í 250 m, 500 m, 1000 m, 2000 m og 4000 m fjarlægð (1. mynd) (Ágústa Helgadóttir o.fl. 2013).

Hæð vöktunarreita yfir sjávarmáli var á bilinu 250–395 m við Hellisheiðarvirkjun og 140–420 m við Nesjavallavirkjun. Lögun hraunbunga ákvað stefnu reita en þeir voru lagðir út fyrir miðju og langsum eftir hraunbungum. Hver vöktunarmælireitur var 20 m á lengd og merktur með tréhælum við 0 m, 10 m og 20 m. Reitir voru merktir virkjun, sniði og reit og GPS-hnit tekið við 0 m og 20 m hæl hvers reits (Ágústa Helgadóttir o.fl. 2013).

Við mælingar sumarið 2017 var farið í hvern vöktunarreit og gróður endurmældur í átta 50×50 cm (0,25 m^2) smáreitum (2. ljósmynd í 3. viðauka) sem lagðir höfðu verið út með 2 m millibili, sá fyrsti við 3 m og síðasti við 17 m. Hver smáreitur hafði verið merktur með rafmagnsrörum í hornum árið 2012 til að tryggja rétta staðsetningu við endurmælingu (Ágústa Helgadóttir o.fl. 2013). Allir smáreitir voru lagðir út vinstra megin við miðlínu vöktunarreits, þegar horft var frá 0 m hæl að 20 m hæl, og nam hægra og neðra horn reits við 3m, 5m o.s.frv. á málbandi. Smáreitum var síðan skipt niður í 100 smærri hlutreiti (5×5 cm) í þeim tilgangi að meta tíðni mismunandi gróðurmælibreyta, s.s. tíðni mismunandi útlitsflokka mosa og einstakra æðplöntutegunda. Við tíðnimælingar var skráð hvort viðkomandi mælibreyta væri til staðar (1/0) í hverjum 5×5 cm hlutreit (sjá 2. ljósmynd í 3. viðauka) og tíðni síðan reiknuð út sem heildartíðni af 100 hlutreitum og gefin upp í prósentum (%).

Við gróðurmælingar 2017 var ástand hraungamraþekju metið út frá útliti samkvæmt greiningarlykli (mosalykli) sem útbúinn var við fyrri gróðurúttekt á svæðunum (Ágústa Helgadóttir o.fl. 2013). Með greiningarlyklinum var þekja mosans flokkuð í tíu útlitsflokka sem taldir voru lýsandi fyrir ástand þekjunnar, s.s. eftir lit mosasprota og ástandi hárodda á endum sprota og var bæði heilbrigðum mosa og skemmdum sem sáust á mosanum þannig lýst (sjá kafla 2.2.1, Mosalykill). Við greiningu á útlitsflokkum hraungambrans var hann vökvaður til að staðla útlit milli mismunandi veðurskilyrða þar sem útlit mosans tekur miklum breytingum með rakastigi. Einnig var þykkt mosaþembu (niður á jarðveg eða hraun) endurmæld í níu punktum í hverjum ramma (sjá nánar í Ágústa Helgadóttir o.fl. 2013).

Tíðni æðplantna, fléttna og mosategunda var endurmetin árið 2017 í samræmi við fyrri mælingar 2012, sem og yfirborðsgerð jarðvegs (áfoksjarðvegur, hraun, grjót, möl og sandur). Fléttur voru greindar til ættkvísla en æðplöntur og mosar til tegunda, að undantekinni mosaættkvíslinni *Polytrichum*.

Teknar voru yfirlitsmyndir og myndir af hverjum smáreit, auk þess sem teknar voru myndir sem sýna dæmi um ástand gróðurs, bæði mosa og æðplantna (3. viðauki). Við mælingar var reynt að valda sem minnstu raski á mosaþembunni, m.a. með því að krjúpa á hlíf til að dreifa álagi. Sumarið 2017 var gróður mældur af Ágústu Helgadóttur og Rannveigu Thoroddsen á tímabilinu 17.–28. júlí við Nesjavallavirkjun og 11.–21. september við Hellisheiðarvirkjun.

2.2.1 Mosalykill

Eftirfarandi er stutt lýsing á greiningareinkennum sem flokkar þekju hraungambra í tíu útlitsflokka (A–H). Nánari lýsingu á útlitsflokkum og fleiri ljósmyndir er að finna í fyrri vöktunarskýrslu (Ágústa Helgadóttir o.fl. 2013).

Heilbrigður mosi (A): Mosaþekja heilbrigð og samfelld. Blöð mosans eru græn og jafnvel gulgræn þegar mosinn er rakur, en þurr er hann gráleitur. Hároddar blaða sjást vel. Sprotar vaxa þétt og sést ekki í eldri dökka stöngla í þekjunni (2. mynd).

Brúngulur mosi (B): Mosaþekja samfelld. Bæði við þurrar og rakar aðstæður sést greinilega að sprotar eru frábrugðnir heilbrigðum mosa þar sem þeir eru fölbrúngulir og blöð skemmd. Yngstu mosastönglar yfirleitt án hárodda. Í fyrri vöktunarskýrslu kallaður „grænn mosi (B)“ (2. mynd).

Gulur mosi (C): Mosaþekja samfelld. Blöð mosa eru fölbrúngul að lit og virðast ekki mjög lífvænleg. Hároddar eru þó til staðar en styttri á yngstu sprotum. Blöð dökkbrún í miklum raka (2. mynd).

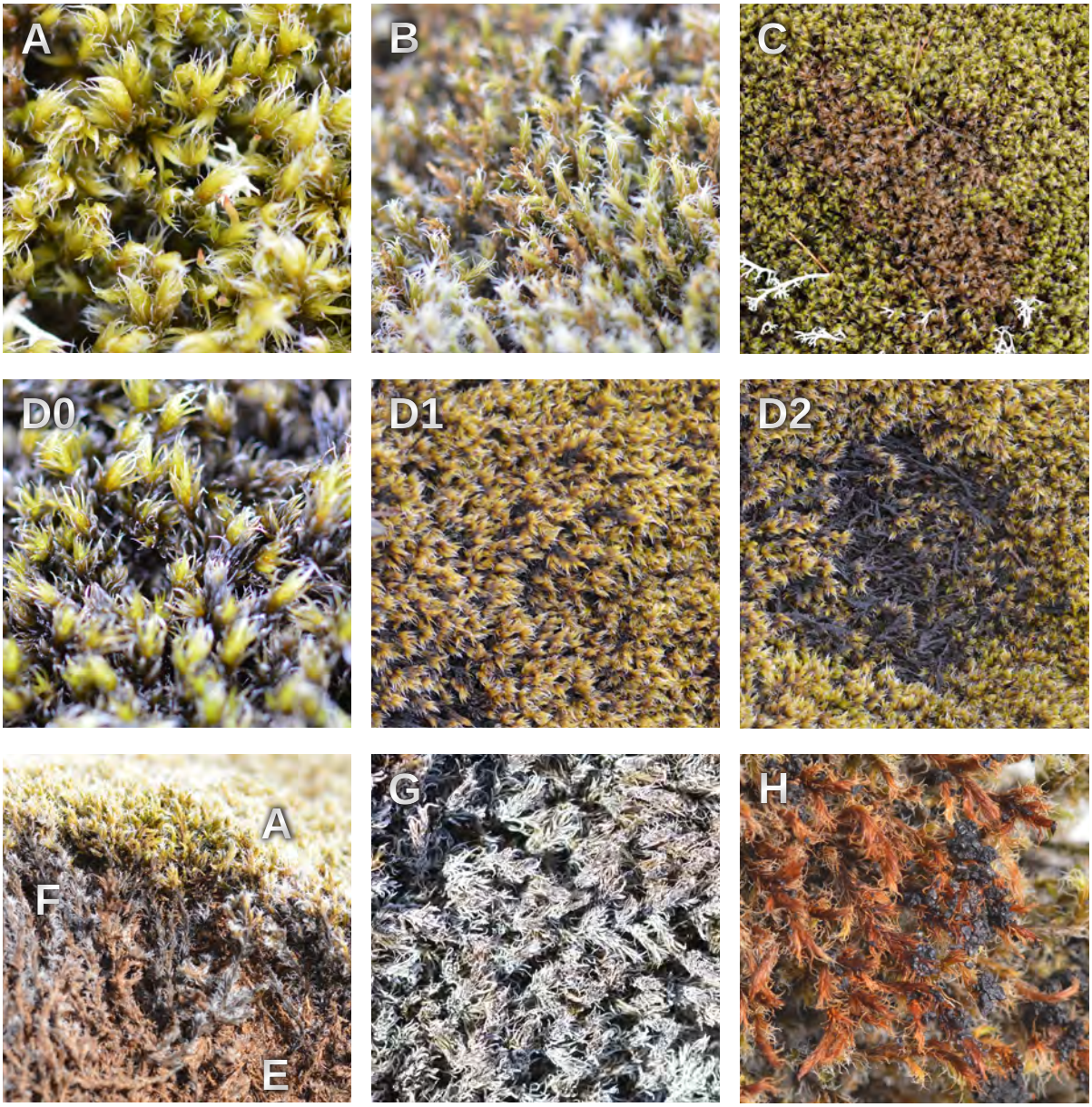
Svartur/svartgrænn mosi (D0): Mosaþekja ósamfelld og/eða rofin. Mosaþekja dekkri en heilbrigð þekja (sértaklega við rakar aðstæður) og er samsett af grænum sprotum og dökkum eldri blaðhvirfingum. Víða sjást skemmdir á blöðum og sprotum sérstaklega á yngri sprotum. Hárodda vantar á einstaka blöð (2. mynd).

Svartur/svartgrænn mosi (D1): Mosaþekja ósamfelld og/eða rofin. Mosaþekjan hefur gisnað og er örlítið yrjótt. Mest ber á ungum gulgrænum sprotum en á milli þeirra sést í dökka eldri sprota. Víða sjást skemmdir á blöðum og sprotum (2. mynd).

Svartur/svartgrænn mosi (D2): Mosaþekja ósamfelld og/eða rofin. Mosaþekjan er svört og mosasprotar eru svartir, blaðlitlir eða blaðlausir og sumir mikið skemmdir, líkast því að blöð hafi sviðnað við stöngul. Skemmdir gráar við þurrar aðstæður en dökkar við rakar (2. mynd).

Brúnn mosi (E): Mosaþekja rofin og stórir brúnir blettir hafa myndast. Mosastönglar eru brúnir að lit og yfirleitt dauðir og blöð hálfrotnuð. Sum staðar hefur þekjan rofnað niður í jarðveg (2. mynd).

Svartur mosi (F): Mosaþekja ósamfelld og/eða rofin. Eldri gráir mosastönglar finnast yfirleitt umhverfis brúna mosastöngla (E). Stönglar eru með eldri hærð blöð. Engir nýir sprotar sjáanlegir (2. mynd).



2. mynd. Myndir af útlitsflokkum mosa í gróðurvöktuninni, áður birtar í skýrslu Ágústu Helgadóttur o.fl. (2013). Ljósm. Ágústa Helgadóttir, í júní og júlí 2012.

Steingrár mosi (G): Mosinn er dauður og steingrár að lit og engin merki um nýja sprota. Yfirborð svipar helst til þess að mosinn hafi brunnið í eldi. Slíkar skemmdir finnast einkum í grennd við borteiga (2. mynd).

Rauður mosi (H): Mosinn er að mestu dauður, ryðrauður að lit með svörtum útfellingum eða kleprum á sprotum (2. mynd).

2.3 Mosasýni

2.3.1 Söfnun mosasýna

Mosasýnum til efnagreininga var safnað í hverjum vöktunarreit árið 2017. Tekin voru fimm sýni úr hverjum reit, hægra megin ef horft var frá 0 m hæl að 20 m hæl, í tveggja metra fjarlægð frá miðlínu við 2 m, 6 m, 10 m, 14 m og 18 m. Hvert sýni var handfylli eða mosaknippi úr efsta lagi mosaþembunnar í því ástandi sem mosinn var í á hverjum stað. Að auki var safnað

sérstökum sýnum af skemmdum mosa af flokkum C (19 sýni) og B (1 sýni) í grennd við vöktunarreiti (sjá ljósmyndir í 3. viðauka). Mosasýnin voru þurrkuð við herbergishita og geymd í þurri geymslu.

2.3.2 Efnagreiningar á mosasýnum

Efnagreiningar voru gerðar á fjórum mosasýnum (tekin við 2 m, 6 m, 14 m og 18 m) úr hverjum vöktunarreit, þ.e. í 250 m, 500 m, 1000 m, 2000 m og 4000 m fjarlægð frá virkjun, á tveimur sniðum á hvorum stað; suðaustur (SA) og suðvestursniði (SV) við Hellisheiðarvirkjun og á suðaustur- (SA) og vestursniði (V) við Nesjavallavirkjun. Efnagreiningar voru því ekki gerðar á öllum mosasýnum sem safnað var á vettvangi. Sýnin sem voru efnagreind voru 20 talsins úr vöktunarreitum af hverju sniði, þ.e. 80 sýni í heild. Þá voru efnagreind 19 mosasýni af gulum mosa (mosaflokkur C) og eitt sýni af gulbrúnum mosa (mosaflokkur B). Alls voru því 100 mosasýni efnagreind vöktunarárið 2017.

Efnagreiningarnar á mosasýnum voru unnar af Vistfræðistofnun Háskólans í Lundi í Svíþjóð. Teknir voru efstu 3 cm af mosasprotum til greininga. Við efnagreiningu voru sýni fyrst þurrkuð við 40°C og síðan 0,5 g sýni leyst upp í sterkri saltpétursýru. Uppleyst sýni voru þynnt með vatni og síðan greind með ICP-OES tækni (Cu, Fe, Ni, S, V og Zn) og ICP-MS tækni (As, B, Cd, Cr, Hg, Pb, Sb).

Styrkur brennisteins (S), arsens (As), bórs (B), kadmíns (Cd), króms (Cr), kopars (Cu), járns (Fe), kvikasilfurs (Hg), nikkels (Ni), blýs (Pb), antímons (Sb), vanadíns (V) og sinks (Zn) var mældur í öllum sýnum.

2.4 Úrvinnsla gagna

Fundin var út tíðni (e. *frequency*) einstakra mælibreyta (t.d. mosaflokka og æðplöntutegunda), þ.e. fjöldi 5×5 cm hlutreita þar sem viðkomandi breyta kom fyrir í af alls 100 hlutreitum í hverjum smáreit (50×50 cm), og tíðnin gefin upp í %. Hafa skal í huga að tíðnimælingar hafa þá annmarka að niðurstöður þeirra eru mjög háðar stærð hlutreitanna sem talningin (1 eða 0) fer fram í (Kershaw og Looney 1985) en mælingar eru nákvæmari því minni sem hlutreitirnir eru (hér 5×5 cm). Einn helsti kostur tíðnimælingar er að þær eru fljótlegar og nýtast ágætlega við samanburð, t.d. milli endurtekinna mælinga á mismunandi útlitsflokkum mosa eins og hér er gert.

Við úrvinnslu gagna var reiknuð út meðaltíðni sem meðaltal úr átta smáreitum í hverjum vöktunarreit. Samanburður á meðaltíðni útlitsflokka mosa (B, C, D2 o.s.frv.) í heild fyrir árin 2012 og 2017 var gerður með pöruðu t-prófi á $\log_{10}(y+1)$ umbreyttum gildum (Leps og Smilauer 2003).

Gerð var einföld línuleg aðhvarfsgreining (e. *linear regression*) á styrk þungmálma og brennisteins og fjarlægðar frá hvorri virkjun fyrir hvort snið. Við greininguna var gildum fyrir þungmálma og brennistein, sem og fjarlægð frá virkjun, umbreytt með $\log_{10}(y)$ til að breytur uppfylltu skilyrði um normaldreifingu og línulegra samband.

Fylgniútreikningar (e. *Pearson correlation coefficient,* r) voru notaðir við að kanna samband tíðni sameinaðs útlitsflokks á mosa (þar sem flokkaðar voru saman í einn hóp skemmdir B, C, D2, E eða F) og efnamagns í mosasýnum úr sömu vöktunarreitum. Tíðnigögnum um þennan sameinaða hóp og gögnum um efnastyrk var umbreytt með $\log_{10}(y)$ til að gögn uppfylltu skilyrði um normaldreifingu og línulegra samband. Reiknuð var meðaltíðni skemmda sem meðaltal

tíðnimælinga úr átta smáreitum og meðalstyrkur efna sem meðaltal úr fjórum mosasýnum. Fylgni á milli einstakra efna var einnig reiknuð.

Efnamagn/styrkur í sýnum af skemmdum mosa (flokkur C og B) var borið saman við efnamagn í öðrum almennum mosasýnum við Hellisheiðarvirkjun og Nesjavallavirkjun (sem safnað var í hverjum vöktunarreit í mismunandi fjarlægð frá virkjunum), með t-prófi fyrir jafna dreifni á $\log_{10}(y)$ umbreyttum gildum.

Meðaltöl eru notuð við útreikning á meðalgildum og staðalskekkja (± 1 SE) gefur til kynna öryggi á mati á meðaltali. Frávikshlutfall var reiknað fyrir ýmsar mælingar og er mælikvarði á hlutfallslegan breytileika (staðalfrávik/meðaltali × 100).

Allir útreikningar voru gerðir með tölfræðiforritinu JMP frá SAS, 14. útgáfu. Nafngiftir æðplantna fylgja Herði Kristinssyni o.fl. (2018), nafngiftir mosa Ágústi H. Bjarnasyni (2018) og fléttna Herði Kristinssyni (2016).

3 NIÐURSTÖÐUR

3.1 Ástand mosaþekju og tengsl mosaskemmda við fjarlægð og stefnu frá Hellisheiðarvirkjun

Ástand mosaþekju við Hellisheiðarvirkjun var metin með tíðniskráningu á heilbrigði þekjunnar sem skipt var niður í nokkra útlitsflokka mosa (sjá kafla 2.2.1 Mosalykill).

3.1.1 Heilbrigður mosi (A)

Heilbrigðir mosasprotar (flokkur A) voru mjög algengir í vöktunarreitum við Hellisheiðarvirkjun (3. mynd a). Í heildina var meðaltíðni slíkra sprota yfir 99% árin 2012 og 2017. Tíðni slíkra mosasprota var á bilinu 95–100% í reitum árið 2017, óháð stefnu og fjarlægð frá virkjun og mjög litlar breytingar var að sjá frá fyrri mælingum (4. mynd a).

Ef litið er á skráningar þar sem eingöngu fundust heilir mosasprotar í reitum (eingöngu A), var meðaltíðni um 24% árið 2012 en minnkaði marktækt í 4% árið 2017 ($t= -9,15$, $p<0,0001$) (3. mynd b). Þegar sömu gögn eru skoðuð eftir stefnu og fjarlægð vöktunarreita frá virkjun sést að aðeins reitur í 2000 m fjarlægð á norðvestursniði (NV) var með nokkuð hátt hlutfall slíkra skráninga (28%) árið 2017, og einnig var nokkuð um slíkar skráningar í 500 m fjarlægð á suðaustursniði (SA) (16%). Aðrir reitir voru með undir 10% slíkra skráninga árið 2017 og var um að ræða miklar breytingar frá fyrra vöktunarári (4. mynd b).

3.1.2 Mismunandi útlitsflokkar mosa (flokkar B–F)

Brúngulur mosi (B)

Ef litið er á tíðni einstakra mosaflokka, þá voru brúngular skemmdir á mosa (flokkur B) fátíðar í vöktunarreitum við Hellisheiðarvirkjun eða um 2% árið 2012, en jukust marktækt í um 14% að meðaltali árið 2017 ($t=3,42$, $p<0,0001$) (3. mynd c). Mjög mikill breytileiki var meðal vöktunarreita af þessum flokki og var miðgildi fyrir tíðni slíkra skemmda 0% og frávikshlutfall 406% við Hellisheiðarvirkjun árið 2012 og sömu lýsistærðir 0% og 221% árið 2017. Langflestir vöktunarreitir voru án skemmda en stakir reitir með töluverða eða mikla tíðni skemmda sem sjá má þegar tíðnin er skoðuð eftir stefnu og fjarlægð frá virkjun (4. mynd c). Árið 2017 var mjög mikið (98%) um brúngular skemmdir á mosa í vöktunarreitum í 4000 m fjarlægð í suðvesturstefnu (SV) frá virkjun, einnig var meðaltíðni um 73% í vöktunarreitum í 250 m fjarlægð og norðvestur-/suðvesturstefnu

(NV/SV) frá virkjun og um 20% í stefnu NV og 2000 m fjarlægð. Skráðum skemmdum hafði fjölgað í samanburði við fyrra mælingarár, nema í vöktunarreitum í suðausturstefnu (SA) 500 m fjarlægð en þar var meðaltíðnin 31% árið 2012 en 0% árið 2017 (4. mynd c).

Gulur mosi (C)
Þegar á heildina er litið voru mosaskemmdir af gerð C mjög fátíðar við Hellisheiðarvirkjun og meðaltíðni 0% árið 2012 og 0,2% árið 2017 og fór hæst í 1% í norðvestur/suðvesturstefnu (NV/SV) frá virkjun og 500 m fjarlægð (3.–4. mynd d).

Svartur/svargrænn mosi (D1)
Algengt var að skráður var útlitsflokkurinn D1 í vöktunarreitum við Hellisheiðarvirkjun (3. mynd e). Meðaltíðni flokks D1 var um 74% við virkjunina árið 2012 og jókst marktækt í um 95% árið 2017 ($t=6,79$, $p<0,0001$). Meðaltíðni D1-skráninga var svipuð eða á bilinu 70–100% eftir fjarlægð og stefnu vöktunarreita frá virkjun fyrir árið 2017 (4. mynd e). Í flestum tilfellum hafði skráningum fjölgað í samanburði við fyrra mælingarár og breytileiki í tíðni D1-flokks var mun meiri árið 2012 (4. mynd e).

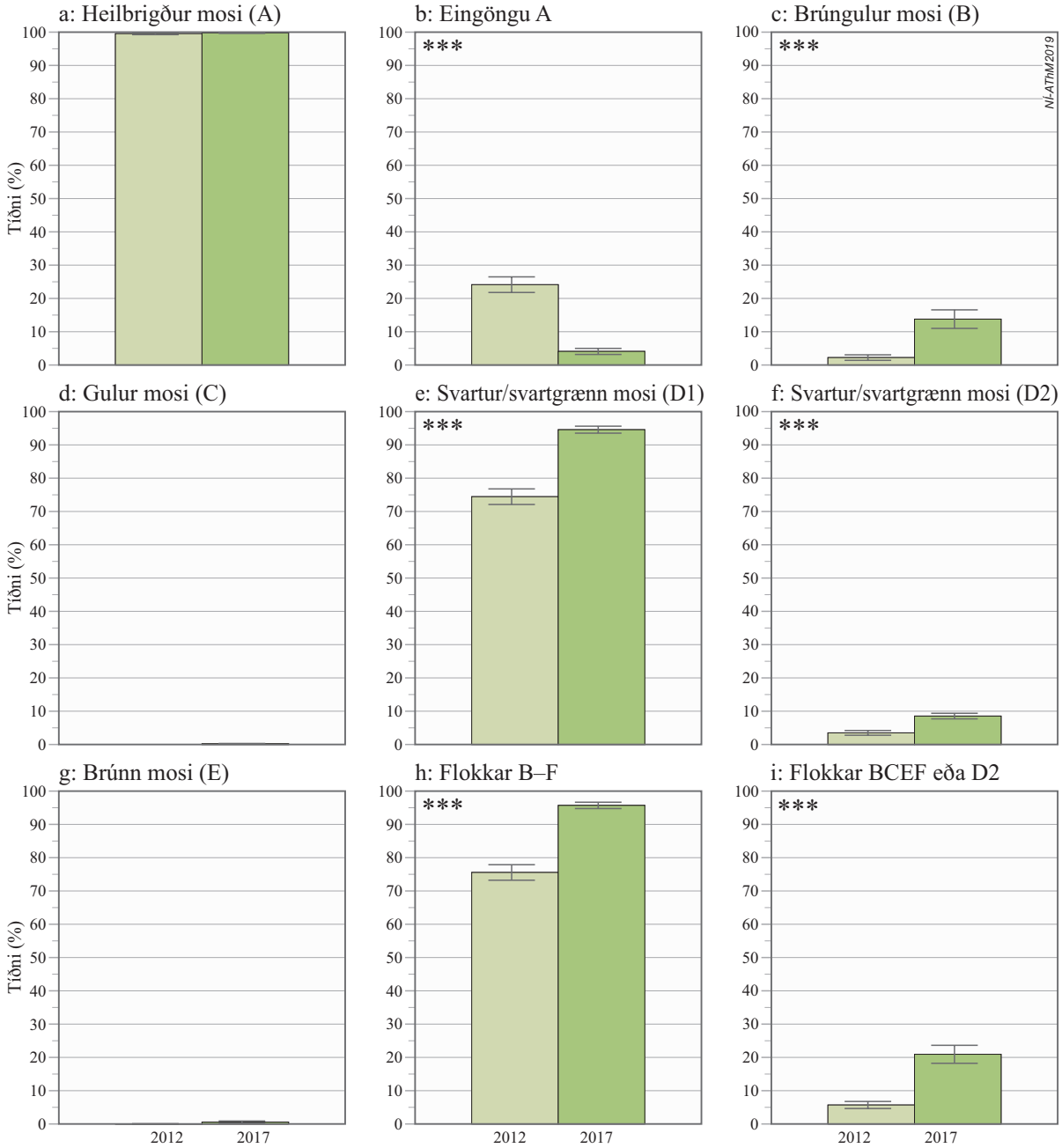
Svartur/svargrænn mosi (D2)
Ef á heildina er litið var nokkuð um að svartur/svargrænn mosi (flokkur D2) fyndist í vöktunarreitum við Hellisheiðarvirkjun. Meðaltíðni slíkra mosaskemmda var rúmlega 3% við virkjunina árið 2012 og jókst marktækt í um 9% árið 2017 ($t=9,26$, $p<0,0001$)(3. mynd f). Töluverður breytileiki var meðal vöktunarreita í algengni þessa skemmdarflokks og var frávikshlutfall 223% árið 2012 og 108% árið 2017. Þegar mosaskemmdir af flokki D2 voru skoðaðar eftir stefnu og fjarlægð frá Hellisheiðarvirkjun sést að árið 2017 var meðaltíðni D2-skemmda á bilinu 1–19%. Í nær öllum tilfellum hafði D2-skemmdum fjölgað frá fyrra mælingarári.

Svargrænn mosi (D0), brúnn mosi (E) og svartur mosi (F)
Þegar á heildina er litið voru mosaskemmdir af flokkum D0, E og F mjög fátíðar í vöktunarreitum við Hellisheiðarvirkjun, með meðaltíðni 0,1% og 0%, 0,03% og 0,6% (3. mynd g), 0,6% og 0% í vöktunarreitum (í þeirri röð) árin 2012 og 2017. Mosaskemmdir af gerð G og H mældust ekki í vöktunarreitum árið 2012 og 2017.

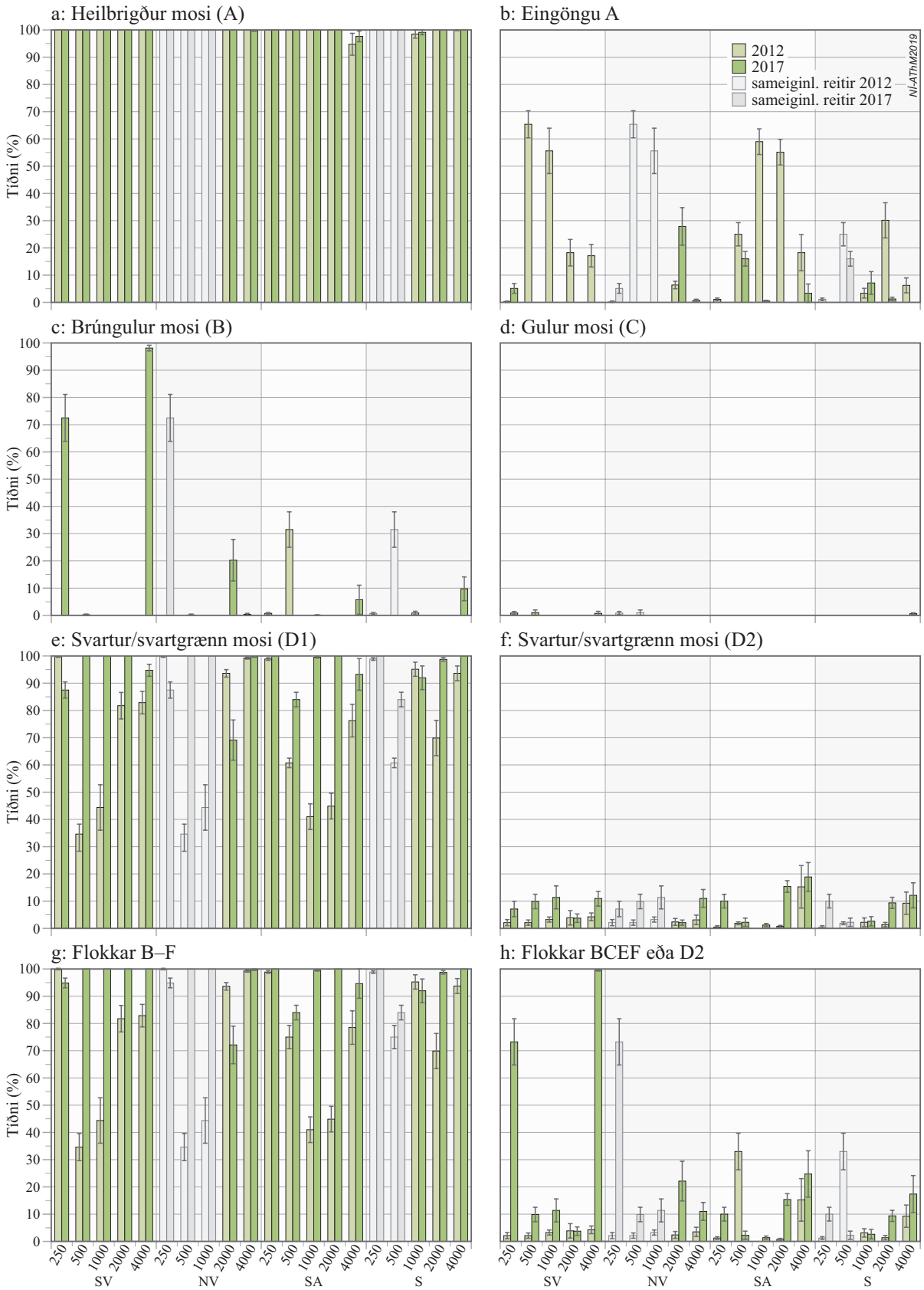
3.1.3 Útlitsflokkar aðrir en heilbrigður mosi (allir flokkar B–F)
Það var algengt að skráðar voru einhversskonar útlitsbreytingar á mosasprotum í vöktunarreitum (flokkar B–F) við Hellisheiðarvirkjun árið 2017 (3. mynd h). Ef á heildina er litið var meðaltíðni slíkra sprota um 76% árið 2012 og jókst marktækt í um 96% árið 2017 ($t= 6,87$, $p<0,0001$). Þegar sömu gögn voru skoðuð eftir stefnu og fjarlægð frá Hellisheiðarvirkjun sést að það var lítill munur á tíðni eftir fjarlægð og stefnu vöktunarreita frá virkjun árið 2017 og var meðaltíðni yfirleitt yfir 90% (4. mynd g). Undantekning á þessu var meðaltíðni í vöktunarreitum í 2000 m fjarlægð norðvestur (NV) af virkjun (72%) og 500 m fjarlægð suðaustur/suður (SA/S) (84%). Í flestum tilfellum hafði skráningum fjölgað í samanburði við fyrra mælingarár og var mun meiri breytileiki milli vöktunarreita árið 2012 (4. mynd g).

3.1.4 Mosaskemmdir af flokkum B, C, D2, E eða F
Ef horft er á útlitsflokka mosa með greinilegar skemmdir (flokkar B, C, D2, E eða F , þ.e. ef undanskildar eru skráningar af langalgengasta mosaflokknum D1 og einnig D0), var meðaltíðni slíkra skemmda í heild um 6% árið 2012 og jókst marktækt í um 21% árið 2017 ($t=7,57$, $p<0,0001$) (3. mynd i). Þegar sömu gögn voru skoðuð eftir stefnu og fjarlægð vöktunarreita frá virkjun sést að það var mikill munur á meðaltíðni árið 2017. Vöktunarreitir í 250 m fjarlægð og

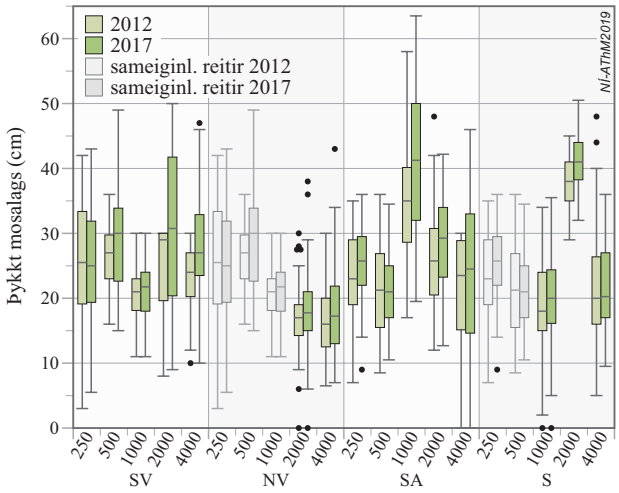
norðvestur/suðvestur (NV/SV) og 4000 m fjarlægð suðvestur (SV) skera sig úr með meðaltíðni skemmda 73% og 99% árið 2017 (mestmegnis B-skemmdir). Í öðrum vöktunarreitum var meðaltíðni skemmda af þessi tagi á bilinu 1–25% (4. mynd h). Í nær öllum tilfellum hafði skráðum skemmdum fjölgað í samanburði við fyrra mælingarár nema í reitum í 500 m fjarlægð í suðaustur/suðurstefnu (SA/S) en þar var meðaltíðni slíkra skemmda 33% árið 2012 en aðeins 2% árið 2017 (4. mynd h).



*3. mynd. Heildaryfirlit yfir tíðni (meðaltöl ± 1 SE, n=120) heilbrigðs mosa (mosaflokkur A og eingöngu A) og mismunandi útlitsflokka á mosa (einstakir flokkar B–E, skemmdir almennt eða skemmdir af einhverjum flokkanna B, C, D2, E eða F) við Hellisheiðarvirkjun fyrir vöktunarárin 2012 og 2017. Lýsingu á útlitsflokkum mosans má finna í kafla 2.2.1. Stjörnur tákna marktækan mun, ***: p<0,001.*



4. mynd. Meðaltíðni mosaflokka (meðaltöl ± 1 SE, n=8) í rannsóknarreitum við Hellisheiðarvirkjun eftir fjarlægð og stefnu frá virkjun fyrir vöktunarárin 2012 og 2017, þ.e. heilbrigður mosi (flokkur A og eingöngu A), einstakir flokkar (B, C, D1 og D2), mosaskemmdir almennt (B–F) og útlitsflokkar af einhverjum flokkanna B, C, D2, E eða F. Bókstafir gefa til kynna stefnu sniða; suðvestur (SV), norðvestur (NV), suðaustur (SA) og suður (S), og tölur fjarlægð vöktunarreita frá virkjun í metrum. Reitir í 250 og 500 m fjarlægð eru sameiginlegir sniðum SA og S og reitir í 250, 500 og 1000 m eru sameiginlegir sniðum SV og NV. Lýsingu á útlitsflokkum mosans má finna í kafla 2.2.1.



5. mynd. Þykkt mosalags í vöktunarreitum við Hellisheiðarvirkjun eftir fjarlægð og stefnu frá virkjun fyrir árin 2012 og 2017. Kassaritin (e. boxplot) sýna miðgildi (þverstrik), endamörk kassans sýna efri (75%) og neðri (25%) fjórðungamörk og línur mörk hæsta og lægsta gildis án útlaga (e. outliers) í dreifingunni. Mæligildi utan kassans eru útlagar. Bókstafir gefa til kynna stefnu sniða (SV, NV, SA og S) og tölur fjarlægð vöktunarreita frá virkjun í metrum. Reitir í 250 og 500 m fjarlægð eru sameiginlegir sniðum SA og S og reitir í 250, 500 og 1000 m eru sameiginlegir sniðum SV og NV.

3.1.5 Þykkt mosalagsins

Í mælingum árið 2012 voru ekki gerðar jafn nákvæmar mælingar á þykkt mosalagsins fyrir alla reiti (hámarksmæling var 30 cm í nokkrum reitum, sjá kafla 3.3.3 um mælingar á mosaþykkt í Ágústa Helgadóttir o.fl. 2003). Þess vegna var reiknað miðgildi í stað meðaltals fyrir samanburð áranna 2012 og 2017. Litlar breytingar komu fram á þykkt mosalagsins milli vöktunarára, miðgildi var 23,5 cm árið 2012 og 24,3 cm árið 2017 við Hellisheiðarvirkjun.

Mosaþykkt var töluvert breytileg milli vöktunarreita eða frá um 17–41 cm (miðgildi) árið 2017. Í 13 reitum af 15 var aukning í mosaþykkt frá 2012 til 2017 en ekki kom fram ákveðið mynstur í breytingum á þykkt tengt fjarlægð eða stefnu frá virkjun (5. mynd).

3.2 Ástand mosaþekju og tengsl mosaskemmda við fjarlægð og stefnu frá Nesjavallavirkjun

Ástand mosaþekju við Nesjavallavirkjun var metin með tíðniskráningu á heilbrigði þekjunnar sem skipt var niður í nokkra útlitsflokka mosa (sjá kafla 2.2.1 Mosalykill).

3.2.1 Heilbrigður mosi (A)

Þegar á heildina er litið voru heilbrigðir mosasprotar (flokkur A, sjá skiptingu í útlitsflokka mosa í kafla 2.2.1 Mosalykill) mjög algengir í vöktunarreitum við Nesjavallavirkjun. Meðaltíðni þeirra var yfir 99%, bæði fyrir árið 2012 og 2017 (6. mynd a). Var meðaltíðni slíkra sprota á bilinu 98–100% í reitum árið 2017, óháð stefnu og fjarlægð frá virkjun og litlar breytingar var að sjá frá fyrra vöktunarári (7. mynd a).

Ef litið er á skráningar þar sem eingöngu fundust heilir mosasprotar í reitum (eingöngu A) var meðaltíðnin um 13% árið 2012 en minnkaði marktækt í 1% árið 2017 ($t= -6{,}58$, $p<0{,}0001$) (6. mynd b). Þegar sömu gögn voru skoðuð eftir stefnu og fjarlægð vöktunarreita frá virkjun kom í ljós að allir reitir voru með undir 5% meðaltíðni slíkra skráninga árið 2017 sem var mikil breyting frá fyrra vöktunarári (7. mynd b).

3.2.2 Mismunandi útlitsflokkar mosa (flokkar B–F)

Brúngulur mosi (B)

Við Nesjavallavirkjun voru brúngular skemmdir á mosa fátíðar árið 2012 eða um 1%, en jukust marktækt í um 13% að meðaltali árið 2017 ($t=4{,}64$, $p<0{,}0001$) (6. mynd c). Mjög mikill breytileiki var meðal vöktunarreita í þessum flokki. Miðgildi á tíðni skemmda af flokki B var

0% og frávikshlutfall 402% árið 2012 og þessar sömu stærðir 0% og 207% árið 2017. Því voru B-skemmdir mjög misalgengar, langflestir vöktunarreitir voru án skemmda en stakir reitir með mikla tíðni skemmda sem sjá má þegar gögnin eru skoðuð eftir stefnu og fjarlægð frá virkjun (7. mynd c). Mjög mikið var um þessar skemmdir á mosa í vöktunarreitum í 1000 m, 2000 m, og 4000 m fjarlægð í vesturstefnu (V) frá virkjun og var meðaltíðni 54%, 49% og 82% (í þeirri röð) en í öðrum reitum var mjög lítið um skemmdir (7. mynd c). Í heildina hafði skráðum skemmdum fjölgað mjög árið 2017 í samanburði við fyrra mælingarár, nema í vöktunarreitum í 1000 m fjarlægð og suðausturstefnu (SA) þar sem var fækkun úr 10% í 2% (7. mynd c).

Gulur mosi (C)
Þegar á heildina er litið voru mosaskemmdir af gerð C fátíðar við Nesjavallavirkjun og meðaltíðni aðeins 2% árið 2017 (6. mynd d). Þó voru slíkar skemmdir töluvert algengar á einum stað nærri virkjuninni, þ.e. í 500 m fjarlægð og í stefnu suðaustur (SA) en þar sem meðaltíðni var 18% en breytileiki meðal smáreita var mikill (7. mynd d).

Svartur/svargrænn mosi (D1)
Mjög algengt var að skráður var útlitsflokkurinn D1 í vöktunarreitum við Nesjavallavirkjun (6. mynd e). Meðaltíðni D1-flokks var um 87% árið 2012 og jókst marktækt í um 99% árið 2017 ($t=4,35$, $p<0,0001$). Meðaltíðni slíkra skráninga var mjög svipuð, eða á bilinu 95–100% eftir fjarlægð og stefnu frá virkjun vöktunarreita frá virkjun fyrir árið 2017 (7. mynd e). Í nær öllum tilvikum hafði slíkum skráningum fjölgað í samanburði við fyrra vöktunarár, en breytileiki í tíðni D1-flokks var meiri árið 2012.

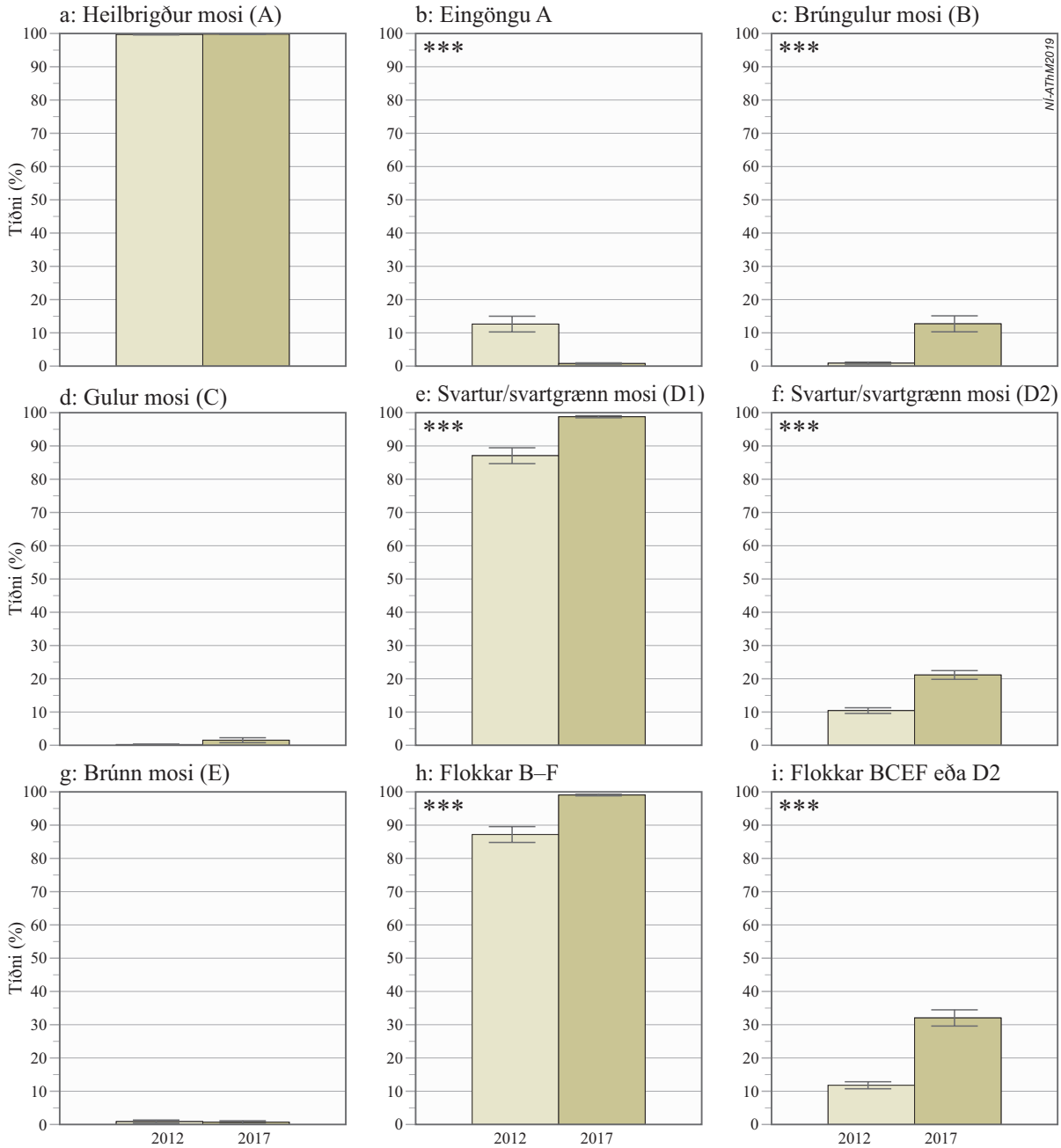
Svartur/svargrænn mosi (D2)
Í heildina var nokkuð um svartan/svargrænan mosa (flokkur D2) í vöktunarreitum við Nesjavallavirkjun (6. mynd f). Meðaltíðni D2 mosaskemmda við virkjunina var um 11% árið 2012 og jókst marktækt í um 21% árið 2017 ($t=8,56$, $p<0,0001$). Töluverður breytileiki var meðal vöktunarreita sem kom fram þegar meðaltíðni var skoðuð með tilliti til staðsetningar reita en hún var á bilinu 8–37% árið 2017 (7. mynd f). Í öllum tilvikum hafði skemmdum fjölgað mjög í samanburði við fyrra vöktunarár.

Svargrænn mosi (D0), brúnn mosi (E) og svartur mosi (F)
Í heild voru mosaskemmdir af flokkum D0, E og F mjög fátíðar við Nesjavallavirkjun, með meðaltíðni 0,4% og 0%, 0,9% og 0,7% (6. mynd g), 0% og 0,3% í vöktunarreitum (í þeirri röð) árin 2012 og 2017. Mosaskemmdir af gerð G og H mældust ekki í vöktunarreitum árið 2012 né 2017.

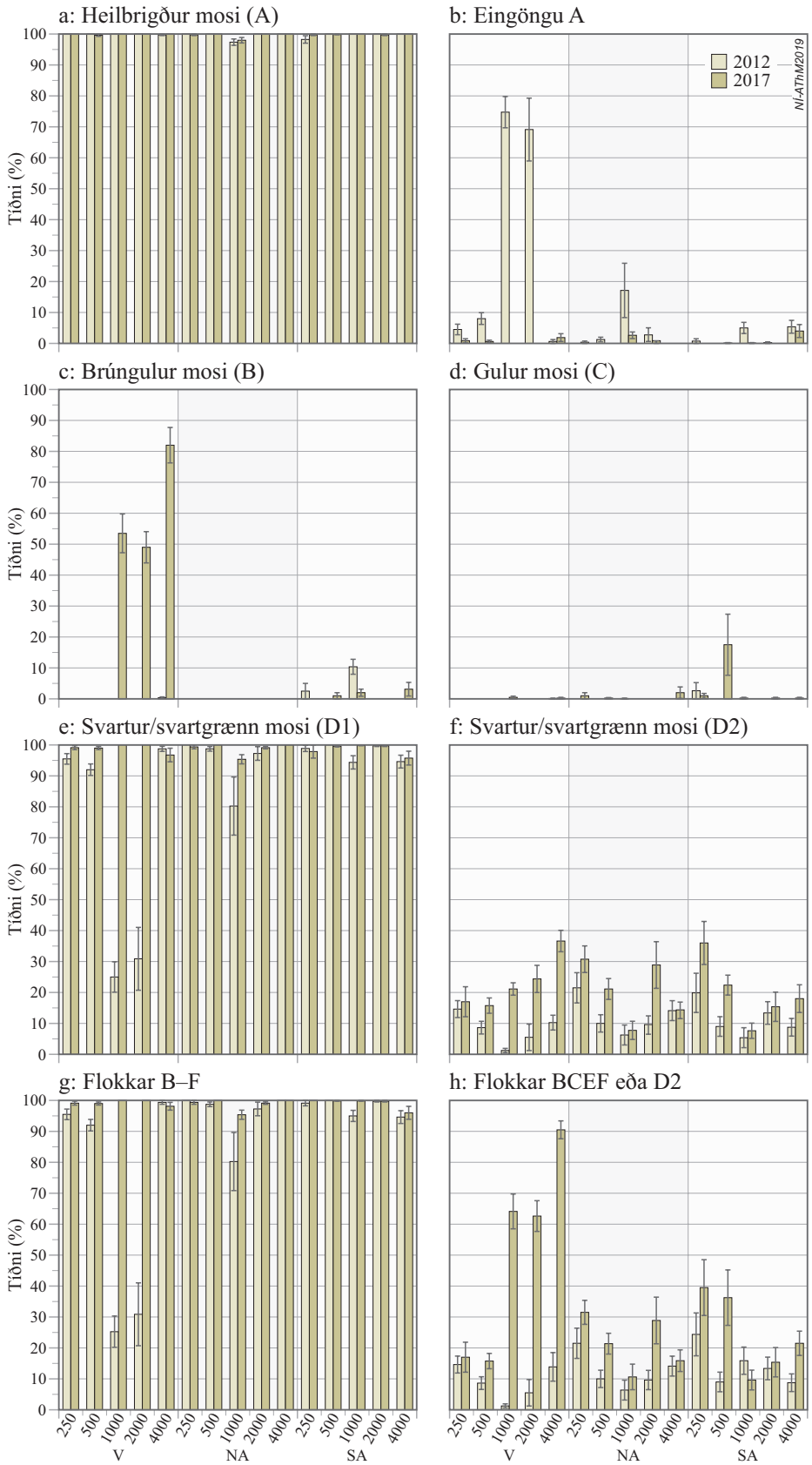
3.2.3 Útlitsflokkar aðrir en heilbrigður mosi (allir flokkar B–F)
Það var algengt að skráðar voru einhversskonar útlitsbreytingar á mosasprotum í vöktunarreitum (flokkar B–F) við Nesjavallavirkjun árið 2017 (6. mynd h). Ef á heildina er litið var meðaltíðni slíkra sprota 87% árið 2012 og jókst marktækt í um 99% árið 2017 ($t=4,40$, $p<0,0001$). Þegar sömu gögn voru skoðuð með tilliti til stefnu og fjarlægðar frá virkjun fyrir árið 2017 kom í ljós lítill munur á tíðni og var meðaltíðni í vöktunarreitum á bilinu 95–100% (7. mynd g). Í nær öllum tilfellum hafði tíðni staðið í stað eða aukist í samanburði við fyrra mælingarár.

3.2.4 Mosaskemmdir af flokkum B, C, D2, E eða F
Ef horft er á útlitsflokka mosa með greinilegar skemmdir, flokkar B, C, D2, E eða F, þ.e. ef undanskildar eru útlitsbreytingar af langalgengasta flokkum D1 og einnig D0, voru þær töluvert algengar í vöktunarreitum við Nesjavallavirkjun (6. mynd i). Miðað við heildina var

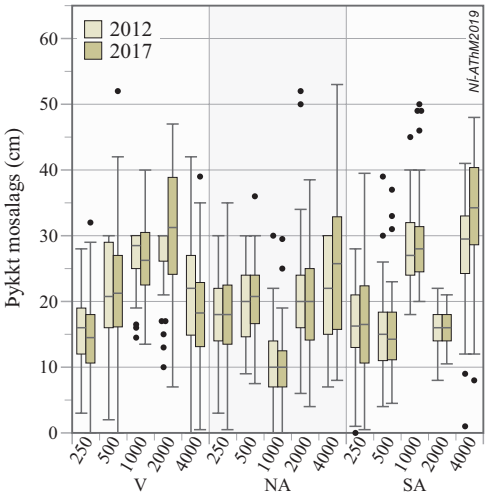
meðaltíðni 12% árið 2012 og jókst marktækt í um 32% árið 2017 (t=7,87 , p<0,0001). Þegar sömu gögn eru skoðuð eftir stefnu og fjarlægð vöktunarreita frá virkjun sést að það var mikill breytileiki í algengni slíkra skemmda árið 2017 og var meðaltíðni á bilinu 10–91% (7. mynd h). Vöktunarreitir í stefnu vestur (V), í 1000 m, 2000 m og 4000 m, skáru sig frá öðrum með háa meðaltíðni skráninga á skemmdum eða 64%, 63% og 91% (mestmegnis B-skemmdir). Aðrir reitir með algengar slíkar skemmdir voru reitir í 250 m (meðaltíðni 32%) og 2000 m (29%) fjarlægð og stefnu norðaustur (NA) og í 250 m (40%) og 500 m fjarlægð (36%) og stefnu suðaustur (SA) (7. mynd h). Aðrir reitir voru með u.þ.b. 10–20% meðaltíðni. Í nær öllum tilfellum hafði skráðum skemmdum fjölgað mjög í samanburði við fyrra mælingarár (7. mynd h).



*6. mynd. Heildaryfirlit yfir tíðni (meðaltöl ± 1 SE, n= 120) heilbrigðs mosa (mosaflokkur A og eingöngu A) og mismunandi útlitsflokka á mosa (einstakir flokkar B–E, skemmdir almennt eða skemmdir af einhverjum flokkanna B, C, D2, E eða F) við Nesjavallavirkjun fyrir vöktunarárin 2012 og 2017. Lýsingu á útlitsflokkum mosans má finna í kafla 2.2.1. Stjörnur tákna marktækan mun, ***: p<0,001.*



7. mynd. Meðaltíðni mosaflokka (meðaltöl ± 1 SE, n=8) í rannsóknarreitum við Nesjavallavirkjun eftir fjarlægð og stefnu frá virkjun fyrir vöktunarárin 2012 og 2017, þ.e. heilbrigður mosi (flokkur A og eingöngu A), einstakir flokkar (B, C, D1 og D2), mosaskemmdir almennt (B–F) og útlitsflokkar af einhverjum flokkanna B, C, D2, E eða F. Bókstafir gefa til kynna stefnu sniða; vestur (V), norðaustur (NA) og suðaustur (SA), og tölur fjarlægð vöktunarreita frá virkjun í metrum. Lýsingu á útlitsflokkum mosans má finna í kafla 2.2.1.



8. mynd. Þykkt mosalags í vöktunarreitum við Nesjavallavirkjun eftir fjarlægð og stefnu frá virkjun fyrir árin 2012 og 2017. Kassaritin (e. boxplot) sýna miðgildi (þverstrik), endamörk kassans sýna efri (75%) og neðri (25%) fjórðungamörk í dreifingunni og línur mörk hæsta og lægsta gildis án útlaga (e. outliers). Mæligildi utan kassans eru útlagar. Bókstafir gefa til kynna stefnu sniða (V, NA og SA) og tölur fjarlægð vöktunarreita frá virkjun í metrum.

3.2.5 Þykkt mosalagsins

Þar sem ekki voru gerðar jafnnákvæmar mælingar á þykkt mosalagsins fyrir alla reiti árið 2012 (hámarksmæling var 30 cm í nokkrum reitum, sjá kafla 3.3.3 um mælingar á mosaþykkt í Ágústa Helgadóttir o.fl. 2003) var reiknað miðgildi í stað meðaltals fyrir samanburð árin 2012 og 2017. Miðgildi fyrir þykkt mosalagsins við Nesjavallavirkjun var 20,0 cm bæði fyrir árið 2012 og 2017.

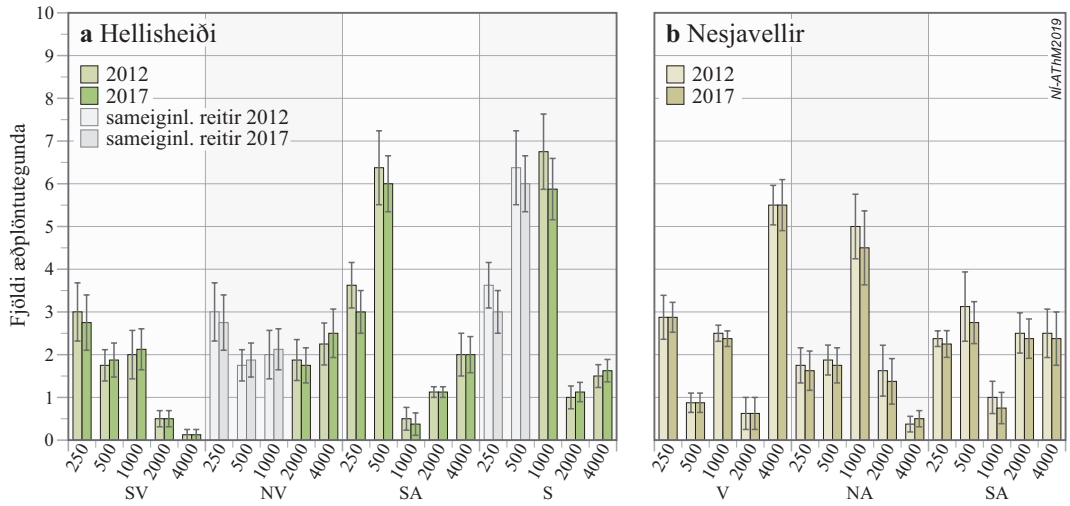
Mosaþykkt var töluvert breytileg milli vöktunarreita eða frá um 10–34 cm (miðgildi) árið 2017. Í fimm reitum af 15 var einhver aukning í mosaþykkt frá 2012 til 2017, í fjórum reitum minnkun og sama þykkt í sex reitum. Það virðist ekki vera um að ræða mynstur í breytingum á þykkt tengt fjarlægð eða stefnu frá virkjun (8. mynd).

3.3 Annar gróður í vöktunarreitum við Hellisheiðarvirkjun og Nesjavallavirkjun

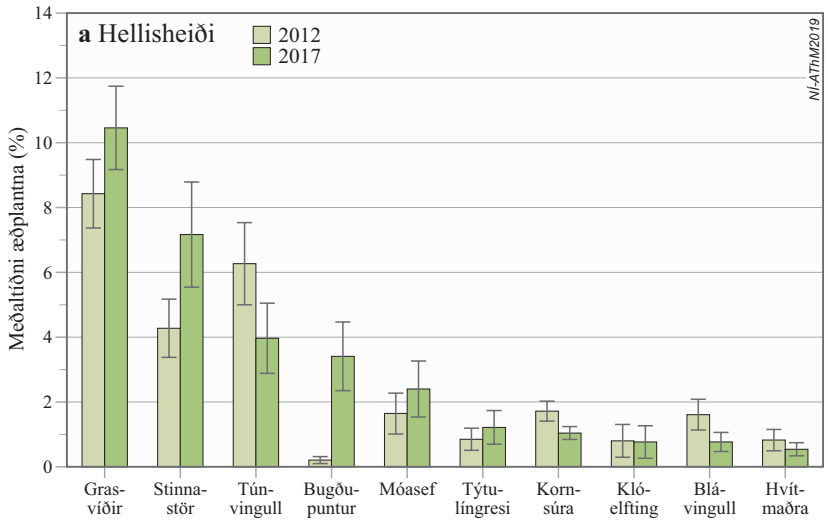
Árið 2017 fundust alls 26 tegundir æðplantna í vöktunarreitum, 19 tegundir við Hellisheiðarvirkjun og 20 tegundir við Nesjavallavirkjun (1. viðauki). Fjöldi æðplöntutegunda sem fannst árið 2017 var frá 0–10 tegundir í 0,25 m² smáreitum við Hellisheiðarvirkjun. Litlar breytingar voru á fjölda tegunda milli ára og var meðalfjöldi 2,3 teg./0,25 m² árið 2012 og 2,2 teg./0,25 m² árið 2017 en meðalfjöldi var töluvert breytilegur milli vöktunarreita (9. mynd a). Fjöldi æðplöntutegunda við Nesjavallavirkjun árið 2017 voru frá 0–9 tegundir í 0,25 m² smáreitum. Á Nesjavöllum var meðalfjöldi sami og á Hellisheiði eða 2,3 teg./0,25 m² árið 2012 og 2,2 teg./0,25 m² árið 2017. Meðalfjöldi við Nesjavallavirkjun var einnig töluvert breytilegur milli vöktunarreita en litlar breytingar milli vöktunarára (9. mynd b).

Algengustu æðplöntutegundir í vöktunarreitum við Hellisheiðarvirkjun voru grasvíðir, stinnastör, túnvingull, bugðupuntur og móasef og hafði meðaltíðni þeirra lítið breyst milli vöktunarára nema helst hjá stinnastör þar sem tíðnin jókst að meðaltali úr rúmlega fjórum hlutreitum af 100 í um sjö hlutreiti (10. og 12. mynd a, 1. viðauki a). Við Nesjavallavirkjun var að finna meiri lynggróður og voru algengustu æðplöntutegundir grasvíðir, stinnastör, krækilyng, bláberjalyng og bugðupuntur. Þar hafði meðaltíðni einnig breyst óverulega milli vöktunarára (11. mynd, 12. mynd b, 1. viðauki b).

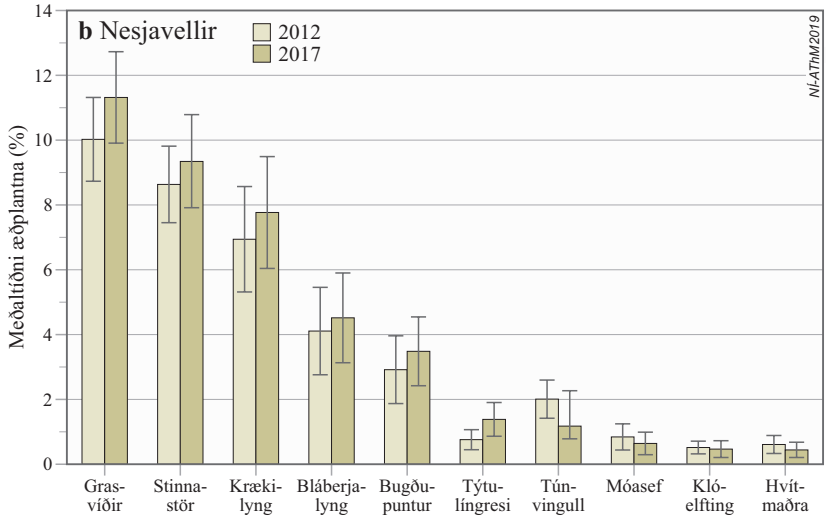
Hraungambri var ríkjandi mosategund í öllum rannsóknarreitum með meðaltíðni yfir 99% í reitum við Hellisheiðarvirkjun og Nesjavallavirkjun árin 2012 og 2017 (1. viðauki). Aðrar mosategundir fundust en voru mjög fátíðar. Nokkrar fléttutegundir fundust en voru með meðaltíðni undir 1%, nema kræðufléttur (*Cetraria* spp.) sem voru með meðaltíðni um 5% á Hellisheiði árin 2012 og 2017 og um 6% og 5% árin 2012 og 2017 á Nesjavöllum (1. viðauki).



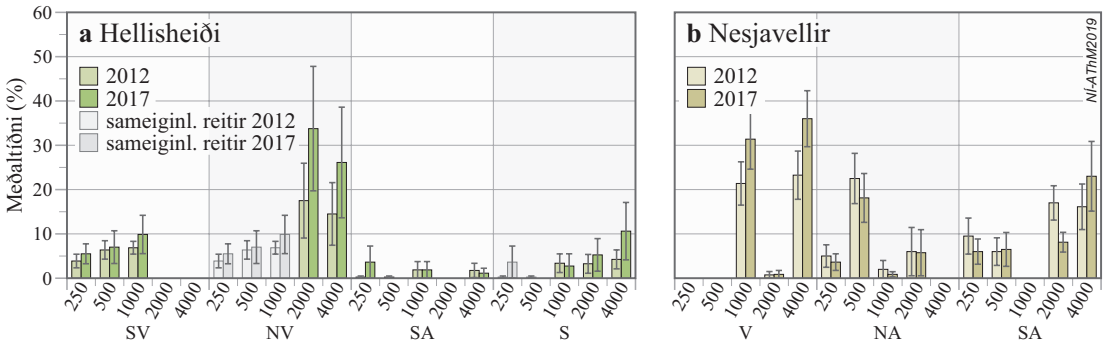
9. mynd. Meðalfjöldi æðplantna í 0,25 m² smáreitum (meðaltöl ± 1 SE, n=8) í vöktunarreitum við Hellisheiðarvirkjun (vinstri mynd) og Nesjavallavirkjun (hægri mynd) eftir fjarlægð og stefnu frá virkjun fyrir árin 2012 og 2017. Bókstafir gefa til kynna stefnu sniða (SA, SV, NV, NA og V) og tölur fjarlægð vöktunarreita frá virkjun í metrum. Reitir í 250 og 500 m fjarlægð eru sameiginlegir sniðum SA og S og reitir í 250, 500 og 1000 m eru sameiginlegir sniðum SV og NV við Hellisheiðarvirkjun.



10. mynd. Meðaltíðni tíu algengustu æðplantna (meðaltöl ± 1 SE, n=120) í vöktunarreitum við Hellisheiðarvirkjun árin 2012 og 2017.



11. mynd. Meðaltíðni tíu algengustu æðplantna (meðaltöl ± 1 SE, n=120) í vöktunarreitum við Nesjavallavirkjun árin 2012 og 2017.



*12. mynd. Meðaltíðni stinnastarar (*Carex bigelowii*) (meðaltöl ± 1 SE, n=8) í vöktunarreitum við Hellisheiðarvirkjun (a, vinstra megin) og Nesjavallavirkjun (b, hægra megin) fyrir árin 2012 og 2017. Bókstafir gefa til kynna stefnu sniða (SV, NV, SA S, V og NA) og tölur fjarlægð vöktunarreita frá virkjun í metrum. Reitir í 250 og 500 m fjarlægð eru sameiginlegir sniðum SA og S og reitir í 250, 500 og 1000 m eru sameiginlegir sniðum SV og NV við Hellisheiðarvirkjun.*

3.4 Brennisteinn og þungmálmar í mosasýnum í vöktunarreitum og tengsl við stefnu og fjarlægð frá virkjun

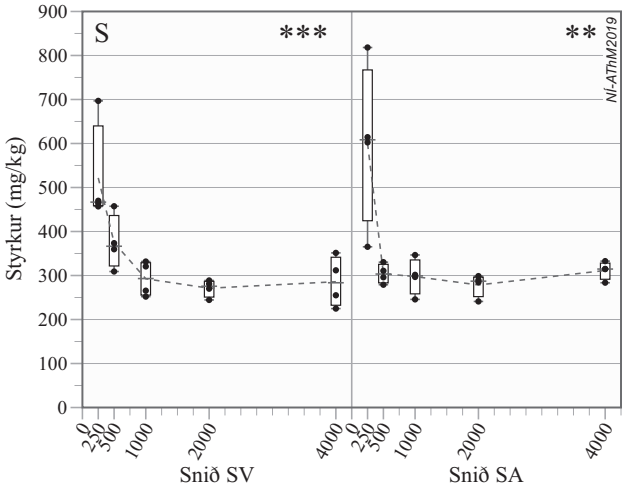
Í rannsókninni var mælt efnamagn í 40 mosasýnum við hvora virkjun, á sniðum í stefnu suðvestur (SV) og suðaustur (SA) frá Hellisheiðarvirkjun og í stefnu vestur (V) og suðaustur (SA) frá Nesjavallavirkjun. Á sniðunum var mosasýnum safnað í mismikilli fjarlægð frá virkjun, þ.e. í vöktunarreitum í 250 m, 500 m, 1000 m, 2000 m og 4000 m fjarlægð frá virkjun. Hér er greint frá efnamagni sem mældist í mosanum og skoðuð tengsl efnamagns við stefnu og fjarlægð frá virkjun.

3.4.1 Styrkur efna við Hellisheiðarvirkjun

Brennisteinn (S)

Styrkur brennisteins í 40 mosasýnum við Hellisheiðarvirkjun árið 2017 var á bilinu 225–818 mg/kg og 354 ± 20,4 mg/kg að meðaltali (13. mynd). Á suðvestursniði (SV) var meðalstyrkur brennisteins 349 ± 25,3 mg/kg og 358 ± 32,7 mg/kg á suðaustursniði (SA).

Brennisteinsstyrkurinn var um tvöfalt hærri næst virkjuninni í 250 m fjarlægð eða að meðaltali 522 mg/kg á suðvestursniði og 600 mg/kg á suðaustursniði miðað við lengra frá og lækkaði ört með aukinni fjarlægð niður í um 270–375 mg/kg (13. mynd, 2. viðauki a). Aðhvarfsgreining sýndi að brennisteinn lækkaði marktækt með aukinni fjarlægð frá virkjun, bæði á suðaustursniði og suðvestursniði (1. tafla).



*13. mynd. Styrkur brennisteins (S)(mg/kg) í mosasýnum (n=4) í vöktunarreitum eftir fjarlægð og stefnu frá Hellisheiðarvirkjun árið 2017. Punktar sýna einstök mæligildi, efri brún kassans (kassarit, e. boxplot) sýnir 75% mörk dreifingarinnar, neðri brún 25% mörk og miðja kassans sýnir miðgildi. Brotna línan gengur í gegn um meðalstyrk (meðaltal) viðkomandi efnis í vöktunarreit. Bókstafir gefa til kynna stefnu sniða frá virkjun; suðvestur (SV) og suðaustur (SA), og tölur fjarlægð vöktunarreita frá virkjun í metrum. Stjörnur tákna marktektarstig; *: p<0,05, **: p<0,01 og ***: p<0,001.*

1. tafla. Niðurstöður línulegrar aðhvarfsgreiningar á sambandi styrks brennisteins og þungmálma í mosa og fjarlægðar frá jarðvarmavirkjun á Hellisheiði. Styrkur efna var mældur í fjórum mosasýnum sem tekin voru úr hverjum vöktunarreit; í 250 m, 500 m, 1000 m, 2000 m og 4000 m fjarlægð frá virkjun. Stefna sniðs var í suðvestur (SV) eða suðaustur (SA). Notuð voru $\log_{10}$ umbreytt gildi á styrk efnanna og fjarlægð frá virkjun í aðhvarfsgreiningunni (n=20). Þar sem aðhvarfsgreiningin var marktæk (feitletruð p-gildi) var um að ræða marktæka lækkun á styrk efna með aukinni fjarlægð frá virkjun (α =0,05).

Efni	Stefna sniðs	F-gildi	Skýringarhlutfall (R^2) %	Marktækni aðhvarfs-greiningarinnar (p-gildi)
Brennisteinn (S)	SV	26,35	59,4	**<0,0001**
	SA	10,56	37,0	**0,0045**
Arsen (As)	SV	0,69	3,7	0,417
	SA	0,53	2,9	0,476
Bór (B)	SV	0,04	0,2	0,838
	SA	5,52	23,5	**0,030**
Kadmín (Cd)	SV	0,02	0,1	0,876
	SA	3,51	16,3	0,077
Króm (Cr)	SV	0,49	2,6	0,495
	SA	2,32	11,4	0,145
Kopar (Cu)	SV	0,21	1,1	0,656
	SA	1,22	6,4	0,283
Járn (Fe)	SV	1,56	8,0	0,228
	SA	0,06	0,4	0,802
Kvikasilfur (Hg)	SV	24,78	57,9	**<0,0001**
	SA	3,93	17,9	0,063
Nikkel (Ni)	SV	4,41	19,7	**0,050**
	SA	0,16	0,9	0,693
Blý (Pb)	SV	0	0,0	0,983
	SA	1,65	8,4	0,215
Antímon (Sb)	SV	0,27	1,5	0,608
	SA	3,86	17,6	0,065
Vanadín (V)	SV	1,2	6,3	0,287
	SA	0,02	0,1	0,894
Sink (Zn)	SV	2,65	12,8	0,121
	SA	3,17	15,0	0,092

Arsen (As)

Styrkur arsens í 40 mosasýnum við Hellisheiðarvirkjun árið 2017 var á bilinu 0,004–0,365 mg/kg og 0,120 ± 0,010 mg/kg að meðaltali (14. mynd a) . Meðalstyrkur arsens var 0,119 ± 0,017 mg/kg á suðvestursniði (SV) og 0,121 ± 0,009 mg/kg á suðaustursniði (SA). Meðalstyrkur arsens var hæstur næst virkjuninni á suðvestursniði en langhæsta gildið á arsen (0,365 mg/kg) var í stöku sýni í viðkomandi reit (14. mynd a og 2. viðauki a). Aðhvarfsgreining á arsenstyrk og fjarlægð var ekki marktæk (1. tafla).

Bór (B)

Styrkur bórs í 40 mosasýnum við Hellisheiðarvirkjun árið 2017 var á bilinu 0,56–3,68 mg/kg og að meðaltali 1,26 ± 0,11 mg/kg (14. mynd a) . Meðalstyrkur bórs var 1,20 ± 0,17 mg/kg suðvestursniði (SV) og 1,33 mg/kg ± 0,13 mg/kg á suðaustursniði (SA). Hæsti meðalstyrkur bórs var á suðvestursniði í 500 m fjarlægð frá virkjun (14. mynd a og 2. viðauki a). Aðhvarfsgreining sýndi að bór lækkaði marktækt með aukinni fjarlægð frá virkjun á suðaustursniði. Á suðvestursniði var aðhvarfsgreining ekki marktæk (1. tafla).

Kadmín (Cd)
Styrkur kadmíns í 40 mosasýnum við Hellisheiðarvirkjun árið 2017 var á bilinu 0,002–0,108 mg/kg og 0,023 ± 0,003 mg/kg að meðaltali (14. mynd a). Meðalstyrkur kadmíns í vöktunarreitum var 0,017 ± 0,002 mg/kg á suðvestursniði (SV) og 0,029 ± 0,005 mg/kg á suðaustursniði (SA). Meðalstyrkur kadmíns var hæstur næst virkjuninni á suðaustursniði en langhæsta kadmíngildið (0,108 mg/kg) var í sýni í viðkomandi reit, að öðru leyti var styrkurinn svipaður í mismunandi fjarlægð (14. mynd a og 2. viðauki a). Aðhvarfsgreining á kadmínstyrk og fjarlægð var ekki marktæk (1. tafla).

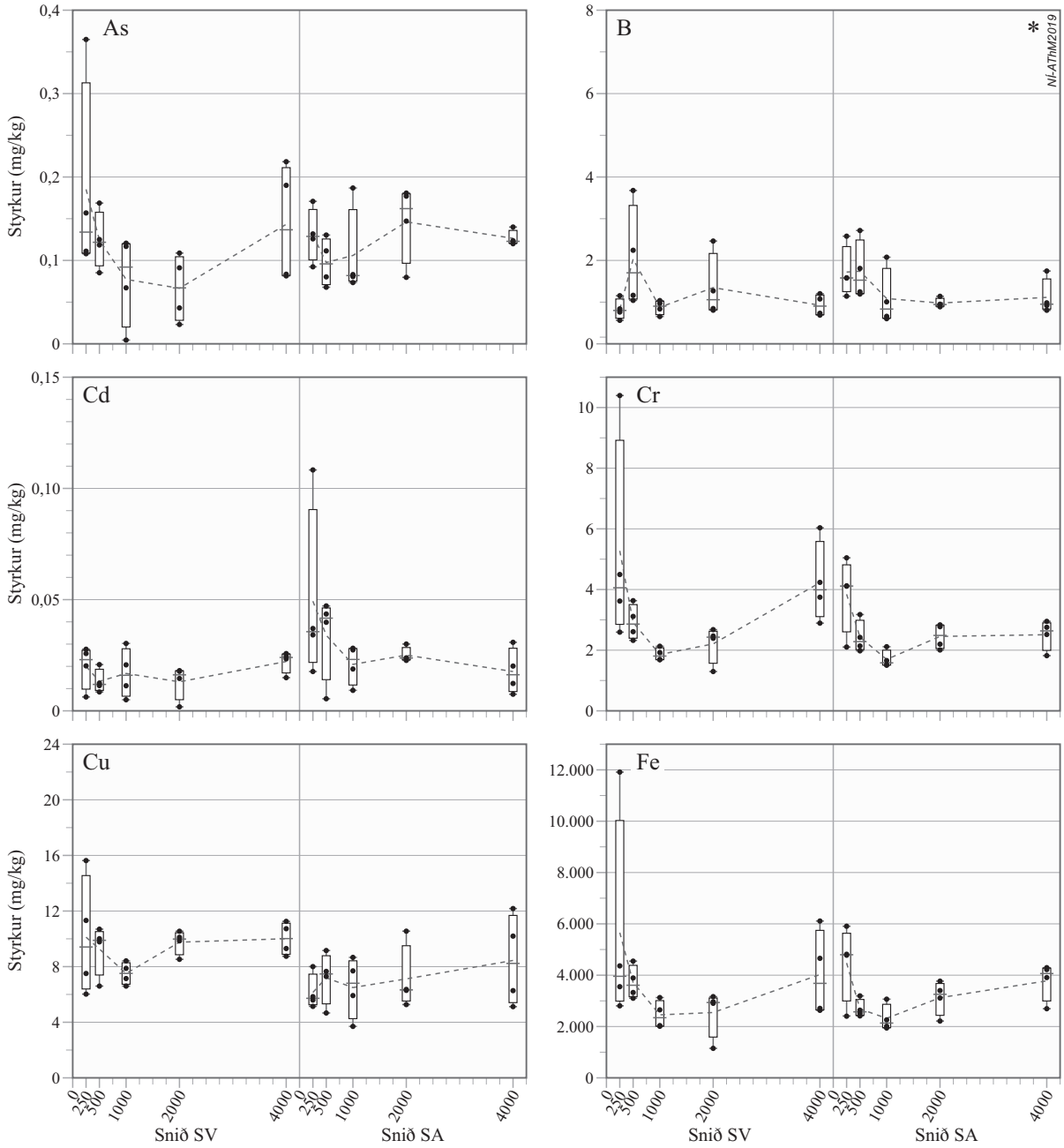
Króm (Cr)
Styrkur króms í 40 mosasýnum við Hellisheiðarvirkjun árið 2017 var á bilinu 1,30–10,39 mg/kg og 2,94 ± 0,25 mg/kg að meðaltali (14. mynd a). Meðalstyrkur króms í vöktunarreitum var 3,30 ± 0,45 mg/kg á suðvestursniði (SV) og 2,59 ± 0,21 mg/kg á suðaustursniði (SA). Meðalstyrkur króms var hæstur næst virkjuninni, fór minnkandi en jókst heldur aftur lengra frá, og langhæsta krómgildið (10,39 mg/kg) var í sýni næst virkjun á suðvestursniði (14. mynd a og 2. viðauki a). Aðhvarfsgreining á krómstyrk og fjarlægð reyndist ekki marktæk (1. tafla).

Kopar (Cu)
Styrkur kopars í 40 mosasýnum við Hellisheiðarvirkjun árið 2017 var á bilinu 3,70–15,63 mg/kg og 8,21 ± 0,39 mg/kg að meðaltali (14. mynd a). Meðalstyrkur kopars var að meðaltali 9,33 ± 0,49 mg/kg á suðvestursniði (SV) og 7,08 ± 0,49 mg/kg á suðaustursniði (SA). Meðalstyrkur kopars var nokkuð breytilegur eftir fjarlægð frá virkjun (14. mynd a og 2. viðauki a). Aðhvarfsgreining á koparstyrk og fjarlægð var ekki marktæk (1. tafla).

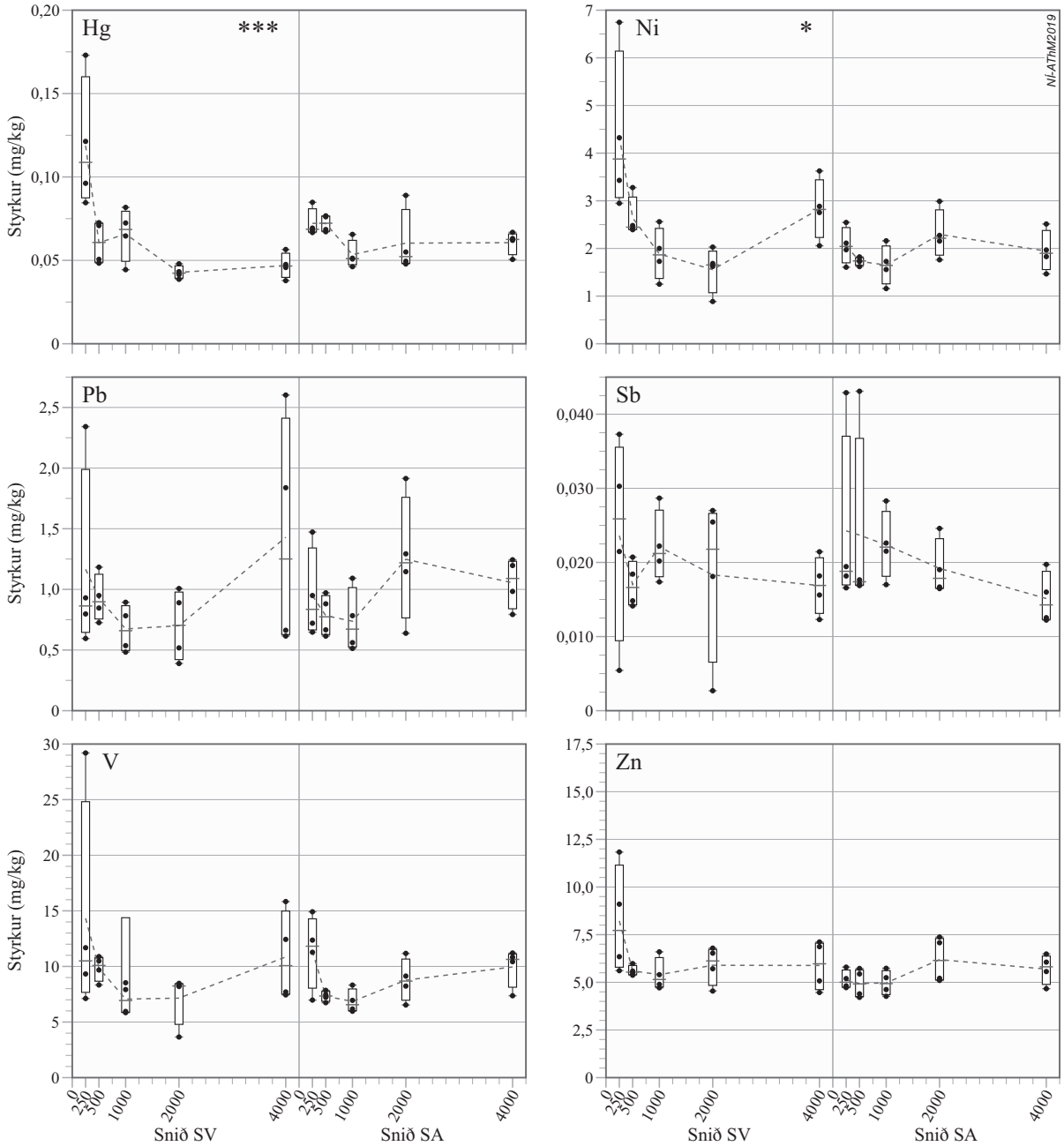
Járn (Fe)
Styrkur járns í 40 mosasýnum við Hellisheiðarvirkjun árið 2017 var á bilinu 1148–11.913 mg/kg og 3478 ± 275 mg/kg að meðaltali (14. mynd a). Meðalstyrkur járns var 3680 ± 496,9 mg/kg á suðvestursniði (SV) og 3276 ± 243,9 mg/kg á suðaustursniði (SA). Meðalstyrkur járns var hæstur næst virkjuninni, fór minnkandi en jókst heldur aftur lengra frá, og langhæsta járngildið (11.913 mg/kg) var í sýni næst virkjun á suðvestursniði (14. mynd a og 2. viðauki a). Aðhvarfsgreining á járnstyrk og fjarlægð reyndist ekki marktæk (1. tafla).

Kvikasilfur (Hg)
Styrkur kvikasilfurs í 40 mosasýnum við Hellisheiðarvirkjun árið 2017 var á bilinu 0,038–0,173 mg/kg og 0,065 ± 0,004 mg/kg að meðaltali (14. mynd b). Meðalstyrkur kvikasilfurs var 0,067 ± 0,007 mg/kg á suðvestursniði (SV) og 0,064 ± 0,003 mg/kg á suðaustursniði (SA). Meðalstyrkur kvikasilfurs var hæstur næst virkjuninni á suðvestursniði og sýndi aðhvarfsgreining að kvikasilfur lækkaði marktækt með aukinni fjarlægð frá virkjun á því sniði. Á suðaustursniði var lítill munur á styrk kvikasilfurs í mismikilli fjarlægð og aðhvarfsgreining ekki marktæk (14. mynd b, 1. tafla og 2. viðauki a).

Nikkel (Ni)
Styrkur nikkels í 40 mosasýnum við Hellisheiðarvirkjun árið 2017 var á bilinu 0,89–6,75 mg/kg og 2,30 ± 0,16 mg/kg að meðaltali (14. mynd b). Meðalstyrkur nikkels var 2,65 ± 0,29 mg/kg á suðvestursniði (SV) og 1,94 ± 0,10 mg/kg á suðaustursniði (SA). Meðalstyrkur nikkels var hæstur næst virkjun á suðvestursniði og sýndi aðhvarfsgreining að nikkel lækkaði marktækt með aukinni fjarlægð frá virkjun á því sniði (1. tafla, 14. mynd b og 2. viðauki a). Á suðaustursniði var lítill breytileiki í styrk nikkels og aðhvarfsgreining ekki marktæk.



*14. mynd a. Styrkur arsens (As) (mg/kg), bórs (B), kadmíns (Cd), króms (Cr), kopars (Cu), járns (Fe) í mosasýnum (n=4) í vöktunarreitum eftir fjarlægð og stefnu frá Hellisheiðarvirkjun árið 2017. Punktar sýna einstök mæligildi, efri brún kassans (kassarit, e. boxplot) sýnir 75% mörk dreifingarinnar, neðri brún 25% mörk og miðja kassans sýnir miðgildi. Brotna línan gengur í gegn um meðalstyrk (meðaltal) viðkomandi efnis í vöktunarreit. Athugið mismunandi mælikvarða á y-ás. Bókstafir gefa til kynna stefnu sniða frá virkjun; suðvestur (SV) og suðaustur (SA), og tölur fjarlægð vöktunarreita frá virkjun í metrum. Stjörnur tákna marktektarstig; *: p<0,05, **: p<0,01 og ***: p<0,001.*



*14. mynd b. Styrkur kvikasilfurs (Hg), nikkels (Ni), blýs (Pb), antímons (Sb), vanadíns (V), sinks (Zn) í mosasýnum (n=4) í vöktunarreitum eftir fjarlægð og stefnu frá Hellisheiðarvirkjun árið 2017. Punktar sýna einstök mæligildi, efri brún kassans (kassarit, e. boxplot) sýnir 75% mörk dreifingarinnar, neðri brún 25% mörk og miðja kassans sýnir miðgildi. Brotna línan gengur í gegn um meðalstyrk (meðaltal) viðkomandi efnis í vöktunarreit. Athugið mismunandi mælikvarða á y-ás. Bókstafir gefa til kynna stefnu sniða frá virkjun; suðvestur (SV) og suðaustur (SA), og tölur fjarlægð vöktunarreita frá virkjun í metrum. Stjörnur tákna marktektarstig; *: p<0,05, **: p<0,01 og ***: p<0,001.*

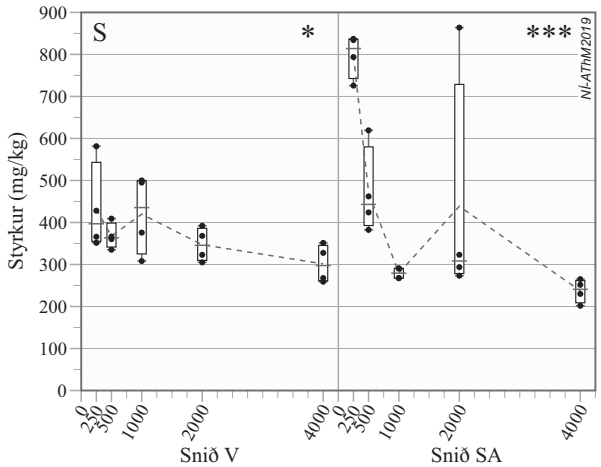
Blý (Pb)
Styrkur blýs í 40 mosasýnum við Hellisheiðarvirkjun árið 2017 var á bilinu 0,39–2,60 mg/kg og 0,97 ± 0,08 mg/kg að meðaltali (14. mynd b). Meðalstyrkur blýs í vöktunarreitum var 0,98 ± 0,13 mg/kg suðvestursniði (SV) og 0,95 ± 0,079 mg/kg á suðaustursniði (SA). Meðalstyrkur blýs var nokkuð breytilegur eftir fjarlægð frá virkjun (14. mynd b og 2. viðauki a). Aðhvarfsgreining á blýstyrk og fjarlægð var ekki marktæk (1. tafla).

Antímon (Sb)
Styrkur antímons í 40 mosasýnum við Hellisheiðarvirkjun árið 2017 var á bilinu 0,003–0,043 mg/kg og 0,020 ± 0,001 mg/kg að meðaltali (14. mynd b). Meðalstyrkur antímons í vöktunarreitum var 0,020 ± 0,002 mg/kg á suðvestursniði (SV) og 0,021 ± 0,002 mg/kg á suðaustursniði (SA). Meðalstyrkur antímons fór heldur lækkandi eftir fjarlægð frá virkjun (14. mynd b og 2. viðauki a). Aðhvarfsgreining á styrk antímons og fjarlægð var ekki marktæk (1. tafla).

Vanadín (V)
Styrkur vanadíns í 40 mosasýnum við Hellisheiðarvirkjun árið 2017 var á bilinu 3,65–29,20 mg/kg og 9,35 ± 0,64 mg/kg að meðaltali (14. mynd b). Meðalstyrkur vanadíns í vöktunarreitum var 9,85 ± 1,17 mg/kg suðvestursniði (SV) og 8,86 ± 0,55 mg/kg á suðaustursniði (SA). Meðalstyrkur vanadíns var hæstur næst virkjun, fór minnkandi en jókst heldur aftur lengra frá (14. mynd b og 2. viðauki a). Langhæsta gildið á vanadín (29,20 mg/kg) var í sýni næst virkjun á suðvestursniði. Aðhvarfsgreining á styrk vanadíns og fjarlægð reyndist ekki marktæk (1. tafla).

Sink (Zn)
Styrkur sinks í 40 mosasýnum við Hellisheiðarvirkjun árið 2017 var á bilinu 4,21–11,83 mg/kg og 5,79 ± 0,22 mg/kg að meðaltali (14. mynd b). Meðalstyrkur sinks í vöktunarreitum var 6,20 ± 0,38 mg/kg á suðvestursniði (SV) og 5,38 ± 0,19 mg/kg á suðaustursniði (SA). Meðalstyrkur sinks var hæstur næst virkjuninni á suðvestursniði (14. mynd b og 2. viðauki a) en þar voru tvö gildi á sink mun hærri en önnur (11,8 og 9,1 mg/kg). Aðhvarfsgreining á sinkstyrk og fjarlægð var ekki marktæk (1. tafla).

3.4.2 Styrkur efna við Nesjavallavirkjun
Brennisteinn (S)
Styrkur brennisteins í 40 mosasýnum sem tekin voru við Nesjavallavirkjun árið 2017 var á bilinu 202–864 mg/kg og 409 ± 28,2 mg/kg að meðaltali (15. mynd). Styrkur brennisteins í vöktunarreitum var að meðaltali 373 ± 17,7 mg/kg á vestursniði (V) og 445 ± 53 mg/kg á suðaustursniði (SA).



*15. mynd. Styrkur brennisteins (S) (mg/kg) í mosasýnum (n=4) í vöktunarreitum, eftir fjarlægð og stefnu frá Nesjavallavirkjun árið 2017. Punktar sýna einstök mæligildi, efri brún kassans (kassarit, e. boxplot) sýnir 75% mörk dreifingarinnar, neðri brún 25% mörk og miðja kassans sýnir miðgildi. Brotna línan gengur í gegn um meðalstyrk (meðaltal) viðkomandi efnis í vöktunarreit. Bókstafir gefa til kynna stefnu sniða frá virkjun; vestur (V) og suðaustur (SA) og tölur fjarlægð vöktunarreita frá virkjun í metrum. Stjörnur tákna marktektarstig; *: p<0,05, **: p<0,01 og ***: p<0,001.*

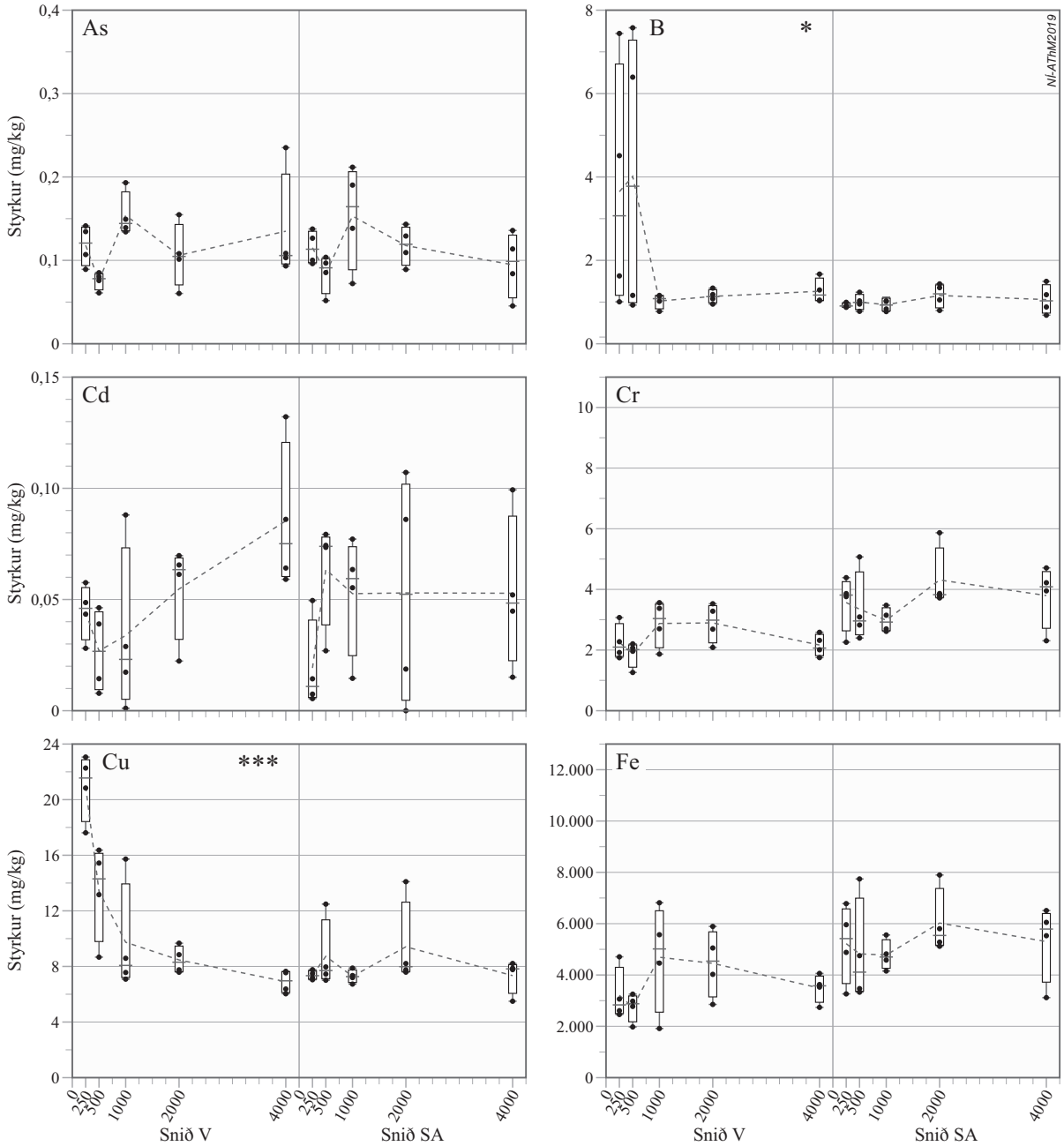
2. tafla. Niðurstöður línulegrar aðhvarfsgreiningar á sambandi styrks brennisteins og þungmálma í mosa og fjarlægðar frá jarðvarmavirkjun á Nesjavöllum. Styrkur efna var mældur í fjórum mosasýnum sem tekin voru úr hverjum vöktunarreit; í 250 m, 500 m, 1000 m, 2000 m og 4000 m fjarlægð frá virkjun. Stefna sniðs í vestur (V) eða suðaustur (SA). Notuð voru $\log_{10}$ umbreytt gildi á styrk efnanna og fjarlægð frá virkjun í aðhvarfsgreiningunni (n=20). Þar sem aðhvarfsgreiningin var marktæk (feitletruð p-gildi) var um að ræða marktæka lækkun á styrk efna með aukinni fjarlægð frá virkjun (α =0,05).

Efni	Stefna sniðs	F-gildi	Skýringarhlutfall (R^2) %	Marktækni aðhvarfs-greiningarinnar (p-gildi)
Brennisteinn (S)	V	7,64	29,8	**0,013**
	SA	25,26	58,4	**<0,0001**
Arsen (As)	V	0,61	3,3	0,44
	SA	0,08	0,4	0,78
Bór (B)	V	5,46	23,3	**0,031**
	SA	1,02	5,4	0,33
Kadmín (Cd)	V	1,64	8,4	0,22
	SA	2,74	13,9	0,12
Króm (Cr)	V	0,77	4,1	0,39
	SA	0,84	4,5	0,37
Kopar (Cu)	V	51,67	74,2	**<0,0001**
	SA	0,01	0,1	0,91
Járn (Fe)	V	1,53	7,8	0,23
	SA	0,45	2,4	0,51
Kvikasilfur (Hg)	V	2,37	11,6	0,14
	SA	0,0	0,0	0,99
Nikkel (Ni)	V	1,37	7,1	0,26
	SA	0,73	3,9	0,40
Blý (Pb)	V	0,34	1,9	0,57
	SA	0,03	0,1	0,87
Antímon (Sb)	V	9,24	33,9	**0,007**
	SA	0,44	2,4	0,52
Vanadín (V)	V	1,14	5,9	0,30
	SA	0,04	0,2	0,85
Sink (Zn)	V	0,14	0,8	0,71
	SA	0,53	2,9	0,48

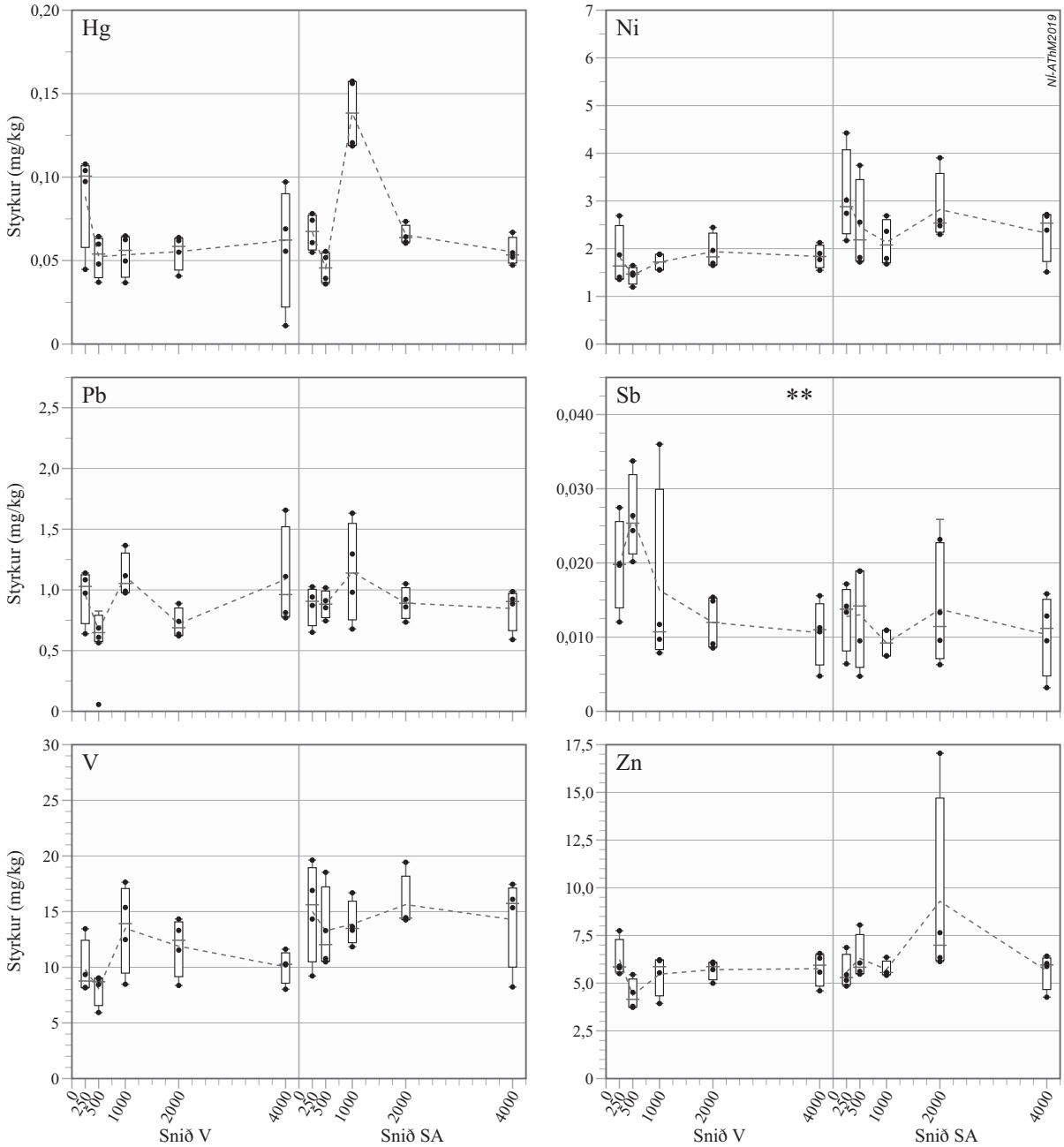
Meðalstyrkur brennisteins var langhæstur á suðaustursniði næst virkjuninni (250 m fjarlægð) eða 798 mg/kg en mun lægri í aukinni fjarlægð nema í stöku sýni (864 mg/kg) í 2000 m fjarlægð. Á vestursniði var brennisteinsstyrkurinn hæstur 432 mg/kg næst virkjuninni en lækkaði þegar fjær dró (15. mynd, 2. viðauki b). Aðhvarfsgreining sýndi að brennisteinn lækkaði marktækt með aukinni fjarlægð frá virkjun á báðum sniðum (2. tafla).

Arsen (As)

Styrkur arsens í 40 mosasýnum við Nesjavallarvirkjun árið 2017 var á bilinu 0,045–0,235 mg/kg og að meðaltali 0,115 ± 0,007 mg/kg (16. mynd a). Meðalstyrkur arsens í vöktunarreitum á suðaustursniði (SA) var 0,118 ± 0,010 mg/kg á vestursniði (V) og 0,113 ± 0,009 mg/kg. Meðalstyrkur arsens var breytilegur eftir fjarlægð frá virkjun (16. mynd a og 2. viðauki b) en aðhvarfsgreining sýndi þó ekki marktækar breytingar á arsenstyrk með aukinni fjarlægð (2. tafla).



*16. mynd a. Styrkur (mg/kg) arsens (As), bórs (B), kadmíns (Cd), króms (Cr), kopars (Cu), járns (Fe) í mosasýnum (n=4) í vöktunarreitum, eftir fjarlægð og stefnu frá Nesjavallavirkjun árið 2017. Punktar sýna einstök mæligildi, efri brún kassans (kassarit, e. boxplot) sýnir 75% mörk dreifingarinnar, neðri brún 25% mörk og miðja kassans sýnir miðgildi. Brotna línan gengur í gegn um meðalstyrk (meðaltal) viðkomandi efnis í vöktunarreit. Athugið mismunandi mælikvarða á y-ás. Bókstafir gefa til kynna stefnu sniða frá virkjun; vestur (V) og suðaustur (SA), og tölur fjarlægð vöktunarreita frá virkjun í metrum. Stjörnur tákna marktektarstig; *: p<0,05, **: p<0,01 og ***: p<0,001.*



*16. mynd b. Styrkur (mg/kg) kvikasilfurs (Hg), nikkels (Ni), blýs (Pb), antímons (Sb), vanadíns (V), sinks (Zn) í mosasýnum (n=4) í vöktunarreitum, eftir fjarlægð og stefnu frá Nesjavallavirkjun árið 2017. Punktar sýna einstök mæligildi, efri brún kassans (kassarit, e. boxplot) sýnir 75% mörk dreifingarinnar, neðri brún 25% mörk og miðja kassans sýnir miðgildi. Brotna línan gengur í gegn um meðalstyrk (meðaltal) viðkomandi efnis í vöktunarreit. Athugið mismunandi mælikvarða á y-ás. Bókstafir gefa til kynna stefnu sniða frá virkjun; vestur (V) og suðaustur (SA), og tölur fjarlægð vöktunarreita frá virkjun í metrum. Stjörnur tákna marktektarstig; *: p<0,05, **: p<0,01 og ***: p<0,001.*

Bór (B)
Styrkur bórs í 40 mosasýnum við Nesjavallavirkjun árið 2017 var á bilinu 0,69–7,58 mg/kg og 1,62 ± 0,27 mg/kg að meðaltali (16. mynd a). Meðalstyrkur bórs var 2,22 ± 0,51 mg/kg á vestursniði (V) og 1,01 ± 0,05 mg/kg á suðaustursniði (SA). Meðalstyrkur bórs var hæstur næst virkjuninni á vestursniði (í 250 m og 500 m) en þar voru fjögur sýni með óvenju há bórgildi (4,51–7,58 mg/kg) en öll önnur sýni voru með bórstyrk undir 2,0 mg/kg (16. mynd a og 2. viðauki b). Aðhvarfsgreining sýndi að bór lækkaði marktækt með aukinni fjarlægð frá virkjun á vestursniði. Á suðaustursniði var aðhvarfsgreining ekki marktæk (2. tafla).

Kadmín (Cd)
Styrkur Kadmíns í 40 mosasýnum við Nesjavallavirkjun árið 2017 var á bilinu 0–0,132 mg/kg og 0,049 ± 0,005 mg/kg að meðaltali (16. mynd a). Meðalstyrkur kadmíns var 0,049 ± 0,007 mg/kg á vestursniði (V) og 0,048 ± 0,008 mg/kg á suðaustursniði (SA). Meðalstyrkur kadmíns var breytilegur eftir fjarlægð frá virkjun en aðhvarfsgreining sýndi ekki marktækar breytingar í kadmínstyrk með aukinni fjarlægð (2. tafla, 16. mynd a og 2. viðauki b).

Króm (Cr)
Styrkur króms í 40 mosasýnum við Nesjavallavirkjun árið 2017 var á bilinu 1,26–5,87 mg/kg og 3,01 ± 0,16 mg/kg að meðaltali (16. mynd a). Meðalstyrkur króms var 2,41 ± 0,15 mg/kg á vestursniði (V) og 3,60 ± 0,22 mg/kg á suðaustursniði (SA). Meðalstyrkur króms var breytilegur eftir fjarlægð frá virkjun (16. mynd a og 2. viðauki b). Aðhvarfsgreining á krómstyrk og fjarlægð var ekki marktæk (2. tafla).

Kopar (Cu)
Styrkur kopars í 40 mosasýnum við Nesjavallavirkjun árið 2017 var á bilinu 5,49–23,06 mg/kg og að meðaltali 9,96 ± 0,73 mg/kg (16. mynd a). Meðalstyrkur kopars var 11,89 ± 1,27 mg/kg á vestursniði (V) og 8,03 ± 0,43 mg/kg á suðaustursniði (SA). Meðalstyrkur kopars var langhæstur næst virkjuninni á vestursniði og sýndi aðhvarfsgreining að kopar lækkaði marktækt með aukinni fjarlægð frá virkjun á því sniði. Á suðaustursniði var aðhvarfsgreining ekki marktæk (2. tafla, 16. mynd a og 2. viðauki b).

Járn (Fe)
Styrkur járns í 40 mosasýnum við Nesjavallavirkjun árið 2017 var á bilinu 1913–7895 mg/kg og 4474 ± 244 mg/kg að meðaltali (16. mynd a). Meðalstyrkur járns var 3717 ± 300 mg/kg á vestursniði (V) og 5229 ± 309,3 mg/kg á suðaustursniði (SA). Meðalstyrkur járns var breytilegur í mismunandi fjarlægð frá virkjun en aðhvarfsgreining sýndi ekki marktækar breytingar á járnstyrk með aukinni fjarlægð (2. tafla, 16. mynd a og 2. viðauki b).

Kvikasilfur (Hg)
Styrkur kvikasilfurs í 40 mosasýnum við Nesjavallavirkjun árið 2017 var á bilinu 0,011–0,157 mg/kg og 0,068 ± 0,005 mg/kg að meðaltali (16. mynd b). Meðalstyrkur kvikasilfurs var 0,062 ± 0,005 mg/kg á vestursniði (V) og 0,074 ± 0,008 mg/kg á suðaustursniði (SA). Meðalstyrkur kvikasilfurs var breytilegur í mismunandi fjarlægð frá virkjun (16. mynd b og 2. viðauki b). Aðhvarfsgreining á kvikasilfursstyrk og fjarlægð var ekki marktæk (2. tafla).

Nikkel (Ni)
Styrkur nikkels í 40 mosasýnum við Nesjavallavirkjun árið 2017 var á bilinu 1,19–4,43 mg/kg og 2,16 ± 0,11 mg/kg að meðaltali (16. mynd b). Meðalstyrkur nikkels var 1,75 ± 0,08 mg/kg á vestursniði (V) og 2,56 ± 0,17 mg/kg á suðaustursniði (SA). Meðalstyrkur nikkels var

breytilegur í mismunandi fjarlægð frá virkjun (16. mynd b og 2. viðauki b). Aðhvarfsgreining á nikkelstyrk og fjarlægð var ekki marktæk (2. tafla).

Blý (Pb)
Styrkur blýs í 40 mosasýnum við Nesjavallavirkjun árið 2017 var á bilinu 0,56–1,66 mg/kg og 0,92 ± 0,04 mg/kg að meðaltali (16. mynd b). Meðalstyrkur blýs var 0,91 ± 0,06 mg/kg á vestursniði (V) og 0,92 ± 0,05 mg/kg á suðaustursniði (SA). Meðalstyrkur blýs var breytilegur í mismunandi fjarlægð frá virkjun (16. mynd b og 2. viðauki b). Aðhvarfsgreining á blýstyrk og fjarlægð var ekki marktæk (2. tafla).

Antímon (Sb)
Styrkur antímons í 40 mosasýnum við Nesjavallavirkjun árið 2017 var á bilinu 0,003–0,036 mg/kg og 0,014 ± 0,001 mg/kg að meðaltali (16. mynd b). Meðalstyrkur antímons var 0,017 ± 0,002 mg/kg vestursniði (V) og 0,012 ± 0,001 mg/kg á suðaustursniði (SA). Meðalstyrkur antímons var hæstur í 500 m fjarlægð frá virkjun á vestursniði og aðhvarfsgreining sýndi að antímon lækkaði marktækt með aukinni fjarlægð frá virkjun á því sniði. Á suðaustursniði var aðhvarfsgreining ekki marktæk (2. tafla, 16. mynd b og 2. viðauki b).

Vanadín (V)
Styrkur vanadíns í 40 mosasýnum við Nesjavallavirkjun árið 2017 var á bilinu 5,93–19,63 mg/kg og 12,54 ± 0,57 mg/kg að meðaltali (16. mynd b). Meðalstyrkur vanadíns var 10,66 ± 0,67 mg/kg á vestursniði (V) og 14,42 ± 0,72 mg/kg á suðaustursniði (SA). Meðalstyrkur vanadíns var nokkuð breytilegur í mismunandi fjarlægð frá virkjun (16. mynd b og 2. viðauki b). Aðhvarfsgreining á styrk vanadíns og fjarlægð var ekki marktæk (2. tafla).

Sink (Zn)
Styrkur sinks í 40 mosasýnum við Nesjavallavirkjun árið 2017 var á bilinu 3,73–17,05 mg/kg og 6,01 ± 0,32 mg/kg að meðaltali (16. mynd b). Styrkur sinks í vöktunarreitum var að meðaltali 5,51 ± 0,22 mg/kg á vestursniði (V) og 6,51 ± 0,59 mg/kg á suðaustursniði (SA). Meðalstyrkur sinks var nokkuð breytilegur í mismunandi fjarlægð frá virkjun og langhæsta sinkgildið (17,05 mg/kg) var í mosasýni í 2000 m fjarlægð á suðaustursniði (16. mynd b og 2. viðauki b). Aðhvarfsgreining á sinkstyrk og fjarlægð var ekki marktæk (2. tafla).

3.4.3 Um skýringarhlutfall efna og fjarlægð frá virkjunum
Við samanburð á skýringarhlutfalli (R^2) efna og fjarlægðar (1. og 2. tafla) má sjá að við Hellisheiðarvirkjun hafa brennisteinn og kvikasilfur á suðvestursniði (SV) skýrustu tengslin við fjarlægð frá virkjun. Þar má skýra um 60% af breytileikanum í styrk efnanna með aukinni fjarlægð frá virkjuninni. Einnig skýrast 37% af breytileikanum í brennisteini á suðaustursniði (SA) af fjarlægð frá virkjun og sambærilegar tölur eru 23% hjá bór á suðaustursniði (SA) og 20% hjá nikkel í mosasýnum af suðvestursniði (SV) (1. tafla).

Á Nesjavöllum er skýrast 74% af breytileikanum í koparstyrk á vestursniði (V) af aukinni fjarlægð frá virkjun, 58% af breytileika í brennisteini á suðaustursniði (SA) skýrist af fjarlægð og 30% á vestursniði (V). Skýringarhlutfall er 34% fyrir antímon og 23% fyrir bór á vestursniði (V) (2. tafla).

3.5 Tengsl efnamagns í mosasýnum og skemmda á mosa í vöktunarreitum

Athuguð var fylgni milli meðalefnamagns (log_{10} umbreytt gildi) í mosasýnum og meðaltíðni mosaskemmda af flokkum B, C, D2, E eða F (log_{10} umbreytt gildi, sameinaður hópur) í vöktunarreitum við báðar virkjanir. Niðurstöður sýna að í vöktunarreitum við Hellisheiðarvirkjun var marktæk og nokkuð há, jákvæð fylgni (r = 0,66–0,81) milli tíðni slíkra skemmda og efnanna arsens (r = +0,66, p = 0,038), króms (r = +0,76, p = 0,011), járns (r = +0,77, p = 0,009), nikkels (r = +0,80, p=0,005), blýs (r = +0,81, p = 0,004), vanadíns (r = +0,80, p = 0,006) og sinks (r = +0,69, p = 0,026) (3. tafla).

Fylgni á milli fyrrtalinna efna var í flestum tilfellum marktæk og á bilinu r = +0,64 til +1,0 (3. tafla). Við Nesjavelli var hins vegar ekki marktæk fylgi neinna efna við aukna tíðni B, C, D2, E eða F-mosaskemmda (4. tafla).

3.6 Efnamagn í sýnum af skemmdum mosa (flokkur C og B) við Hellisheiðarvirkjun og Nesjavallavirkjun og samanburður við mosasýni úr vöktunarreitum

Í verkefninu var einnig safnað sérstökum sýnum af skemmdum mosa til efnagreininga. Á mosanum voru skemmdir af flokk C og B (sjá lýsingu af skemmdum í kafla 2.2.1 Mosalykill) og var tíu sýnum safnað við hvora virkjun, samtals 20 mosasýnum (n=20). Hér eru niðurstöður efnagreininga á sýnunum kynntar og bornar saman við niðurstöður úr efnagreiningum á almennum mosasýnum úr vöktunarreitum, alls 80 sýni (n=80). Samanburður á efnamagni var gerður með t-prófi á log_{10} (y) umbreyttum gildum en myndir sýna óbreytt gildi.

Brennisteinn (S)
Styrkur brennisteins í 20 sýnum af skemmdum mosa var á bilinu 279–956 mg/kg, að meðaltali 498 ± 36,9 mg/kg (staðalskekkja) og frávikshlutfall 33%. Í almennum mosasýnum úr vöktunarreitum (n=80) var styrkurinn á bilinu 202–863 mg/kg, að meðaltali 381 ± 17,6 mg/kg og frávikshlutfall 41%. Samanburður sýndi að meðalstyrkur brennisteins var marktækt hærri í skemmdum mosasýnum en öðrum mosasýnum (t=3,35, p=0,0012) (17. mynd).

Arsen (As)
Styrkur arsens í skemmdum mosa var á bilinu 0,023–0,230 mg/kg, að meðaltali 0,156 ± 0,011 mg/kg og frávikshlutfall 32%. Í almennum mosasýnum úr vöktunarreitum var styrkurinn á bilinu 0,004–0,365 mg/kg og 0,118 ± 0,006 mg/kg að meðaltali og frávikshlutfall 44%. Meðalstyrkur arsens reyndist marktækt hærri í skemmdum sýnum en öðrum mosasýnum (t=2,28, p=0,025) (18. mynd).

Bór (B)
Styrkur bórs í skemmdum mosa var á bilinu 0,46–5,27 mg/kg, að meðaltali 1,27 ± 0,27 mg/kg og frávikshlutfall 96%. Í almennum mosasýnum úr vöktunarreitum var styrkurinn á bilinu 0,56–7,58 mg/kg, að meðaltali 1,44 ± 0,15 mg/kg og frávikshlutfall 90%. Samanburður sýndi ekki marktækan mun á meðalbórstyrk í skemmdum sýnum og öðrum mosasýnum (t=-1,51, p=0,135) (18. mynd).

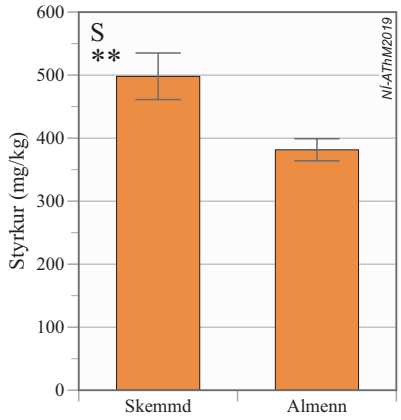
Kadmín (Cd)
Styrkur kadmíns í skemmdum mosa var á bilinu 0,003–0,172 mg/kg, að meðaltali 0,037 ± 0,008 mg/kg og frávikshlutfall 94%. Í mosasýnum úr vöktunarreitum var styrkurinn á bilinu 0–0,132 mg/kg, að meðaltali 0,036 ± 0,003 mg/kg og frávikshlutfall 80%. Það var ekki marktækur munur á meðalstyrk kadmíns í skemmdum sýnum og öðrum mosasýnum (t=0,39, p=0,697) (18. mynd).

3. tafla. Fylgni (Pearson fylgnistuðull, r) milli meðalstyrks efna (log_{10} umbreytt gildi) og meðaltíðni mosaskemmda af flokkum B, C, D2, E eða F (log_{10} umbreytt gildi sameinaður hópur) í vöktunarreitum við Hellisheiðarvirkjun. Efnin eru arsen (As), bór (B), kadmín (Cd), króm (Cr), kopar (Cu), járn (Fe), kvikasilfur (Hg), nikkel (Ni), blý (Pb), antímon (Sb), vanadín (V) og sink (Zn). Marktækir fylgnistuðlar eru feitletraðir (α =0,05, n= 10).

Skemmdir/ efni		As	B	Cd	Cr	Cu	Fe	Hg	Ni	Pb	S	Sb	V	Zn
B, C, D2, E, F	r	**0,66**	-0,51	-0,07	**0,76**	0,58	**0,77**	0,30	**0,80**	**0,81**	0,27	-0,33	**0,80**	**0,69**
	p-gildi	0,038	0,135	0,854	0,011	0,080	0,009	0,402	0,005	0,004	0,459	0,348	0,006	0,026
As	r	1,00	-0,22	0,31	**0,74**	0,13	**0,82**	0,54	**0,81**	**0,86**	0,52	-0,03	**0,84**	0,55
	p-gildi		0,542	0,382	0,014	0,716	0,004	0,105	0,004	0,002	0,124	0,945	0,002	0,101
B	r		1,00	0,20	-0,07	-0,22	-0,07	-0,14	-0,33	-0,31	0,23	0,01	-0,13	-0,53
	p-gildi			0,572	0,853	0,535	0,855	0,710	0,348	0,380	0,526	0,969	0,724	0,114
Cd	r			1,00	0,28	**-0,66**	0,23	0,32	-0,04	0,19	0,46	0,58	0,21	-0,29
	p-gildi				0,431	0,036	0,528	0,375	0,912	0,595	0,176	0,078	0,570	0,421
Cr	r				1,00	0,45	0,94	0,51	**0,84**	**0,72**	**0,68**	0,05	**0,94**	0,63
	p-gildi					0,195	<,0001	0,133	0,003	0,018	0,032	0,898	<,0001	0,052
Cu	r					1,00	0,37	-0,03	0,53	0,34	-0,11	-0,53	0,38	0,66
	p-gildi						0,288	0,929	0,113	0,340	0,764	0,118	0,275	0,039
Fe	r						1,00	0,59	**0,84**	**0,73**	**0,75**	-0,05	**1,00**	**0,64**
	p-gildi							0,075	0,003	0,018	0,012	0,899	<0,0001	0,047
Hg	r							1,00	0,62	0,17	**0,71**	0,57	0,58	0,52
	p-gildi								0,055	0,636	0,023	0,086	0,082	0,124
Ni	r								1,00	**0,71**	0,51	0,01	**0,86**	**0,81**
	p-gildi									0,022	0,130	0,982	0,001	0,004
Pb	r									1,00	0,19	-0,36	**0,75**	0,53
	p-gildi										0,593	0,314	0,012	0,116
S	r										1,00	0,47	**0,73**	0,29
	p-gildi											0,173	0,017	0,411
Sb	r											1,00	-0,05	-0,06
	p-gildi												0,88	0,87
V	r												1,00	**0,67**
	p-gildi													0,035

4. tafla. Fylgni (Pearson fylgnistuðull, r) milli meðalstyrks efna (log_{10} umbreytt gildi) og meðaltíðni mosaskemmda af einhverjum eftirtaldra flokka B, C, D2, E eða F (log_{10} umbreytt gildi, sameinaður hópur) í vöktunarreitum við Nesjavallavirkjun. Efnin eru arsen (As), bór (B), kadmín (Cd), króm (Cr), kopar (Cu), járn (Fe), kvikasilfur (Hg), nikkel (Ni), blý (Pb), antímon (Sb), vanadín (V) og sink (Zn).

		As	B	Cd	Cr	Cu	Fe	Hg	Ni	Pb	S	Sb	V	Zn
B,C, D2,E, F-sk.	r	0,16	-0,33	0,16	-0,12	-0,34	-0,01	-0,60	-0,10	0,08	0,16	-0,17	-0,04	-0,16
	p-gildi	0,660	0,346	0,663	0,751	0,337	0,974	0,070	0,793	0,817	0,657	0,640	0,914	0,657



*17. mynd. Meðalstyrkur brennisteins (meðaltal ± SE, í mg/kg) í sýnum af skemmdum mosa (mosaflokkar C og B) (n=20) og til samanburðar almennum mosasýnum (n=80) í gróðurvöktun við Hellisheiðarvirkjun og Nesjavallavirkjun. Stjörnur tákna marktektarstig; *: p<0,05, **: p<0,01 og ***: p<0,001.*

Króm (Cr)
Styrkur króms í skemmdum mosa var á bilinu 2,45–15,38 mg/kg, að meðaltali 5,22 ± 0,64 mg/kg og frávikshlutfall 55%. Í mosasýnum úr vöktunarreitum var styrkurinn á bilinu 1,26–10,39 mg/kg, að meðaltali 2,97 ± 0,15 mg/kg eða og frávikshlutfall 45%. Meðalstyrkur króms var marktækt hærri í skemmdum sýnum en öðrum mosasýnum (t=5,62, p<0,0001) (18. mynd).

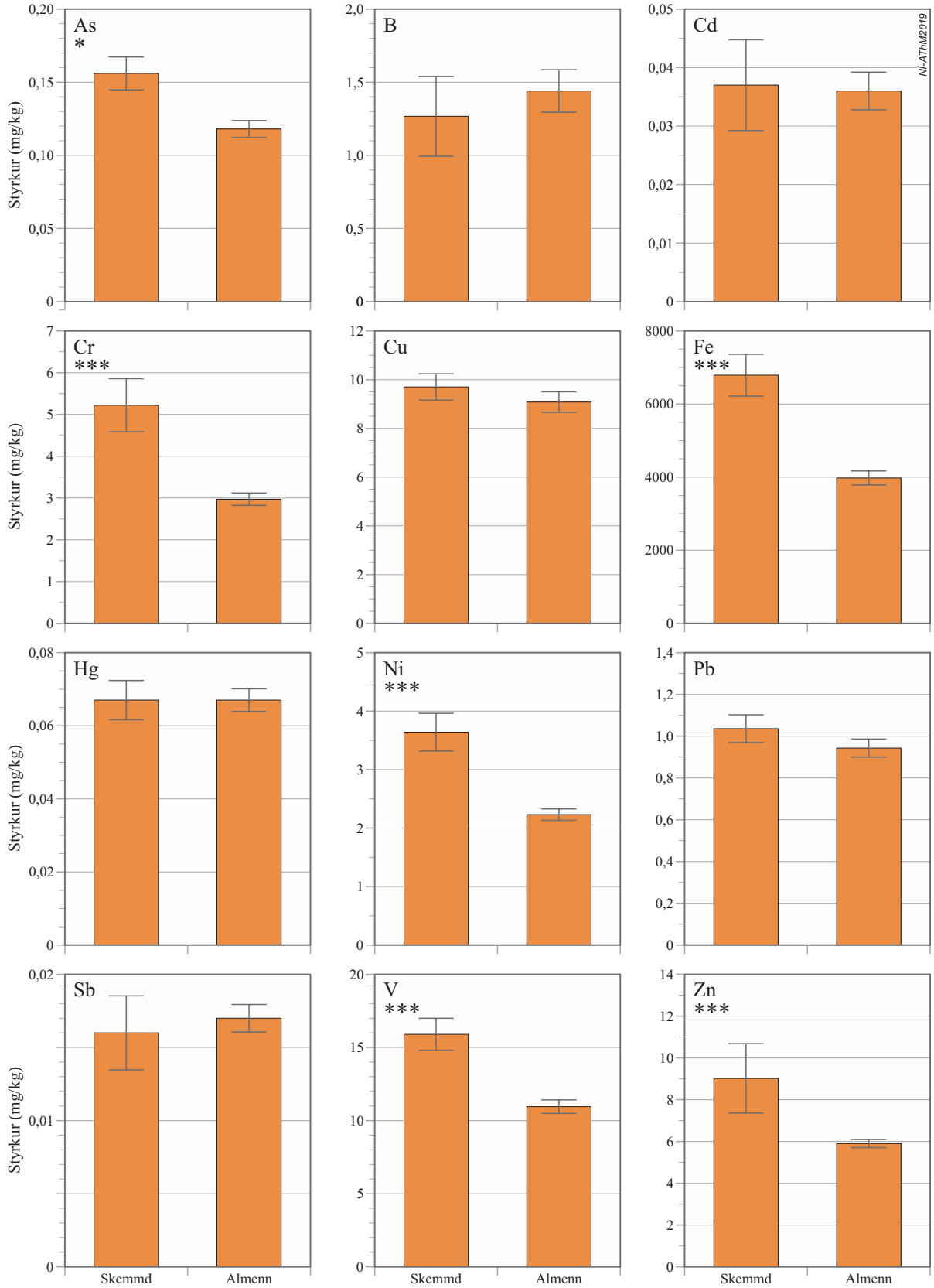
Kopar (Cu)
Styrkur kopars í skemmdum mosa var á bilinu 6,0–16,75 mg/kg, að meðaltali 9,70 ± 0,54 mg/kg og frávikshlutfall 25%. Í mosasýnum úr vöktunarreitum var styrkurinn á bilinu 3,70–23,06 mg/kg, að meðaltali 9,08 ± 0,42 mg/kg og frávikshlutfall 41%. Það reyndist ekki marktækur munur á meðalstyrk kopars í skemmdum sýnum og öðrum mosasýnum (t=1,27, p=0,207) (18. mynd).

Járn (Fe)
Styrkur járns í skemmdum mosa var á bilinu 3387–12.429 mg/kg, að meðaltali 6789 ± 571 mg/kg og frávikshlutfall 37%. Í mosasýnum úr vöktunarreitum var styrkurinn á bilinu 1149–11.913 mg/kg, að meðaltali 3976 ± 191mg/kg og frávikshlutfall 43%. Meðalstyrkur járns var marktækt hærri í skemmdum sýnum en öðrum mosasýnum (t=5,64, p<0,0001) (18. mynd).

Kvikasilfur (Hg)
Styrkur kvikasilfurs í skemmdum mosa var á bilinu 0,033–0,132 mg/kg, að meðaltali 0,067 ± 0,005 mg/kg og frávikshlutfall 36%. Í mosasýnum úr vöktunarreitum var styrkurinn á bilinu 0,011–0,173 mg/kg, að meðaltali 0,067 ± 0,003 mg/kg og frávikshlutfall 42%. Ekki var marktækur munur á meðalstyrk kvikasilfurs í skemmdum sýnum og öðrum mosasýnum (t=0,188, p=0,85) (18. mynd).

Nikkel (Ni)
Styrkur nikkels í skemmdum mosa var á bilinu 2,05–8,21 mg/kg, að meðaltali 3,64 ± 0,32 mg/kg og frávikshlutfall 40%. Í mosasýnum úr vöktunarreitum var styrkurinn á bilinu 0,89–6,75 mg/kg, að meðaltali 2,23 ± 0,10 mg/kg og frávikshlutfall 39%. Meðalstyrkur nikkels reyndist marktækt hærri í skemmdum sýnum en öðrum mosasýnum (t=5,85, p<0,0001) (18. mynd).

Blý (Pb)
Styrkur blýs í skemmdum mosa var á bilinu 0,67–1,65 mg/kg, að meðaltali 1,04 ± 0,07 mg/kg og frávikshlutfall 29%. Í mosasýnum úr vöktunarreitum var styrkurinn á bilinu 0,39–2,60 mg/kg og 0,94 ± 0,04 mg/kg að meðaltali og frávikshlutfall 41%. Það var ekki marktækur munur á styrk blýs í skemmdum sýnum og öðrum mosasýnum (t=1,46, p=0,146) (18. mynd).



*18. mynd. Meðalstyrkur arsens (As) (meðaltal ± SE, í mg/kg), bórs (B), kadmíns (Cd), króms (Cr), kopars (Cu), járns (Fe), kvikasilfurs (Hg), nikkels (Ni), blýs (Pb), antímons (Sb), vanadíns (V), sinks (Zn) í sýnum af skemmdum mosa (mosaflokkar C og B) (n=20) og til samanburðar almennum mosasýnum (n=80) í gróðurvöktun við Hellisheiðarvirkjun og Nesjavallavirkjun. Athugið mismunandi mælikvarða á y-ás. Stjörnur tákna marktektarstig; *: p<0,05, **: p<0,01 og ***: p<0,001.*

Antímon (Sb)
Styrkur antímons í skemmdum mosa var á bilinu 0,001–0,039 mg/kg, að meðaltali 0,016 ± 0,003 mg/kg og frávikshlutfall 71%. Í mosasýnum úr vöktunarreitum var styrkurinn á bilinu 0,003–0,043 mg/kg og 0,017 ± 0,001 mg/kg að meðaltali og frávikshlutfall 49%. Ekki var marktækur munur á styrk antímons í skemmdum sýnum og öðrum mosasýnum (t= -1,64, p=0,104) (18. mynd).

Vanadín (V)
Styrkur vanadíns í skemmdum mosa var á bilinu 8,98–26,26 mg/kg, að meðaltali 15,90 ± 1,09 mg/kg og frávikshlutfall 31%. Í mosasýnum úr vöktunarreitum var styrkurinn á bilinu 3,65–29,20 mg/kg, að meðaltali 10,95 ± 0,46 mg/kg og frávikshlutfall 38%. Meðalstyrkur vanadíns var marktækt hærri í skemmdum sýnum en öðrum mosasýnum (t=4,57, p<0,0001) (18. mynd).

Sink (Zn)
Styrkur sinks í skemmdum mosa var á bilinu 4,98–39,93 mg/kg og 9,02 ± 1,66 mg/kg að meðaltali og frávikshlutfall 82%. Í mosasýnum úr vöktunarreitum var styrkurinn á bilinu 3,73–17,05 mg/kg, að meðaltali 5,90 ± 0,19 mg/kg og frávikshlutfall 29%. Meðalstyrkur sinks var marktækt hærri í skemmdum sýnum en öðrum mosasýnum (t = 4,63, p<0,0001) (18. mynd).

4 UMRÆÐUR

Hér er fyrst rætt um ástand mosaþekju og annars gróðurs, þá um efni í mosasýnum í vöktunarreitum og síðast um tengsl efnamælinga og ástands mosaþekju.

4.1 Ástand mosaþekju og annars gróðurs

Mosaþekja í vöktunarreitum í grennd við virkjanirnar var flokkuð niður í útlitsflokka sem m.a. var byggð á lit mosasprota og ástandi hárodda á endum sprota. Niðurstöður sýndu að heilbrigðir mosasprotar voru áfram mjög algengir (>95 % tíðni) í vöktunarreitum árið 2017 líkt og við fyrri mælingar. Þó var einnig nokkuð algengt að á sprotunum sæjust einhversskonar skemmdir og hafði tíðni skemmda aukist töluvert frá árinu 2012 (3. og 6. mynd). Hlutreitum, þar sem eingöngu fannst mosi án útlitsbreytinga (eingöngu A), hafði fækkað að meðaltali frá fyrri mælingu úr 24% (24 af 100) í 4% reita á Hellisheiði og úr 13% í 1% við Nesjavelli. Jafnframt jókst tíðni greinilegra skemmda (flokkar B, C, D2, E og F, mosasprotar óeðlilegir að lit og hároddar eyddir; sjá kafla 2.2.1) úr 6% árið 2012 í 21% árið 2017 á Hellisheiði og úr 12% í 32% við Nesjavelli (3. og 6. mynd). Vert er að árétta að hér er ekki átt við að 21% eða 32% mosaþekjunnar í heild hafi verið með greinilegar skemmdir, heldur fundust þær á mosasprotum í 21 og 32 hlutreitum að meðaltali, sem voru 5×5 cm að stærð, af alls 100 hlutreitum í 50×50 cm smáreitum (tíðnimælingar; sjá aðferðir og 2. ljósmynd í 3. viðauka). Ef horft er á allar útlitsbreytingar á mosanum, þ.e. ef einnig eru teknir með mosaflokkarnir D0 og D1 (sjá kafla 2.2.1) þá var tíðni reita með slíkar skáningar >95% á báðum stöðum árið 2017 (3. og 6. mynd). Hvort þær útlitsbreytingar (flokkar D0 og D1) sýni eiginlegar skemmdir (sjá kafla 2.2.1 Mosalykill), og þá af völdum náttúrulegra orsaka, s.s. veðurálags, eða hugsanlega annarra þátta eins og efnaálags, er ekki hægt að dæma af útliti mosans. Mun greinilegri skemmdir á mosasprotum voru útlitsflokkarnir B, C, D2, E og F (flokkar G og H fundust ekki í vöktunarreitum) og því var lögð áhersla á að kanna hvort slíkar skemmdir hefðu samsvörun við efnamagn í mosasýnum úr vöktunarreitum. Hugsanlegt er að það séu efnaskemmdir þar sem mosinn var mjög óeðlilegur að lit (sjá t.d. 6.–10. ljósmynd í 3. viðauka), þó ekki sé hægt að slá því föstu nema helst með skipulegum tilraunum.

Mikill breytileiki var meðal vöktunarreita í tíðni skemmda á báðum stöðum og var ekki að sjá að sá breytileiki tengdist aukinni fjarlægð frá virkjununum (4. mynd h og 7. mynd h), sem er það sama og kom fram við upphaf gróðurvöktunarinnar árið 2012 þar sem skemmdir voru staðbundnar og tíðastar í stökum reitum ýmist nærri eða lengst frá virkjun (Ágústa Helgadóttir o.fl. 2013). Hvað varðar stefnu frá virkjun, höfðu vöktunarreitir á sniði suðvestur af Hellisheiðarvirkjun í 250 m og 4000 m fjarlægð langtíðastar mosaskemmdir (í 73% og 99% reita) (4. mynd h) en algengasta vindátt á Hengilsvæðinu er austanátt (1. mynd). Á Nesjavöllum voru þrír vöktunarreitir með mjög tíðar mosaskemmdir (63–91%, mestmegnis B-skemmdir) einnig á sniði vestur af virkjun en í reitum lengst frá eða í 1000–4000 m fjarlægð (7. mynd h).

Thecla M. Mutia (2016) rannsakaði einnig skemmdir á hraungambra við Hellisheiðar- og Nesjavallavirkjun (að hluta til við sömu vöktunarreiti og í þessari rannsókn) en hún fann ekki samband á milli mosaskemmda og fjarlægðar eða stefnu vöktunarreita frá virkjunum. Skemmdir hafa einnig verið skráðar hérlendis hjá tildurmosa (*Hylocomnium splendens*) í tengslum við vöktun á þungmálmum vegna iðjuvera, og voru skemmdirnar bæði taldar afleiðingar mengunar frá iðjuverum og eldgosa (Sigurður H. Magnússon 2013). Í rannsókn verkfræðistofunnar Eflu segir að greinilegar skemmdir sjáist á hraungambra í nánasta umhverfi við Hellisheiðarvirkjun og Nesjavallvirkjun og töldu höfundar skemmdirnar að hluta til vera vegna áhrifa frá virkjununum og að hluta til vegna náttúrulegs rofs (Árni Bragason og Eva Yngvadóttir 2009).

Meðalþykkt mosalagsins hafði tekið litlum eða engum breytingum frá árinu 2012 til 2017 á báðum stöðum. Notað var miðgildi við samanburð áranna í stað meðaltals vegna þess að ekki voru gerðar jafnnákvæmar mælingar á þykkasta mosalaginu fyrir alla reiti árið 2012 en slíkt hefur ekki mikil áhrif á miðgildið. Mosaþykktin var nokkuð mismunandi milli vöktunarreita en það var ekki að sjá mynstur í breytileikanum sem tengdist t.d. tíðari skemmdum á mosaþekjunni (4.–5. og 7.–8. mynd).

Hvað æðplöntur varðar voru nær engar breytingar á meðalfjölda tegunda milli ára á hvorugum staðnum í gróðurvöktuninni og breytileiki í fjölda tegunda fylgdi ekki ákveðnu mynstri varðandi fjarlægð eða stefnu vöktunarreita frá virkjunum heldur fólst í mun milli einstakra vöktunarreita (9. a. og b. mynd). Svipaða sögu er að segja af meðaltíðni einstakra plöntutegunda þar sem litlar breytingar voru á milli vöktunarára á báðum stöðunum fyrir utan að meðaltíðni stinnastarar jókst lítillega, úr 4% hlutreita í 7% (10.–11. mynd). Þegar meðaltíðni stinnastarar var skoðuð nánar, var ekki að sjá ákveðið mynstur í breytileika sem tengdist t.d. vöktunarreitum með tíðari skemmdir á mosaþekjunni (4., 7. og 12. mynd).

4.2 Efnamagn brennisteins og snefilefna í mosasýnum og tengsl við stefnu og fjarlægð frá jarðvarmavirkjun

Í mælingum árið 2017 voru í fyrsta sinn í gróðurvöktuninni skoðuð tengsl efnamagns í mosasýnum við stefnu og fjarlægð frá virkjun. Sýnin, sem voru efnagreind, komu úr vöktunarreitum frá 250 m til 4000 m á tveim sniðum við hvora virkjun sem lágu í gagnstæðar áttir; á móti og undan ríkjandi vindátt (í suðaustur og suðvestur við Hellisheiðarvirkjun og í suðaustur og vestur við Nesjavallavirkjun) (1. mynd).

Við Hellisheiðarvirkjun kom fram marktækt fall í styrk nokkurra efna í mosasýnum með aukinni fjarlægð frá virkjun. Í fyrsta lagi var greinilegt fall í styrk brennisteins í sýnunum með aukinni fjarlægð frá virkjun, bæði á suðaustursniði og suðvestursniði (13. mynd). Á suðaustursniði var einnig marktæk lækkun í bór með aukinni fjarlægð frá virkjun og greinilegt fall var í styrk

kvikasilfurs og nikkels í sýnum af suðvestursniði með aukinni fjarlægð frá aðalstöðvarhúsi (14. mynd og 1. tafla). Við Nesjavallavirkjun komu einnig fram marktæk áhrif af aukinni fjarlægð á fjögur efni í mosasýnunum. Greinilegt fall var í styrk brennisteins í sýnum með aukinni fjarlægð frá Nesjavallavirkjun á báðum sniðum (15. mynd og 2. tafla). Á suðaustursniðinu var fallið mun meira og greinilegra. Á vestursniði við Nesjavallavirkjun var einnig fall í bór, antímonstyrk og greinilegt fall í kopar með aukinni fjarlægð frá virkjun (16. mynd og 2. tafla).

Við Hellisheiðarvirkjun var brennisteinsstyrkur (S) nær tvöfalt hærri næst virkuninni þ.e. í 250 m fjarlægð (að meðaltali 600 mg/kg á suðaustursniði og 520 mg/kg á suðvestursniði) miðað við í vöktunarreitum lengra frá (270–375 mg/kg) og skýrðist 59% og 37% af breytileikanum í styrknum af breytingum í fjarlægð (13. mynd og 1. tafla). Við Nesjavallavirkjun var um tvö- til þrefaldur munur á meðalstyrk sýna næst virkjuninni (798 mg/kg) miðað við sýni úr reitum í 1000–4000 m fjarlægð (300 mg/kg) á suðaustursniði og 58% og 30% af breytileikanum í brennisteinsstyrk skýrðust af breytingum í fjarlægð. Þessar niðurstöður sýna að brennisteinn safnast upp í mosanum í næsta nágrenni við báðar virkjanirnar og bendir dreifingarmynstrið til þess að hann berist frá virkjunum. Aðrar rannsóknir á efnum í nágrenni jarðvarmavirkjana hafa einnig sýnt uppsöfnun á brennisteini í mosa. Í rannsókn verkfræðistofunnar Eflu árið 2008 á styrk efna í hraungambra við Hellisheiðarvirkjun og Nesjavallavirkjun var meðalstyrkur brennisteins um 465 mg/kg í 320 m fjarlægð frá stöðvarhúsi á Hellisheiði og 640 mg/kg í 600 m fjarlægð en á viðmiðunarsvæði í Bláfjöllum (14 km fjarlægð frá virkjun) 320 mg/kg (Árni Bragason og Eva Yngvadóttir 2009) sem eru mjög svipuð gildi, í nálægð og meiri fjarlægð, og í þessari rannsókn. Meðalstyrkur brennisteins við Nesjavelli var aftur á móti mun hærri eða 2879 mg/kg (Árni Bragason og Eva Yngvadóttir 2009) og stafar munurinn miðað við okkar rannsókn líklega af miklum breytileika í brennisteinsstyrk í námunda við stöðvarhúsið, blásandi borholum nærri sýnatökustað eða minni upptöku þar sem minnkun hefur orðið í losun á brennisteinsvetni frá virkjununum (Hólmfríður Sigurðardóttir og Þorsteinn Ari Þorgeirsson 2016). Í þessum samanburði er reiknað með að gildin séu sambærileg þar sem í báðum rannsóknum var notuð ICP-tækni við efnagreiningar og óskoluð mosasýni, þó efstu 5 cm mosasprotanna hafi verið teknir í stað efstu 3 cm í okkar rannsókn. Í rannsókn Thecla Munanie Mutia (2016) á áhrifum útblásturs jarðvarmavirkjana á Hellisheiði og Nesjavöllum á vistkerfið, m.a. hraungambra, kom fram fallandi á brennisteini í mosasýnum með aukinni fjarlægð frá virkjun á Nesjavöllum en ekki á Hellisheiði. Niðurstöður Bargagli o.fl. (1997), Loppi o.fl. (1999) og González-Migueo o.fl. (2010) sýndu sama mynstur og í okkar rannsókn, þ.e. hlutfallslega hærri styrk brennisteins og vissra snefilefna í mosasýnum í nágrenni jarðvarmavirkjana en lengra frá og töldu höfundar það benda til að efnin bærust í mosann frá virkjununum. Í rannsókn Sigurðar H. Magnússonar (2018) á áhrifum iðjuvera á brennistein og þungmálma í mosa (sama aðferðafræði við efnamælingar og í gróðurvöktuninni sem hér er greint frá) voru langflestar mælingar gerðar á sýnum af tildurmosa (*Hylocomium splendens*) en einnig voru mæld nokkur sýni af hraungambra, en mismunandi mosategundir safna ekki sama magni af efnum í sig. Styrkur brennisteins var frá 297–649 mg/kg í hraungambrasýnum í þeirri rannsókn (Sigurður H. Magnússon 2018).

Brennisteinsdíoxíð (SO_2) er eitt megin mengunarefnið fyrir gróður og margar viðkvæmar mosa- og fléttutegundir hafa horfið frá stórum svæðum í Evrópu vegna hækkaðs SO_2 og súrs regns (WHO 2000). Þó er talið líklegt að aðeins hluti brennisteinsvetnis (H_2S) oxist í SO_2 hérlendis, en í svölu íslensku loftslagi oxast H_2S í brennistein (S) eða súlfat (SO_4) sem safnast fyrir í umhverfinu nærri uppsprettunni, í stað þess að berast lengra sem SO_2 (Kristmannsdóttir og Ármannsson 2003, Árni Bragason og Eva Yngvadóttir 2009). Mikil úrkoma er á virkjunarsvæðunum og má búast við að H_2S þvoist tiltölulega fljótt úr lofti þegar

úrkomu gætir (Árni Bragason og Eva Yngvadóttir 2009). Í rannsókn Snjólaugar ÓIafsdóttur (Olafsdottir o.fl. 2014) á dreifingu brennisteinsvetnis við Hellisheiðar- og Nesjavallavirkjun kom fram að stöðugur loftmassi, lítill vindur og þurrt veður jók styrk H_2S í andrúmslofti og að hækkuð gildi fundust ennþá í 20–30 km fjarlægð frá virkjunum. Í rannsókninni kom einnig fram að landslag hafði mikil áhrif á dreifingu H_2S og sýndu mælingar að strókar (e. *plumes*) H_2S fylgdu landslagi í fjalllendi og að endurtekin mynstur sáust í dreifingu þeirra en strókarnir voru grennri yfir sléttlendi (OIafsdottir o.fl. 2014).

Þolmörk hraungambra fyrir efni eins og brennistein eru ekki þekkt, þ.e. hversu hár styrkurinn þarf að vera til að skemma eða drepa mosann (Árni Bragason og Eva Yngvadóttir 2009). Thecla M. Mutia (2016) gerði tilraunir með að vökva hraungambra með mismunandi styrkleika af H_2S-lausn (0, 30, 100 og 300 µg /L H_2S gas uppleyst í vatni og vökvun í 13 vikur) sem líkti eftir mismunandi styrk í rakamettuðu andrúmslofti. Þvert á væntingar hafði meðferðin ekki áhrif á uppsöfnun brennisteins í mosanum, né á lífmassa eða magn blaðgrænu í sprotum en hins vegar dró úr vexti sprota um 59% við mikinn styrk brennisteins. Stuttur tími tilraunarinnar var talinn ein hugsanleg ástæða fyrir lítilli svörun mosans við háum H_2S-styrk (Mutia 2016). Áhrif brennisteins á gróður eru flókin og margvísleg, það er plöntunæringarefni í vissu magni en í miklu magni er það mjög skaðlegt gróðri og hefur neikvæð áhrif á efnaskipti og vöxt plantna (Mutia 2016).

Þekkt er að þungmálmarnir arsen, bór, kvikasilfur og antímon berist einnig frá jarðvarmavirkjunum. Aukin uppsöfnun á arseni, bór, kvikasilfri og antímon fannst í mosanum holtafaxa (*Hypnum cupressiforme*) sem safnað var innan nokkurra hundrað metra frá jarðvarmavirkjun á Ítalíu (Bargagli o.fl. 1997). Gróðurvöktun okkar sýndi að bórstyrkur (B) lækkaði marktækt með aukinni fjarlægð frá virkjun á suðaustursniði á Hellisheiði og á vestursniði á Nesjavöllum (14. og 16. mynd). Á Nesjavöllum var meðalbórstyrkur í 250 og 500 m fjarlægð frá virkjun um þrefaldur til fjórfaldur (3,65 og 4,02 mg/kg) miðað við styrkinn í 1000–4000 m fjarlægð (1,02–1,26 mg/kg) en fjögur há bórgildi næst virkjun (4,5–7,6 mg/kg) ollu þessu háa falli í styrk. Virðist dreifing og uppsöfnun á bór í mosanum því vera mjög breytileg en bór í miklu magni er mjög skaðlegt efni flestum plöntum (Bargagli o.fl. 1997, Kristmannsdóttir og Ármannsson 2003). Í rannsókn verkfræðistofunnar Eflu voru gildi á bór ekki ólík og í þessari rannsókn en þar var bórstyrkur reyndar marktækt lægri við Nesjavallavirkjun (meðalstyrkur 1,60 mg/kg) miðað við viðmiðunarsvæði í Bláfjöllum (meðalstyrkur 3,26 mg/kg) en ekki var marktækur munur við stöðvarhús Hellisheiðarvirkjunar (3,20 mg/kg). Í þeirri rannsókn lækkaði styrkur bórs einnig með aukinni fjarlægð frá stöðvarhúsi Hellisheiðarvirkjunnar en reyndar var um fáar mælingar að ræða (Árni Bragason og Eva Yngvadóttir 2009). Í rannsókn Sigurðar Magnússonar (2018) á þungmálmum í hraungambra nærri iðjuverum voru bórgildi í öllum sýnum (13 sýni) á svipuðu róli og flest sýni í okkar rannsókn eða á bilinu 0,92–3,56 mg/kg, hins vegar voru ekki dæmi um gildi yfir 4 mg/kg eins og í okkar rannsókn á Nesjavöllum. Mjög há bórgildi, eða að meðaltali 16,07 mg/kg (3,41–30,40 mg/kg) mældust í hraungambrasýnum við borholu á Hellisheiði í rannsókn verkfræðistofunnar Eflu árið 2008, en þar voru mæld þrjú sýni (Árni Bragason og Eva Yngvadóttir 2009).

Kvikasilfursmagn (Hg) í mosasýnum var mun hærra við aðalstöðvarhús á suðvestursniði á Hellisheiði samanborið við lengra frá virkjun (14. mynd) og skýrðist 58% breytileikans í kvikasilfurmagninu með breytingum í fjarlægð frá virkjun (1. tafla). Munurinn í meðalkvikasilfursmagni var um tvö- til þrefaldur á sýnum næst virkjun (0,12 mg/kg) og í 1000–4000 m fjarlægð (0,043–0,047 mg/kg). Hæsta kvikasilfursgildið við virkjunina var 0,17 mg/kg. Kvikasilfur safnaðist því upp í mosanum suðvestanmegin við virkjunina undan ríkjandi vindátt. Styrkur kvikasilfurs í mosasýnum var

svipaður og mældist við stöðvarhús Hellisheiðarvirkjunar af verkfræðistofunni Eflu árið 2008 eða 0,14 mg/kg en einnig mældist svipaður styrkur í Bláfjöllum eða 0,16mg/kg (Árni Bragason og Eva Yngvadóttir 2009). Í þeirri rannsókn var kvikasilfursstyrkurinn mun hærri við Nesjavallavirkjun, eða 0,47 mg/kg, miðað við mælingar í gróðurvöktun okkar. Í rannsókn Sigurðar H. Magnússonar (2018) á hraungambra voru kvikasilfursgildi í 13 sýnum á bilinu 0,017–0,067 mg/kg sem er svipað og í sýnum í gróðurvöktun okkar á báðum sniðum í 1000–4000 m fjarlægð frá Hellisheiðarvirkjun. Mosar safna upp meira kvikasilfri en æðplöntur og eru kvikasilfur og brennisteinn líklega þau efni sem hafa hvað mest eitrunar – og umhverfisáhrif af þeim efnum sem losna frá jarðhitasvæðum (Bargagli o.fl. 1997). Loppi o.fl. (1999) fundu út að kvikasilfursmagn í fléttum og mosum var 2–3 sinnum hærra nærri jarðvarmavirkjunum í Tuscany-héraði á Ítalíu samanborið við viðmiðunarsvæði.

Marktæk áhrif voru af fjarlægð frá virkjun á antímonstyrk (Sb) í mosasýnum á vestursniði við Nesjavelli og var 34% af breytileikanum í styrk efnisins rakin til mismunandi fjarlægðar (16. mynd og 2. tafla). Antímonstyrkur var hæstur í 500 m fjarlægð frá virkun þar sem hann var að meðaltali um 0,025 mg/kg en um 0,012 mg/kg í 1000–4000 m fjarlægð. Loppi o.fl. (1999) fundu einnig út að antímon í mosa var tvöfalt hærra nærri jarðvarmavirkjunum samanborið við viðmiðunarsvæði. Styrkur antímons við Nesjavelli var þó lágur miðað við styrkinn í mosasýnum í rannsókn Sigurðar H. Magnússonar (2018) á þungmálum í nágrenni iðjuvera en þar var styrkurinn 0,009–0,078 mg/kg í níu sýnum en margfalt hærri eða 0,256–0,802 mg/kg í fjórum sýnum.

Á Hellisheiði var einnig marktækt fall á styrk nikkels (Ni) í mosasýnum af suðvestursniði með aukinni fjarlægð frá aðalstöðvarhúsi og var styrkur um tvöfaldur næst virkjun (4,36 mg/kg) miðað við í 1000 m og 2000 m fjarlægð (1,88 og 1,56 mg/kg) (14. mynd og 1. tafla). Styrkur nikkels í gróðurvöktuninni var þó ekki hár miðað við mælingar á meðalstyrk efnisins í hraungambra af verkfræðistofunni Eflu við stöðvarhús Hellisheiðarvirkjunar (36,8 mg/kg) (Árni Bragason og Eva Yngvadóttir 2009). Einnig eru gildin ekki há miðað við sýni af hraungambra (sýni greind með ICP-tækni) sem safnað var frá svæði milli Selfjalls að Hamranesi ofan Hafnarfjarðar, og talið er ósnortið af mengun, en þar var meðalgildi nikkels 4,0 mg/kg (Landsnet 2007). Í rannsókn Sigurðar Magnússonar (2018) á þungmálum í nágrenni iðjuvera var styrkur nikkels í hraungambra misjafn eða frá 2,33–18,89 mg/kg fyrir utan eitt sýni þar sem styrkurinn var margfalt hærri eða 41,09 mg/kg.

Á Nesjavöllum var hátt og jafnt fall í koparstyrk (Cu) á vestursniði eftir því sem lengra kom frá stöðvarhúsi og um þrefaldur munur var á styrk kopars í 250m fjarlægð (21 mg/kg) miðað við 4000 m fjarlægð (7 mg/kg) (16. mynd og 2.tafla). Til samanburðar var styrkur kopars að meðaltali 11,2 mg/kg við Nesjavallavirkjun, 34 mg/kg við Hellisheiðarvirkjun og 31,7 mg/kg í Bláfjöllum í rannsókn verkfræðistofunnar Eflu (Árni Bragason og Eva Yngvadóttir 2009) og 7,5 mg/kg í sýnum frá svæðinu milli Selfjalls og að Hamranesi (Landsnet 2007). Í rannsókn Sigurðar H. Magnússonar (2018) var styrkur kopars í hraungambra á bilinu 5,4–22,7 mg/kg fyrir utan eitt sýni þar sem styrkurinn var mun hærri eða 45,81 mg/kg.

Kopar virðist því safnast upp í mosanum í vesturátt frá Nesjavallavirkjun og nikkel í suðvesturátt frá Hellisheiðarvirkjun og bendir dreifingarmynstrið til að þessi efni berist frá virkjunarsvæðunum undan ríkjandi vindátt. Þó er styrkur þeirra ekki hár miðað við fyrrnefndan samanburð. Þessi efni eru ekki meðal þeirra sem talin eru berast í gróður með útblæstri jarðvarmavirkjana (Bargagli o.fl. 1997, Loppi o.fl. 1999, González-Migueo o.fl. 2010). Nikkel og kopar geta borist frá iðjuverum og einnig geta ryk og áfoksefni hækkað styrk þeirra í mosa hérlendis (Sigurður H. Magnússon

2013). Það er t.d. hugsanlegt að ryk og áfoksefni berist í mosann frá framkvæmdasvæðum nærri stöðvarhúsum og valdi hækkuðum styrk eða að um sé að ræða einhverja aðra uppsprettu þessara efna tengd umsvifum við virkjanirnar.

Það virðist sammerkt ferlum efnanna sem sýndu marktækt aðhvarf við aukna fjarlægð frá stöðvarhúsum virkjananna að eftir um 500–1000 m var styrkur þeirra svipaður út sniðið að 4000 m (13.–16. mynd). Sömu sögu er að segja með dreifingarmynstur fleiri efna á Hellisheiði, s.s. arsens, króms, járns, vanadíns og sinks (14. mynd). Lögun ferlanna bendir til að dreifing efnanna nái ekki langt út frá uppsprettunni. Það sama kom fram í rannsókn verkfræðistofunnar Eflu á Hellisheiði en þar nefndu höfundar jafnvægi í efnamagni í um 700 m fjarlægð (Árni Bragason og Eva Yngvadóttir 2009). Almennt hafa rannsóknir sýnt að líffræðileg áhrif jarðvarmavirkjana eru innan nokkur hundruð metra frá uppsprettu efnanna (Loppi o.fl. 1999).

Austanátt og norðvestanátt eru algengustu vindáttir á Hengilsvæðinu (1. mynd). Ferlar margra efna sem sýna uppsöfnun í mosa á vestursniði við Hellisheiðarvirkjun sýna endurtekið mynstur, sem bendir til ákveðnari dreifingu efna í vesturátt frá virkjun (13.–14. mynd). Það er ekki eins mikill munur á ferlum efna á sniðunum tveimur við Nesjavelli nema fyrir einstök efni eins og bór, kopar og antímon á vestursniði og síðan brennistein á suðaustursniði (15.–16. mynd). Einstök sýni voru síðan með óvanalega há gildi á nokkrum efnum og bendir það til blettóttrar dreifingar og uppsöfnunar efna í mosanum.

4.3 Tengsl efnamagns í mosasýnum og mosaskemmda

Greinilegar skemmdir á mosasprotum í hraungambraþekjunni fólu m.a. í sér óeðlilegan lit og skemmdir á hároddum. Slíkum mosasýnum (19 sýni af mosa með C-skemmdum og 1 sýni af B skemmdum, sjá lýsingu í kafla 2.2.1) var safnað sérstaklega og efnamagn þeirra borið saman við almennu mosasýnin sem safnað var kerfisbundið úr vöktunarreitum, en þau síðarnefndu gátu einnig innihaldið skemmdan mosa. Við samanburðin kom í ljós að marktækt hærra magn var af nokkrum efnum í skemmdum mosasýnum. Þessi efni voru brennisteinn (S), arsen (As), króm (Cr), járn (Fe), nikkel (Ni), vanadín (V) og sink (Zn) og var styrkurinn á þessum efnum um 30–75% hærri í skemmdum sýnum miðað við almennu sýnin (17.–18. mynd). Einnig sýndu athuganir á fylgni á milli meðaltíðni B, C, D2, E eða F-mosaskemmda og meðalstyrks efna í almennum mosasýnum úr vöktunarreitum, að þar fór saman há tíðni skemmda og hár styrkur nánast sömu efnanna fyrir utan brennistein, þ.e. arsens, króms, járns, nikkels, vanadíns, sinks og til viðbótar blýs (Pb) (3. tafla). Þetta átti þó eingöngu við um vöktunarreiti við Hellisheiðarvirkjun en engin marktæk fylgni var á milli mosaskemmda í reitum við Nesjavelli og efnamagns (4. tafla). Athuga ber að fylgniútreikningarnir voru þó byggðir á aðeins tíu gildum á hvorum stað fyrir meðaltíðni B, C, D2, E eða F-skemmda í vökturnarreitum og samsvarandi tíu gildum á meðalefnamagni í sömu reitum og ber því að túlka með varúð.

Þessar upplýsingar um samsvörun efnanna við skemmdir geta gefið vísbendingar um hvaða efni geti hugsanlega valdið skemmdum sem sjást á mosanum. Það er þó ekki vitað hver þolmörk hraungambra eru fyrir efnunum sem hér um ræðir. Mosar og fléttur geta ekki hindrað að þungmálmar og aðrar eitraðar jónir berist í blöð og stöngla þeirra og þar sem þeir taka næringarefni beint upp með úrkomu eða lofti og hafa enga yfirhúð (e. *cuticle*) sem verndar þá (Salemaa o.fl. 2001). Mosar voru sá plöntuhópur sem sýndi mestu viðbrögðin við þungmálmamengun nærri iðjuveri í Finnlandi og var gróðurþekja, sérstaklega mosans, nánast horfin í um 0,5 km radíus (Salemaa o.fl. 2001). Hörður Kristinsson (1998) lýsti einnig miklum skemmdum á mosa í nágrenni álversins í Straumsvík sem náðu mun lengra út á hraunið en

skemmdir á lyngi. Í rannsókn verkfræðistofunnar Eflu voru greinilegar og miklar mosaskemmdir við Nesjavallavirkjun og þar mældist brennisteinsstyrkur mjög hár (Árni Bragason og Eva Yngvadóttir 2009).

Ef styrkur arsens, króms, járns, nikkels, vanadíns, sinks og blýs í reitum í gróðurvöktuninni er borinn saman við niðurstöður um efnamagn í hraungambra nærri iðjuverum (álver, iðnaðarsvæði og ýmsar jarðvarmavirkjanir) má sjá að styrkur arsens var á bilinu 0,004–0,37 mg/kg í gróðurvöktun okkar en nokkuð hærri gildi eða 0,06–1,07mg/kg fundust nærri iðjuverum (Sigurður H. Magnússon 2018). Króm var á bilinu 1,26–10,39 mg/kg í gróðurvöktuninni en 0,47–14,52 mg/kg nærri iðjuverum. Járn var á bilinu 1149–11.913 mg/kg í gróðurvöktuninni og 2646–10.127 mg/kg nærri iðjuverum (Sigurður H. Magnússon 2018). Nikkel var á bilinu 0,89–6,75 mg /kg í gróðurvöktuninni en mun hærri gildi fundust nærri iðjuverum eða 2,33–41,09 mg/kg. Vanadín var á bilinu 3,65–29,2 mg/kg í gróðurvöktuninni og 0,88–21,89 mg/kg nærri iðjuverum (Sigurður H. Magnússon 2018). Styrkur sinks í hraungambrasýnum var á bilinu 3,73–17,05 mg/kg í gróðurvöktuninni en mun hærri gildi fundust nærri iðjuverum eða 7,17–149,7 mg/kg. Styrkur blýs var á bilinu 0,39–2,6 mg/kg í gróðurvöktuninni en margfalt hærri gildi fundust nærri iðjuverum eða 0,54–75,16 mg/kg (Sigurður H. Magnússon 2018). Af þessum samanburði má sjá að efni eins og nikkel, sink og blý voru í mun lægri styrk í vöktunarreitum á Hellisheiði og Nesjavöllum heldur en við iðjuverin en styrkur arsens,króms, járns og vanadíns var af svipaðri stærðargráðu.

Líklegt er að hæsti styrkur efna valdi skemmdum. Sum sýnin af skemmdum mosa voru með mjög mikinn styrk vissra efna s.s. hæsta gildi á brennsteini 957 mg/kg, annað sýni með hæstu gildi á króm 15,4 mg/kg, járni 12.429 mg/kg og vanadín 26,3 mg/kg, annað sýni með hæsta gildi á sinki 39,9 mg/kg og hátt gildi á bór 5,27 mg/kg. Hugsanlega er hár styrkur mismunandi efna að valda skemmdum á mosanum og mögulega hafa efnin einnig samverkandi áhrif sem valda skemmdum.

Þó að skráningar á mosaskemmdum hafi sýnt að meðaltíðni heilbrigðra mosasprota hafi verið >99% á báðum stöðum, var einnig algengt að finna skemmdir á sprotum og það var aukning í tíðni mosaskemmda frá árinu 2012 til 2017 í nánast öllum vöktunarreitum. Þó hefur á sama tímabili dregið t.d. úr losun á H_2S úr um 12.000 í um 2.900 tonn/ári frá Hellisheiðarvirkjun og úr 8.640 í um 6.600 tonn/ári frá Nesjavallavirkjun (Hólmfríður Sigurðardóttir og Þorsteinn Ari Þorgeirsson 2016, Ársskýrsla OR 2017, Sigurður H. Magnússon 2018). Í gróðurvöktuninni voru gerðar efnagreiningar á efstu 3 cm mosans sem endurspegla væntanlega uppsöfnun hans á að giska síðustu 3–5 ár en sýnin voru tekin sumarið 2017. Þá er tekið mið af því að hraungambri vaxi hérlendis um 0,75–1,1 cm á ári (Ingibjörg Svala Jónsdóttir 2014). Uppsöfnun mosans á brennisteini verður því væntanlega minni á komandi árum við virkjanirnar vegna minnkandi styrks brennisteins í andrúmsloftinu og verður áhugavert að sjá hvaða breytingar verða við næstu vöktunarmælingar. Á næstu árum eru síðan einnig væntanlegar niðurstöður á magngreiningu snefilefna (þungmálma) í útblástursgasi (Bergur Sigfússon, tölvupóstur 13. desember 2018).

Í eldgosum getur losnað mikið magn af brennisteini út í andrúmsloftið. Áætlað hefur verið að í eldgosinu í Holuhrauni sem stóð yfir í sex mánuði frá ágúst 2014 til febrúar 2015, hafi um 10 megatonn (10.000.000 tonn) af brennisteinsdíoxíði borist út í andrúmsloftið (Gíslason o.fl. 2015, Pfeffer o.fl. 2018). Þótt losun SO_2 og H_2S sé ekki alveg sambærileg (Sigurður H. Magnússon 2018) má sjá að magnið sem losnaði af brennisteini í Holuhraunsgosinu var um fimmhundruð sinnum meira en árslosun H_2S frá báðum jarðvarmavirkjununum, á Hellisheiði og Nesjavöllum, árið 2014 (Hólmfríður Sigurðardóttir og Þorsteinn Ari Þorgeirsson 2016). Hugsanlegt er að

það hafi valdið einhverri uppsöfnun á brennisteini í mosa í þessum mælingum sem hér greinir frá en slíkt hefur þá að öllum líkindum hækkað öll gildi jafnt og myndi ólíklega hafa áhrif á lögun ferlanna sem sýna dreifingarmynstrið með aukinni fjarlægð frá virkjunum. Skemmdir, sem komu fram á tildurmosa víða um land sumarið 2015, voru taldar stafa af Holuhraunsgosinu (Sigurður H. Magnússon 2018). Gosið gæti hugsanlega átt þátt í skýringu á almennri aukningu skemmda á hraungambra sem komu fram í gróðurvöktuninni frá 2012 til 2017.

5 LOKAORÐ

Gróðurvöktunin 2017 sýndi að ástand mosaþekjunnar í vöktunarreitum við Hellisheiðarvirkjun og Nesjavallavirkjun var í stórum dráttum góð og heilbrigðir sprotar af hraungambra, sem er sú tegund sem myndar mosaþekjuna, voru algengir (meðaltíðni >95%). Þó hafa skemmdir á mosanum, sem lýsa sér í litabreytingum á mosasprotum og skemmdum á hároddum blaða, aukist frá árinu 2012 á báðum stöðum. Skemmdirnar voru tíðastar í stöku vöktunarreitum, bæði nærri og lengst frá virkjununum, en tíðari á mælisniðum í vesturátt frá virkjunum, þ.e. undan ríkjandi vindátt á svæðinu. Mælingar á styrk brennisteins og tólf þungmálma í mosasýnum sýndu að efnin brennisteinn (S), bór (B), kvikasilfur (Hg), antímon (Sb), nikkel (Ni) og kopar (Cu) söfnuðust upp í mosanum nærri virkjununum og bendir dreifingarmynstrið til að efnin berist frá þeim eða framkvæmdasvæðum við virkjanirnar. Oftast sýndu ferlar efnanna dreifingu undan ríkjandi vindátt, þ.e. í vesturátt frá virkjun, sérstaklega Hellisheiðarvirkjun. Þekkt er að brennisteinn, bór, kvikasilfur og antímon berist frá jarðvarmavirkjunum með útblæstri en hugsanlegt er að nikkel og kopar berist í mosann frá framkvæmdasvæðum við virkjanirnar eða vegna annara umsvifa. Efnamagn brennisteins, bórs og kvikasilfurs næst virkjun var nokkuð hátt miðað við styrk þeirra í hraungambra hérlendis í nágrenni iðjuvera (Sigurður H. Magnússon 2018), þar sem sömu aðferðafræði við sýnatöku og mælingar var beitt.

Fylgni fannst milli mosaskemmda og nokkurra efna við Hellisheiðarvirkjun, þ.e. arsens (As), blýs (Pb), króms (Cr), járns (Fe), nikkels (Ni), vanadíns (V) og sinks (Zn). Sömu efni, auk brennisteins (S), en fyrir utan blý voru í 30–75% meiri styrk í sýnum af skemmdum mosa en í almennum mosasýnum. Sum þessara efna (Pb, Ni, Zn) voru í mun minni styrk við virkjanirnar samanborið við styrk þeirra í nágrenni iðjuvera hérlendis en önnur (As, Cr, Fe, V) voru af svipaðri stærðargráðu (Sigurður H. Magnússon 2018). Líklegt er að hár styrkur efna valdi skemmdum á mosa og fundust sum þessara efna í háum styrk í skemmdum mosasýnum. Mikilvægt er að halda áfram vöktun á gróðri og efnum í mosaþembum í nágrenni virkjananna og bæta mætti upplýsingar um uppsöfnun efna með efnagreiningum á mosasýnum úr öllum vöktunarreitum.

6 ÞAKKIR

Við gerð skýrslunnar, auk höfunda, vann Anette Th. Meier sem teiknaði kort og myndir. Sigurður H. Magnússon og María Harðardóttir lásu yfir handrit og færðu margt til betri vegar. Bergur Sigfússon hjá Orkuveitu Reykjavíkur og Magnea Magnúsdóttir hjá Orku náttúrunnar veittu upplýsingar varðandi starfsemi jarðvarmavirkjananna. Vistfræðideild Háskólans í Lundi í Svíþjóð sá um efnagreiningar á mosasýnum. Veðurstofa Íslands veitti aðgang að veðurfarsgögnum af rannsóknarsvæðinu. Allir þessir aðilar fá bestu þakkir fyrir aðkomu þeirra að verkefninu.

7 HEIMILDIR

Ágúst H. Bjarnason 2018. *Mosar á Íslandi*. Reykjavík: Ágúst H. Bjarnason.

Ágústa Helgadóttir, Ásta Eyþórsdóttir og Sigurður H. Magnússon 2013. *Vöktun mosaþembugróðurs við Hellisheiðarvirkjun og Nesjavallavirkjun.* Unnið fyrir Orkuveitu Reykjavíkur. Náttúrufræðistofnun Íslands, NÍ-13007. Garðabær: Náttúrufræðistofnun Íslands.

Árni Bragason og Eva Yngvadóttir 2009. *Rannsóknir á mosa við jarðvarmavirkjun Orkuveitu Reykjavíkur á Hellisheiði.* Unnið fyrir Orkuveitu Reykjavíkur. Reykjavík: EFLA verkfræðistofa.

Ársskýrsla OR 2017. Reykjavík: Orkuveita Reykjavíkur. www.or.is/sites/or.is/files/arsskyrsla_or_2017_-_prentutgafa.pdf [skoðað 4.3.2019]

Bargagli, R., D. Cateni, L. Nelli, S. Olmastroni og B. Zagarese 1997. Environmental Impact of Trace Element Emissions from Geothermal Power Plants. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 33: 172–181.

Bergur Sigfússon, Magnús Þór Arnarson, Sandra Ósk Snæbjörnsdóttir, Marta Rós Karlsdóttir, Edda Sif Aradóttir og Ingvi Gunnarsson 2018. Reducing emissions of carbon dioxide and hydrogen sulphide at Hellisheidi power plant in 2014–2017 and the role of CarbFix in achieving the 2040 Iceland climate goals. *Energy Procedia* 146: 135–145. doi: 10.1016/j.egypro.2018.07.018

Gíslason, S. R., G. Stefansdottir, M.A. Pfeffer, S. Barsotti, T. Jóhannsson, I. Galeczka o.fl. 2015. Environmental pressure from the 2014-15 eruption of Bárðarbunga volcano, Iceland. *Geochemical Perspectives Letters* 1(1): 84–93. DOI: 10.7185/geochemlet.1509

González, A.G. og O.S. Pokrovsky 2014. Metal adsorption on mosses: Toward a universal adsorption model. *Journal of Colloid and Interface Science* 415: 169–178.

González-Migueo, L., D. Elustondo, E. Lasheras, og J.M. Santamaría 2010. Use of native mosses as biomonitors of heavy metals and nitrogen deposition in surroundings of two steel works. *Chemosphere* 78: 965–971.

Hólmfríður Sigurðardóttir og Þorsteinn Ari Þorgeirsson, ritstj. 2016. *Umhverfisskýrsla OR 2016.* Reykjavík: Orkuveita Reykjavíkur. www.or.is/sites/or.is/files/umhverfisskyrsla_or_2016.pdf [skoðað 4.3.2019]

Hörður Kristinsson 1998. Gróðurbreytingar við álverið í Straumsvík. *Náttúrufræðingurinn* 67: 241–254.

Hörður Kristinsson 2016. *Íslenskar fléttur.* Reykjavík: Hið íslenska bókmenntafélag.

Hörður Kristinsson, Jón Baldur Hlíðberg og Þóra Ellen Þórhallsdóttir 2018. *Flóra Íslands. Blómplöntur og byrkningar.* Reykjavík: Vaka-Helgafell.

Ingibjörg Svala Jónsdóttir 2014. Vistfræði mosa í ljósi loftslagsbreytinga. *Náttúrufræðingurinn* 84 (3–4): 99–112.

Kershaw, K.A. og J.H.H. Looney 1985. *Quantitative and Dynamic Plant Ecology.* Third edition. London: Edward Arnold Limited.

Kristján Sæmundsson 2003. *Hellisheiðarvirkjun: jarðfræðilegar aðstæður á virkjanasvæði.* Greinagerð KS-03/02. Unnið fyrir Orkuveitu Reykjavíkur. Reykjavík: Íslenskar Orkurannsóknir.

Kristmannsdóttir, H. og H. Ármannsson 2003. Environmental aspects of geothermal energy utilization. *Geothermics* 32: 451–461.

Landsnet 2007. *Frumrannsóknir á gróðurskemmdum við háspennumöstur á Suðvesturlandi.* Unnið af Rannsóknarstofu Umhverfistækni hjá Línuhönnun. Reykjavík: Landsnet.

Leps J. og P. Smilauer 2003. *Multivariate Analysis of Ecological Data using CANOCO.* Cambridge: University Press.

Loppi S., B. Giomarelli og R. Bargagli 1999. Lichen and mosses as biomonitors of trace elements in a geothermal area (Mt.Amiata, central Italy). *Cryptogamie Mycologie* 20 (2):119–126.

Mutia, T.M. 2016. *The impacts of geothermal power plant emissions on terrestrial ecosystems in contrasting bio-climatic zones.* Doktorsritgerð við Háskóla Íslands, Reykjavík.

Olafsdottir, S., S.M. Gardarsson og H.O. Andradottir 2014. Spatial distribution of hydrogen sulfide from two geothermal power plants in comples terrain. *Atmospheric Environment* 82: 60–70.

Pfeffer, M., B. Bergsson, S. Barsotti, G. Stefánsdóttir, B. Galle, S. Arellano o.fl. 2018. Ground-Based Measurements of the 2014–2015 Holuhraun Volcanic Cloud (Iceland). Geosciences 8(1): 29–25. DOI: 10.3390/geosciences8010029

Salemaa, M., I. Vanha-Majamaa og J. Derome 2001. Understorey vegetation along a heavy-metal pollution gradient in SW Finland. Environmental Pollution 112: 339–350.

Sigurður H. Magnússon 2013. *Þungmálmar og brennisteinn í mosa á Íslandi 1990–2010: áhrif iðjuvera.* Náttúrufræðistofnun Íslands, NÍ-13003. Garðabær: Náttúrufræðistofnun Íslands.

Sigurður H. Magnússon 2018. *Vöktun þungmálma og brennisteins í mosa á Íslandi 1990–2015: áhrif frá iðjuverum og eldvirkni.* Náttúrufræðistofnun Íslands, NÍ-18006. Garðabær: Náttúrufræðistofnun Íslands.

Sigurður H. Magnússon, Borgþór Magnússon, Ásrún Elmarsdóttir, Sigmar Metúsalemsson og Hans H. Hansen 2016. Vistgerðir á landi. Í Jón Gunnar Ottósson, Anna Sveinsdóttir og María Harðardóttir, ritstj. *Vistgerðir á Íslandi,* bls. 17–169. Fjölrit Náttúrufræðistofnunar nr. 54. Garðabær: Náttúrufræðistofnun Íslands.

Svanhildur Jónsdóttir Svane 1963. Um mosaþembugróður. *Náttúrufræðingurinn* 33: 233–263.

WHO 2000. *Air quality guidelines for Europe. 2nd edition. WHO Regional Publications.* European Series No. 91. Copenhagen: World Health Organization Regional office for Europe.

8 VIÐAUKAR

1. viðauki, a. Meðaltíðni plöntutegunda (ásamt staðalskekkju, lægsta og hæsta gildi) í smáreitum (0,25m²) í vöktunarreitum við Hellisheiðarvirkjun árin 2012 og 2017 (n=120). Tíðni er fjöldi hlutreita (5×5 cm) af alls 100 hlutreitum í hverjum smáreit (50×50 cm).

Latneskt heiti	Íslenskt heiti	meðaltíðni 2012	SE	lægsta gildi	hæsta gildi	meðaltíðni 2017	SE	lægsta gildi	hæsta gildi
Æðplöntur									
Agrostis vinealis	Týtulíngresi	0,9	0,34	0	24	1,2	0,52	0	42
Armeria maritima	Geldingarhnappur	0,04	0,02	0	2	0,03	0,03	0	4
Avenella flexuosa	Bugðupuntur	0,2	0,11	0	9	3,4	1,06	0	60
Bistorta vivipara	Kornsúra	1,7	0,31	0	14	1,0	0,20	0	9
Carex bigelowii	Stinnastör	4,3	0,90	0	56	7,2	1,62	0	91
Cerastium nigrescens	Fjallafræhyrna	0,02	0,01	0	1	0,03	0,03	0	4
Empetrum nigrum	Krækilyng	0,03	0,02	0	2	0,1	0,04	0	4
Equisetum arvense	Klóelfting	0,8	0,51	0	51	0,8	0,50	0	54
Festuca richardsonii	Túnvingull	6,3	1,27	0	60	4,0	1,08	0	82
Festuca vivipara	Blávingull	1,6	0,47	0	33	0,8	0,30	0	30
Galium boreale	Krossmaðra	0,01	0,01	0	1				
Galium normanii	Hvítmaðra	0,8	0,33	0	28	0,5	0,20	0	17
Juncus trifidus	Móasef	1,6	0,63	0	45	2,4	0,86	0	64
Koenigia islandica	Naflagras	0,01	0,01	0	1				
Luzula multiflora	Vallhæra	0,03	0,03	0	3				
Luzula spicata	Axhæra	0,1	0,05	0	4	0,1	0,07	0	6
Minuartia spp.	Nóra	0,04	0,04	0	5				
Poa glauca	Blásveifgras	0,1	0,04	0	5				
Rumex acetosa	Túnsúra					0,1	0,08	0	9
Rumex acetosella	Hundasúra	0,1	0,07	0	8				
Salix herbacea	Grasvíðir	8,4	1,06	0	64	10,5	1,29	0	78
Salix lanata	Loðvíðir					0,2	0,18	0	22
Saxifraga hypnoides	Mosasteinbrjótur					0,01	0,01	0	1
Saxifraga oppositifolia	Vetrarsteinbrjótur	0,2	0,11	0	11	0,2	0,12	0	13
Thalictrum alpinum	Brjóstagras	0,8	0,30	0	22	0,4	0,20	0	22
Mosar									
Hylocomium splendens	Tildurmosi	1,2	0,49	0	50	1,1	0,42	0	39
Marchantiophyta	Flatmosi					0,03	0,02	0	2
Polytrichum sp.	Haddmosi	0,5	0,12	0	7	0,9	0,22	0	16
Racomitrium ericoides	Melagambri	0,3	0,24	0	29	0,2	0,18	0	20
Racomitrium lanuginosum	Hraungambri	99,7	0,23	74	100	99,8	0,15	84	100
Rhytidiadelphus squarrosus	Engjaskraut					0,02	0,01	0	1
Sanionia uncinata	Móasigð					0,02	0,02	0	2
Bryophyta	Blaðmosi	0,02	0,02	0	2				
Fléttur									
Cetraria sp.	Kræðuflétta	5,4	0,52	0	22	5,7	0,53	0	30
Cladonia furcata	Mókrókar					0,1	0,05	0	6
Cladonia arbuscula	Hreindýrakrókar	0,4	0,12	0	12	0,4	0,16	0	16
Cladonia sp.	Bikarfléttuætt					0,6	0,19	0	15
Stereocaulon sp.	Breyskja					0,1	0,05	0	4
Thamnolia vermicularis	Ormagrös	0,4	0,18	0	15	0,2	0,07	0	5
Cryptogamic crust	Lífræn jarðvegsskán	0,1	0,06	0	6				

1. viðauki, b. Meðaltíðni plöntutegunda (ásamt staðalskekkju, lægsta og hæsta gildi) í smáreitum (0,25m²) í vöktunarreitum við Nesjavallavirkjun árin 2012 og 2017 (n=120). Tíðni er fjöldi hlutreita (5×5 cm) af alls 100 hlutreitum í hverjum smáreit (50×50 cm).

Latneskt heiti	Íslenskt heiti	meðaltíðni 2012	SE	lægsta gildi	hæsta gildi	meðaltíðni 2017	SE	lægsta gildi	hæsta gildi
Æðplöntur									
Agrostis vinealis	Týtulíngresi	0,8	0,31	0	24	1,4	0,52	0	44
Alchemilla alpina	Ljónslappi	0,02	0,02	0	2	0,1	0,09	0	11
Avenella flexuosa	Bugðupuntur	2,9	1,04	0	68	3,5	1,06	0	70
Bistorta vivipara	Kornsúra	0,5	0,16	0	13	0,4	0,11	0	8
Calluna vulgaris	Beitilyng	0,2	0,22	0	26	0,2	0,19	0	23
Carex bigelowii	Stinnastör	8,6	1,18	0	47	9,4	1,44	0	62
Empetrum nigrum	Krækilyng	6,9	1,63	0	89	7,8	1,73	0	95
Equisetum arvense	Klóelfting	0,5	0,20	0	15	0,5	0,26	0	28
Equisetum pratense	Vallelfting					0,1	0,08	0	9
Equisetum variegatum	Beitieski	0,1	0,10	0	11	0,4	0,22	0	22
Festuca richardsonii	Túnvingull	2,0	0,59	0	39	1,2	0,39	0	28
Festuca vivipara	Blávingull	0,4	0,23	0	25	0,3	0,23	0	26
Galium normanii	Hvítmaðra	0,6	0,28	0	26	0,4	0,24	0	23
Juncus trifidus	Móasef	0,8	0,40	0	45	0,6	0,35	0	38
Luzula multiflora	Vallhæra	0,03	0,03	0	3	0,03	0,03	0	4
Luzula spicata	Axhæra	0,03	0,03	0	3	0,01	0,01	0	1
Salix herbacea	Grasvíðir	10,0	1,29	0	61	11,3	1,41	0	69
Silene acaulis	Lambagras	0,02	0,02	0	2	0,01	0,01	0	1
Thalictrum alpinum	Brjóstagras	0,2	0,16	0	18	0,2	0,11	0	10
Vaccinium uliginosum	Bláberjalyng	4,1	1,35	0	91	4,5	1,38	0	88
Mosar									
Hylocomium splendens	Tildurmosi	0,1	0,05	0	6	0,1	0,06	0	7
Marchantiophyta	Flatmosi					0,2	0,10	0	8
Polytrichum sp.	Haddmosi	0,03	0,02	0	1	0,1	0,04	0	4
Racomitrium ericoides	Melagambri	0,03	0,03	0	3	0,01	0,01	0	1
Racomitrium lanuginosum	Hraungambri	99,8	0,09	93	100	99,8	0,08	93	100
Bryophyta	Blaðmosi	0,01	0,01	0	1	0,03	0,03	0	3
Fléttur									
Cetraria sp.	Kræðuflétta	6,2	0,83	0	46	5,4	0,80	0	48
Cladonia arbuscula	Hreindýrakrókar	0,9	0,27	0	20	0,9	0,29	0	28
Cladonia sp.	Bikarfléttuætt					0,1	0,13	0	16
Peltigera sp.	Engjaskóf	0,1	0,06	0	7				
Stereocaulon sp.	Breyskja	0,4	0,17	0	17	0,4	0,24	0	27
Thamnolia vermicularis	Ormagrös	0,1	0,06	0	5	0,02	0,01	0	1
Lichen sp.	Ógreind flétta					0,04	0,03	0	3

2. viðauki, a. Meðalstyrkur (mg/kg, n=4) brennisteins og þungmálmana arsens, bórs, kadmíns, króms, kopars, járns, kvikasilfurs, nikkels, blýs, antímons, vanadíns og sinks í mosasýnum í vöktunarreitum eftir fjarlægð og stefnu frá Hellisheiðarvirkjun. Bókstafir gefa til kynna stefnu sniða frá virkjun (SV og SA) og tölur fjarlægð vöktunarreita frá virkjun í metrum.

Efni	Snið	Vöktunar-reitur	Meðaltal	Staðalskekkja	Lægsta gildi	Hæsta gildi	Miðgildi
Brennisteinn (S)	SV	250	522	58,3	457	697	467
		500	375	30,8	309	457	366
		1000	292	19,8	252	332	293
		2000	271	9,6	244	289	276
		4000	286	28,3	225	351	283
	SA	250	600	92,6	365	818	608
		500	304	10,9	279	330	303
		1000	298	20,6	246	346	299
		2000	278	12,8	241	299	287
		4000	311	10,2	284	333	315
Arsen (As)	SV	250	0,185	0,0609	0,108	0,365	0,134
		500	0,124	0,0172	0,085	0,169	0,122
		1000	0,077	0,0271	0,004	0,121	0,092
		2000	0,067	0,0200	0,023	0,109	0,067
		4000	0,143	0,0356	0,081	0,218	0,137
	SA	250	0,130	0,0161	0,092	0,171	0,129
		500	0,097	0,0143	0,068	0,130	0,096
		1000	0,106	0,0270	0,073	0,187	0,082
		2000	0,146	0,0234	0,080	0,181	0,162
		4000	0,126	0,0046	0,120	0,140	0,123
Bór (B)	SV	250	0,83	0,12	0,56	1,15	0,80
		500	2,03	0,61	1,04	3,68	1,70
		1000	0,87	0,08	0,65	1,04	0,90
		2000	1,35	0,39	0,81	2,46	1,06
		4000	0,92	0,13	0,69	1,20	0,90
	SA	250	1,72	0,30	1,14	2,58	1,58
		500	1,74	0,35	1,19	2,72	1,53
		1000	1,09	0,34	0,60	2,08	0,83
		2000	0,98	0,06	0,89	1,14	0,94
		4000	1,11	0,21	0,80	1,75	0,95
Kadmín (Cd)	SV	250	0,020	0,0048	0,006	0,028	0,023
		500	0,013	0,0026	0,008	0,021	0,012
		1000	0,017	0,0055	0,005	0,030	0,016
		2000	0,013	0,0038	0,002	0,018	0,016
		4000	0,022	0,0025	0,015	0,026	0,024
	SA	250	0,049	0,0201	0,018	0,108	0,036
		500	0,034	0,0096	0,005	0,047	0,042
		1000	0,021	0,0044	0,009	0,028	0,023
		2000	0,025	0,0017	0,023	0,030	0,024
		4000	0,018	0,0051	0,007	0,031	0,016

2. viðauki, a. Framhald.

Efni	Snið	Vöktunar-reitur	Meðaltal	Staðalskekkja	Lægsta gildi	Hæsta gildi	Miðgildi
Króm (Cr)	SV	250	5,28	1,75	2,59	10,39	4,06
		500	2,92	0,29	2,32	3,63	2,86
		1000	1,86	0,11	1,69	2,13	1,81
		2000	2,21	0,31	1,30	2,68	2,43
		4000	4,23	0,66	2,89	6,03	3,99
	SA	250	3,84	0,62	2,10	5,04	4,12
		500	2,43	0,26	1,98	3,17	2,28
		1000	1,70	0,14	1,51	2,11	1,58
		2000	2,45	0,21	2,01	2,83	2,49
		4000	2,51	0,25	1,82	2,95	2,63
Kopar (Cu)	SV	250	10,12	2,15	6,03	15,63	9,41
		500	9,27	0,91	6,60	10,69	9,89
		1000	7,51	0,40	6,60	8,41	7,51
		2000	9,76	0,44	8,53	10,55	9,98
		4000	10,01	0,59	8,75	11,26	10,02
	SA	250	6,15	0,63	5,14	8,00	5,72
		500	7,19	0,93	4,67	9,16	7,47
		1000	6,49	1,09	3,70	8,66	6,81
		2000	7,12	1,17	5,27	10,55	6,33
		4000	8,44	1,65	5,12	12,18	8,23
Járn (Fe)	SV	250	5658	2109,3	2804	11913	3957
		500	3717	322,9	3103	4548	3609
		1000	2456	268,9	2009	3129	2342
		2000	2545	468,7	1149	3163	2935
		4000	4026	838,1	2632	6110	3681
	SA	250	4475	739,0	2402	5906	4796
		500	2687	174,9	2412	3193	2571
		1000	2319	258,0	1942	3066	2135
		2000	3122	331,9	2212	3767	3254
		4000	3779	371,6	2693	4293	4064
Kvikasilfur (Hg)	SV	250	0,119	0,0196	0,085	0,173	0,109
		500	0,061	0,0064	0,048	0,073	0,061
		1000	0,066	0,0079	0,044	0,082	0,069
		2000	0,043	0,0019	0,039	0,048	0,042
		4000	0,047	0,0038	0,038	0,057	0,047
	SA	250	0,072	0,0042	0,067	0,085	0,069
		500	0,072	0,0025	0,067	0,077	0,072
		1000	0,053	0,0042	0,046	0,066	0,051
		2000	0,060	0,0097	0,048	0,089	0,052
		4000	0,061	0,0035	0,051	0,067	0,063
Nikkel (Ni)	SV	250	4,36	0,84	2,95	6,75	3,88
		500	2,64	0,21	2,39	3,28	2,45
		1000	1,88	0,27	1,25	2,56	1,86
		2000	1,56	0,24	0,89	2,03	1,65
		4000	2,83	0,32	2,06	3,63	2,82
	SA	250	2,06	0,19	1,61	2,55	2,04
		500	1,73	0,04	1,62	1,82	1,74
		1000	1,65	0,21	1,16	2,16	1,64
		2000	2,29	0,26	1,76	2,99	2,21
		4000	1,94	0,22	1,47	2,51	1,90

2. viðauki, a. Framhald.

Efni	Snið	Vöktunar-reitur	Meðaltal	Staðalskekkja	Lægsta gildi	Hæsta gildi	Miðgildi
Blý (Pb)	SV	250	1,17	0,40	0,60	2,34	0,86
		500	0,93	0,10	0,73	1,18	0,90
		1000	0,67	0,10	0,48	0,89	0,66
		2000	0,70	0,15	0,39	1,01	0,70
		4000	1,43	0,48	0,62	2,60	1,25
	SA	250	0,95	0,19	0,65	1,47	0,84
		500	0,78	0,09	0,61	0,97	0,77
		1000	0,74	0,13	0,51	1,09	0,67
		2000	1,25	0,26	0,64	1,91	1,22
		4000	1,05	0,10	0,79	1,24	1,09
Antímon (Sb)	SV	250	0,024	0,0069	0,005	0,037	0,026
		500	0,017	0,0016	0,014	0,021	0,017
		1000	0,022	0,0024	0,017	0,029	0,021
		2000	0,018	0,0056	0,003	0,027	0,022
		4000	0,017	0,0019	0,012	0,021	0,017
	SA	250	0,024	0,0062	0,017	0,043	0,019
		500	0,024	0,0065	0,017	0,043	0,017
		1000	0,022	0,0023	0,017	0,028	0,022
		2000	0,019	0,0019	0,016	0,025	0,018
		4000	0,015	0,0018	0,012	0,020	0,014
Vanadín (V)	SV	250	14,33	5,04	7,11	29,20	10,50
		500	9,85	0,56	8,33	10,88	10,08
		1000	7,06	0,68	5,84	8,53	6,94
		2000	7,15	1,17	3,65	8,48	8,24
		4000	10,85	2,02	7,44	15,83	10,07
	SA	250	11,38	1,66	6,97	14,91	11,82
		500	7,32	0,23	6,74	7,85	7,35
		1000	6,85	0,53	5,97	8,32	6,56
		2000	8,77	0,97	6,53	11,17	8,68
		4000	9,96	0,88	7,36	11,21	10,63
Sink (Zn)	SV	250	8,22	1,42	5,61	11,83	7,72
		500	5,60	0,13	5,37	5,98	5,53
		1000	5,40	0,42	4,71	6,60	5,15
		2000	5,90	0,51	4,54	6,79	6,12
		4000	5,88	0,66	4,47	7,12	5,97
	SA	250	5,13	0,24	4,72	5,80	5,01
		500	4,94	0,38	4,21	5,72	4,92
		1000	4,97	0,33	4,27	5,74	4,93
		2000	6,19	0,60	5,10	7,38	6,14
		4000	5,69	0,39	4,67	6,48	5,81

2. viðauki, b. Meðalstyrkur (mg/kg, n=4) brennisteins og þungmálma (arsen, bór, kadmín, króm, kopar, járn, kvikasilfur, nikkel, blý, antímon, vanadín og sink) í mosasýnum í vöktunarreitum eftir fjarlægð og stefnu frá Nesjavallavirkjun. Bókstafir gefa til kynna stefnu sniða frá virkjun (V og SA) og tölur fjarlægð vöktunarreita frá virkjun í metrum.

Efni	Snið	Vöktunar-reitur	Meðaltal	Staðalskekkja	Lægsta gildi	Hæsta gildi	Miðgildi
Brennisteinn (S)	V	250	432	53	351	581	397
		500	368	15	335	409	363
		1000	420	47	308	500	435
		2000	347	20	305	392	346
		4000	301	23	259	351	298
	SA	250	798	26	726	837	814
		500	472	52	382	619	443
		1000	279	7	267	291	279
		2000	438	142	273	864	308
		4000	237	14	202	265	241
Arsen (As)	V	250	0,118	0,012	0,089	0,141	0,121
		500	0,076	0,005	0,061	0,085	0,078
		1000	0,154	0,013	0,134	0,193	0,144
		2000	0,106	0,019	0,060	0,155	0,105
		4000	0,135	0,034	0,093	0,235	0,106
	SA	250	0,115	0,010	0,096	0,138	0,113
		500	0,084	0,012	0,052	0,104	0,091
		1000	0,153	0,031	0,072	0,212	0,164
		2000	0,118	0,012	0,089	0,143	0,119
		4000	0,095	0,020	0,045	0,136	0,099
Bór (B)	V	250	3,646	1,478	1,006	7,441	3,069
		500	4,015	1,733	0,928	7,578	3,777
		1000	1,024	0,088	0,776	1,159	1,081
		2000	1,136	0,081	0,950	1,334	1,130
		4000	1,260	0,149	1,033	1,670	1,168
	SA	250	0,916	0,027	0,874	0,994	0,898
		500	0,998	0,095	0,777	1,235	0,990
		1000	0,936	0,080	0,771	1,117	0,927
		2000	1,157	0,145	0,798	1,436	1,197
		4000	1,060	0,177	0,685	1,497	1,029
Kadmín (Cd)	V	250	0,044	0,006	0,028	0,058	0,046
		500	0,027	0,009	0,008	0,046	0,027
		1000	0,034	0,019	0,001	0,088	0,023
		2000	0,055	0,011	0,022	0,070	0,063
		4000	0,085	0,017	0,059	0,132	0,075
	SA	250	0,019	0,010	0,005	0,050	0,011
		500	0,064	0,012	0,027	0,079	0,074
		1000	0,053	0,013	0,015	0,077	0,059
		2000	0,053	0,026	0,000	0,107	0,052
		4000	0,053	0,017	0,015	0,099	0,048

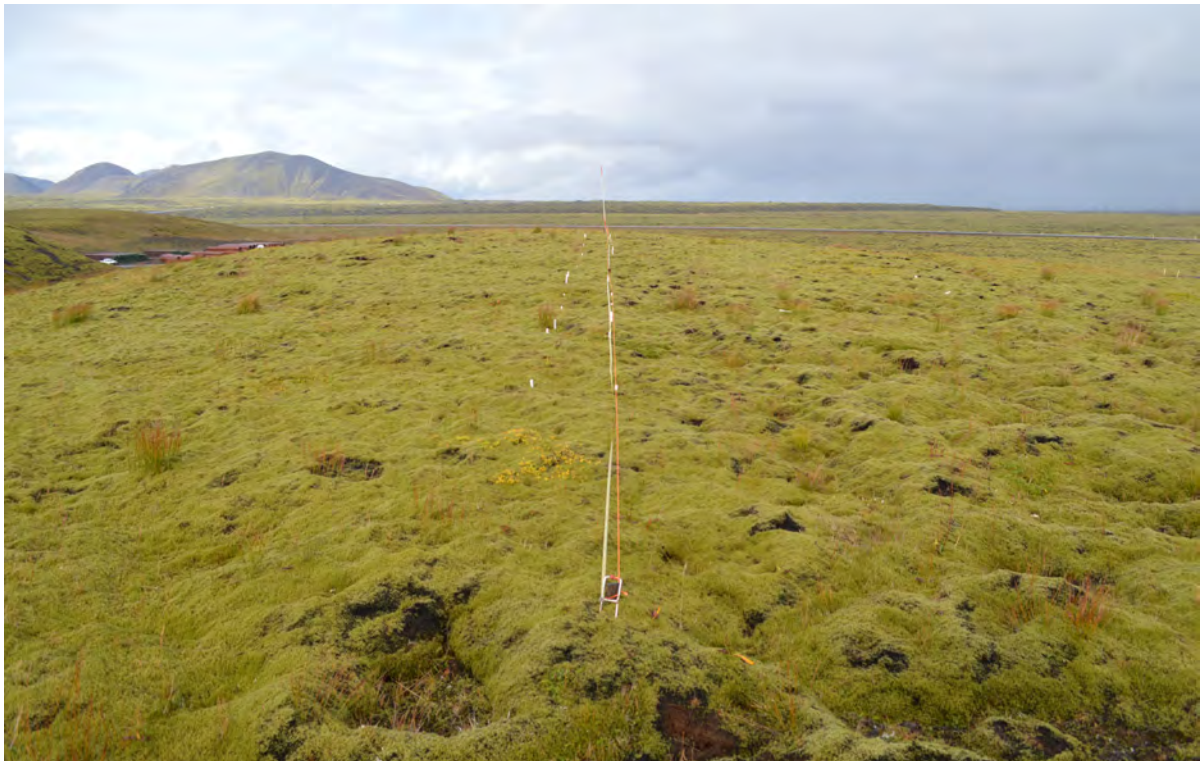
2. viðauki, b. Framhald.

Efni	Snið	Vöktunar-reitur	Meðaltal	Staðalskekkja	Lægsta gildi	Hæsta gildi	Miðgildi
Króm (Cr)	V	250	2,253	0,294	1,746	3,070	2,097
		500	1,874	0,210	1,260	2,204	2,015
		1000	2,876	0,384	1,866	3,562	3,038
		2000	2,896	0,322	2,087	3,527	2,985
		4000	2,166	0,182	1,750	2,586	2,164
	SA	250	3,567	0,458	2,257	4,386	3,812
		500	3,346	0,592	2,397	5,070	2,958
		1000	2,984	0,202	2,615	3,476	2,923
		2000	4,309	0,520	3,719	5,867	3,825
		4000	3,796	0,521	2,306	4,709	4,085
Kopar (Cu)	V	250	20,948	1,202	17,617	23,065	21,555
		500	13,409	1,718	8,667	16,370	14,300
		1000	9,739	2,020	7,084	15,726	8,074
		2000	8,465	0,490	7,586	9,672	8,302
		4000	6,901	0,409	6,034	7,646	6,963
	SA	250	7,369	0,161	7,043	7,764	7,334
		500	8,726	1,268	7,010	12,484	7,704
		1000	7,287	0,238	6,727	7,883	7,269
		2000	9,413	1,568	7,590	14,099	7,981
		4000	7,338	0,622	5,494	8,213	7,822
Járn (Fe)	V	250	3209	516	2459	4709	2834
		500	2746	275	1977	3253	2877
		1000	4690	1043	1913	6813	5016
		2000	4455	657	2851	5891	4539
		4000	3489	276	2738	4062	3578
	SA	250	5220	760	3262	6780	5419
		500	4824	1024	3332	7742	4110
		1000	4779	294	4155	5560	4701
		2000	6025	640	5120	7895	5542
		4000	5302	755	3117	6511	5789
Kvikasilfur (Hg)	V	250	0,088	0,015	0,045	0,108	0,101
		500	0,052	0,006	0,037	0,064	0,054
		1000	0,053	0,006	0,037	0,065	0,056
		2000	0,055	0,005	0,041	0,064	0,058
		4000	0,058	0,018	0,011	0,097	0,062
	SA	250	0,067	0,005	0,055	0,078	0,067
		500	0,046	0,005	0,036	0,055	0,046
		1000	0,138	0,011	0,119	0,157	0,138
		2000	0,065	0,003	0,060	0,073	0,064
		4000	0,055	0,004	0,047	0,067	0,053
Nikkel (Ni)	V	250	1,829	0,309	1,353	2,689	1,637
		500	1,444	0,094	1,194	1,646	1,467
		1000	1,718	0,094	1,551	1,884	1,719
		2000	1,938	0,183	1,648	2,445	1,829
		4000	1,836	0,122	1,546	2,127	1,835
	SA	250	3,089	0,479	2,170	4,425	2,879
		500	2,458	0,468	1,719	3,746	2,185
		1000	2,131	0,239	1,678	2,690	2,078
		2000	2,819	0,367	2,299	3,905	2,537
		4000	2,325	0,281	1,510	2,718	2,535

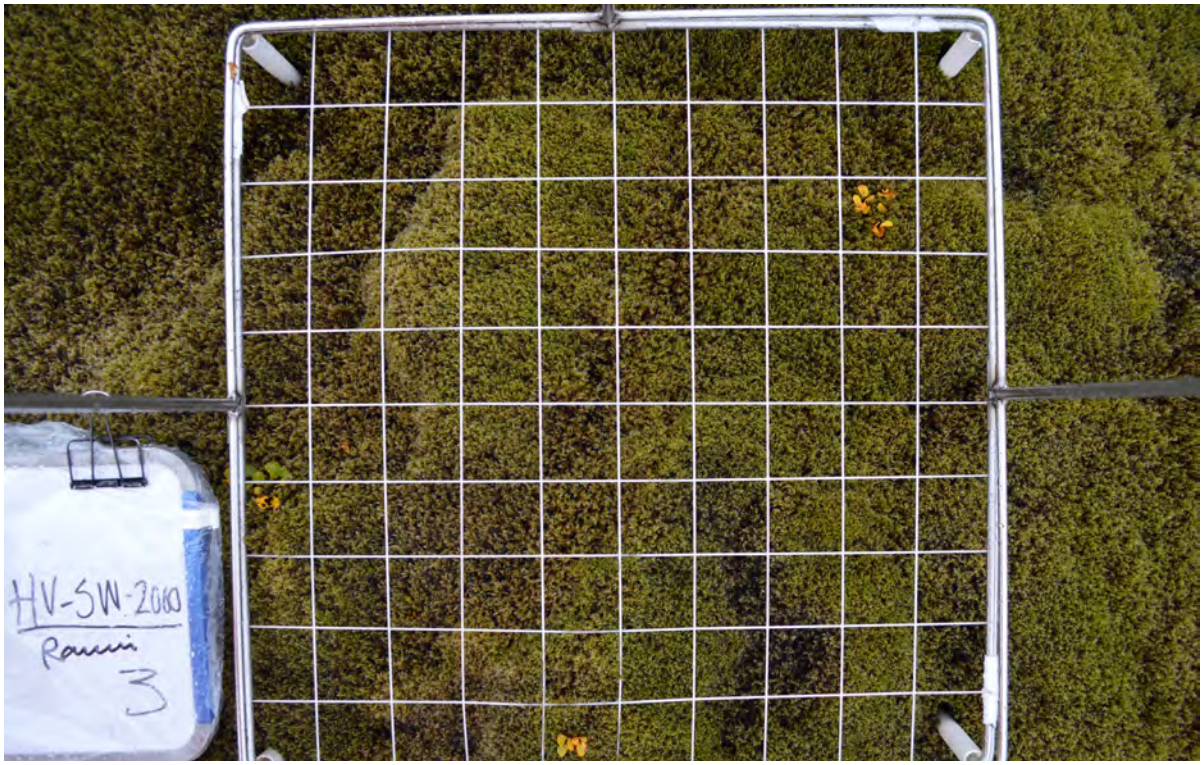
2. viðauki, b. Framhald.

Efni	Snið	Vöktunar-reitur	Meðaltal	Staðalskekkja	Lægsta gildi	Hæsta gildi	Miðgildi
Blý (Pb)	V	250	0,959	0,112	0,638	1,139	1,028
		500	0,671	0,057	0,564	0,826	0,648
		1000	1,112	0,091	0,975	1,366	1,053
		2000	0,721	0,062	0,621	0,888	0,688
		4000	1,087	0,204	0,770	1,657	0,961
	SA	250	0,872	0,080	0,651	1,026	0,907
		500	0,882	0,057	0,745	1,018	0,882
		1000	1,146	0,205	0,678	1,632	1,138
		2000	0,891	0,066	0,734	1,050	0,891
		4000	0,846	0,088	0,591	0,986	0,904
Antímon (Sb)	V	250	0,020	0,003	0,012	0,027	0,020
		500	0,026	0,003	0,020	0,034	0,025
		1000	0,016	0,007	0,008	0,036	0,011
		2000	0,012	0,002	0,009	0,015	0,012
		4000	0,011	0,002	0,005	0,016	0,011
	SA	250	0,013	0,002	0,006	0,017	0,014
		500	0,013	0,004	0,005	0,019	0,014
		1000	0,009	0,001	0,007	0,011	0,009
		2000	0,014	0,004	0,006	0,026	0,011
		4000	0,010	0,003	0,003	0,016	0,011
Vanadín (V)	V	250	9,787	1,254	8,163	13,457	8,765
		500	8,093	0,732	5,932	9,040	8,700
		1000	13,494	1,979	8,473	17,647	13,929
		2000	11,889	1,309	8,364	14,336	12,429
		4000	10,043	0,747	8,023	11,627	10,261
	SA	250	15,019	2,217	9,213	19,631	15,616
		500	13,275	1,864	10,487	18,535	12,039
		1000	13,876	1,019	11,835	16,695	13,487
		2000	15,632	1,267	14,258	19,432	14,420
		4000	14,286	2,063	8,235	17,452	15,729
Sink (Zn)	V	250	6,239	0,510	5,501	7,749	5,852
		500	4,371	0,402	3,730	5,450	4,153
		1000	5,470	0,535	3,934	6,225	5,861
		2000	5,709	0,252	4,996	6,107	5,867
		4000	5,762	0,440	4,600	6,560	5,944
	SA	250	5,576	0,447	4,846	6,867	5,295
		500	6,298	0,597	5,471	8,048	5,837
		1000	5,721	0,215	5,412	6,358	5,556
		2000	9,290	2,609	6,127	17,052	6,991
		4000	5,648	0,475	4,265	6,417	5,955

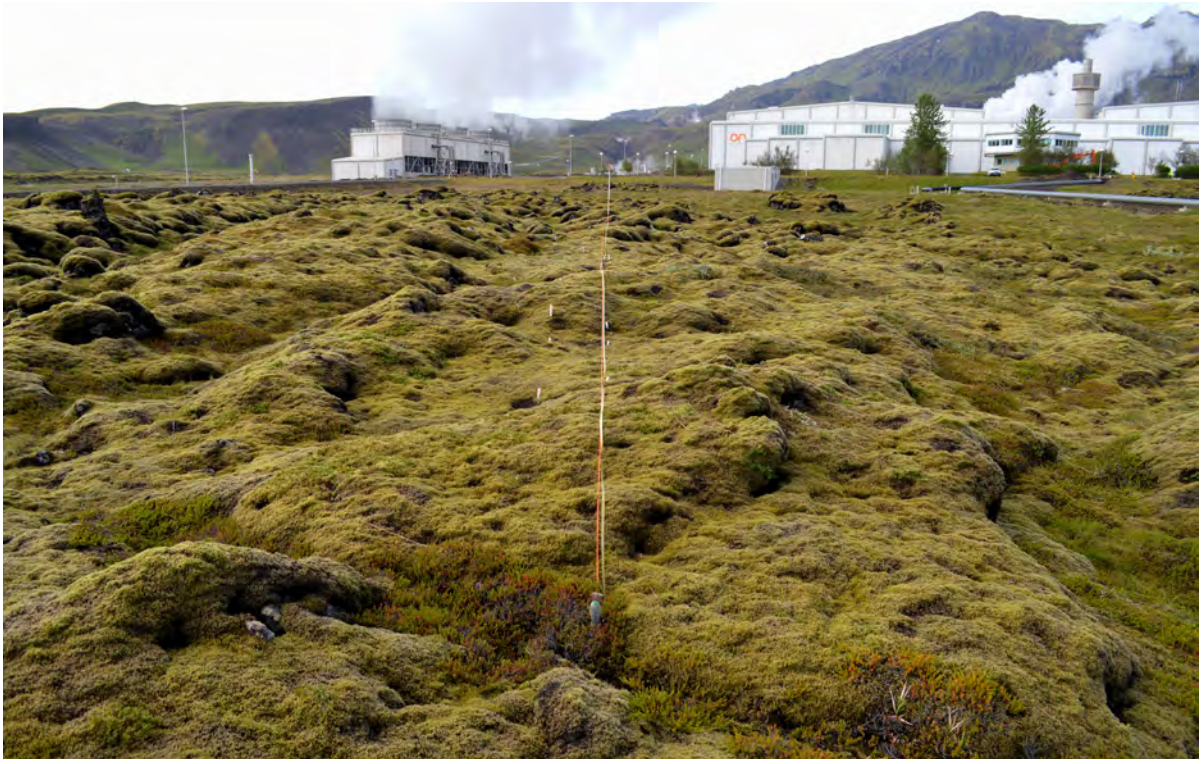
3. viðauki. Ljósmyndir af vöktunarreitum við Hellisheiðarvirkjun og Nesjavallavirkjun.



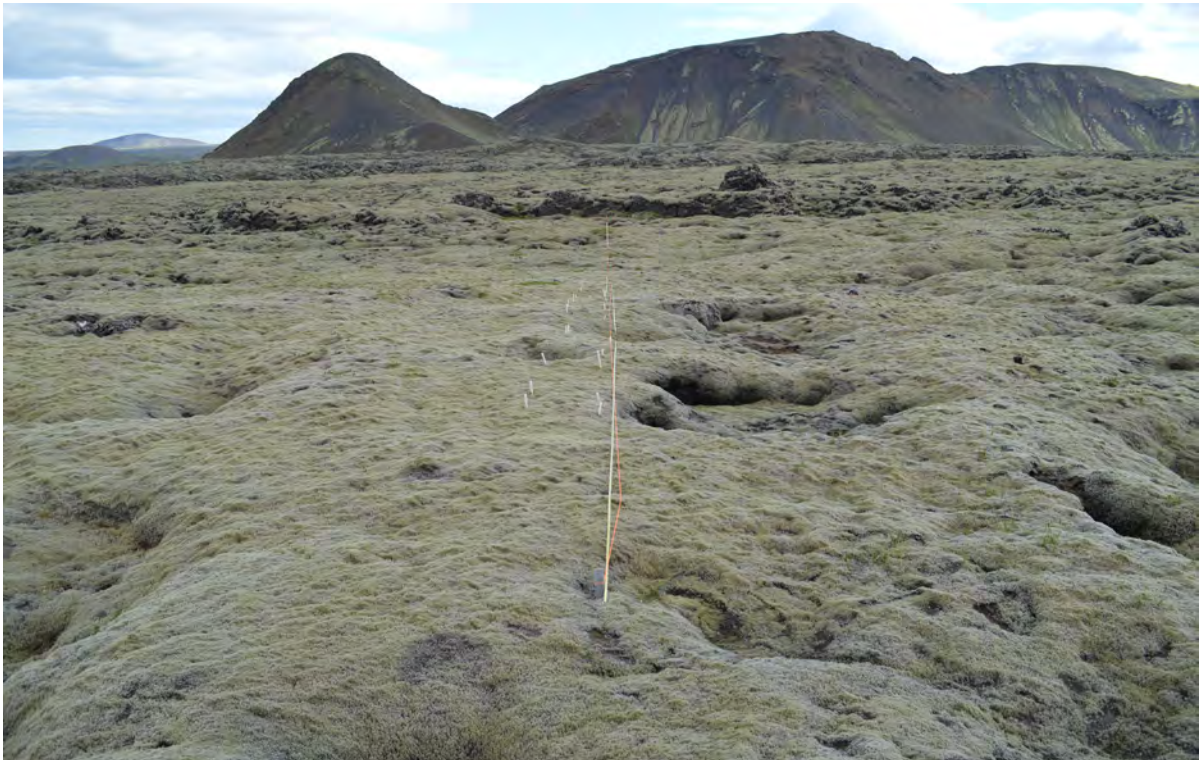
1. ljósmynd. Dæmi um vöktunarreit á mælisniði í suðausturátt og 250 m fjarlægð frá Hellisheiðarvirkjun. Merkingar fyrir smáreiti sjást í reitnum. Ljósm. Ágústa Helgadóttir, 19. september 2017.



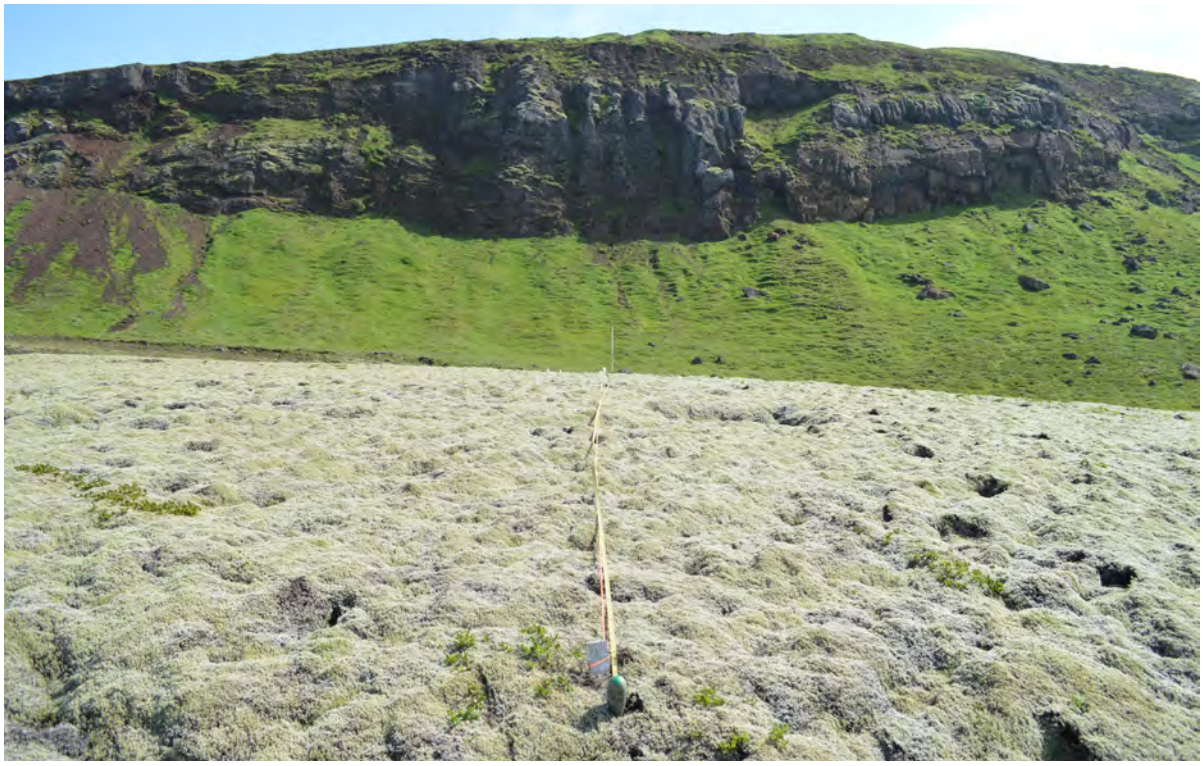
2. ljósmynd. Dæmi um 50×50 cm gróðurmæliramma, þ.e. smáreit, þar sem skráningar á tíðni útlitsflokka mosa (hraungambra) og tíðni einstakra plöntutegunda og plöntuhópa fóru fram. Við tíðnimælingarnar var skráð hvort viðkomandi útlitsflokkur mosans, og plöntutegund, kæmi fyrir í hverju hólfi þ.e. hlutreit (5×5cm) af alls 100 hlutreitum. Í hverjum vöktunarreit voru átta slíkir smáreitir og við úrvinnslu gagna var reiknuð út meðaltíðni fyrir hverja mælibreytu fyrir hvern vöktunarreit (n=8). Ljósm. Ágústa Helgadóttir, 20. september 2017.



3. ljósmynd. Dæmi um vöktunarreit á mælisniði í norðausturátt og 250 m fjarlægð frá Nesjavallavirkjun. Merkingar fyrir smáreiti sjást í reitnum. Ljósm. Ágústa Helgadóttir, 20. júlí 2017.



4. ljósmynd. Dæmi um vöktunarreit á mælisniði í suðvesturátt og 4000 m fjarlægð frá Hellisheiðarvirkjun. Merkingar fyrir smáreiti sjást í vöktunarreitnum. Ljósm. Ágústa Helgadóttir, 28. júlí 2017.



5. ljósmynd. Dæmi um vöktunarreit á mælisniði í vesturátt og 2000 m fjarlægð frá Nesjavallavirkjun. Merkingar fyrir smáreiti sjást í reitnum. Ljósm. Ágústa Helgadóttir, 25. júlí 2017.

6. ljósmynd. Dæmi um sjáanlegar skemmdir á mosaþekjunni. Mynd tekin í vöktunarreit í 1000 m fjarlægð á vestursniði við Nesjavallavirkjun. Ljósm. Ágústa Helgadóttir, 27. júlí 2017.

7. ljósmynd. Nærmynd af B-, C- og D2-skemmd í mosaþekjunni. Mynd tekin í vöktunarreit í 1000 m fjarlægð á vestursniði við Nesjavallavirkjun. Ljósm. Ágústa Helgadóttir, 27. júlí 2017.

8. ljósmynd. Nærmynd af C-skemmd í mosaþekjunni. Mynd tekin í vöktunarreit í 1000 m fjarlægð á vestursniði við Nesjavallavirkjun. Ljósm. Ágústa Helgadóttir, 27. júlí 2017.

9. ljósmynd. Nærmynd af skemmdum mosasprotum sem flokkast sem B-skemmdir. Á myndinni sést hversu dökkir sprotarnir eru. Mynd tekin í vöktunarreit í 2000 m fjarlægð á suðvestursniði við Nesjavallavirkjun. Ljósm. Ágústa Helgadóttir, 25. júlí 2017.

10. ljósmynd. Nærmynd af skemmdum mosasprotum sem flokkast sem B-skemmdir. Á myndinni sést hversu dökkir sprotarnir eru og að hároddar eru oft eyddir á sprotaendum. Mynd tekin í vöktunarreit í 2000 m fjarlægð á suðvestursniði við Nesjavallavirkjun. Ljósm. Ágústa Helgadóttir, 25. júlí 2017.