



Vöktun þungmálma og brennisteins í mosa á Íslandi 1990–2015 Áhrif frá iðjuverum og eldvirkni

Sigurður H. Magnússon



**Vöktun þungmálma og brennisteins í mosa á
Íslandi 1990-2015. Áhrif frá iðjuverum og eldvirkni**

Sigurður H. Magnússon

NÍ-18006


Garðabær, desember 2018



NÁTTÚRUFRÆÐISTOFNUN ÍSLANDS

Mynd á kápu: Sýnatökustaðir mosa sumarið 2015. Brúnir punktar tákna tildurmosa en bláir hraungambra. Skyggð svæði sýna gosbelti. Holuhraun er merkt sem rauður fláki.

ISSN 1670-0120

	Urriðaholtsstræti 6-8 212 Garðabæ Sími 590 0500 Fax 590 0595 http://www.ni.is ni@ni.is	Borgum við Norðurlóð 602 Akureyri Sími 460 0500 Fax 460 0501 http://www.ni.is nia@ni.is
Skýrsla nr. NI-18006	Dags, Mán, Ár Desember 2018	Dreifing Opin
Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill Vöktun þungmálma og brennisteins í mosa á Íslandi 1990–2015. Áhrif frá iðjuverum og eldvirkni	Upplag 25	
	Fjöldi síðna 109	
	Kort / Mælikvarði	
	Verknúmer 3158 Málsnúmer 2018010039	
Höfundar Sigurður H. Magnússon		
Unnið fyrir		
Samvinnuaðilar Alcoa Fjarðaál, Elkem Ísland, Hafnafjarðarbær, HS Orka, Landsvirkjun, Norðurál, PCC Bakki Silicon, Rio Tinto Iceland, Vegagerðin		
Útdráttur Hér á landi hefur loftborin mengun verið vöktuð frá árinu 1990 með því að mæla þungmálma í tildurmosa (<i>Hylocomium splendens</i>) á fimm ára fresti. Vöktunin er hluti af evrópsku verkefni, unnið í þeim tilgangi að kortleggja uppsprettur mengandi efna í andrúmslofti og fylgjast með breytingum sem verða. Hér hefur mosa verið safnað víðs vegar um land en styrkur efna í mosa hefur einnig verið vaktuð sérstaklega um skeið við álverin í Straumsvík, á Grundartanga og í Reyðarfirði og í litlum mæli við jarðvarmavirkjanir. Árið 2015 hófst vöktun við kísilverin á Bakka og í Helguvík. Frá upphafi hefur styrkur Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, V og Zn verið mældur og frá 1995 einnig As, Hg og S; árið 2015 var efnunum B og Sb bætt við. Vöktunin hér á landi hefur leitt í ljós að helstu uppsprettur þungmálma og brennisteins eru eldgos (As, S), áfok af lítt grónum svæðum (Cr, Cu, Fe, Ni, V), álver (As, Ni, S, Sb), annar iðnaður (Cr, Cu, Fe, Pb, V, Zn) og jarðvarmavirkjanir (As, S). Erlendis frá berast hingað þungmálmar með loftstraumum en í frekar litlum mæli (Cd, Pb). Frá því að vöktun hófst hér á landi hefur styrkur kopars (Cu) í mosa lækkað. Sama er að segja um styrk kadmíns (Cd) og blýs (Pb) sem hefur þó hækkað lítils háttar á ný. Styrkur króms (Cr) hefur heldur hækkað en styrkur arsens (As) lítið breyst. Styrkur annarra efna (Hg, Fe, Ni, S) hefur verið breytilegur eftir árum. Mikilvirkustu uppsprettur loftmengunar eru eldgos, sem geta haft tímabundin áhrif á stórum hluta landsins. Aðrar uppsprettur mengunar eru álver, annar iðnaður og jarðvarmavirkjanir sem hafa fremur staðbundin en viðvarandi áhrif. Styrkur efna er misjafn eftir árum og svæðum. Í kjölfar gossins í Holuhrauni 2014–2015 hækkaði styrkur brennisteins í tildurmosa og skemmdir á mosanum komu fram á stórum hluta landsins. Þá var mosi einnig skemmdur við öll álverin og sums staðar hafði hann horfið með öllu, að líkindum vegna efnaálags. Í Reyðarfirði hafði styrkur arsens (As) og nikkels (Ni) hækkað verulega. Við iðnaðarsvæðið í Hellnahnrauni í Hafnarfirði er talsverð mengun en þar hefur mælst hlutfallslega hár styrkur margra efna (Cr, Cu, Fe, Pb, Zn) sem líklega má rekja til málmiðnaðar á svæðinu. Inn á svæðið berast einnig efni í allmiklum mæli frá álverinu í Straumsvík (As, Ni, Sb, S).		
Lykilorð Vöktun, þungmálmar, brennisteinn, álver, járnblendir, kísilver, jarðvarmavirkjanir, ákoma, mengun, bakgrunnsgildi, mengunarstuðull, tildurmosi, hraungambri.	Yfirfarið MH	

EFNISYFIRLIT

1 INNGANGUR	7
2.1 Landið í heild	9
2.2 Sérstök vöktunarsvæði	10
2.2.1 Straumsvík og Vallahverfi	10
2.2.2 Grundartangi	12
2.2.3 Reyðarfjörður	13
2.2.4 Jarðvarmavirkjanir	14
2.2.5 Kísilver	18
3 AÐFERÐIR	18
3.1 Söfnun, hreinsun og efnagreining mosasýna	18
3.2 Skemmdir á mosa	20
3.3 Styrkur efna í hraungambra og tildurmosa	20
4 ÚRVINNSLA	22
4.1 Bakgrunnsgildi	22
4.2 Mengunarstuðull	22
4.3 Kortlagning	22
4.4 Tölfræðileg úrvinnsla	23
5 NIÐURSTÖÐUR	24
5.1 Bakgrunnsgildi	24
5.2 Styrkur efna utan iðnaðarsvæða og breytingar með tíma	24
5.3 Áhrif iðjuvera á styrk efna	50
5.3.1 Samband fjarlægðar frá iðjuverum og efnastyrks	50
5.3.2 Styrkur efna við iðjuver, breytingar með tíma	52
5.4 Klasagreining	78
5.5 Mosaskemmdir sumarið 2015	78
5.6 Styrkur efna við jarðvarmavirkjanir	81
5.7 Styrkur efna við kísilver	81
5.8 Samanburður á styrk efna í tildurmosa og hraungambra	84
5.9 Styrkur efna í hraungambra	84
6 UMRÆÐA	86
6.1 Arsen, nikkell, antimon og brennisteinn	86
6.2 Króm, kopar, járn og vanadín	89
6.3 Bór, kvikasilfur, kadmín, blý og sink	90
6.4 Eyðing mosa og mosaskemmdir	92
6.4.1 Hvar fundust skemmdir?	92
6.4.2 Hverjar eru orsakir mosaskemmda?	93
7 LOKAORÐ	95
9 HEIMILDIR	98

10 VIÐAUKAR	107
1. viðauki. Losun CO ₂ og H ₂ S frá Hellsheiðarvirkjun árin 2002–2017	107
2. viðauki. Styrkur efna í mosa á svæðum umhverfis jarðvarmavirkjanirnar í Bjarnarflagi, við Hellsheiði, í Svartsengi, á Þeistareykjum og á Reykjanesi árin 2010 og 2015	108
3. viðauki. Styrkur efna í tildurmosa á svæðum umhverfis kísilverin á Bakka við Húsavík og í Helguvík árin 2010 og 2015	109

1 INNGANGUR

Mosar eru án þróaðra róta og hafa ekki sérstakt varnarlag á ytra borði (e. *cuticle*). Þeir taka því upp vatn, næringarefni og ýmis mengunarefni beint úr andrúmslofti, annaðhvort úr vatnslausn eða frá ögnum sem á þá setjast (Harmens o.fl. 2014, Steinnes o.fl. 2016). Yfirborð blaða á mosum er stórt miðað við rúmmál, þeir hafa greið jónaskipti við umhverfið og geta bundið hlutfallslega mikið af efnum (Fernandez o.fl. 2002). Þessi eiginleiki mosa gerir þá vel fallna til að fylgjast með mengun í andrúmslofti.

Sænskir vísindamenn voru fyrstir til að sýna fram á að styrkur sumra þungmálma í mosa samsvaraði styrk málma í úrkomu (Rühling og Tyler 1971, 1973). Fyrir mörg efni hefur t.d. komið fram línulegt samband á milli styrks sem mælist í mosa og styrks í úrkomu (Berg o.fl. 1995, Berg og Steinnes 1997). Reynslan hefur sýnt að með mosaaðferðinni má, auk þungmálma (Schröder o.fl. 2010, Harmens o.fl. 2012), fá upplýsingar um styrk fleiri efna í lofti og úrkomu, svo sem köfnunarefnis (Solga o.fl. 2005, Salemaa o.fl. 2008, Harmens o.fl. 2011) og ýmissa þrávirkra efna (Harmens o.fl. 2013a, Foan o.fl. 2014).

Vöktun mengunar með mælingum á mosa er tiltölulega ódýr og einkum gagnleg á landsvæðum þar sem efni berast að með ójöfnum eða árstíðabundnum hætti (Gonçalves o.fl. 1994) en slíka toppa er oft erfitt að fanga og greina með beinum efnamælingum.

Þrátt fyrir marga kosti mosaaðferðarinnar fylgja henni annmarkar (Steinnes 1995). Talið er að sum efni geti flust milli árssprota í mosa, svo sem Zn og Cu (Steinnes 1995, Harmens o.fl. 2015), sem getur haft áhrif á mældan styrk. Þá getur samkeppni loftborinna katjóna um sæti á yfirborði mosans (e. *exchange sites*), t.d. í sjávarseltu (Na og Mg), haft áhrif á styrk sumra efna (Steinnes 1995). Þá er einnig ljóst að áfok getur haft mikil áhrif á mældan styrk (Harmens o.fl. 2015). Hér á landi eru það einkum Fe og V en hár styrkur þessara efna í mosa hér er frekar mælikvarði á áfok en efnamengun frá iðnaði (Sigurður H. Magnússon 2013).

Hér á landi hefur verið fylgst með með magni þungmálma í mosa frá 1990 með mælingum á fimm ára fresti víða um land (Rühling o.fl. 1992, Rühling og Steinnes 1998, Sigurður H. Magnússon 2002a, 2002b, Sigurður H. Magnússon og Björn Thomas 2007a, 2007b, 2007c, Sigurður H. Magnússon 2013). Mælingarnar eru hluti af vöktunarverkefni (ICP Vegetation) sem mörg Evrópuríki taka þátt í og miðar að því að finna uppsprettur mengunar og fylgjast með breytingum sem kunna að verða (Harmens o.fl. 2007, 2008b, 2010).

Nokkuð misjafnt er hvaða mosategundir hafa verið notaðar við vöktunina en hér á landi hefur tildurmosa (*Hylocomium splendens* (Hedw.) Shimp.) verið safnað. Hann er hér fremur algengur, en mosinn er breiðmyndandi og myndar afmarkaða ársprota og hefur reynst hentugur til vöktunar á þungmálmum (Berg og Steinnes 1997). Frá upphafi árið 1990 hefur styrkur Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, V og Zn verið mældur hér á landi og frá 1995 einnig As, Hg og S. Þau gögn sem uppfylla skilyrðin sem sett eru fyrir verkefnið, t.d. hvað varðar fjarlægð frá vegum og þéttbýli, eru send í sameiginlegan gagnagrunn. Unnið er úr þeim fyrir Evrópu í heild og niðurstöður birtar (Rühling o.fl. 1992, Rühling og Steinnes 1998, Harmens o.fl. 2008a, Harmens o.fl. 2013b). Auk þess hefur verið unnið úr evrópsku mosagögnunum með ýmsum hætti og niðurstöður birtar í vísindagreinum, (t.d. Holy o.fl. 2009, Harmens o.fl. 2010, 2012, 2015, Schröder o.fl. 2010, 2016, 2017).

Þótt Ísland sé eyja fjarri öðrum löndum er ýmislegt sem getur valdið hér mengun. Í fyrsta lagi geta mengandi efni borist hingað um langan veg en slíkur flutningur efna er víða þekktur

(Borys og Rahn 1981, Steinnes o.fl. 2011, Harmens o.fl. 2013a). Hér er einnig mikil eldvirkni sem valdið getur verulegri tímabundinni mengun. Er þar skemmst að minnast gossins í Eyjafjallajökli árið 2010 sem olli m.a. hækkun á styrk As í mosa (Sigurður H. Magnússon 2013) og gossins í Holuhrauni 2014–2015 þar sem m.a. mikið af brennisteini barst út í andrúmsloft (Gíslason o.fl. 2015). Nýting jarðvarma, og þá aðallega á háhitasvæðum, getur einnig leitt til þess að mengandi efni losna út í andrúmsloft. Koma þar einkum til greina brennisteinsvetni (H_2S) og arsen (As) en einnig kvikasilfur (Hg) og bór (B) (Kristmannsdóttir o.fl. 2000, Kristmannsdóttir og Armannsson 2003, Stefán Arnórsson 2017). Hér hafa verið reistar nokkrar jarðvarmavirkjanir; við Kröflu, á Nesjavöllum og við Hellisheiði. Á Reykjanesskaga eru tvær jarðvarmavirkjanir; í Svartsengi og Reykjanesvirkjun norðan við Gunnuhver á Reykjanesi. Í Bjarnarflagi er lítil jarðvarmavirkjun og á Þeistareykjum er ný jarðvarmavirkjun sem gangsett var í lok árs 2017.

Á síðustu áratugum hefur stóriðja aukist mikið hér á landi en hér hafa risið þrjú álver; í Straumsvík, á Grundartanga og í Reyðarfirði. Á Grundartanga er auk þess rekin járnblendiverksmiðja. Tvö kísilver hafa verið reist, annað í Helguvík á Reykjanesskaga en hitt á Bakka við Húsavík. Kísilverið í Helguvík var gangsett í lok árs 2016 en rekstur stöðvaður vegna mengunar á haustmánuðum 2017 (Umhverfisstofnun 2017). Auk þess sem hér hefur verið nefnt geta önnur umsvif manna haft mengandi áhrif á umhverfið. Má þar nefna brennslu jarðefnaeldsneytis vegna umferðar á landi, sjó og í lofti, efnanotkunar í landbúnaði og iðnaði og frá ýmiss konar málmiðnaði.

Niðurstöður rannsókna á mosa árin 1990 og 1995 bentu til þess að styrkur nokkurra þungmálma við álverið í Straumsvík, einkum As, Pb, Hg og Ni, væri þar hærri en víðast annars staðar á landinu (Rühling o.fl. 1992, Rühling og Steinnes 1998). Í samráði við Íslenska álfélagið sem þá rak álverið í Straumsvík var árið 2000 ákveðið að taka sýni á fleiri stöðum til að fá nákvæmari upplýsingar um styrk og dreifingu efna við álverið (Sigurður H. Magnússon 2002a). Í samráði við Reyðarálf hf. var þá einnig ákveðið að taka nokkur sýni í nágrenni fyrirhugaðs álvers í Reyðarfirði (Sigurður H. Magnússon 2002b) og voru þessar viðbótarrannsóknir hugsaðar sem upphaf vöktunar á styrk þungmálma í firðinum. Árið 2005 hófst einnig samskonar vöktun í nágrenni verksmiðjanna á Grundartanga í samráði við Norðurál og Elkem Ísland. Sumarið 2010 var bætt við fáeinum sýnatökustöðum við jarðvarmavirkjanirnar í Svartsengi og við Hellisheiði til að fá betri upplýsingar um styrk efna í mosa í nágrenni virkjananna. Að ósk Landsvirkjunar voru þá einnig tekin sýni við Bjarnarflag og Þeistareyki en í nágrenni jarðhitasvæðanna hafði sýnum ekki verið safnað áður.

Árið 2013 óskaði bæjarstjórn Hafnarfjarðar í samráði við heilbrigðiseftirlit Hafnarfjarðar- og Kópavogssvæðis eftir að Náttúrufræðistofnun Íslands kannaði sérstaklega styrk nokkurra efna í mosa í og við íbúðabyggðina á Völlum í Hafnarfirði en suðaustur af álverinu í Straumsvík hafði styrkur nokkurra efna mælst hlutfallslega hár, einkum Pb og Zn en einnig Cd, Cr og Cu (Sigurður H. Magnússon 2013). Haustið 2013 voru því tekin sýni á nýjum stöðum til að fá fyllri upplýsingar um styrk og dreifingu efna á þessu svæði (Sigurður H. Magnússon 2014). Í samráði við bæjarstjórn Hafnarfjarðar voru sýni tekin þar á sömu stöðum sumarið 2015 til greiningar á þungmálmum og brennisteini.

Árið 2015 var sýnatökustöðum enn fjölgað. Að ósk kísilvers PCC á Bakka við Húsavík hófst vöktun með mælingum á mosa í nágrenni versins. Þá samþykkti Kísilverið United Silicon í Helguvík að taka þátt í vöktun með mælingum á mosa í nágrenni við verið og það sama gerði HS Orka um vöktun við virkjanir fyrirtækisins á Reykjanesskaga.

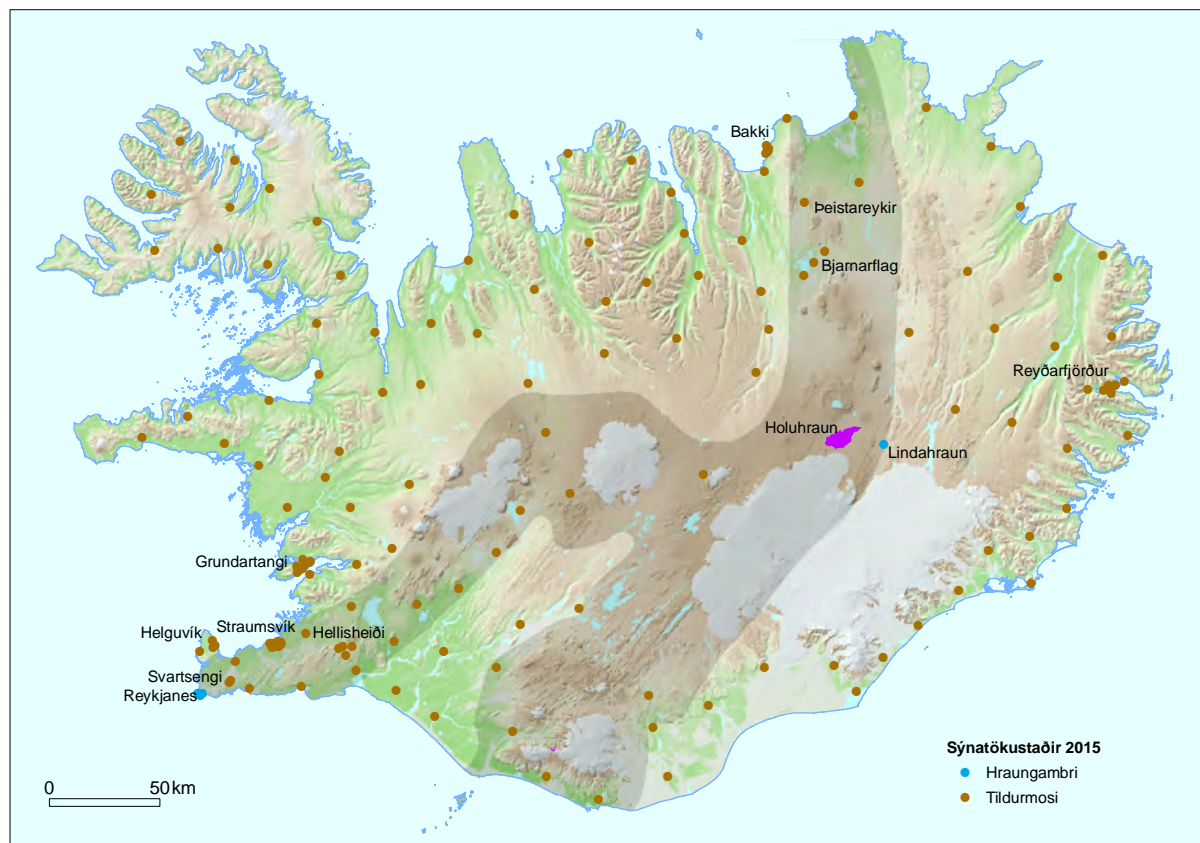
Megintilgangur þeirra rannsókna sem fjallað er um í þessari skýrslu er að lýsa dreifingu þungmálma og brennisteins hér á landi, bæði á landsvísu og við einstakar líklegar uppsprettur, og kanna breytingar sem orðið hafa með tíma frá því að mælingar hófust árið 1990. Einnig að kanna áhrif eldgossins í Holuhrauni norðan Vatnajökuls, sem hófst í lok ágúst 2014 og lauk í febrúar 2015, á styrk efna í mosa og mosaskemmdir.

2 RANNSÓKNASVÆÐI

2.1 Landið í heild

Rannsókn á styrk efna í mosa nær til meginhluta landsins en leitast var við að fá upplýsingar um styrk sem víðast. Hálandið er þó að mestu undanskilið því þar er lítið af tildurmosa (Náttúrufræðistofnun Íslands a) auk þess sem land er þar víða erfitt yfirferðar til söfnunar. Rannsóknarsvæðið er því að stórum hluta á láglandi en meira en helmingur allra sýna hefur verið tekin neðan 100 m hæðar og aðeins fimm sýnatökustaðir eru ofan við 500 m hæðarmörk. Umhverfisaðstæður eru misjafnar eftir stöðum, t.d. hvað varðar úrkomu, hita, berggrunn og gróður. Sérstaklega skal á það bent að mikill munur er á áfoki, einkum innan og utan gosbeltisins (1. mynd).

Við upphaf vöktunarinnar árið 1990 var tildurmosa safnað á 106 stöðum. Með árunum hefur vöktunin aukist og náð til fleiri svæða. Sýnatökustöðum hefur því fjölgað og voru þeir orðnir 163 árið 2015. Þá voru tekin sjö aukasýni af hraungambra (*Racomitrium lanuginosum* (Hedw.) Brid.) til samanburðar við tildurmosa á jafnmörgum stöðum svo heildarfjöldi sýna það árið varð 170 (1. tafla).



1. mynd. Sýnatökustaðir mosa sumarið 2015. Brúnir punktar tákna tildurmosa en bláir hraungambra. Skyggð svæði sýna gosbelti. Holuhraun er merkt sem rauður fláki.

1. tafla. Yfirlit yfir fjölda mosasýna sem tekin hafa verið á einstökum svæðum frá upphafi rannsókna árið 1990; grundvallarsýni (G), við iðnaðarsvæðin þrjú á Grundartanga, í Reyðarfirði og í Straumsvík (I), við jarðvarmavirkjanir (J) og kísilver (K).

Svæði	Tildurmosi						Hraungambri (aukasýni)	
	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2015	2015
Grundvallarsýni um land allt (G)	99	104	102	104	104	103	1	
Grundartangi (I)	3	3	4	11	12	10	1	
Reyðarfjörður (I)	1	1	9	11	11	11		
Straumsvík (I)	2	1	11	11	11	10	2	2
Vellir Hafnarfirði (I)						5		2
Hellisheiði (J)	1	1	1	1	4	4		3
Þeistareykir/Bjarnarflag (J)					3	3		
Svartsengi (J)					2	2		
Reykjanes (J)							3	
Bakki við Húsavík (K)						5		
Helguvík (K)						3		
Samtals	106	110	127	138	147	156	7	7

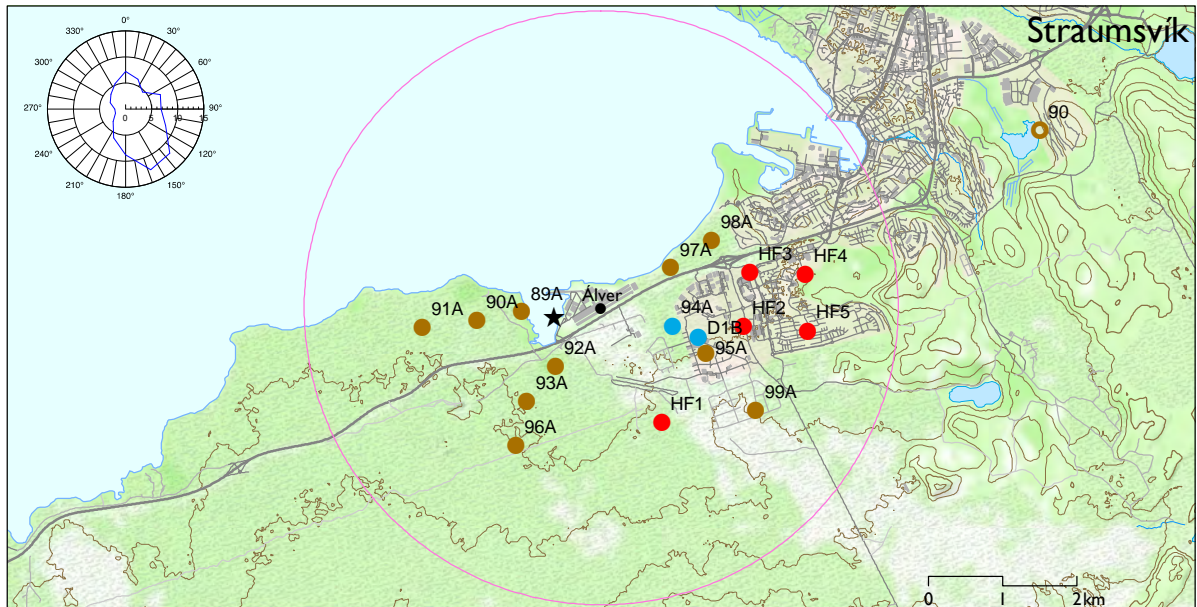
Þegar söfnun mosa hófst sumarið 2015 var ljóst að við eldgosíð í Holuhrauni hafði mikið af brennisteini borist út í andrúmsloft en gosíð hófst 31. ágúst 2014 og stóð til 27. febrúar 2015 (Gíslason o.fl. 2015). Því var áhugavert að kanna hvort gosíð hefði haft áhrif á styrk brennisteins í mosa og mögulega á styrk fleiri efna. Gosstöðvarnar eru í um 700 m hæð en á þeim slóðum er gróður lítil og strjáll. Við fyrri mælingar höfðu sýni ekki verið tekin í nágrenni svæðisins. Þeir staðir sem næstir liggja eru í 45–60 km fjarlægð (1. mynd). Til þess að freista þess að ná í sýni nær gosstöðvunum var farin sérstök söfnunarferð upp á hálendið austan við Jökulsá á Fjöllum og leitað að tildurmosa. Hvergi fannst nægjanlega mikið af mosanum til að unnt væri að safna honum. Í Hvannalindum er gróður einna mestur á þessu svæði. Þrátt fyrir talsverða leit fannst tildurmosi þar ekki. Í Lindahrauni var hins vegar tekið sýni af mosanum hraungambra um 25 km austan við gosstöðvarnar og er staðurinn sá sem næst þeim liggur (1. mynd).

2.2 Sérstök vöktunarsvæði

2.2.1 Straumsvík og Vallahverfi

Í Straumsvík og nágrenni hefur iðnaður verið að byggjast upp um alllanga hríð. Álverið í Straumsvík, sem er elst álvera á Íslandi, var vígt árið 1970 og var framleiðslan í byrjun um 33.000 tonn á ári. Verið var síðan stækkað og árið 1980 var framleiðslan komin í 100.000 tonn. Á árunum 1995–1997 var álverið stækkað enn frekar og var framleiðslugetan aukin í 162.000 tonn (Rio Tinto Alcan). Árið 2009 var framleiðsla álversins í Straumsvík komin í um 190.000 tonn (Sjálfbærnisráðgjafi ISAL 2011) og árið 2014 var framleiðslan 206.000 tonn (Grænt bókhald 2014: Rio Tinto Alcan á Íslandi). Losun frá álverinu samanstendur að stórum hluta af flúoríði, SO₂, ryki og CO₂ (Guðrún Þóra Magnúsdóttir 2017).

Frá því að álverið tók til starfa hafa aðstæður breyst mikið í nágrenni versins. Þar hefur margs konar iðnaði verið komið á fót, aðallega austur af álverinu. Þar starfa nú mörg fyrirtæki, lítil, meðalstór og stór á íslenskan mælikvarða; í rafíðnaði, endurvinnslu, plastiðnaði, trésmiðjur og ýmiss konar þjónustufyrirtæki. Mest er þó um fyrirtæki í bílgreinum og málmíðnaði (Páll Stefánsson, munnlegar upplýsingar 20. apríl 2018). Á Völlum austur af álverinu hefur íbúðabygging aukist mikið, einnig hefur verið ráðist í gatnagerð á svæði ofan við Álfhelli í



2. mynd. Yfirlit yfir sýnatökustaði við álverið í Straumsvík og á Völlum í Hafnarfirði árið 2015. Brúnir og rauðir punktar merkja staði þar sem tildurmosa var safnað en bláir sýni af hraungambra. Rauðir tákna staði þar sem mosa var fyrst safnað haustið 2013. Opinn hringur er aflagður staður. Sýnd er hlutfallsleg tíðni vindstefnu árin 2013 og 2015 vestan við álverið (svört stjarna). Hringferill afmarkar það svæði sem er innan 4 km frá miðju álvers.

Kapelluhrauni en sumarið 2015 var ekki farið að byggja á því svæði. Þá má einnig nefna að í Hvaleyrarhrauni norðaustan álversins og norðan Reykjanesbrautar hefur land einnig breyst talsvert en golfvöllur var þar stækkaður út á hraunið (Sigurður H. Magnússon 2014). Vegna allra þessara framkvæmda hefur land á hrauninum austan Straumsvíkur, þ.e. í Kapelluhrauni og Hvaleyrarhrauni, breyst mikið á undanförunum áratugum.

Þegar vöktun þungmálma hófst árið 1990 var tekið eitt mosasýni við álverið í Straumsvík (90A) (2. mynd). Árið 2000 voru tekin 10 sýni til viðbótar við álverið á fjórum mælisniðum sem lögð voru út frá því. Næst álverinu var mjög lítið um tildurmosa og því var ekki unnt að safna nær því en í 1000–1100 m fjarlægð. Miðað var við að taka sýni í 1100, 1700 og 2500 m fjarlægð. Það reyndist ekki mögulegt í öllum tilvikum því að mosinn fannst ekki alls staðar þar sem ætlunin var að safna honum. Sýni voru því tekin eins nálægt fyrirhuguðum stað og unnt var. Sýnatökustaðirnir 10 voru allir valdir í samráði við Guðrúnu Þóru Magnúsdóttur, starfsmann álversins. Við endurtekna sýnatöku árin 2005, 2010 og 2015 voru sýni tekin á sömu stöðum. Sumarið 2015 var tildurmosi algerlega horfinn á sýnatökustað 94A, þess í stað var tekið sýni af hraungambra sem þar er algengur. Auk þessa var tekið eitt sýni (DB1) af hraungambra á nýjum stað um 100 m suðvestan við athafnasvæði málmvinnslunnar Furu en á því svæði hefur orðið vart við miklar skemmdir á mosanum (Náttúrufræðistofnun Íslands b). Tildurmosi fannst þar hins vegar ekki.

Á Völlum í Hafnarfirði og nágrenni voru sýni tekin sumarið 2015 á sömu stöðum og haustið 2013 (2. mynd). Fjögur þeirra (HF2–HF5) eru innan íbúðabyggðarinnar en eitt (HF1) er utan hennar um 300 m sunnan við kvartmílubrautina í Kapelluhrauni. Staðsetning sýnatökustaða var ákvörðuð af starfsmönnum Hafnarfjarðarbæjar haustið 2013 með það í huga að fá sem gleggstar upplýsingar um styrk þungmálma við iðnaðarsvæðið í Hellnahrauni (1. áfanga) og innan íbúðabyggðarinnar á Völlum (Sigurður H. Magnússon 2014).

Vegna aukinnar byggðar og mikilla umsvifa manna í nágrenni við álverið í Straumsvík hefur þeim sýnum fækkað sem uppfylla þau skilyrði sem sett eru við vöktun á landsvísu og nothæf teljast fyrir vöktun í evrópska vöktunarverkefninu (ICP Vegetation), t.d. hvað varðar fjarlægð frá vegum og byggð (sjá aðferðalýsingu í kafla 3.1).

2.2.2 Grundartangi

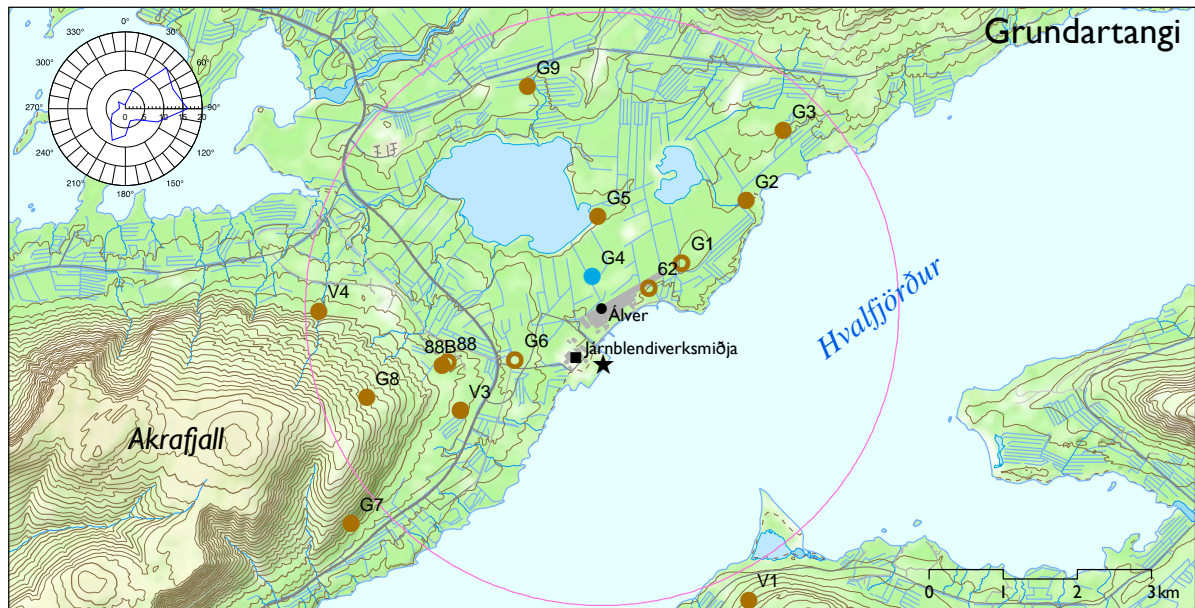
Á Grundartanga hefur verið byggður upp talsverður iðnaður og er þar helst að nefna kísilmálmverksmiðju Elkem Ísland (áður Íslenska járnblendifélagið) og álver Norðuráls.

Kísilmálmverksmiðjan var gangsett árið 1979. Þar er framleitt kísiljárn (e. *ferrosilicon*), FeSi75, sem inniheldur um 76% kísil (Si) og 22% járn (Fe), en afgangurinn er ál (Al), kalsín (kalsíum; Ca) og ýmis snefilefni (Jón Hálfðanarson 2003). Í fyrstu voru tveir ofnar í verksmiðjunni og var framleiðslugetan um 60.000 tonn en fljótlega var hún aukin í 72.000 tonn. Þriðji ofninn var svo tekinn í notkun árið 1999 og er framleiðslugeta verksmiðjunnar nú um 120.000 tonn af kísilmálmi (Elkem Ísland). Út í andrúmsloft berast frá verksmiðjunni einkum kísilryk, brennisteinstvíoxíð (SO₂) og koltvíoxíð (CO₂) (Eva Yngvadóttir o.fl. 2016).

Álver Norðuráls á Grundartanga tók til starfa í júní 1998. Framleiðslugeta þess var í fyrstu 60.000 tonn af áli á ári en árið 2001 var hún aukin í 90.000 tonn. Árið 2006 var hún aukin í 220.000 tonn og í 260.000 tonn ári síðar (Norðurál). Árið 2009 var framleiðslan komin í 278.000 tonn (Grænt bókhald 2010: Norðurál Grundartangi ehf.) og árið 2014 var hún um 300.000 tonn (Grænt bókhald 2014: Norðurál). Þær lofttegundir sem einkum myndast við framleiðsluna eru SO₂, CO₂, flúorsambönd og auk þess ryk. Einnig losna kolflúorsambönd í litlu magni (Eva Yngvadóttir o.fl. 2016).

Á Grundartanga er einnig rekið iðnfyrirtækið Kratus sem hóf starfsemi í nóvember 2012 og vinnur ál úr álgjalli frá álfyrirtækjum. Árið 2015 endurvann Kratus um 1.600 tonn af áli úr um 3.300 tonnnum af gjalli (Eva Yngvadóttir o.fl. 2016). Árið 2013 hóf fyrirtækið GMR starfsemi á Grundartanga en það endurvinnur notaða straumteina og tindaefni (Eva Yngvadóttir o.fl. 2016). Árið 2015 voru 4.000 tonn endurunnin. Losun í andrúmsloft samanstendur aðallega af svifryki og SO₂. Á Grundartanga eru einnig vélsmiðjur og málmíðnaðarfyrirtæki. Þá má einnig nefna umsvif vegna hafnarinnar og flutningastarfsemi sem henni tengist (Magnús Freyr Ólafsson, munnlegar upplýsingar 19. apríl 2018).

Við upphaf mælinga á þungmálmum árið 1990 voru sýni tekin á fjórum stöðum á Grundartanga og nágrenni, þ.e. við Eyri í Kjós (V1), austan við Kjalardal (V4), á Katanesi (62) og við Galtalæk (3. mynd). Árið 2005 var ákveðið í samráði við starfsmenn iðjuveranna á Grundartanga að fjölga sýnum til þess að fylgjast betur með styrk efna og hefja vöktun á svæðinu. Tveir af fyrri sýnatökustöðum höfðu þá skemmst, þ.e. staðurinn við Katanes sem var kominn undir byggingar álversins og sá við Galtalæk var kominn undir nýjan veg. Árið 2005 voru því valdir níu nýir vöktunarstaðir, þ.e. G1–G8 og nýr staður við Galtalæk (V3). Árið 2010 var síðan bætt við einum stað við eyðibýlið Fornabæ (G9) norðvestur af Galtarholti. Árið 2015 var ekki unnt að safna á öllum þessum stöðum. Staður G1 var þá kominn undir vatn því þar var verið að endurheimta votlendi. Á stöðum G4 og G6 var tildurmosi algerlega horfinn og því ekki hægt að taka þar sýni. Á stað G4 var í staðin tekið sýni af hraungambra. Tildurmosi var einnig horfinn á stað 88 við Mörk. Þess í stað var tildurmosa safnað á nýjum stað nokkru vestar (88B). Árið 2015 voru sýnatökustaðir þar sem tildurmosa var safnað á svæðinu við Grundartanga því aðeins 10 að tölu (3. mynd).



3. mynd. Yfirlit yfir sýnatökustaði mosa við iðnaðarsvæðið á Grundartanga árið 2015. Brúnir punktar merkja tildurmosa en blár hraungambra. Aflagðir staðir eru sýndir sem opnir hringir. Sýnd er hlutfallsleg tíðni vindstefnu árin 2013–2015 við Grundartangahöfn (svört stjarna). Hringferill afmarkar það svæði sem er innan 4 km frá miðju álvers.

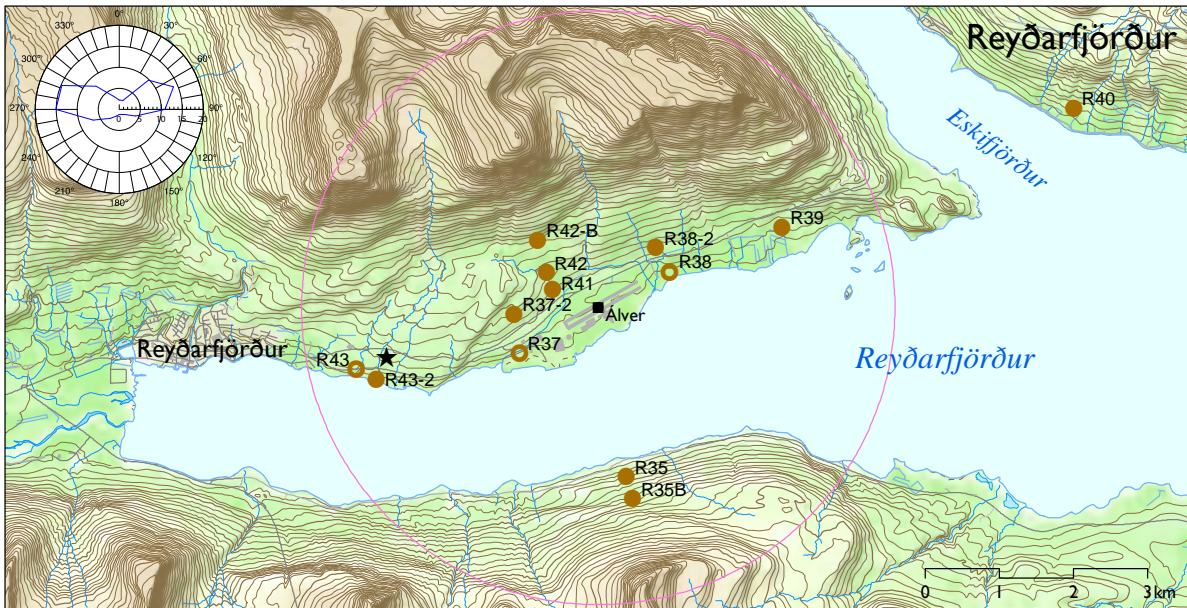
2.2.3 Reyðarfjörður

Yngst álveranna, en jafnframt það stærsta, er álver Alcoa Fjarðaáls í Reyðarfirði sem tók til starfa í apríl 2007. Það ár voru framleidd þar 35.000 tonn af áli (Arnór Þ. Sigfússon 2008). Ári síðar var álverið komið í fullan rekstur. Árið 2009 var álframleiðsla um 350.000 tonn (Grænt bókhald 2009: Alcoa Fjarðaál) og árið 2014 voru framleidd í verinu um 336.000 tonn (Grænt bókhald 2014: Alcoa Fjarðaál).

Í Reyðarfirði er fylgst með loftgæðum og ýmsir efnabættir vaktaðir (Elín Guðmundsdóttir o.fl. 2016) en framleiðsla áls fylgir losun ýmissa efna út í náttúruna svo sem á flúoríði, SO_2 , ryki og CO_2 (Grænt bókhald 2015: Alcoa Fjarðarál).

Við álverið í Reyðarfirði er ýmis starfsemi önnur en álverið sjálft sem hugsanlega getur haft einhver mengandi áhrif. Þarna er ein stærsta útskipunarhöfn landsins og skipakomur tíðar. Á hafnarsvæðinu hefur verið rekin malbikunarstöð tímabundið að sumarlagi og slökkvilið Fjarðabyggðar er þar einnig með reglulegar æfingar. Auk þess eru við álverið fyrirtæki sem þjónusta það svo sem vélaverkstæði (VHE og Launafl) (Guðmundur Sveinsson, munnlegar upplýsingar 24. apríl 2018). Í þéttbýlinu við Reyðarfjörð er nokkur iðnaðarstarfsemi af svipuðum toga. Má þar nefna endurvinnslufyrirtækið Hringrás, steypustöð og bifreiðaverkstæðið Bíley sem eru öll vestarlega í bænum og Launafl sem rekur fjölbreytta starfsemi í austurhlutanum, svo sem málmstöðju, vélaverkstæði, bifreiðaverkstæði og blikksmiðju (Helga Hreinsdóttir og Lára Guðmundsdóttir, munnlegar upplýsingar 27. apríl 2018).

Árin 1990 og 1995 var mosa safnað á einum stað í Reyðarfirði, þ.e. við Seljateig sem er um 10 km vestan við álverið sem nú er risið. Árið 2000 var ákveðið að fjölga sýnum og hefja kerfisbundna vöktun á þungmálmum í firðinum. Við val á stöðum var miðað við líklega dreifingu efna frá álveri og að þau spönnuðu sem stærstan fallanda út frá því (4. mynd). Allir sýnatökustaðir voru valdir í samráði við Valgeir Kjartansson, þáverandi starfsmann Reyðaráls hf.



4. mynd. Yfirlit yfir sýnatökustaði tildurmosa við álverið í Reyðarfirði árið 2015. Opnir hringir tákna aflagða staði. Sýnd er hlutfallsleg tíðni vindstefnu árin 2013–2015 á veðurstöð 2 (svört stjarna). Hringferill afmarkar það svæði sem er innan 4 km frá miðju álvers.

Sýni voru tekin á tveimur sniðum (4. mynd). Annað lá frá fjarðarbotni og út með firði en hitt hornrétt á það á móts við fyrirhugað álver. Árið 2000 voru tekin sex sýni á langsníðinu en þrjú á þversniðinu. Þegar sýni voru tekin árið 2005 var bygging álversins hafin og höfðu þá þrjár staðir skemmst vegna framkvæmda. Tveir þeirra (R37 og R38) voru nálægt verinu en einn hafði farið undir veg (R43). Í þeirra stað voru valdir nýir staðir (R43-2, R37-2 og R38-2) og tveimur bætt við, öðrum sunnan fjarðar (R35B) en hinum norðan (R42-B). Árið 2005 voru sýnatökustaðir í firðinum því 11 og var sýnataka þar endurtekin bæði 2010 og 2015.

2.2.4 Jarðvarmavirkjanir

Við jarðvarmavirkjanirnar á Hellisheiði, í Bjarnarflagi, Svartsengi, á Reykjanesi og við jarðhitasvæðið á Þeistareykjum hafa verið tekin nokkur mosasýni. Söfnun á þessum stöðum hefur ekki verið eins umfangsmikil og við álverin þrjú og hefur víðast hvar staðið í skamman tíma.

Hellisheiðarvirkjun. Við Kolviðarhól, sem er í nágrenni virkjunarinnar, hefur sýni (1) verið tekið frá upphafi mælinga árið 1990 (5. mynd). Sumarið 2010 voru sýni tekin á þremur stöðum til viðbótar í nágrenninu, þ.e. við Hverahlíð (H1), Skarðsmýri (H2) og Svínahraun (H3). Árið 2015 voru sýni tekin á öllum þessum stöðum en vegna mistaka í efnamælingu þurfti að taka ný sýni á stöðum H1–H3 og var það gert 2. júní 2016.

Hellisheiðarvirkjun tók til starfa haustið 2006 og framleiddi í byrjun um 90 MW af raforku. Hún var síðan stækkuð og árið 2008 var uppsett afl hennar 213 MW. Árin 2011–2014 var uppsett afl virkjunarinnar 303 MW (Einar Gunnlaugsson 2015).

Losun frá Hellisheiðarvirkjun samanstendur að stórum hluta af H_2S og CO_2 . Árin 2007–2014 var losun brennisteinsvetnis frá Hellisheiðarvirkjun breytileg bæði eftir stöðum og árum (1. viðauki). Frá kæliturenum við aðalhús virkjunarinnar var losun á H_2S mest árið 2010, eða 13.600 tonn. Frá þeim tíma hefur dregið úr losun frá virkjuninni og var hún árið 2014 komin niður í 8.484 tonn, miðað við losun frá kæliturenum við Aðalhús og í Sleggjubeinsdal. Svipað hefur átt sér stað

með losun H_2S frá borholum en á þessu tímabili var hún mest árið 2008, eða 1.681 tonn, en var komin niður í 32 tonn árið 2014 (1. viðauki).

Svartsengi. Við jarðvarmavirkjanirnar í Svartsengi hafa sýni verið tekin á tveimur stöðum frá 2010 (6. mynd). Annars vegar norðvestan við Sýlingarfell (SV1) og hins vegar við Baðsvelli (SV2) sunnan við virkjanirnar.

Jarðvarmavirkjanirnar í Svartsengi, sem framleiða bæði hitaveituvatn og raforku, hafa verið byggðar upp í áföngum á árunum 1977–2008 (HS Orka). Losun frá þeim samanstendur að stórum hluta af CO_2 og H_2S . Árið 2009 var gasútbástur virkjananna rúmlega 43.400 tonn af CO_2 en 844 tonn af H_2S (Ívar Baldvinsson o.fl. 2011). Árið 2014 var losun þessara efna 66.727 tonn af CO_2 og 1.136 tonn af H_2S (Marín Ósk Hafnadóttir, munnlegar upplýsingar 28. júní 2018).

Bjarnarflag. Í Mývatnssveit, ekki mjög fjarri jarðhitasvæðinu í Bjarnarflagi, voru sumarið 2010 tekin tvö sýni; annað (B1) norðvestan við Hverfell en hitt (B2) austan við Dalfjall norðan við Námaskarð. Sýnataka var svo endurtekin sumarið 2015. Frá 1990 hefur sýni einnig verið tekið við Skútustaði (sýni 58) u.þ.b. 9 km suðvestan við Bjarnarflag (7. mynd).

Virkjunin í Bjarnarflagi sem er 2–3 MW hefur verið rekin frá 1969, fyrst af rekstarfélagi Laxárvirkjunar en nú af Landsvirkjun. Uppi hafa verið áform um að byggja þar nýja og stærri virkjun 45–90 MW að afli (Wikipedia 2013, Trausti Hauksson 2015).

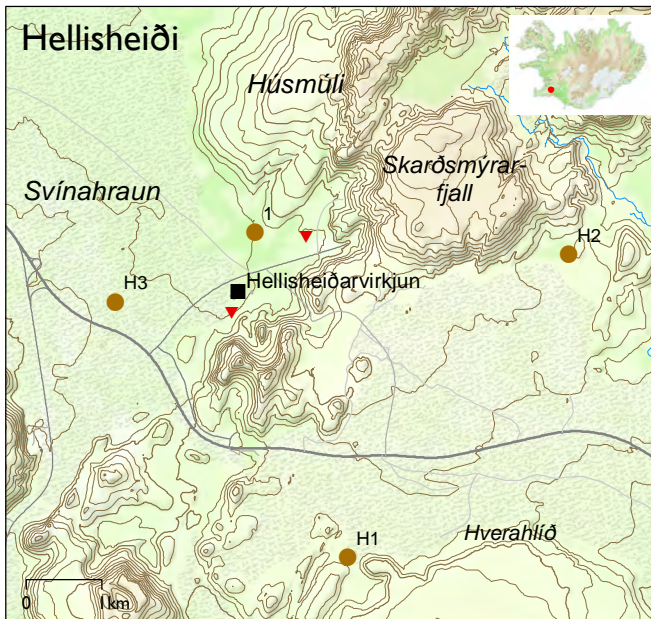
Losun efna í andrúmsloft frá virkjuninni í Bjarnarflagi er að stærstum hluta H_2S og CO_2 . Árið 2014 var losun H_2S 447 tonn en af CO_2 voru losuð um 296 tonn (Trausti Hauksson 2015).

Peistareykir. Við Peistareyki var tekið eitt sýni (T1) árið 2010 suðvestan við Bæjarfjall (8. mynd). Ætlunin var að taka þar fleiri sýni til að fá upplýsingar um styrk efna í mosa á þessum slóðum en tildurmosi er þar mjög sjaldgæfur og því var ekki safnað á fleiri stöðum. Sýnataka á þessum eina stað var endurtekin árið 2015.

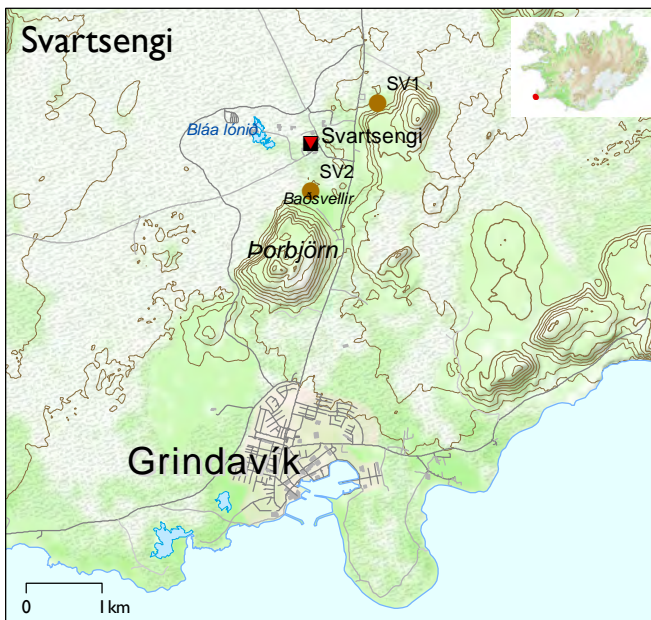
Undirbúningur að byggingu jarðvarmavirkjunar við Peistareyki hófst 1999 en þá var fyrsta rannsóknarholan boruð. Framkvæmdir hófust við byggingu virkjunarinnar í maí 2015 (Landsvirkjun 2016).

Reykjanesvirkjun. Við Reykjanesvirkjun voru tekin mosasýni í fyrsta sinn sumarið 2015. Ætlunin var að safna þar tildurmosa en í nágrenni virkjunarinnar fannst hvergi nægilega mikið af honum til sýnatöku. Í hans stað voru tekin sýni af hraungambra sem finnst þarna nokkuð víða. Á hverasvæðinu við Gunnuhver og á allstóru svæði utan þess var talsvert af dauðum mosa ýmissa tegunda sem rekja má til aukins yfirborðshita í kjölfar virkjunar jarðhita á svæðinu (Kristbjörn Egilsson o.fl. 2008, sjá einnig Skipulagsstofnun 2008). Alls voru tekin þrjú sýni af hraungambra, eitt við Eldborg dýpri (RN1) vestur af virkjuninni, annað (RN2) við rætur Skálafells suður af Gunnuhver og það þriðja (RN3) sunnan vegar norðaustur af Gunnuhver (9. mynd).

Samkvæmt skýrslu um losun efna frá jarðvarmavirkjunum var losun CO_2 frá Reykjanesvirkjun um 24.650 tonn árið 2009 en 766 tonn af H_2S (Ívar Baldvinsson o.fl. 2011). Árið 2014 voru samsvarandi tölur 26.677 tonn og 941 tonn (Marín Ósk Hafnadóttir, munnlegar upplýsingar 28. júní 2018).



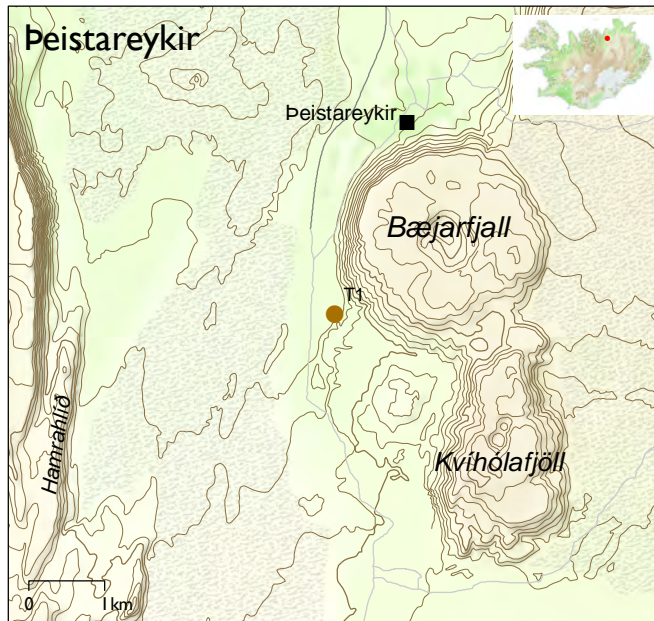
5. mynd. Sýnatökustaðir tildurmosa í nágrenni Helliðarvirkjunar. Rauðir þríhyrningar sýna staðsetningu kæliturna við Aðalhús og í Sleggjubeinsdal. Losun efna og fjarlægð til sýnatökustaða miðast við syðsta kæliturn í Aðalhúsi (N64,03460, W-21,40168) (Bergur Sigfússon, munnleg heimild 25. júní 2018).



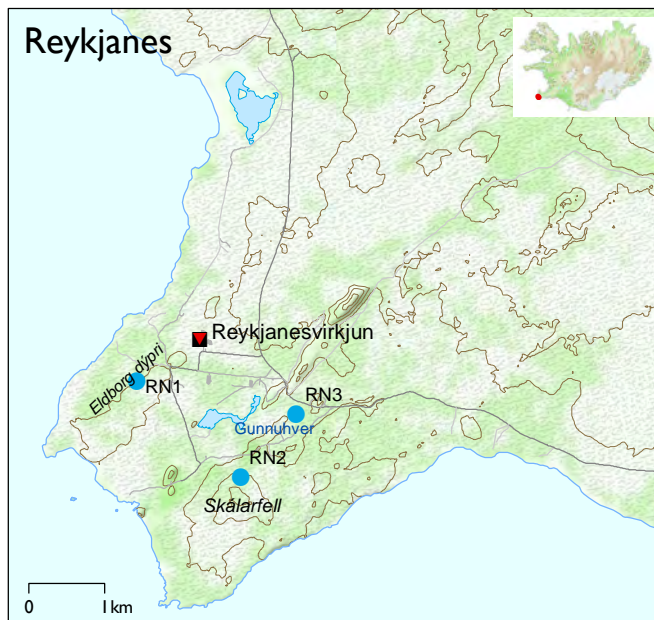
6. mynd. Sýnatökustaðir tildurmosa við Svartsengi árið 2015. Rauður þríhyrningur táknar þann stað þar sem losun efna fer að mestu fram (Marín Ósk Hafnadóttir, munnleg heimild 6. júní 2018).



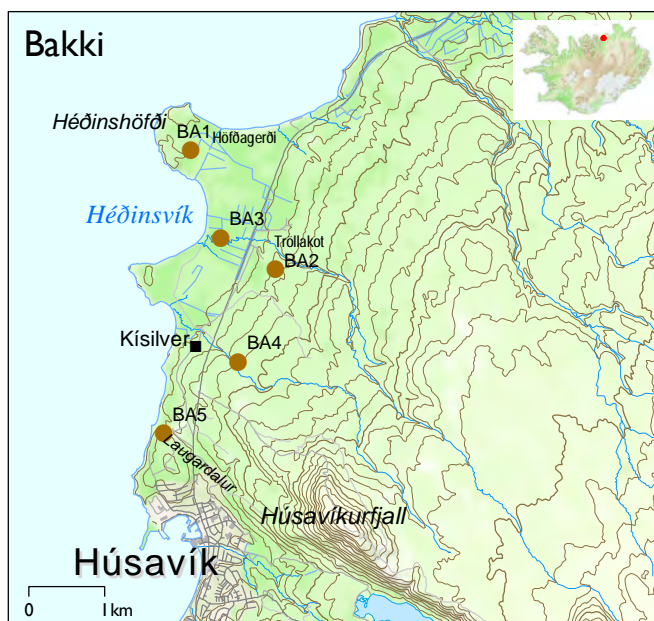
7. mynd. Sýnatökustaðir tildurmosa í nágrenni Bjarnarflags árið 2015. Losun efna miðast við gufuafsstöðina í Bjarnarflagi (N65,64333; W-16,84625) (Ásgerður K. Sigurðardóttir, munnleg heimild 6. júní 2018).



8. mynd. Sýnatökustaður tildurmosa við Peistareyki árið 2015.



9. mynd. Sýnatökustaðir mosans hraungambra í nágrenni Reykjanesvirkjunar árið 2015. Losun efna er að megninu til úr stöðvarhúsi virkjunarinnar (rauður þríhyrningur) (Marín Ósk Hafnadóttir, munnleg heimild 6. júní 2018).



10. mynd. Sýnatökustaðir tildurmosa við kísilverið á Bakka við Húsavík árið 2015.



11. mynd. Sýnatökustaðir tildurmosa við kísilverið í Helgavík árið 2015.

2.2.5 Kísilver

Kísilverið á Bakka. Haustið 2015 voru tekin fimm sýni af tildurmosa í nágrenni kísilvers PCC sem þá var í byggingu á Bakka við Húsavík (10. mynd). Var þessi sýnataka hugsuð sem upphaf vöktunar á þungmálum og brennisteini í mosa við kísilverið sem þá var í byggingu. Norður og norðaustur af kísilverinu voru tekin þrjú sýni, eitt (BA1) suðvestur af eyðibýlinu Höfðagerði á Héðinshöfða, annað (BA2) uppi í hæðunum austan Þjóðvegur skammt frá eyðibýlinu Tröllakoti og það þriðja (BA3) skammt frá Reyðará, um það bil miðja vegu milli Þjóðvegur og Héðinsvíkur. Þá voru tekin tvö sýni sunnan og suðaustan við kísilverið, annað (BA4) í hlíðunum austan Þjóðvegur norðan við Bakkaá en hitt (BA5) í allmiklum halla mót norðnorðaustri við Laugardal, um 180 m frá sjó.

Kísilverið í Helgavík. Við kísilverið í Helgavík voru tekin þrjú sýni af tildurmosa haustið 2015 (11. mynd). Sýnatakan, var eins og á Bakka, hugsuð sem fyrsta skref í vöktun þungmálma og brennisteins í mosa við kísilverið en það var þá í byggingu og síðar gangsett í nóvember 2016 (Umhverfisstofnun 2016). Eitt sýni (HV1) var tekið vestan við golfvöllinn í Leiru, annað (HV2) skammt frá kirkjugarðinum við Garðskagaveg og hið þriðja (HV3) á Miðnesheiði austan Sandgerðisvegur. Á þessum slóðum er land víða mikið raskað og því reyndist ekki auðvelt að finna heppilega söfnunaraði.

3 AÐFERÐIR

3.1 Söfnun, hreinsun og efnagreining mosasýna

Við söfnun sýna hefur frá upphafi árið 1990 verið fylgt þeim leiðbeiningum sem gefnar hafa verið út um verkefnið (t.d. Harmens 2010). Sýnum er t.d. safnað á opnu landi þar sem áhrifa úrkomu sem fallið hefur af trjám og runnum er lítið. Flestum sýnum hefur verið safnað að sumri eða snemma hausts, eða frá 25. júní til 6. október. Árið 2015 voru nokkur sýni tekin síðar á árinu vegna þess að óskir um sýnatöku bárust seint. Í Helgavík voru sýni tekin 10. október og við Bakka á Húsavík 3. nóvember. Þrjú sýni sem tekin höfðu verið í nágrenni Hellsisheiðarvirkjunar,

þ.e. við Hverahlíð (H1), Skarðsmýri (H2) og Svínahraun (H3) skemmdust við efnagreiningu og því var sýnataka þar endurtekin 2. júní 2016.

Á hverjum sýnatökustað voru tekin 5–10 hlutsýni á um 50×50 m svæði og þeim slegið saman í eitt samsýni (≈2–3 l). Á nokkrum stöðum var það lítið af mosa að nauðsynlegt var að safna á stærra svæði. Árið 2015 var hlutsýnum fjölgað og yfirleitt tekin 10 hlutsýni á hverjum stað. Árin 2010 og 2015 var nokkuð um að mosi væri skemmdur. Þar sem skemmda varð vart voru sýni eingöngu tekin af mosa sem var nokkurn veginn óskemmdur. Við alla sýnatöku var þess gætt að snerta ekki mosann með berum höndum heldur var hönd stungið í plastpoka og mosabrúskur (hlutsýni) tekinn upp. Brúskar voru strax settir í plastpoka og þeim snúið þannig að toppar snéru saman til þess að forðast að jarðvegur spillti sýnum. Fyrstu árin voru sýnatökustaðir merktir á kort og þeim lýst svo hægt væri að finna þá síðar. Eftir að GPS-tæknin kom til sögunnar voru hnit tekin á sýnatökustað, í miðju þess svæðis sem safnað var á. Á hverjum stað var aðstæðum lýst stuttlega, mældur halli lands og hallastefna með einföldum hallamæli (áttavita en síðar síma) og ríkjandi æðplöntutegundir skráðar. Hin síðari ár hafa ljósmyndir verið teknar á hverjum stað. Sýni hafa ávallt verið tekin á sömu stöðum væri þess nokkur kostur. Vegna breytinga á landnýtingu, svo sem vegna nýrra vega, golfvalla, ræktunar, breyttra beitarráttanna, öskufalls (2010) eða vegna þess að mosi fannst ekki lengur var í sumum tilvikum nauðsynlegt að hætta söfnun og/eða taka sýni á nýjum stað.

Við heimkomu voru sýni fryst og geymd þannig fram að hreinsun sem fór fram veturinn eftir sýnatöku. Sýni voru þídd við herbergishita fyrir hreinsun. Sina og lausar agnir voru hreinsaðar frá og vaxtarsproti mosans frá nýliðnu sumari fjarlægður en vaxtarsprotar þriggja ára þar á undan teknir til efnagreiningar. Sprotarnir voru settir í bréfpoka og þurrkaðir við herbergishita. Þurrkuð sýnin voru síðan send til Vistfræðistofnunar háskólans í Lundi í Svíþjóð til efnagreiningar.

Sumarið 2015 voru tekin nokkur sýni af mosanum hraungambra. Sýnataka og meðhöndlun þeirra var gerð með sama hætti og um tildurmosa væri að ræða nema að af hverjum mosasprotu voru teknir 3 cm til greiningar en hraungambri myndar ekki sérstaka ársprotu líkt og tildurmosi.

2. tafla. Yfirlit yfir greiningaraðferðir.

Efni	1990	1995	2000	2005	2010	2015
As		ICP MS	ICP MS	ICP MS	ICP MS	ICP MS
B						ICP MS
Cd	ICP ES	ICP ES	ICP MS	ICP MS	ICP MS	ICP MS
Cr	ICP ES	ICP ES	ICP ES	ICP MS	ICP ES	ICP MS
Cu	ICP ES	ICP ES	ICP ES	ICP ES	ICP ES	ICP ES
Fe	ICP ES	ICP ES	ICP ES	ICP ES	ICP ES	ICP ES
Hg		ICP MS	ICP MS	ICP MS	ICP MS	ICP MS
Ni	ICP ES	ICP ES	ICP MS	ICP MS	ICP ES	ICP ES
Pb	ICP ES	ICP ES	ICP MS	ICP MS	ICP MS	ICP MS
S		ICP ES	ICP ES	ICP ES	ICP ES	ICP ES
Sb						ICP MS
V	ICP ES	ICP ES	ICP MS	ICP MS	ICP ES	ICP ES
Zn	ICP ES	ICP ES	ICP ES	ICP ES	ICP ES	ICP ES

ICP ES: Inductively coupled plasma, emission spectrometry. ICP MS: Inductively coupled plasma, mass spectrometry.

Frá upphafi mosarannsóknanna hefur styrkur Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, V og Zn verið mældur í öllum sýnum (1. tafla). Árið 1995 var magn Co, Mn, Mo, As, Hg og S mælt í 30 sýnum. Frá árinu 2000 hefur styrkur As, Hg og S verið mældur í öllum sýnum. Árið 2015 var bætt við greiningum á B og Sb. Athuga ber að ekki er gerð grein fyrir niðurstöðum mælinga á Co, Mn og Mo í þessari skýrslu. Við efnagreiningu voru sýni fyrst þurrkuð við 40°C og síðan soðin í sterkri saltpéturssýru. Efnagreining fór síðan fram með ICP-MS eða ICP-ES tækni (2. tafla).

3.2 Skemmdir á mosa

Sumarið 2010 voru í fyrsta skipti metnar skemmdir á mosanum skógartildra á sýnatökustöðum en þá hafði nýafstaðið eldgos í Eyjafjallajökli sums staðar valdið skemmdum á mosa (Sigurður H. Magnússon 2013). Vegna mögulegra áhrifa eldgossins í Holuhrauni var ákveðið endurtaka þetta sumarið 2015. Notaðir voru eftirfarandi þrír flokkar:

1. Engar skemmdir – örlitlar eða engar sjáanlegar skemmdir á mosa.
2. Nokkrar skemmdir – mosi greinilega skemmdur, blöð og greinar dökkar líkt og þær hefðu brunnið eða sviðnað. Skemmdir voru allt frá því að vera litlar að umfangi upp í að finnast á nokkrum stöðum á sýnatökusvæði.
3. Miklar skemmdir – mosi greinilega skemmdur á svipaðan hátt eins og í 2. flokki en umfang skemmda meira, þ.e. fleiri og stærri blettir í mosa.

Tekið skal fram að mörk milli 2. og 3. flokks eru ekki greinileg. Meðfylgjandi ljósmyndir sýna í megindráttum mun á flokkunum þremur (12.–14. mynd).

3.3 Styrkur efna í hraungambra og tildurmosa

Við sýnatöku árið 2015 kom í ljós að ekki var mögulegt að safna tildurmosa alls staðar þar sem ætlað var. Hraungambri er hins vegar mun algengari hér á landi og hægt að safna honum víðar. Hraungambri hefur ekki verið notaður við vöktun í evrópska verkefninu en efni í honum hafa hins vegar verið mæld við vöktun í nágrenni Hellisheiðarvirkjunar og Nesjavallavirkjunar (Mutia 2016). Í ljósi þess að munur getur verið styrk efna á milli mosategunda (Folkesson 1979, Carballeira o.fl. 2008) er mikilvægt að fá upplýsingar um tengsl einstakra efna milli tegunda. Til þess að fá einhverja hugmynd um tengslin voru tekin sýni af tildurmosa og hraungambra á sjö stöðum, þ.e. á fjórum stöðum við Straumsvík (95A, 99A, HF1 og HF5) og þremur við Hellisheiðarvirkjun (H1–H3) (2. og 5. mynd). Því miður eru þetta fá sýni og niðurstöður því takmarkaðar. Meginástæða þess að svo fá sýni voru tekin var sú að söfnun var nánast lokið þegar í ljós kom að tildurmosi fannst ekki alls staðar við Straumsvík og hvergi við Reykjanesvirkjun.



12. mynd. Engar skemmdir; tildurmosi án sýnilegra skemmda. Frá Sandvík í Bárðardal. Ljós. Sigurður H. Magnússon, 10. ágúst 2015.



13. mynd. Nokkrar skemmdir; sviðinn blettur í tildurmosa. Straumsvík staður 92A. Ljós. Sigurður H. Magnússon, 4. sept. 2015.



14. mynd. Miklar skemmdir; mikið sviðinn tildurmosi. Frá Reyðarfirði, staður R42-B. Ljós. Sigurður H. Magnússon, 7. ágúst 2015.

4 ÚRVINNSLA

4.1 Bakgrunnsgildi

Til þess að meta bakgrunnsgildi fyrir einstök frumefni var notuð svokölluð 2-sigma-aðferð (Matschullat o.fl. 2000) en það er sama aðferð og notuð var eftir mosasöfnun 2010 og úrvinnslu gagna sem birt var árið 2013 (Sigurður H. Magnússon 2013). Aðferðin byggist á því að fyrst er reiknaður út meðalstyrkur og staðalfrávik fyrir gagnasafn viðkomandi efnis. Öllum gildum sem eru hærri eða lægri en tvær staðalfrávikseiningar frá meðaltali er þá sleppt. Sami útreikningur er þá endurtekinn fyrir þau gildi sem eftir standa. Þetta er síðan endurtekið uns öll gildi liggja innan ± 2 staðalfrávikseininga frá meðaltali. Bakgrunnsgildi er lokameðaltal $+2$ staðalfrávikseiningar fyrir viðkomandi efni (3. tafla).

Við útreikningana var öllum gildum hvers efnis frá öllum árum slegið saman. Þannig fengust 784 gildi fyrir Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, V og Zn en þessi efni hafa verið mæld frá 1990. Fyrir As, Hg og S fengust alls 598 gildi en þau hafa verið mæld frá 1995. Fyrir B og Sb fengust 156 gildi en efnin hafa aðeins verið mæld í sýnum sem safnað var 2015. Aðferðinni var beitt á hvert efni fyrir sig. Eingöngu var miðað við styrk efna í tildurmosa.

4.2 Mengunarstuðull

Fyrir hvert efni var fundinn svokallaður mengunarstuðull MS (e. *contamination factor CF*) samkvæmt skilgreiningum Fernandez o.fl. (2002) en mengunarstuðull er hlutfallið á milli styrks viðkomandi efnis í sýni og bakgrunnsgildis viðkomandi efnis ($MS = \text{styrkur í sýni deilt með bakgrunnsgildi efnis}$). Við mat á mengun var notaður sex flokka kvarði sem Fernandez o.fl. (2002) hafa sett fram:

1. flokkur	$CF \leq 1$	engin mengun (e. <i>no contamination</i>)
2. flokkur	$1 < CF \leq 2$	vísbinding um mengun (e. <i>suspected contamination</i>)
3. flokkur	$2 < CF \leq 3,5$	lítillsháttar mengun (e. <i>slight contamination</i>)
4. flokkur	$3,5 < CF \leq 8$	nokkur mengun (e. <i>moderate contamination</i>)
5. flokkur	$8 < CF \leq 27$	veruleg mengun (e. <i>serious contamination</i>)
6. flokkur	$27 < CF$	mjög mikil mengun (e. <i>extremely serious contamination</i>)

4.3 Kortlagning

Við kortlagningu á styrk efna á landinu voru gögn lesin inn í forritið ArcMap. Punktur með styrk hvers efnis og fyrir hvert ár voru settir í sérstaka skrá og eins konar hæðarlíkan búið til með „Topo2Raster“ í „ArcMap-Spatial Analyst“. Í stað hæðargildis var notaður mældur styrkur frumefnis og var eitt líkan búið til fyrir hvert efni og ár. Útmörk líkansins voru u.þ.b. 50 km frá ystu annesjum. ISN-hnit þeirra voru: vestur 195757, norður 735782, austur 803241 og suður 276994. Stærð myndeyninga í líkönum fyrir landið allt var 1000×1000 m en 100×100 m í líkönum fyrir nærsvæði iðjuvera. Líkönin voru síðan lituð eftir jafngildislínum samkvæmt reiknuðum mengunarstuðlum (3. tafla).

Bent skal á að kortin sýna einungis megindrætti fyrir styrk efna, annars vegar á landsvísu og hins vegar umhverfis helstu iðnaðarsvæðin. Styrkur efna á einstökum sýnatökustöðum er einnig sýndur á kortunum.

4.4 Tölfræðileg úrvinnsla

Samband á milli fjarlægðar frá iðjuverunum á Grundartanga, í Reyðarfirði og í Straumsvík og styrks efna var kannað með línulegri aðhvarfsgreiningu eftir að styrk hafði verið umbreytt með \log_{10} . Þetta var reiknað út fyrir hvert iðjuver og fyrir sýni sem safnað var innan 35 km frá hverju iðjuveri. Væru einhver sýni innan þessa radíuss og jafnframt í minna en 4 km fjarlægð frá öðrum iðjuverum, jarðvarmavirkjunum eða kísilverum var þeim sleppt. Sambandið var reiknað sérstaklega fyrir hvert söfnunarár 1990–2015. Sömu aðferð var beitt við jarðvarmavirkjanir og kísilver en þar var þetta samband kannað fyrir árin 2005, 2010 og 2015.

Breytingar á styrk efna milli ára utan iðnaðarsvæðanna þriggja á Grundartanga, í Reyðarfirði og í Straumsvík (>4 km frá næsta iðjuveri) voru metnar með fjölþáttafervikagreiningu fyrir endurmælingar (e. *MANOVA repeated measures*) á \log_{10} umbreytt gildi. Í þessa greiningu voru eingöngu teknir þeir staðir þar sem mosa hafði verið safnað á sömu stöðum öll árin. Fyrir As, Hg og S er miðað við árin 2000–2015 en fyrir Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, V og Zn 1990–2015. Alls er um 68 staði að ræða.

Breytingar á styrk efna milli ára, 2005, 2010 og 2015, og milli svæða, þ.e. utan iðnaðarsvæðanna (>4 km frá næsta iðjuveri, 100 sýni) og á iðnaðarsvæðunum þremur (≤ 4 km); á Grundartanga (6 sýni), Reyðarfirði (9 sýni) og Straumsvík (10 sýni) voru metnar með fjölþáttafervikagreiningu fyrir endurmælingar (e. *MANOVA repeated measures*) á \log_{10} umbreytt gildi. Í þessa greiningu voru aðeins notuð sýni sem tekin höfðu verið á sömu stöðum endurtekið öll árin (2005, 2010 og 2015) á alls 125 stöðum. Um er að ræða efnin As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Ni, Pb, S, V og Zn. Styrkur B og Sb, sem aðeins voru mæld árið 2015, var borinn saman milli svæða með fervikagreiningu á \log_{10} umbreytt gildi og eingöngu notuð sýni frá sömu stöðum og fyrir hin efnin, alls 125 sýni.

Tengsl milli styrks einstakra efna í tildurmosa og hraungambra voru könnuð með því að reikna út fylgnistuðul (e. *Pearson correlation*) á \log_{10} -umbreytt gildi fyrir þá staði þar sem báðum tegundum hafði verið safnað, alls 7 staðir.

Dreifing og breytingar á styrk efna fyrir landið allt og í næsta nágrenni iðjuvera eru sýndar í skýrslunni á kortum fyrir As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Ni, Pb, S, V og Zn fyrir árin 2005 og 2010 og 2015 og einnig dreifing B og Sb fyrir árið 2015.

Samband styrks efna og skemmda í tildurmosa árið 2015 var kannað með „multiple backward logistic regression“. Fyrir greiningu var skemmdarflokkunum „nokkrar skemmdir“ og „miklar skemmdir“ slegið saman.

Til þess að kanna hvaða efni hefðu svipaða útbreiðslu á landinu árið 2015 var gerð klasagreining á styrk efna í tildurmosa eftir stöðum. Notuð var stigskipt, tvíhliða (e. *two way clustering*) Ward-aðferð og gildi stöðluð við greininguna.

Tölfræðigreiningar voru unnar með forritinu JMP 9.01 frá SAS (SAS Institute Inc. 2010).

3. tafla. Bakgrunnsgildi (MS×1) fyrir einstök frumefni í tildurmosa á Íslandi reiknuð út frá öllum sýnum sem tekin hafa verið árin 1990–2015 reiknuð samkvæmt 2-sigma aðferð. Innan sviga er fjöldi sýna sem liggur að baki útreikningum. Mengunarstuðull (MS) er hlutfallið á milli styrk efnis og bakgrunnsgildis. Mengunarflokkar (engin mengun – mjög mikil mengun) eru samkvæmt tillögum frá Fernandez o.fl. (2002).

	1	MS×1	2	MS×2	3	MS×3,5	4	MS×8	5	MS×27	6			
As (598)		0,16		0,33		0,58		1,32		4,45				
B (156)		4,25		8,50		14,88		34,02		114,81				
Cd (784)		0,087		0,17		0,31		0,70		2,35				
Cr (784)		3,41	Vísbending um mengun	6,83		11,95		27,32		92,20				
Cu (784)	Engin mengun	10,58			21,15	Lítilháttar mengun	37,02		84,61	Veruleg mengun	285,56	Mjög mikil mengun		
Fe (784)		4,991			9,983			17,470			39,932			134,769
Hg (598)		0,05			0,10			0,18			0,42			1,41
Ni (784)		4,73			9,46			16,56			37,85			127,75
Pb (784)		1,59			3,18			5,57			12,73			42,96
S (598)		763			1.526			2.671			6.105			20.603
Sb (156)		0,026			0,05			0,09			0,21			0,70
V (784)		18,56			37,13			64,97			148,50			501,20
Zn (784)		26,32			52,65			92,13			210,58			710,71

5 NIÐURSTÖÐUR

5.1 Bakgrunnsgildi

Bakgrunnsgildi eru eðlilega afar misjöfn fyrir einstök frumefni (3. tafla). Lægstu gildin, mælt í mg/kg af þurrkuðum mosa, eru fyrir antimon (Sb), kvikasilfur (Hg) og kadmín (Cd); undir 0,1 mg/kg en langhæst eru þau fyrir Fe, tæp 5.000 mg/kg.

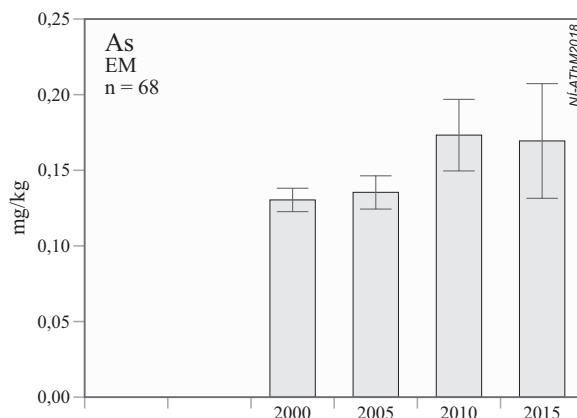
Flest bakgrunnsgildi hafa breyst lítið frá því þau voru reiknuð út byggt á gögnum frá 1990–2010 (Sigurður H. Magnússon 2013). Bakgrunnsgildi fyrir kvikasilfur (Hg) og blý (Pb) hafa lækkað hlutfallslega mest. Bakgrunnsgildi fyrir króm (Cr) hefur hins vegar hækkað nokkuð.

5.2 Styrkur efna utan iðnaðarsvæða og breytingar með tíma

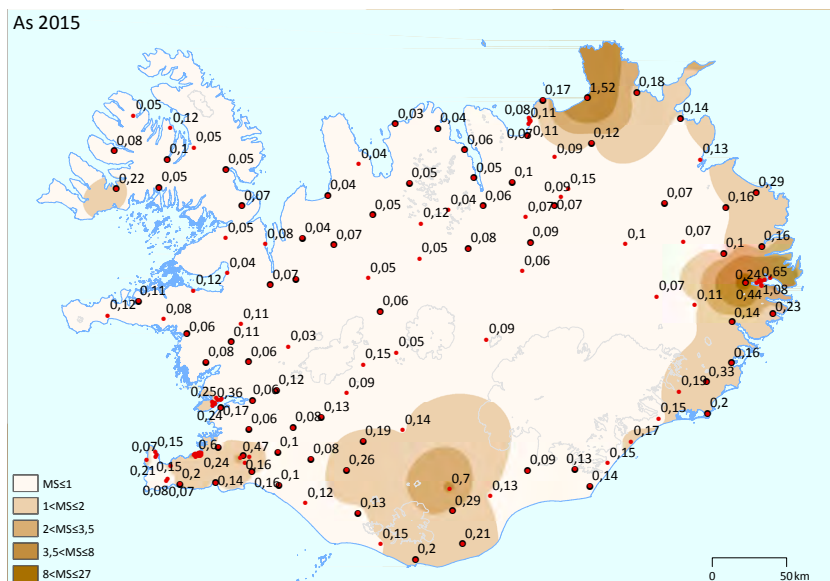
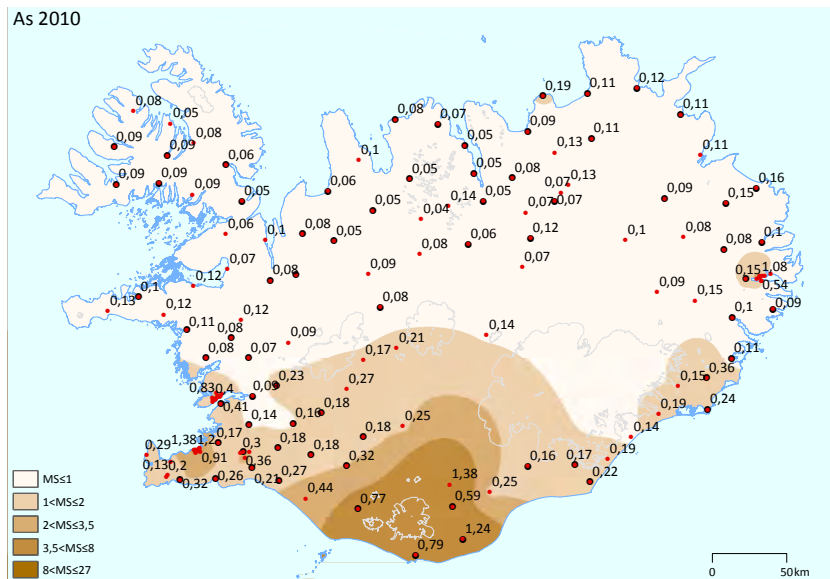
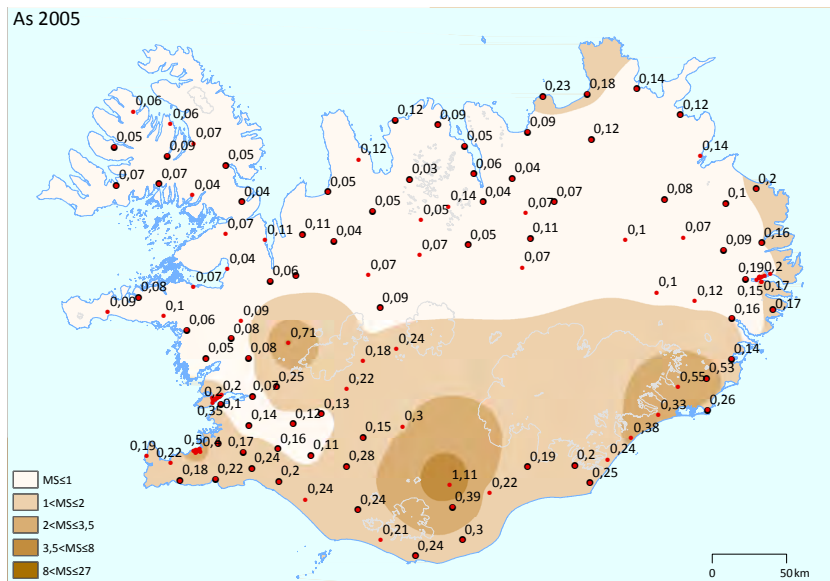
Arsen (As)

Ekki var marktækur munur á styrk arsens á milli ára á þeim sýnum sem tekin voru á sömu stöðum utan iðnaðarsvæðanna þriggja tímabilið 2000–2015 (>4 km), $F(2,00; 134,22) = 2,02$; $p=0,136$ (G-G epsilon 0,67), $n=68$. Að meðaltali var styrkur arsens hæstur árin 2010 og 2015 (0,17 og 0,17 mg/kg) (15. mynd).

Mikill munur var hins vegar á styrk arsens eftir landshlutum (16. mynd). Miðað við árin 2005–2015 var styrkurinn einna lægstur á Snæfellsnesi, Vestfjörðum og á Norðvesturlandi, en langhæstur á Suðurlandi, einkum í



15. mynd. Meðalstyrkur (mg/kg) arsens (As) í tildurmosa 2000–2015, þ.e. utan (>4 km) iðnaðarsvæðanna á Grundartanga, í Reyðarfirði og í Straumsvík. Niðurstöður byggja á sýnum frá 68 stöðum þar sem mosa hefur verið safnað endurtekið frá 2000, sjá 16. mynd. Lóðrétt strik tákna staðalskekku. EM = ekki marktækt.



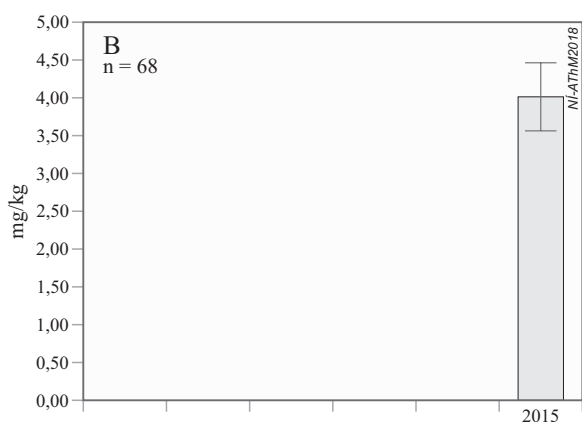
16. mynd. Styrkur (mg/kg) arsens (As) í tildurmosa 2005, 2010 og 2015. Mismunandi litir sýna mengunarflokka byggða á reiknuðum mengunarstuðlum (MS), sjá 3. töflu. Svartir hringir tákna þá 68 staði þar sem sýnataka hefur verið endurtekin frá upphafi árið 1990.

nágrenni við Eyjafjallajökul og Mýrdalsjökul, sérstaklega árið 2010. Þá var styrkur arsens það hár á því svæði að það telst *nokkur mengun*. Styrkur arsens er einnig hlutfallslega hár í nágrenni álvera. Við Reyðarfjörð kemur fram greinileg hækkun frá 2010 til 2015. Athygli vekur að styrkur arsens í sýni frá Klaufargerði í Núpasveit sem tekið var árið 2015 er óvenju hár.

Bór (B)

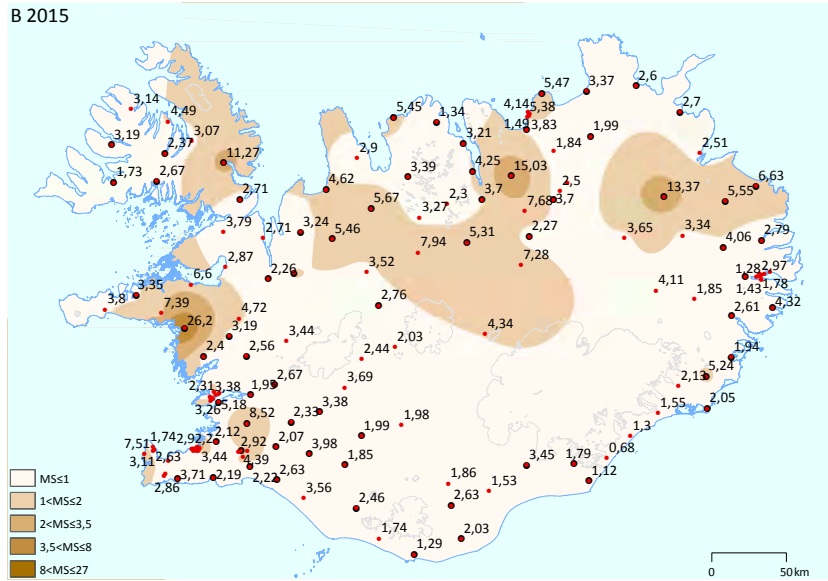
Styrkur bórs hefur aðeins verið mældur árið 2015 og samanburður í tíma því ekki mögulegur. Styrkur bórs utan iðnaðarsvæða (>4 km) á þeim 68 stöðum sem mosa hefur verið safnað á sama stað í gegnum árin reyndist vera að meðaltali 4,01 mg/kg, n=68 (17. mynd).

Þegar litið er á dreifingu efnisins á landinu kemur fram nokkur munur. Styrkurinn er einna lægstur á Suður- og Suðausturlandi en einna hæstur á norðurhluta landsins (18. mynd).



17. mynd. Meðalstyrkur (mg/kg) bórs (B) í tildurmosa árið 2015, þ.e. utan (>4 km) iðnaðarsvæðanna á Grundartanga, í Reyðarfirði og í Straumsvík. Niðurstöður byggja á sýnum frá 68 stöðum þar sem mosa hefur verið safnað endurtekið frá 1990, sjá 18 mynd. Lóðrétt strík táknar staðalskekkju.

B 2015

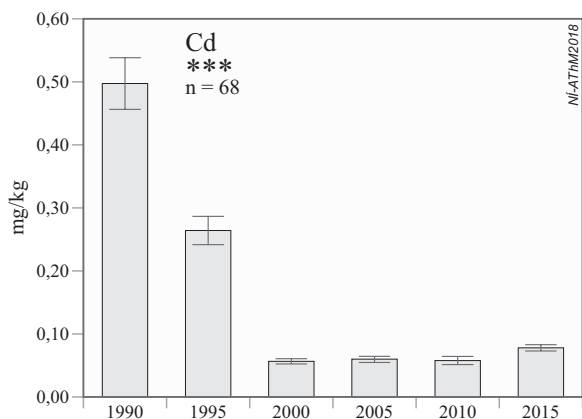


18. mynd. Styrkur (mg/kg) bórs (B) í tildurmosa árið 2015. Mismunandi litir sýna mengunarflokka byggða á reiknuðum mengunarstuðlum (MS), sjá 3. töflu. Svartir hringir tákna þá 68 staði þar sem sýnataka hefur verið endurtekin frá upphafi árið 1990.

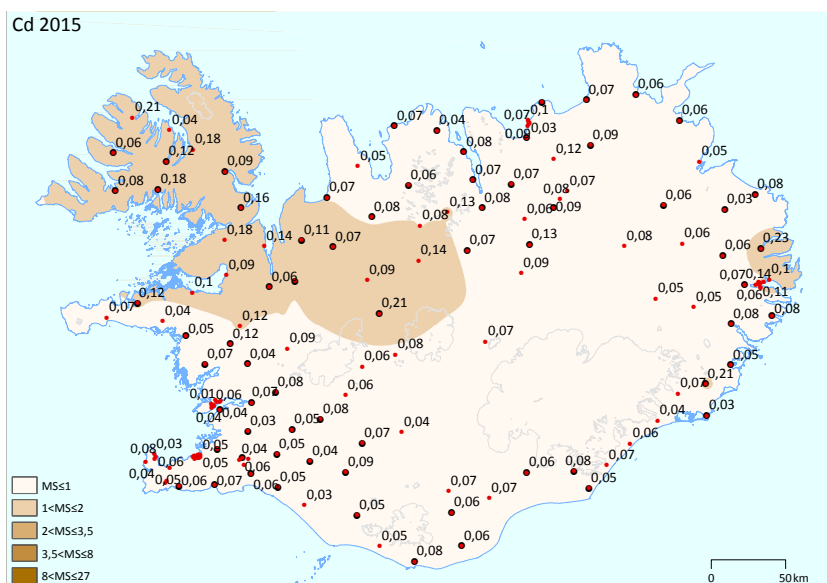
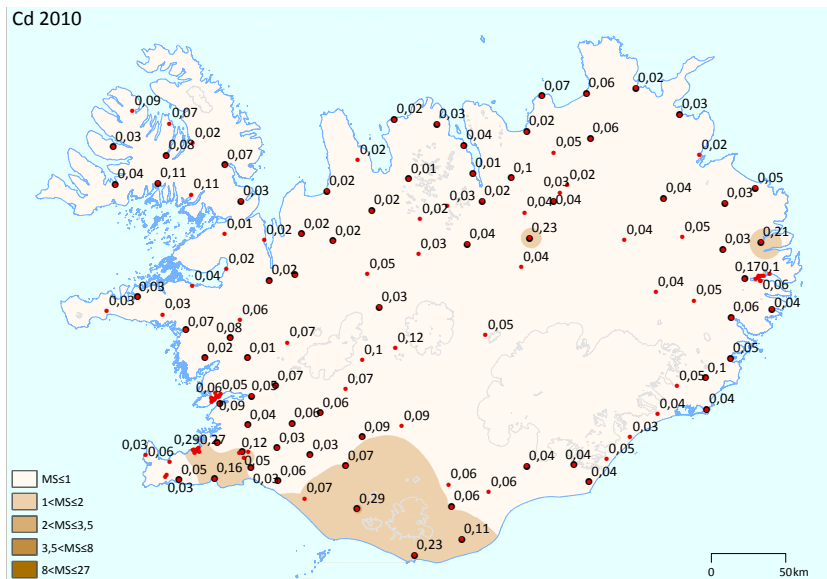
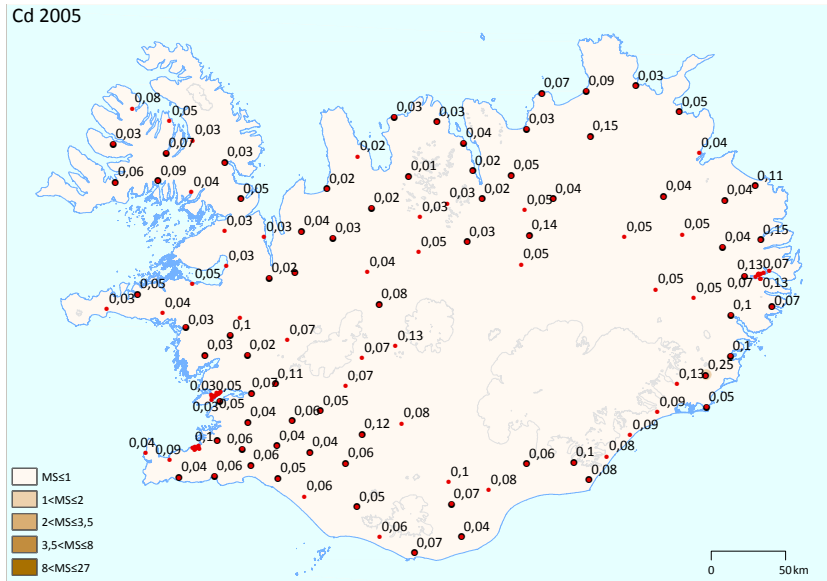
Kadmín (Cd)

Mjög mikill og marktækur munur var á styrk kadmíns í mosa eftir árum, $F(1,44; 96,20) = 100,62$; $p < 0,0001$ (G-G epsilon 0,29), $n=68$ (mynd). Styrkur var langhæstur árið 1990 (0,497 mg/kg), talsvert lægri árið 1995 (0,264 mg/kg) og enn lægri árið 2000 (0,057 mg/kg) (19. mynd).

Miðað við árin 2005–2015 var styrkur kadmíns nokkuð breytilegur eftir landshlutum og árum (20. mynd). Árið 2010 var styrkur kadmíns einna hæstur í nágrenni Eyjafjallajökuls og Mýrdalsjökuls en árið 2015 var hann einna hæstur á norðvesturhluta landsins sem er óvanalegt því þar hefur styrkur kadmíns yfirleitt verið hlutfallslega lágur. Við þrjár síðustu mælingar (2005–2015) telst mengun samkvæmt reiknuðum mengunarstuðlum af völdum kadmíns annað hvort vera *engin* eða *vísbending um mengun*.



19. mynd. Meðalstyrkur (mg/kg) kadmíns (Cd) í tildurmosa 1990–2015, þ.e. utan (>4 km) iðnaðarsvæðanna á Grundartanga, í Reyðarfirði og í Straumsvík. Niðurstöður byggja á sýnum frá 68 stöðum þar sem mosa hefur verið safnað endurtekið frá 1990, sjá 20. mynd. Lóðrétt strik tákna staðalskekkju. Marktækur munur: *** = $p < 0,001$.

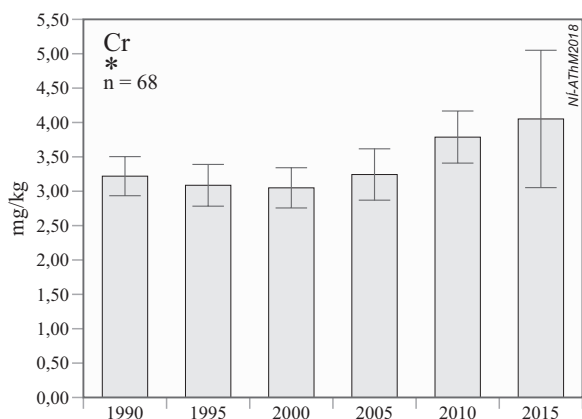


20. mynd. Styrkur (mg/kg) kadmíns (Cd) í tildurmosa 2005, 2010 og 2015. Mismunandi litir sýna mengunarflokka byggða á reiknuðum mengunaruðuðum (MS), sjá 3. töflu. Svartir hringir tákna þá 68 staði þar sem sýnataka hefur verið endurtekin frá upphafi árið 1990.

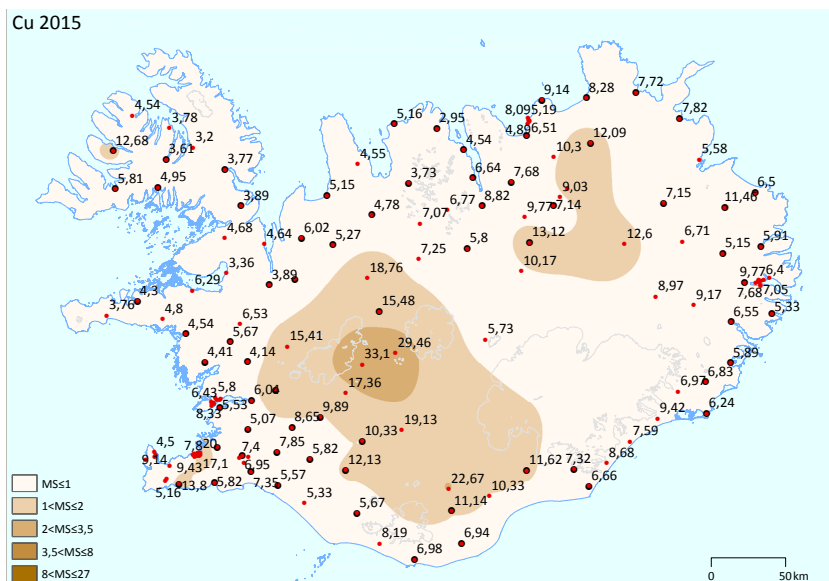
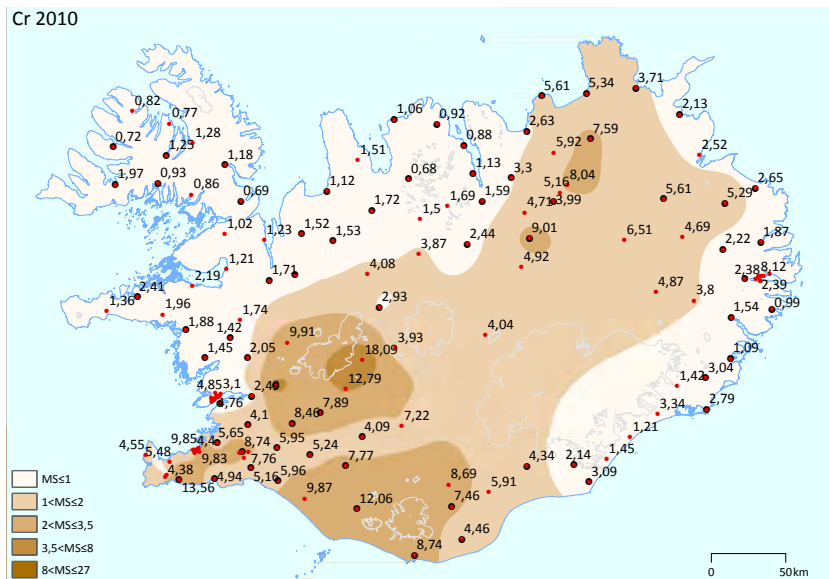
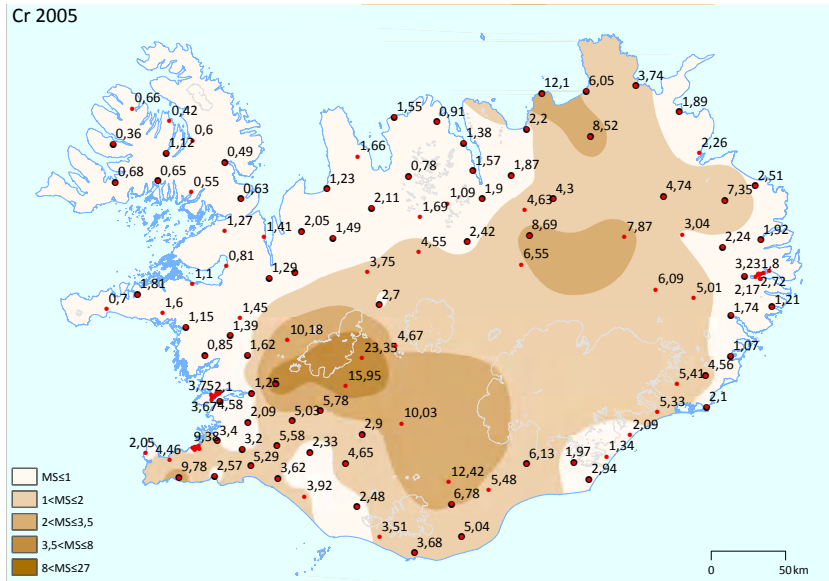
Króm (Cr)

Samanburður sýna sem tekin voru utan iðnaðarsvæða á sömu stöðum (>4 km) sýndi marktækan mun á styrk króms á milli ára 1990–2015, $F(3,52; 236,37) = 3,16$; $p=0,019$ (G–G epsilon 0,71), $n=68$ en styrkur króms mældist að jafnaði lægstur árið 2000 (3,05 mg/kg) en hæstur árið 2015 (4,05 mg/kg) (21. mynd).

Miðað við árin 2005–2015 er verulegur munur á styrk króms eftir svæðum. Einna hæstur er hann á gosbeltinu en lægstur á norðvesturhluta landsins, einkum á Vestfjörðum. Hæstu gildin mælast einkum við Langjökul og árið 2015 í sýnum úr Bárðardal og nágrenni. Þar flokkast mengun sem *veruleg* samkvæmt þeirri aðferð sem notuð er í þessari rannsókn (22. mynd).



21. mynd. Meðalstyrkur (mg/kg) króms (Cr) í tildurmosa 1990–2015, þ.e. utan (>4 km) iðnaðarsvæðanna á Grundartanga, í Reyðarfirði og í Straumsvík. Niðurstöður byggja á sýnum frá 68 stöðum þar sem mosa hefur verið safnað endurtekið frá 1990, sjá 22. mynd. Lóðrétt strik tákna staðalskekkju. Marktækur munur: $* = p < 0,05$.

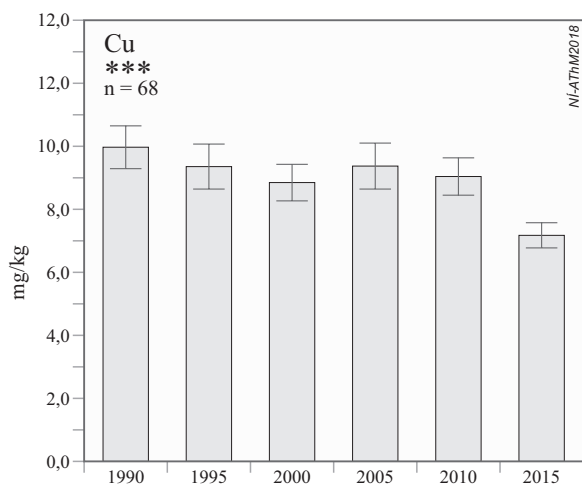


22. mynd. Styrkur (mg/kg) króms (Cr) í tildurmosa 2005, 2010 og 2015. Mismunandi litir sýna mengunarflokka byggða á reiknuðum mengunaruðuðum (MS), sjá 3. töflu. Svartir hringir tákna þá 68 staði þar sem sýnataka hefur verið endurtekin frá upphafi árið 1990.

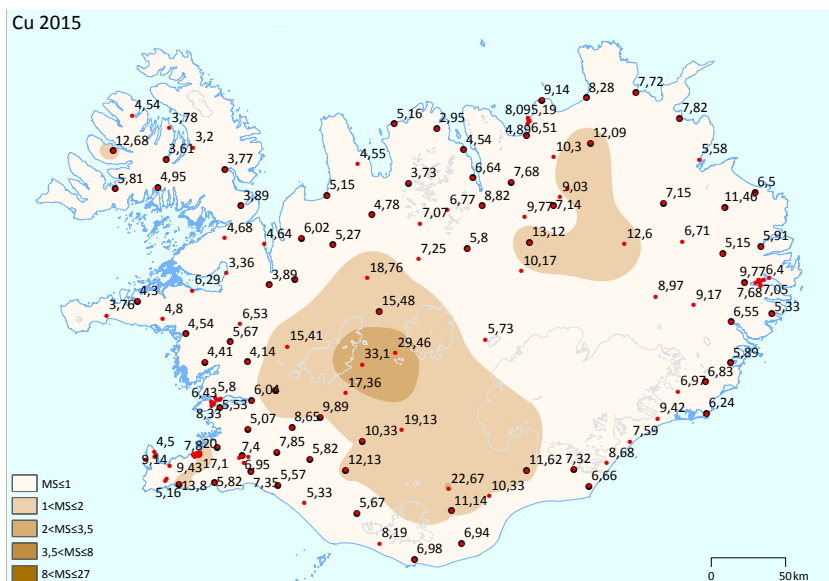
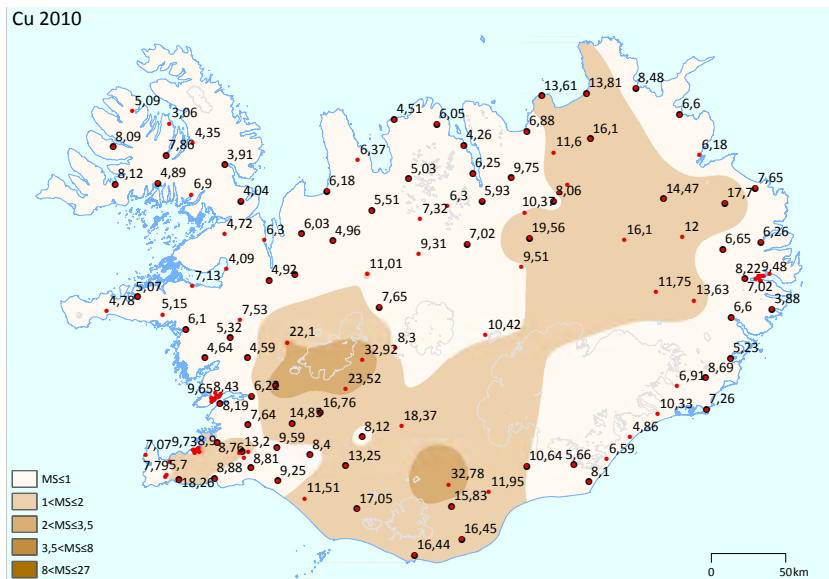
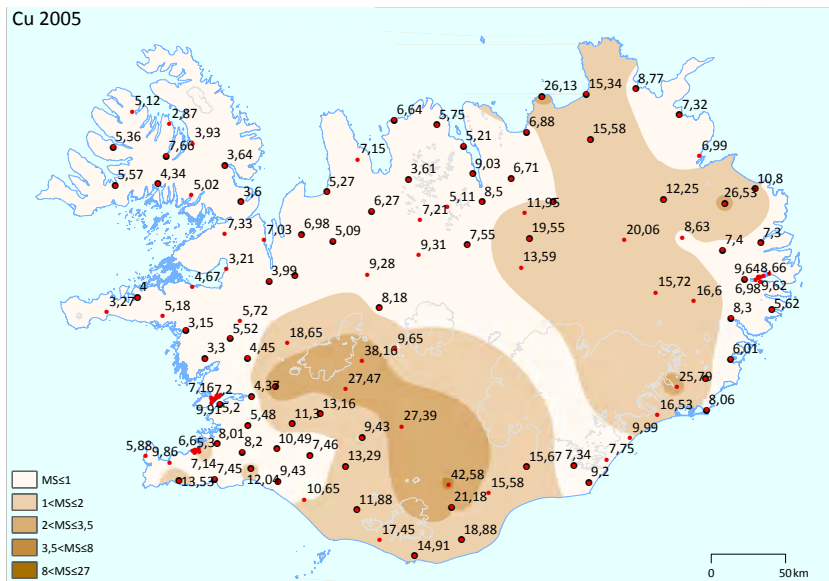
Kopar (Cu)

Samanburður sýna sem tekin voru utan iðnaðarsvæða á sömu stöðum (>4 km) sýndi marktækan mun á styrk kopars á milli ára 1990–2015, $F(3,99; 267,66) = 7,98$; $p = <0,0001$ (G–G epsilon 0,80), $n=68$ en styrkur kopars hefur í stórum dráttum farið minnkandi frá því mælingar hófust, eða úr 9,97 mg/kg árið 1990 niður í 7,17 mg/kg árið 2015 (23. mynd).

Miðað við árin 2005–2015 er styrkur kopars talsvert misjafn eftir landsvæðum (24. mynd). Hann hefur mælst einna lægstur á norðvesturhluta landsins, svo sem á Snæfellsnesi, Vestfjörðum og Norðvesturlandi. Styrkur kopars er hins vegar hæstur á gosbeltinu, einkum á svæði frá Langjökli til suðausturs að Skaftártungu. Hæstu gildin eru það há að þau flokkast sem *lítillsháttar mengun* eða *nokkur mengun*.



23. mynd. Meðalstyrkur (mg/kg) kopars (Cu) í tildurmosa 1990–2015, þ.e. utan (>4 km) iðnaðarsvæðanna þriggja á Grundartanga, í Reyðarfirði og í Straumsvík. Niðurstöður byggja á sýnum frá þeim 68 stöðum þar sem mosa hefur verið safnað endurtekið frá 1990, sjá 24. mynd. Lóðrétt strik tákna staðalskekkju. Marktækur munur: *** = $p < 0,001$.

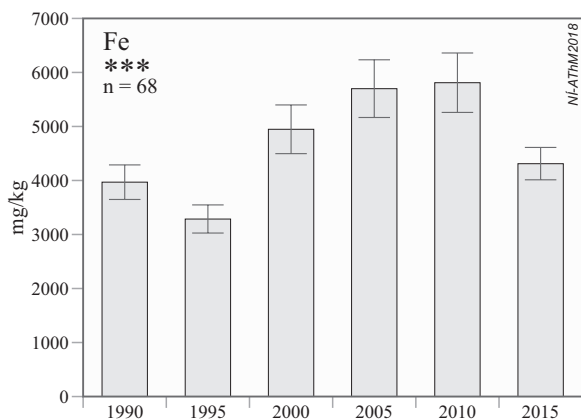


24. mynd. Styrkur (mg/kg) kopars (Cu) í tildurmosa 2005, 2010 og 2015. Mismunandi litir sýna mengunarflokka byggða á reiknuðum mengunarstuðlum (MS), sjá 3. töflu. Svartir hringir tákna þá 68 staði þar sem sýnataka hefur verið endurtekin frá upphafi árið 1990.

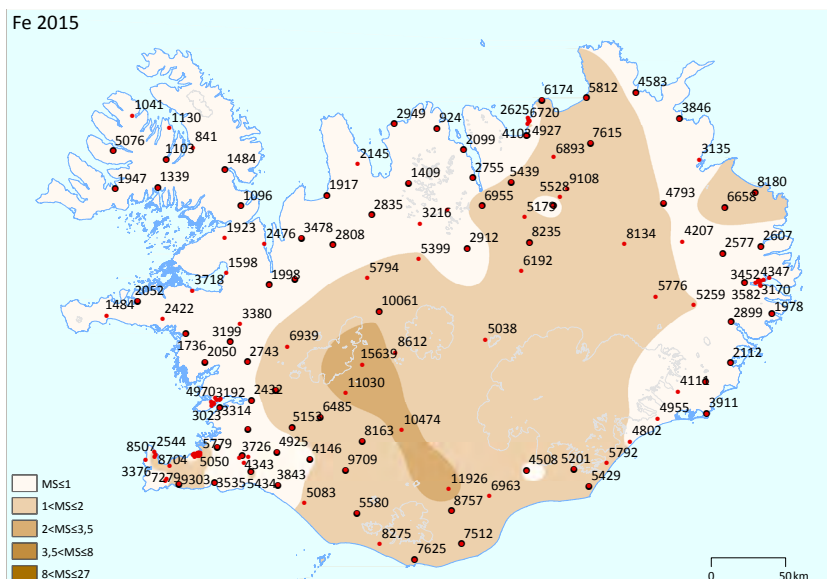
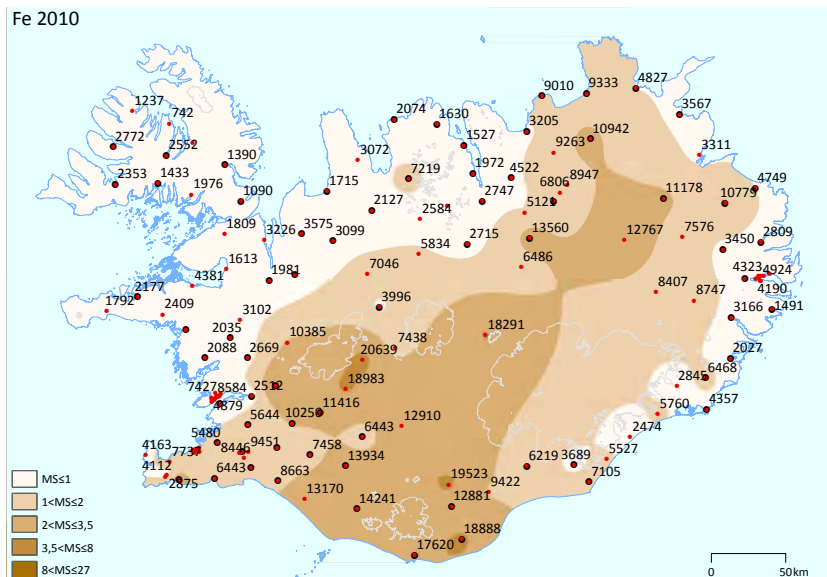
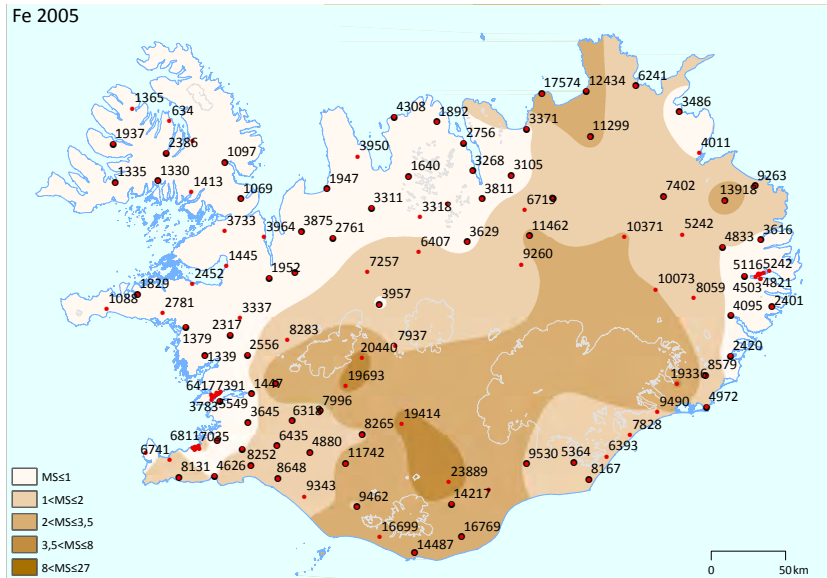
Járn (Fe)

Styrkur járns í mosa utan iðjuvera (>4 km) hefur verið afar misjafn þau ár sem járn hefur verið mælt (1990–2015), $F(4,29; 287,58) = 29,17$; $p < 0,0001$ (G–G epsilon 0,86), $n=68$. Styrkurinn var lægstur árið 1995 (3.286 mg/kg) en hæstur 2005 og 2010 (5.700 og 5.810 mg/kg) (25. mynd).

Styrkur járns í mosa er mjög misjafn eftir landshlutum (26. mynd). Samkvæmt mælingum árin 2005–2015 er hann einna lægstur á norðvesturhluta landsins, einkum á Snæfellsnesi og Vestfjörðum. Styrkurinn er sterklega tengdur gosbeltinu og mælist einna hæstur á stóru svæði milli Langjökuls og Mýrdalsjökuls og allt til sjávar undir Eyjafjöllum og í Skaftafellssýslu. Hæstu gildin eru það há að þau flokkast sem *nokkur mengun*.



25. mynd. Meðalstyrkur (mg/kg) járns (Fe) í tildurmosa 1990–2015, þ.e. utan (>4 km) iðnaðarsvæðanna á Grundartanga, í Reyðarfirði og í Straumsvík. Niðurstöður byggja á sýnum frá þeim 68 stöðum þar sem mosa hefur verið safnað endurtekið frá 1990, sjá 26. mynd. Lóðrétt strik tákna staðalskekkju. Marktækur munur: *** = $p < 0,001$.

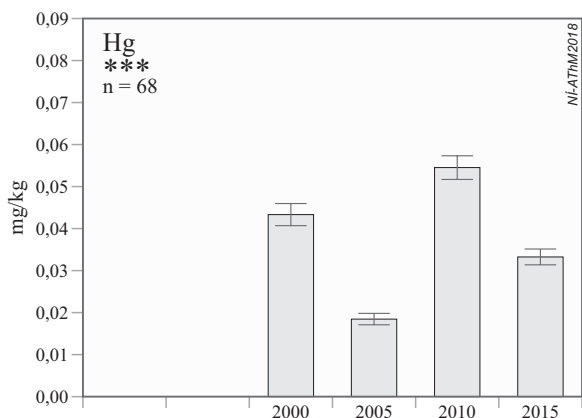


26. mynd. Styrkur (mg/kg) járns (Fe) í tildurmosa 2005, 2010 og 2015. Mismunandi litir sýna mengunarflokka byggða á reiknuðum mengunarstuðlum (MS), sjá 3. töflu. Svartir hringir tákna þá 68 staði þar sem sýnataka hefur verið endurtekin frá upphafi árið 1990.

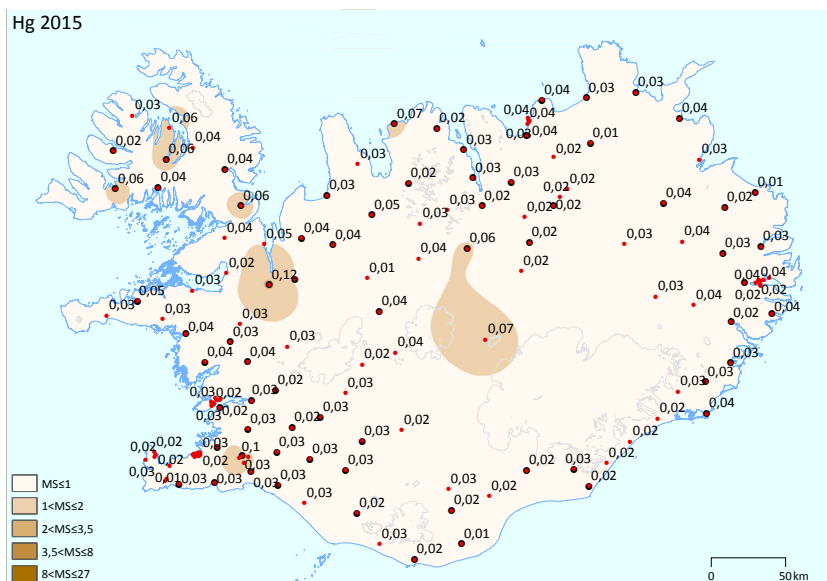
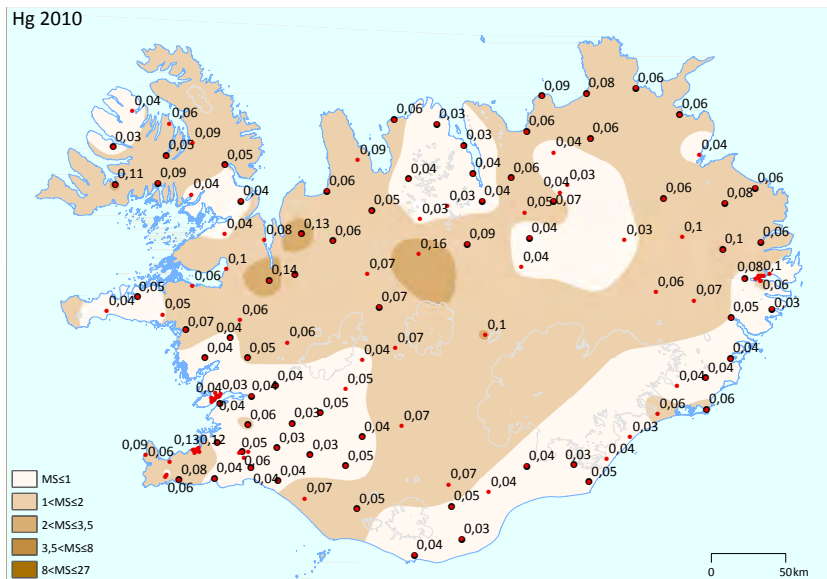
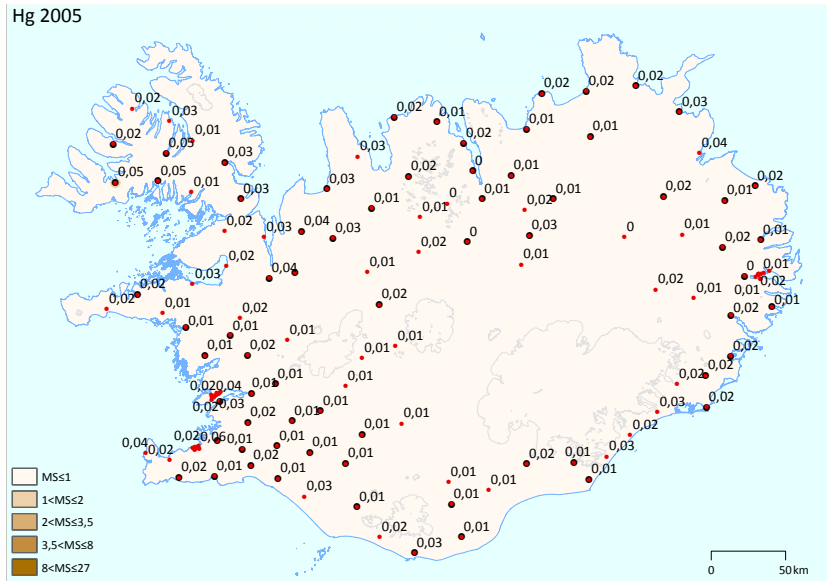
Kvikasilfur (Hg)

Styrkur kvikasilfurs í mosa utan iðjuvera (>4 km) hefur verið afar misjafn eftir árum (2000–2015), $F(2,61; 174,62) = 104,86$; $p < 0,0001$ (G–G epsilon 0,87), $n=68$ (mynd). Lægstur mældist styrkurinn árið 2005 (0,018 mg/kg) en hæstur 2010 (0,055 mg/kg) (27. mynd).

Styrkur kvikasilfurs utan iðnaðarsvæða árin 2005–2015 virðist ekki vera mjög svæðisbundinn en hann er víðast hvar lágur. Örfá sýni mælast það há að þau flokkast sem *lítilsháttar mengun* og eru þau nánast öll frá árinu 2010 (28. mynd).



27. mynd. Meðalstyrkur (mg/kg) kvikasilfurs (Hg) í tildurmosa 1990–2015, þ.e. utan (>4 km) iðnaðarsvæðanna á Grundartanga, í Reyðarfirði og í Straumsvík. Niðurstöður byggja á sýnum frá 68 stöðum þar sem mosa hefur verið safnað endurtekið frá 1990, sjá 28. mynd. Lóðrétt strik tákna staðalskekkju. Marktækur munur: *** = $p < 0,001$.



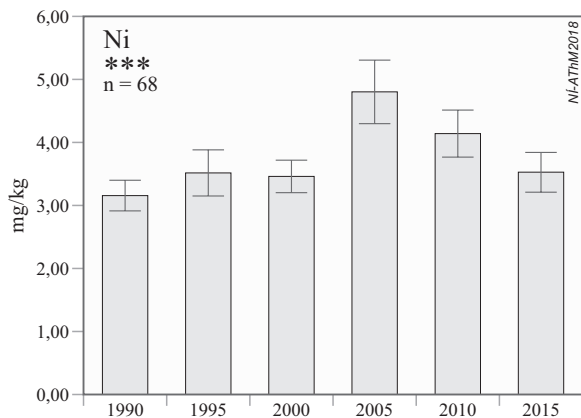
28. mynd. Styrkur (mg/kg) kvikasilfurs (Hg) í tildurmosa 2005, 2010 og 2015. Mismunandi litir sýna mengunarflokka byggða á reiknuðum mengunarstuðlum (MS), sjá 3. töflu. Svartir hringir tákna þá 68 staði þar sem sýnataka hefur verið endurtekin frá upphafi árið 1990.

Nikkel (Ni)

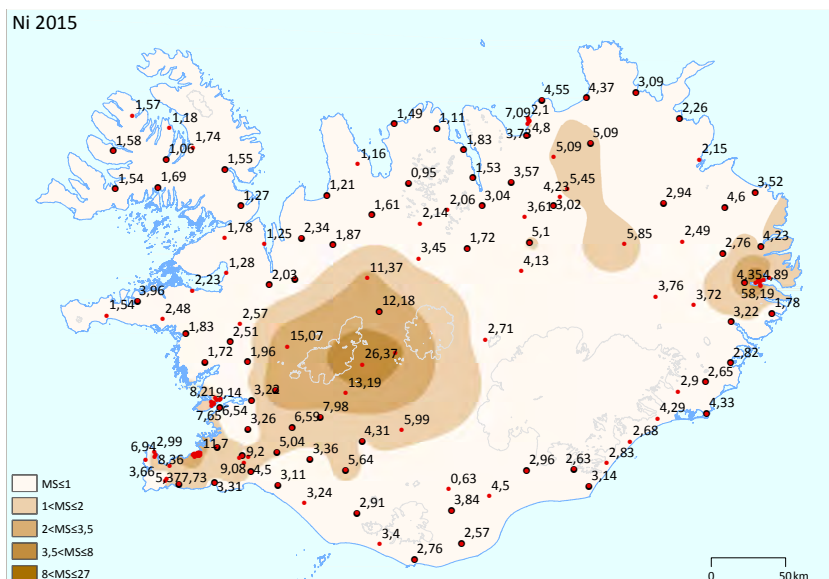
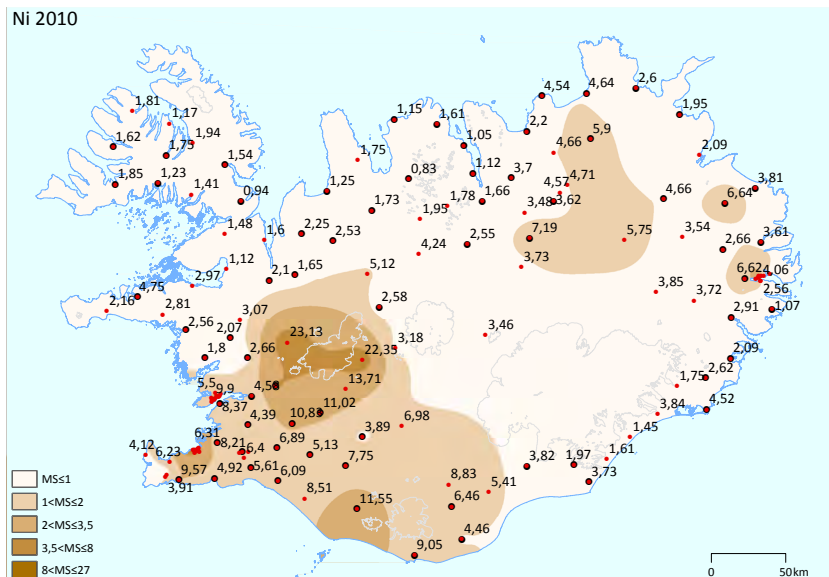
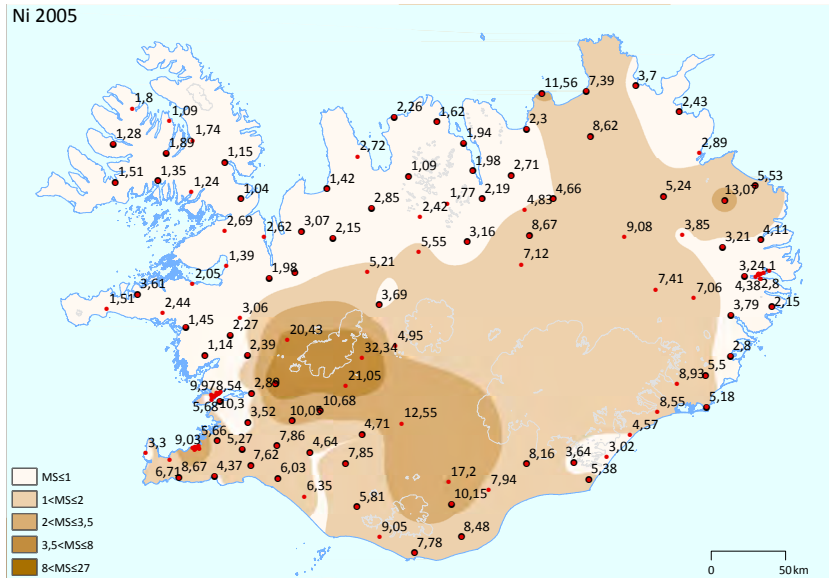
Mjög mikill og marktækur munur var á styrk nikkels í mosa utan iðjuvera (>4 km) eftir árum, $F(3,90; 261,48) = 12,20$; $p < 0,0001$ (G–G epsilon 0,78), $n=68$ (mynd). Lægstur var styrkurinn árið 1990 (3,16 mg/kg) en hæstur árið 2005 (4,80 mg/kg) (29. mynd).

Mikill munur er einnig á styrk eftir svæðum (30. mynd). Árin 2005–2015 var styrkur nikkels einna lægstur á norðvestanverðu landinu svo sem á Snæfellsnesi og Vestfjörðum. Langsamlega hæstur var styrkur nikkels í nágrenni Langjökuls og svo hefur það verið allar götur frá því þessar mælingar hófust. Miðað við þann mengunarkvarða sem notaður er í þessari rannsókn flokkast hæstu gildin utan iðjuvera árin 2005–2010 sem *nokkur mengun*.

Áhrif iðjuvera á styrk nikkels koma nokkuð greinilega fram á kortunum og ljóst er að styrkur nikkels hefur aukist í nágrenni álversins í Reyðarfirði (30. mynd).



29. mynd. Meðalstyrkur (mg/kg) nikkels (Ni) í tildurmosa 1990–2015, þ.e. utan (>4 km) iðnaðarsvæðanna á Grundartanga, í Reyðarfirði og í Straumsvík. Niðurstöður byggja á sýnum frá 68 stöðum þar sem mosa hefur verið safnað endurtekið frá 1990, sjá 30. mynd. Lóðrétt strik tákna staðalskekkju. Marktækur munur: *** = $p < 0,001$.

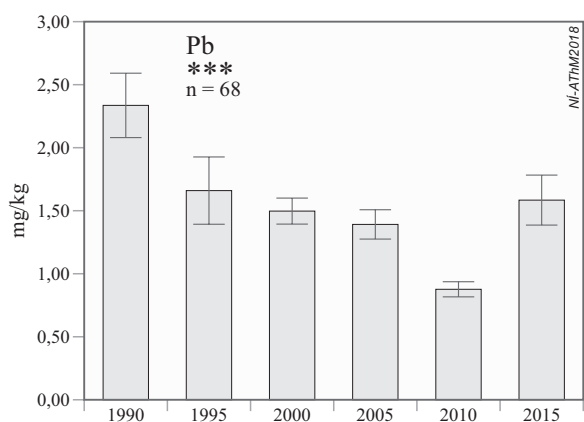


30. mynd. Styrkur (mg/kg) nikkels (Cd) í tildurmosa 2005, 2010 og 2015. Mismunandi litir sýna mengunarflokka byggða á reiknuðum mengunarstuðlum (MS), sjá 3. töflu. Svartir hringir tákna þá 68 staði þar sem sýnataka hefur verið endurtekin frá upphafi árið 1990.

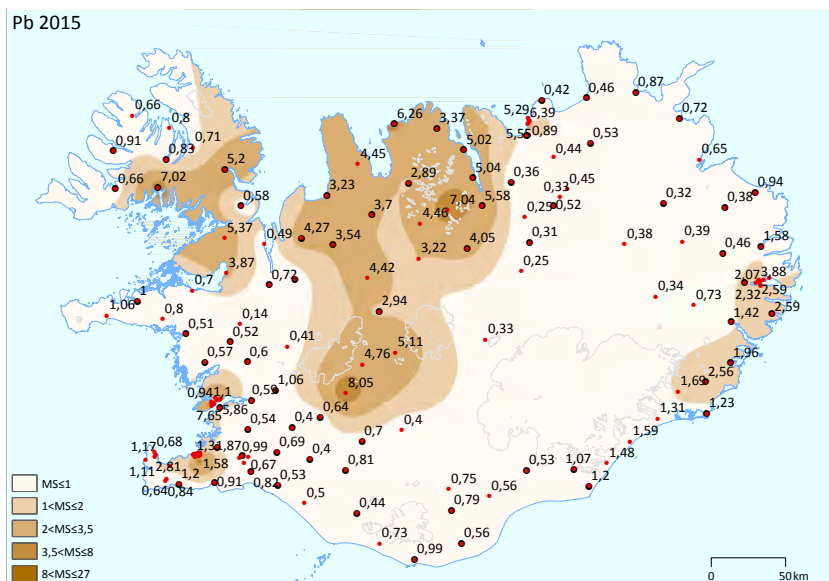
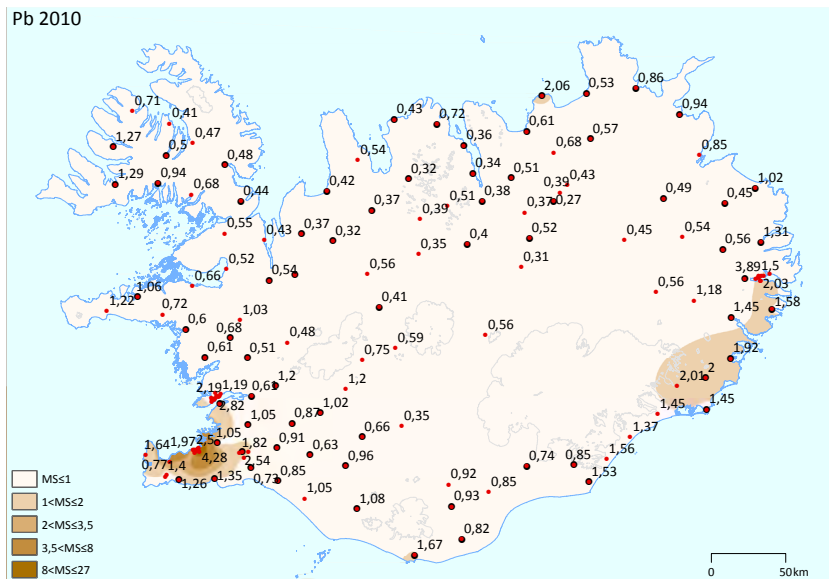
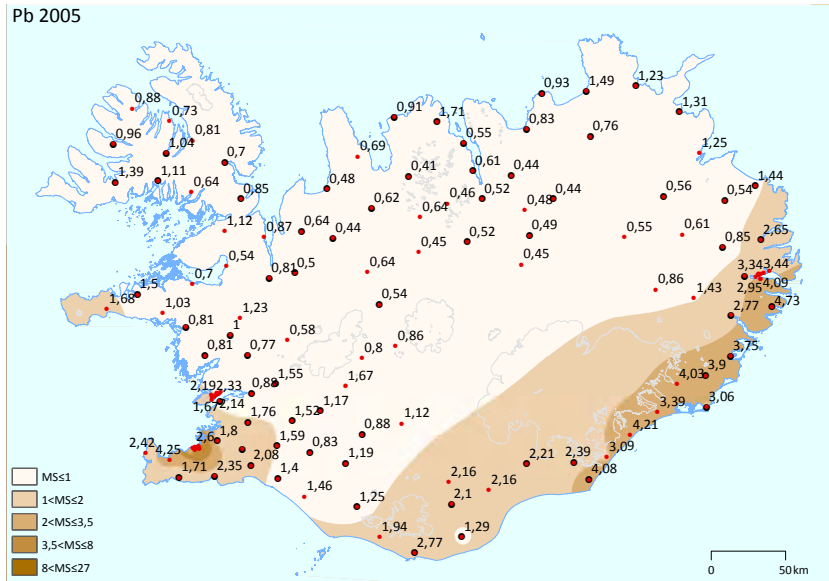
Blý (Pb)

Samanburður sýna sem tekin voru utan iðnaðarsvæða (>4 km) sýndi marktækan mun á styrk blýs á milli ára 1990–2015, $F(2,29; 153,51) = 3,58$; $p=0,025$ (G–G epsilon 0,46), $n=68$. Styrkur var hæstur árið 1990 (2,34 mg/kg) og fór síðan lækkandi til 2010 (0,88 mg/kg) en árið 2015 mældist styrkurinn hærra á ný (1,58 mg/kg) (31. mynd).

Dreifing blýs um landið er misjöfn (32. mynd). Að jafnaði hefur mælst hærra styrkur í nágrenni höfuðborgarsvæðisins og á Suðausturlandi en annars staðar. Árið 2015 varð nokkur breyting á þessu mynstri því hæstu gildin fundust þá á norðurhluta landsins, þ.e. á svæði sem nær frá austurhluta Vestfjarða austur fyrir Eyjafjörð og nær síðan suður fyrir Kjöl á miðhálandinu. Miðað við þá mengunarstuðla sem notaðir eru í þessari rannsókn falla hæstu gildin í flokkinn *nokkur mengun*.



31. mynd. Meðalstyrkur (mg/kg) blýs (Pb) í tildurmosa á landsvísu 1990–2015, þ.e. utan (>4 km) iðnaðarsvæðanna þriggja á Grundartanga, í Reyðarfirði og í Straumsvík. Niðurstöður byggja á sýnum frá þeim 68 stöðum þar sem mosa hefur verið safnað endurtekið frá 1990, sjá 32. mynd. Lóðrétt strik tákna staðalskekkju. Marktækur munur: *** = $p < 0,001$.



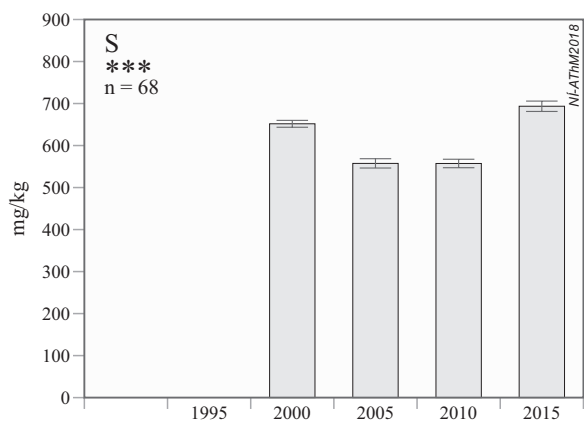
32. mynd. Styrkur (mg/kg) blýs (Pb) í tildurmosa 2005, 2010 og 2015. Mismunandi litir sýna mengunarflokka byggða á reiknuðum mengunaruðuðum (MS), sjá 3. töflu. Svartir hringir tákna þá 68 staði þar sem sýnataka hefur verið endurtekin frá upphafi árið 1990.

Brennisteinn (S)

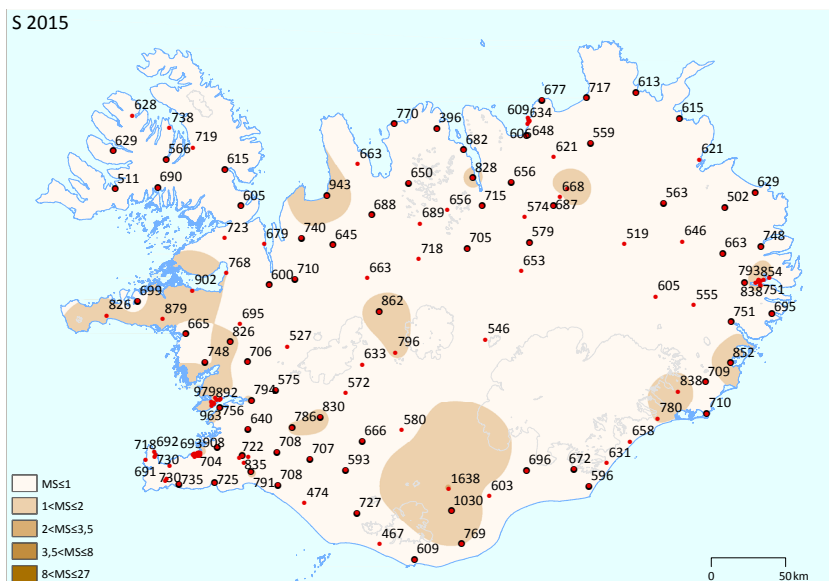
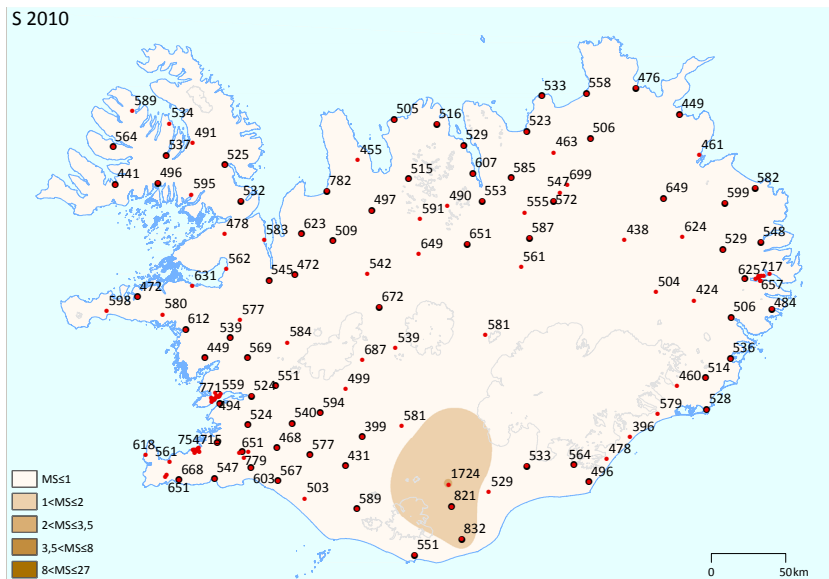
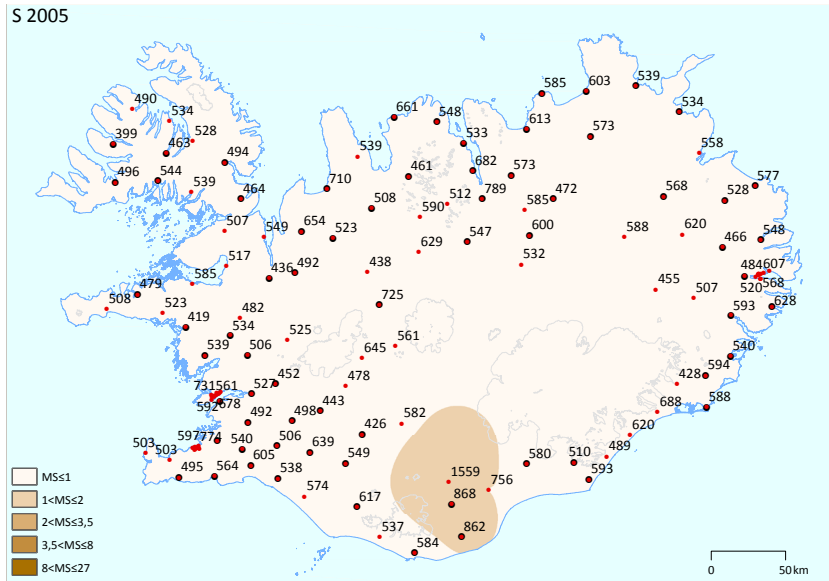
Samanburður á sýnum sem tekin voru utan iðnaðarsvæða (>4 km) sýndu marktækan mun á milli ára (2000–2015), $F(2,85; 191,10) = 79,52$; $p < 0,0001$ (G–G epsilon 0,95), $n=68$ (mynd). Lægstu gildin mældust árin 2005 (558 mg/kg) og 2010 (557 mg/kg) en þau hæstu 2000 (652 mg/kg) og þó einkum árið 2015 (694 mg/kg) (33. mynd).

Miðað við árabilið 2005–2015 er styrkur brennisteins yfirleitt nokkuð jafn á landinu (34. mynd). Eitt svæði sker sig þó úr en það austur af Mýrdalsjökli. Einkum eru það sýni tekin í Álftaveri, Skaftártungu og við Syðri-Ófæru sem ávallt hafa mælst með hlutfallslega háan styrk af brennisteini.

Miðað við reiknaða mengunarstuðla hefur mengun af völdum brennisteins verið lítil á landinu árin 2005–2015. Þó verður nokkur breyting árið 2015 en þá mælist *vísbending um mengun* nokkuð víða sem er talsvert ólíkt því sem áður hefur mælst (34. mynd).



33. mynd. Meðalstyrkur (mg/kg) brennisteins (S) í tildurmosa 2000–2015, þ.e. utan (>4 km) iðnaðarsvæðanna á Grundartanga, í Reyðarfirði og í Straumsvík. Niðurstöður byggja á sýnum frá 68 stöðum þar sem mosa hefur verið safnað endurtekið frá 1990, sjá 34. mynd. Lóðrétt strik tákna staðalskekkju. Marktækur munur: *** = $p < 0,001$.

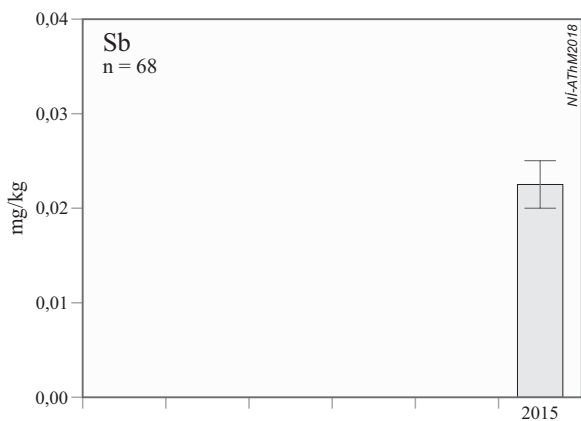


34. mynd. Styrkur (mg/kg) brennisteins (S) í tildurmosa 2005, 2010 og 2015. Mismunandi litir sýna mengunarflokka byggða á reiknuðum mengunaruðuðum (MS), sjá 3. töflu. Svartir hringir tákna þá 68 staði þar sem sýnataka hefur verið endurtekin frá upphafi árið 1990.

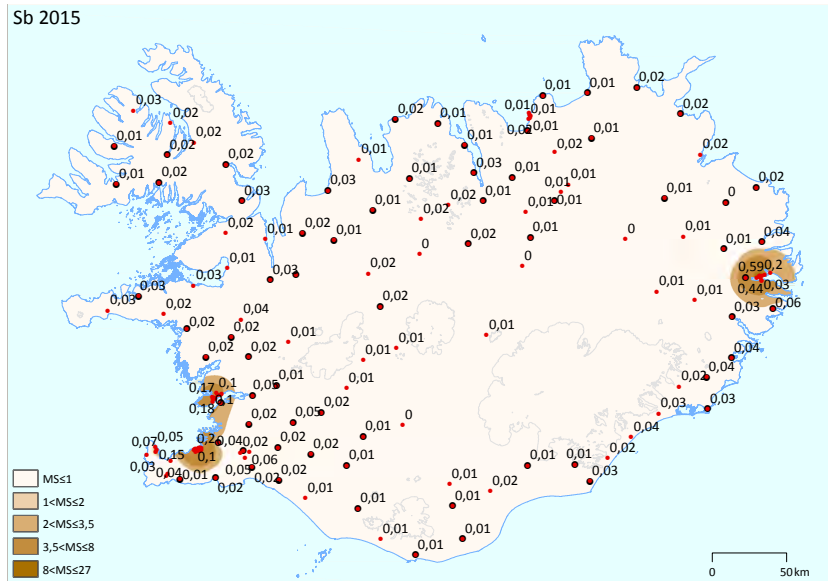
Antimon (Sb)

Antimon hefur aðeins verið mælt árið 2015 og samanburður í tíma er því ekki mögulegur. Að meðaltali var styrkur utan iðjuvera (>4 km) 0,023 mg/kg, n=68 (35. mynd).

Þegar litið er á dreifingu efnisins á landinu kemur fram mjög sterkt mynstur. Styrkur er langsamlega hæstur í nágrenni iðjuveranna þriggja, þ.e. í Straumsvík, á Grundartanga og í Reyðarfirði. Annars staðar er styrkur efnisins hlutfallslega lágur (36. mynd).



35. mynd. Meðalstyrkur (mg/kg) antimons (Sb) í tildurmosa árið 2015, þ.e. utan (>4 km) iðnaðarsvæðanna á Grundartanga, í Reyðarfirði og í Straumsvík. Niðurstöður byggja á sýnum frá 68 stöðum þar sem mosa hefur verið safnað endurtekið frá 1990, sjá 36. mynd. Lóðrétt strik táknar staðalskekkju.

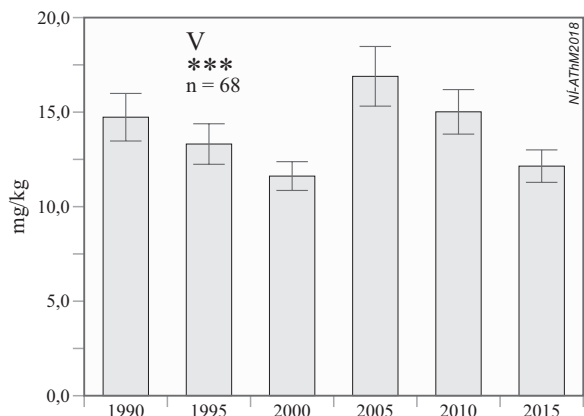


36. mynd. Styrkur (mg/kg) antimons (Sb) í tildurmosa árið 2015. Mismunandi litir sýna mengunarflokka byggða á reiknuðum mengunarstuðlum (MS), sjá 3. töflu. Svartir hringir tákna þá 68 staði þar sem sýnataka hefur verið endurtekin frá upphafi árið 1990. Antimon hefur þó aðeins verið mælt árið 2015.

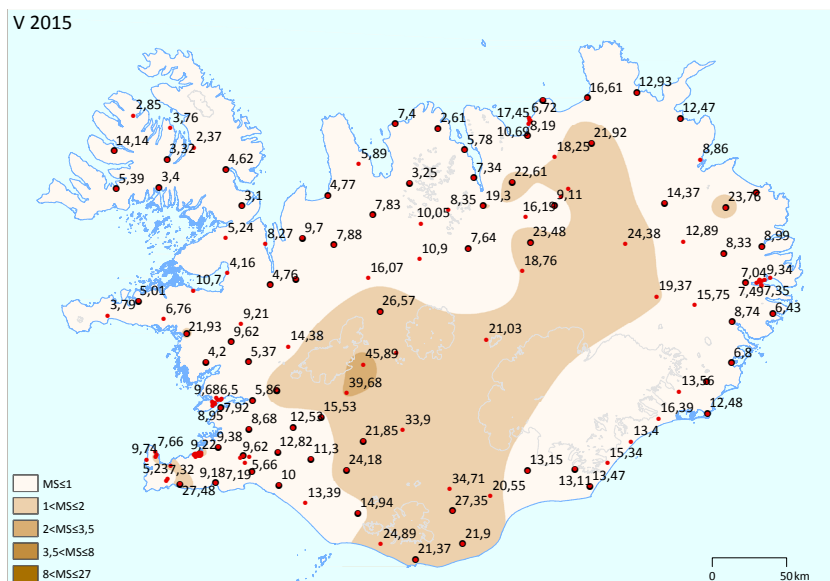
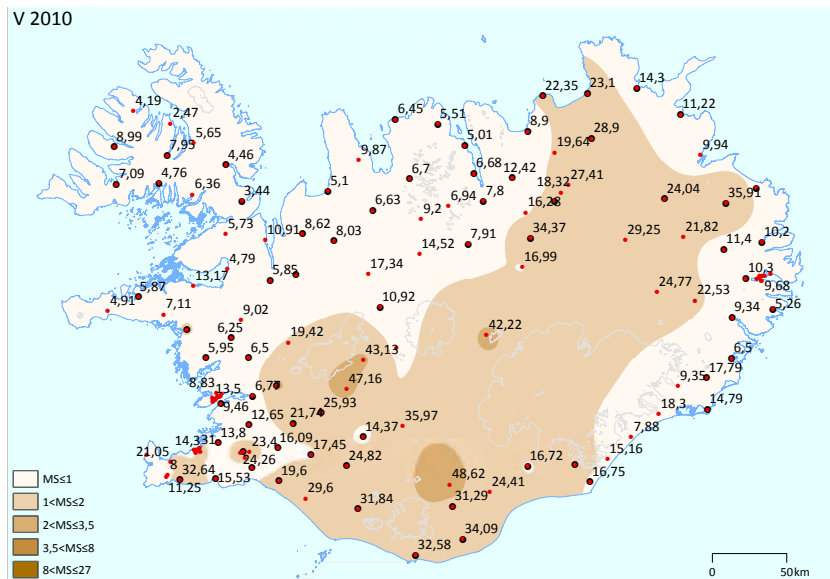
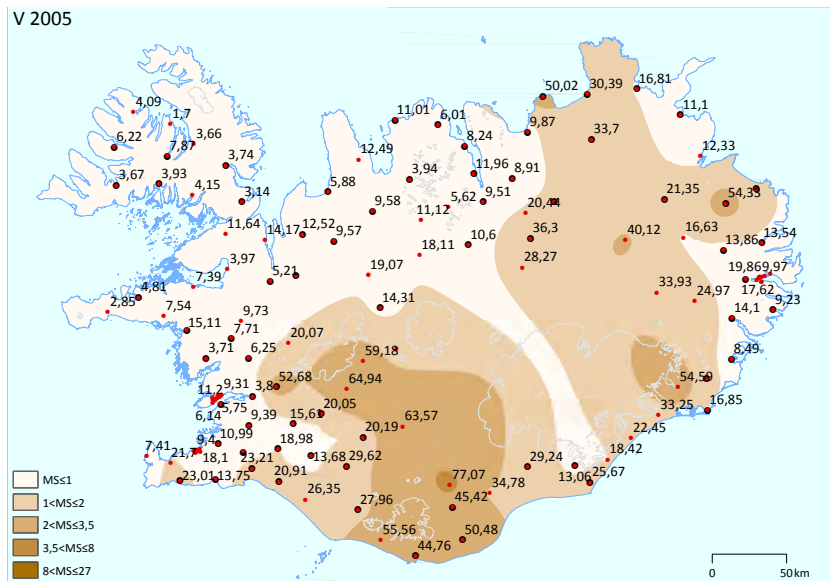
Vanadín (V)

Utan iðnaðarsvæða (>4 km) var marktækur munur á styrk vanadíns á milli ára (1990–2015), $F(4,39; 294,03) = 7,87$; $p < 0,0001$ (G–G epsilon 0,88), $n=68$ (37. mynd). Að jafnaði var styrkur lægstur árið 2000 (11,62 mg/kg, $n=68$) en hæstur árið 2005 (16,89 mg/kg).

Árin 2005–2015 er styrkur vanadíns mjög misjafn eftir svæðum; lægstur á Vestfjörðum og Norðvesturlandi en hæstur á gosbeltinu. Samkvæmt þeirri aðferð sem hér er notuð til að meta mengun flokkast hún sem *nokkur* þar sem styrkur er hæstur (38. mynd).



37. mynd. Meðalstyrkur (mg/kg) vanadíns (V) í tildurmosa 1990–2015, þ.e. utan (>4 km) iðnaðarsvæðanna á Grundartanga, í Reyðarfirði og í Straumsvík. Niðurstöður byggja á sýnum frá 68 stöðum þar sem mosa hefur verið safnað endurtekið frá 1990, sjá 38. mynd. Lóðrétt strik tákna staðalskekkju. Marktækur munur: *** = $p < 0,001$.

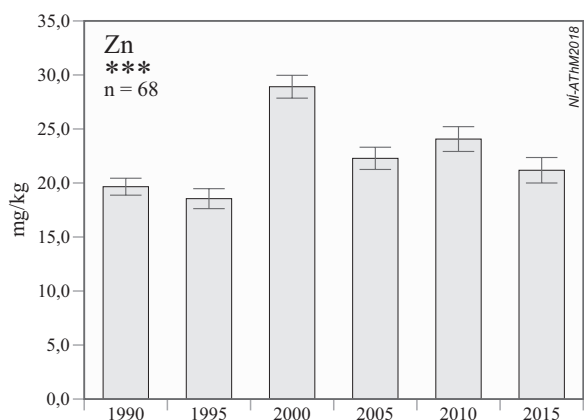


38. mynd. Styrkur (mg/kg) vanadíns (V) í tildurmosa 2005–2015. Mismunandi litir sýna mengunarflokka byggða á reiknuðum mengunarsuðlum (MS), sjá 3. töflu. Svartir hringir tákna þá 68 staði þar sem sýnataka hefur verið endurtekin frá upphafi árið 1990.

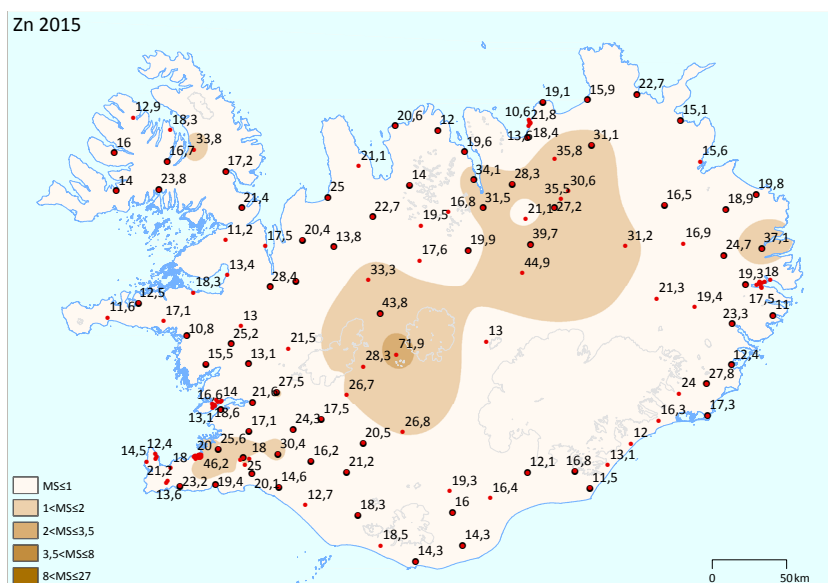
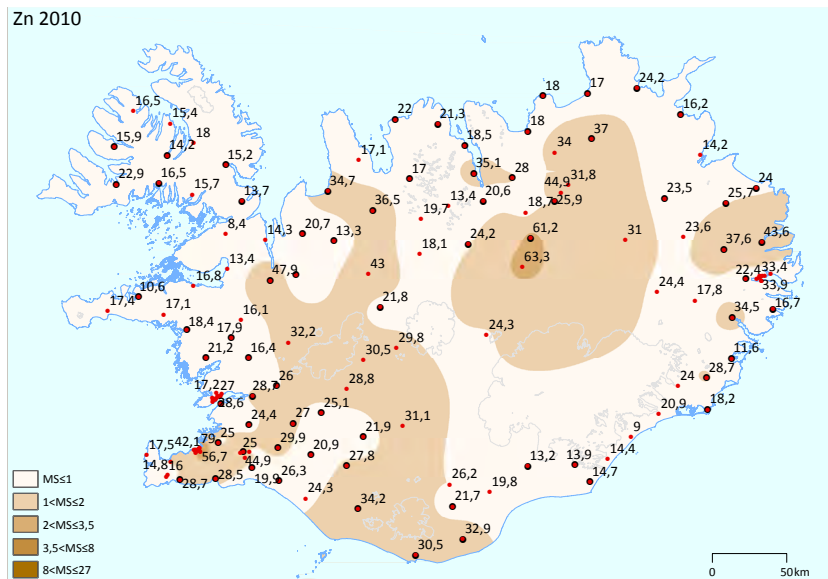
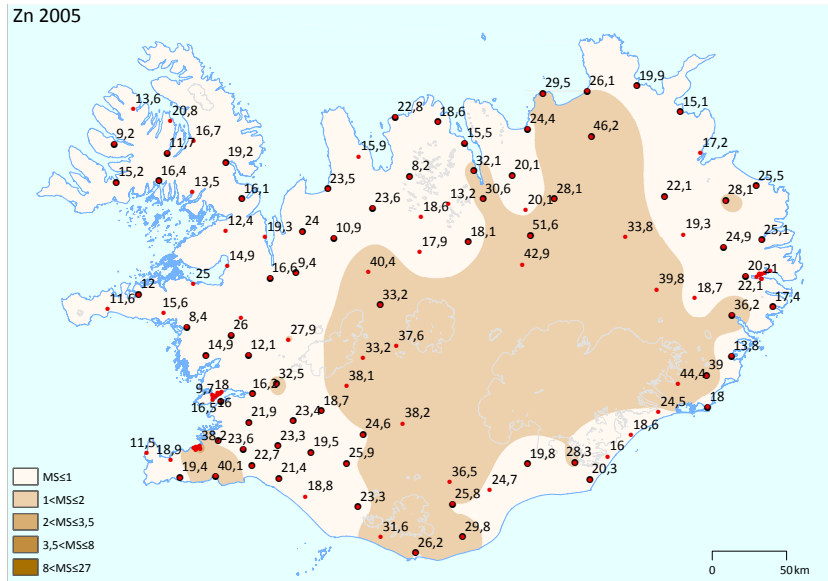
Sink (Zn)

Mjög mikill og marktækur munur var á styrk sinks í mosa utan iðjuvera (>4 km) eftir árum (1990–2015), $F(4,47; 299,51) = 31,78$; $p < 0,0001$ (G–G epsilon 0,89), $n=68$. Að meðaltali var styrkur sinks langhæstur árið 2000, eða 28,91 mg/kg. Hin árin var styrkur að meðaltali á bilinu 18,55–24,06 mg/kg (39. mynd).

Után iðjuvera var styrkur sinks mjög misjafn eftir landsvæðum, einna lægstur á Norðvesturlandi en yfirleitt hæstur á gosbeltinu. Þar sem styrkur sinks mældist hæstur telst mengun *lítillsháttar* (40. mynd).



39. mynd. Meðalstyrkur (mg/kg) sinks (Zn) í tildurmosa 1990–2015, þ.e. utan (>4 km) iðnaðarsvæðanna á Grundartanga, í Reyðarfirði og í Straumsvík. Niðurstöður byggja á sýnum frá 68 stöðum þar sem mosa hefur verið safnað endurtekið frá 1990, sjá 40. mynd. Lóðrétt strik tákna staðalskekkju. Marktækur munur: *** = $p < 0,001$.



40. mynd. Styrkur (mg/kg) sinka (Zn) í tildurmosa 2005, 2010 og 2015. Mismunandi litir sýna mengunarflokka byggða á reiknuðum mengunarsuðlum (MS), sjá 3. töflu. Svartir hringir tákna þá 68 staði þar sem sýnataka hefur verið endurtekin frá upphafi árið 1990.

5.3 Áhrif iðjuvera á styrk efna

5.3.1 Samband fjarlægðar frá iðjuverum og efnastyrks

Aðhvarfsgreining á milli fjarlægðar frá iðjuverunum á Grundartanga, í Reyðarfirði og í Straumsvík og styrks efna sýndi að styrkur margra þeirra breyttist marktækt með fjarlægð (4. tafla). Við öll iðjuverin fellur styrkur arsens, nikkels, blýs og antimons marktækt með aukinni fjarlægð frá verunum. Fyrir arsen var þetta samband þegar komið fram árið 2000 á Grundartanga og í Straumsvík en fyrir þann tíma eru mælingar of fáar til að unnt sé að meta sambandið. Í Reyðarfirði var þetta komið fram árið 2010. Fyrir nikkell var sambandið orðið marktækt frá upphafi mælinga í Straumsvík, frá árinu 2005 á Grundartanga og frá 2010 í Reyðarfirði. Hvað varðar blý var sambandið komið fram árið 2000 í Straumsvík og á Grundartanga, en í Reyðarfirði frá 2010. Rétt er að nefna að árin 1990 og 1995 voru sýni við iðjuverin fá og að álverið í Reyðarfirði tók ekki til starfa fyrr en í apríl 2007. Antimon, sem var mælt í fyrsta skipti árið 2015, sýndi sterkt samband við fjarlægð við öll iðjuverin þrjú.

Nokkur önnur efni sýna marktæka breytingu með fjarlægð frá iðjuverum. Marktækt neikvætt samband er milli fjarlægðar og styrks kadmíns bæði í Straumsvík (2000–2015) og á Grundartanga (2010). Sama er að segja um styrk kopars á Grundartanga (2000, 2010 og 2015) og í Straumsvík (2015). Styrkur brennisteins er einnig tengdur fjarlægð frá verunum en marktækt neikvætt samband fjarlægðar og styrks kom fram á Grundartanga (2005–2015) og í Reyðarfirði (2010–2015). Í Straumsvík hefur neikvætt samband fundist á milli fjarlægðar og styrks sinks nánast öll árin.

Athygli vekur að eitt efni sýnir jákvætt samband við fjarlægð en það er kvikasilfur við Grundartanga (2015).

4. tafla. Samband styrks efna í mosa 1990–2015 og fjarlægðar frá iðjuverum metið með línulegri aðhvarfsgreiningu, reiknuð á \log_{10} -umbreytt gildi fyrir styrk efnis. Í greininguna voru tekin sýni sem voru innan við 35 km frá viðkomandi iðjuveri. Marktækt samband er: *** = $P < 0,001$; ** = $P < 0,01$; * = $P < 0,05$; EM = ekki marktækt. Tölur innan sviga tákna fjölda sýna.

Efni	Iðjuver	1990	1995	2000	2005	2010	2015
As	Grundartangi		(2)	– ** (10)	– *** (17)	– *** (18)	– ** (15)
	Reyðarfjörður		(2)	EM (13)	EM (15)	– ** (15)	– * (15)
	Straumsvík		(3)	– *** (17)	– *** (18)	– *** (18)	– *** (22)
B	Grundartangi						EM (15)
	Reyðarfjörður						EM (15)
	Straumsvík						EM (22)
Cd	Grundartangi	EM (9)	EM (9)	EM (10)	EM (17)	– ** (18)	EM (15)
	Reyðarfjörður	EM (5)	EM (5)	EM (13)	EM (15)	EM (15)	EM (15)
	Straumsvík	EM (7)	EM (8)	– * (17)	– ** (18)	– * (18)	– ** (22)
Cr	Grundartangi	EM (9)		EM (10)	EM (17)	EM (18)	EM (15)
	Reyðarfjörður	EM (5)	EM (5)	EM (13)	EM (15)	EM (15)	EM (15)
	Straumsvík	EM (7)	EM (8)	EM (17)	EM (18)	EM (18)	EM (22)
Cu	Grundartangi	EM (9)	EM (9)	– * (10)	EM (17)	– * (18)	– * (15)
	Reyðarfjörður	EM (5)	EM (5)	EM (13)	EM (15)	EM (15)	EM (15)
	Straumsvík	EM (7)	EM (8)	EM (17)	EM (18)	EM (18)	– ** (22)
Fe	Grundartangi	EM (9)	EM (9)	EM (10)	EM (17)	EM (18)	EM (15)
	Reyðarfjörður	EM (5)	EM (5)	EM (13)	EM (15)	EM (15)	EM (15)
	Straumsvík	EM (7)	EM (8)	EM (17)	EM (18)	EM (18)	EM (22)
Hg	Grundartangi		(2)	EM (10)	EM (17)	EM (18)	+ ** (15)
	Reyðarfjörður		(2)	EM (13)	EM (15)	EM (15)	EM (15)
	Straumsvík		(3)	EM (17)	EM (18)	EM (18)	EM (22)
Ni	Grundartangi	EM (9)	EM (9)	EM (10)	– * (17)	– ** (18)	– *** (15)
	Reyðarfjörður	EM (5)	EM (5)	EM (13)	EM (15)	– *** (15)	– ** (15)
	Straumsvík	– * (7)	– * (8)	– *** (17)	– *** (18)	– *** (18)	– *** (22)
Pb	Grundartangi	EM (9)	EM (9)	– ** (10)	EM (17)	– ** (18)	– ** (15)
	Reyðarfjörður	EM (5)	EM (5)	EM (13)	EM (15)	– * (15)	– * (15)
	Straumsvík	EM (7)	EM (8)	– * (17)	– * (18)	– * (18)	EM (22)
S	Grundartangi		(2)	EM (10)	– *** (17)	– ** (18)	– ** (15)
	Reyðarfjörður		(2)	EM (13)	EM (15)	– ** (15)	– ** (15)
	Straumsvík		(3)	EM (17)	EM (18)	EM (18)	EM (22)
Sb	Grundartangi						– *** (15)
	Reyðarfjörður						– ** (15)
	Straumsvík						– *** (22)
V	Grundartangi	EM (9)	EM (9)	EM (10)	EM (17)	EM (18)	EM (15)
	Reyðarfjörður	EM (5)	EM (5)	EM (13)	EM (15)	EM (15)	EM (15)
	Straumsvík	EM (7)	EM (8)	– ** (17)	EM (18)	EM (18)	EM (22)
Zn	Grundartangi	EM (9)	EM (9)	EM (10)	EM (17)	EM (18)	EM (15)
	Reyðarfjörður	EM (5)	EM (5)	EM (13)	EM (15)	EM (15)	EM (15)
	Straumsvík	EM (7)	– ** (8)	EM (17)	– *** (18)	– ** (18)	– ** (22)

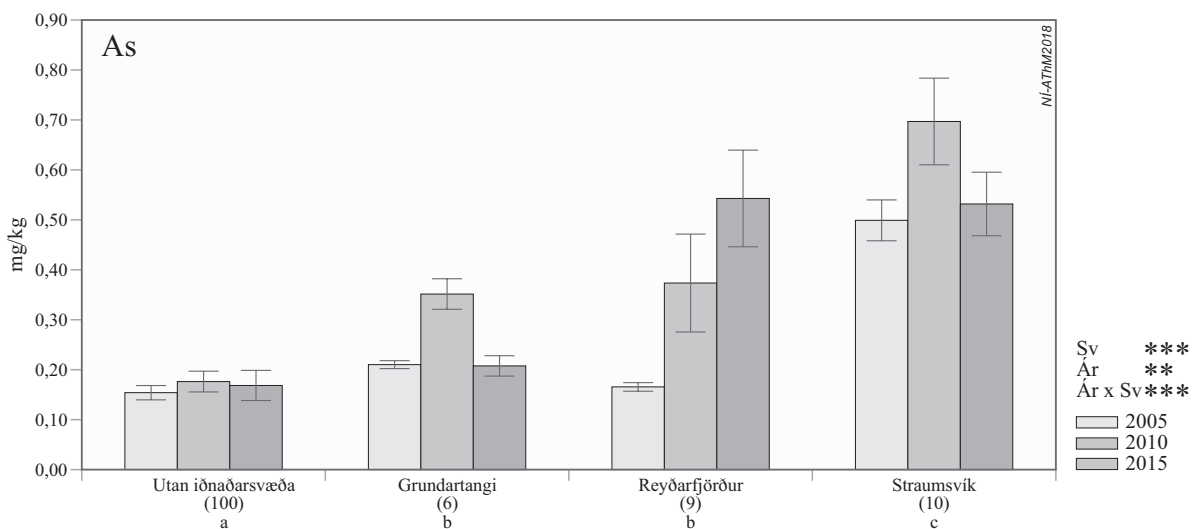
5.3.2 Styrkur efna við iðjuver, breytingar með tíma

Arsen (As)

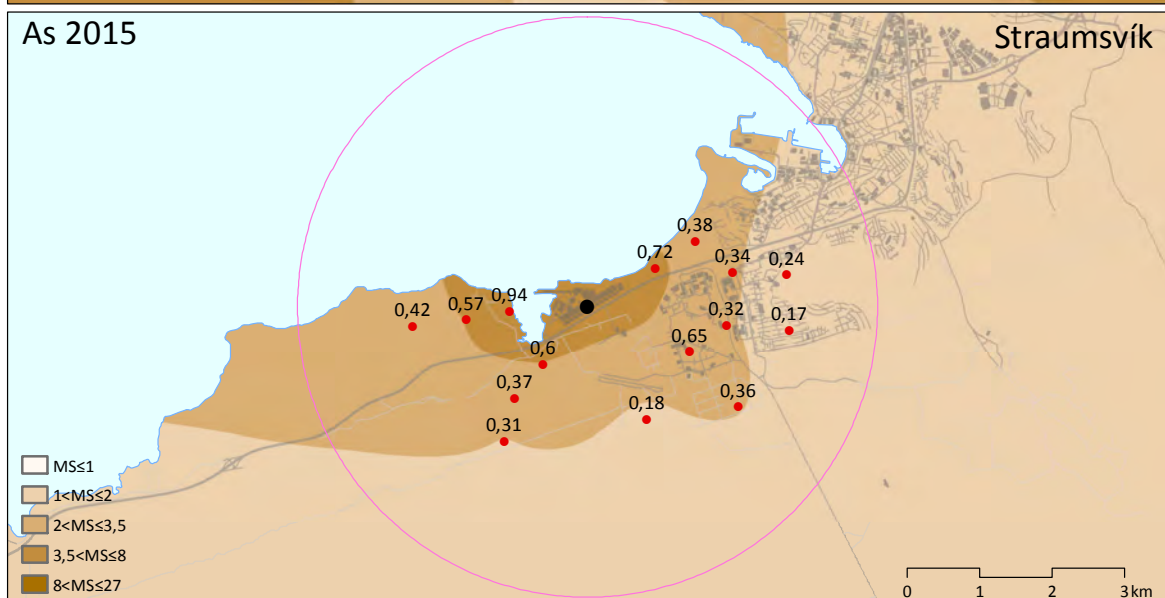
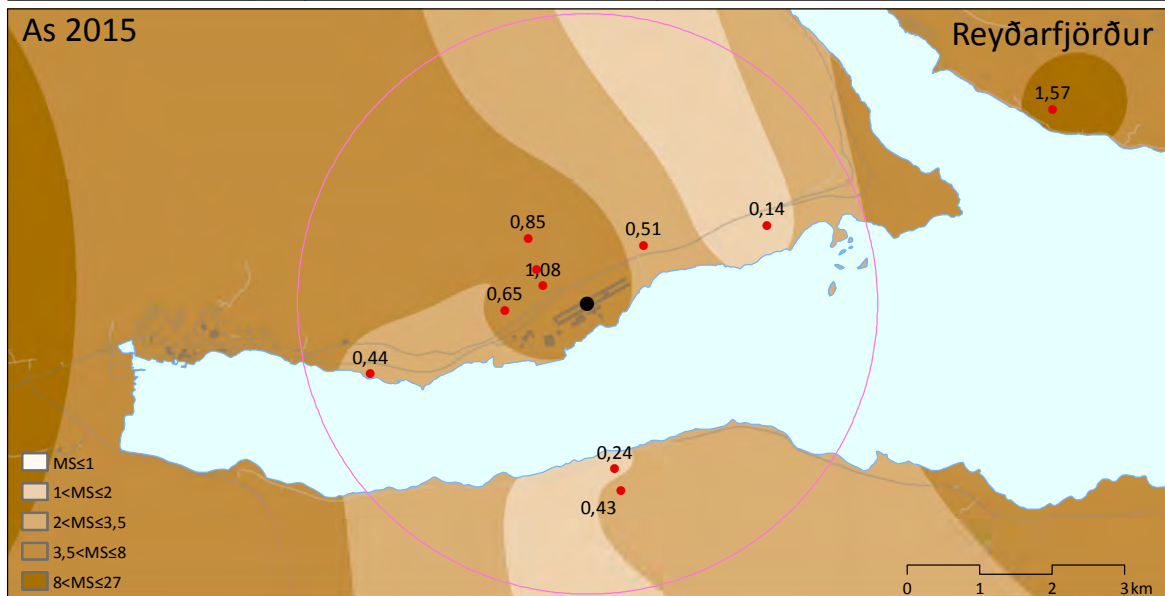
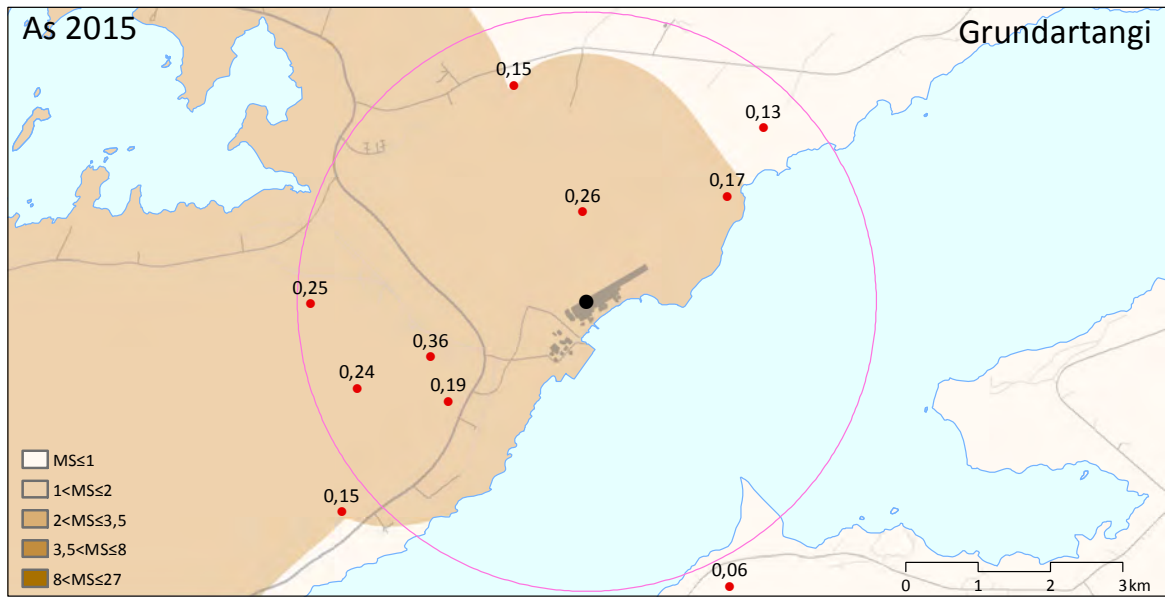
Samanburður á styrk arsens eftir svæðum og árum tímabilið 2005–2015 sýnir marktækan mun bæði milli ára og svæða auk þess sem samspil ára og svæða er marktækt (41. mynd). Samanborið við land utan iðnaðarsvæða er styrkur arsens hærrí við iðjuverin en utan þeirra. Minnstur er munurinn á Grundartanga en mestur í Straumsvík. Við iðjuverin er talsverður breytileiki milli ára. Bæði á Grundartanga og við Straumsvík mælist styrkur hæstur árið 2010 en niðurstöður frá Reyðarfirði gefa hins vegar til kynna að þar hafi styrkur arsens í mosa hækkað mikið frá 2005, þ.e. eftir að álverið tók til starfa árið 2007.

Kort yfir styrk arsens við iðjuverin gefa til kynna dreifingu efnisins í næsta nágrenni þeirra, hér aðeins sýnt fyrir árið 2015 (42. mynd). Á Grundartanga og þó einkanlega í Straumsvík eru hæstu gildin nálægt iðjuverunum. Í Reyðarfirði er ekki að sjá skýrt mynstur en þar er mikill breytileiki milli einstakra staða. Hæstu gildin eru við Ljósá austan við Hólmanes (1,57 mg/kg) um 7 km austan við álverið og við Seljateig (2,23 mg/kg) um 10 km vestan við verið en sá sýnatökustaður kemur ekki fram á kortinu.

Miðað við þá aðferð sem hér er notuð telst mengun af völdum arsens á Grundartanga árið 2015 vera *engin* eða *vísbending um mengun*. Í Reyðarfirði telst mengunin vera *veruleg* þar sem hæstu gildin mælast. Í Straumsvík telst næst álverinu vera *nokkur mengun* af völdum arsens (42. mynd).



41. mynd. Styrkur (mg/kg) arsens (As) í tildurmosa árin 2005, 2010 og 2015 utan iðnaðarsvæða (>4 km) og við iðnaðarsvæðin á Grundartanga, í Reyðarfirði og við Straumsvík (þöruð gildi). Lóðrétt strik tákna staðalskekkju. Tölfræðilegur samanburður svæða (Sv), ára (Ár) og samspil (Sv×Ár) er sýnt t.h. Bókstafir tákna mun á svæðum. Innan sviga er fjöldi sýna. Marktækur munur: *** = $p < 0,001$, ** = $p < 0,01$.

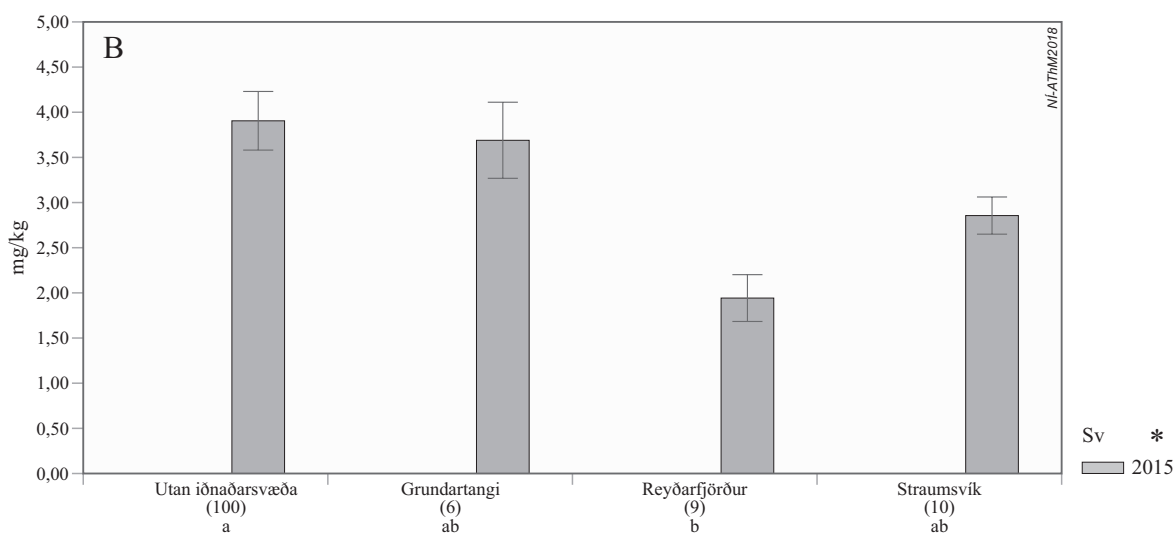


42. mynd. Styrkur (mg/kg) arsens (As) í tildurmosa árið 2015 við iðjuverin á Grundartanga, í Reyðarfirði og í Straumsvík. Mismunandi litir sýna mengunarflokka byggða á reiknuðum mengunarstuðlum (MS), sjá 3. töflu.

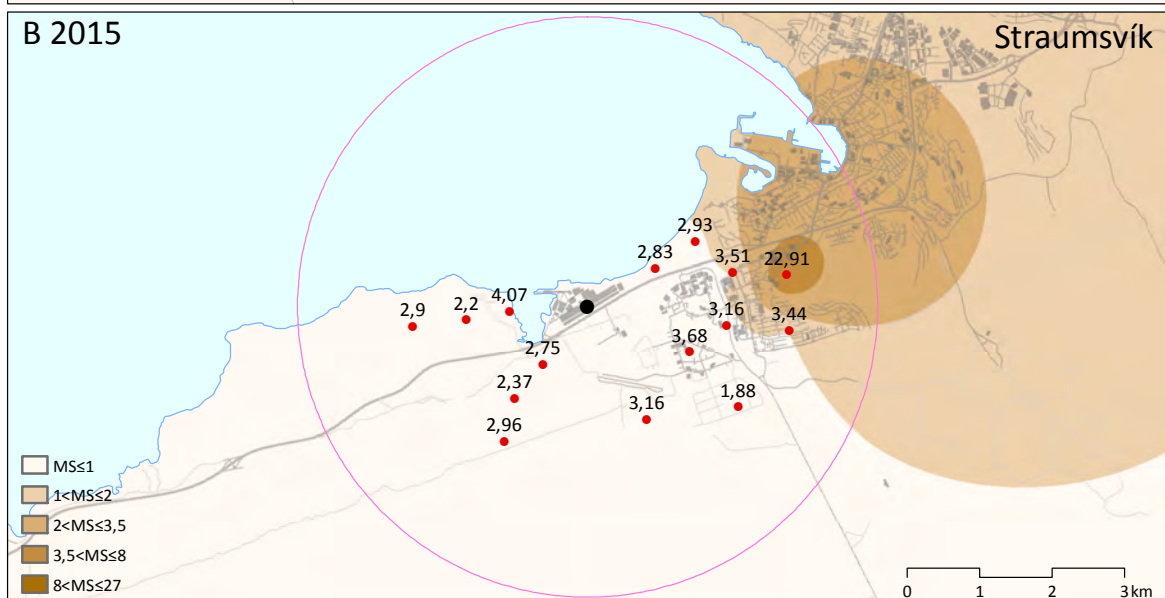
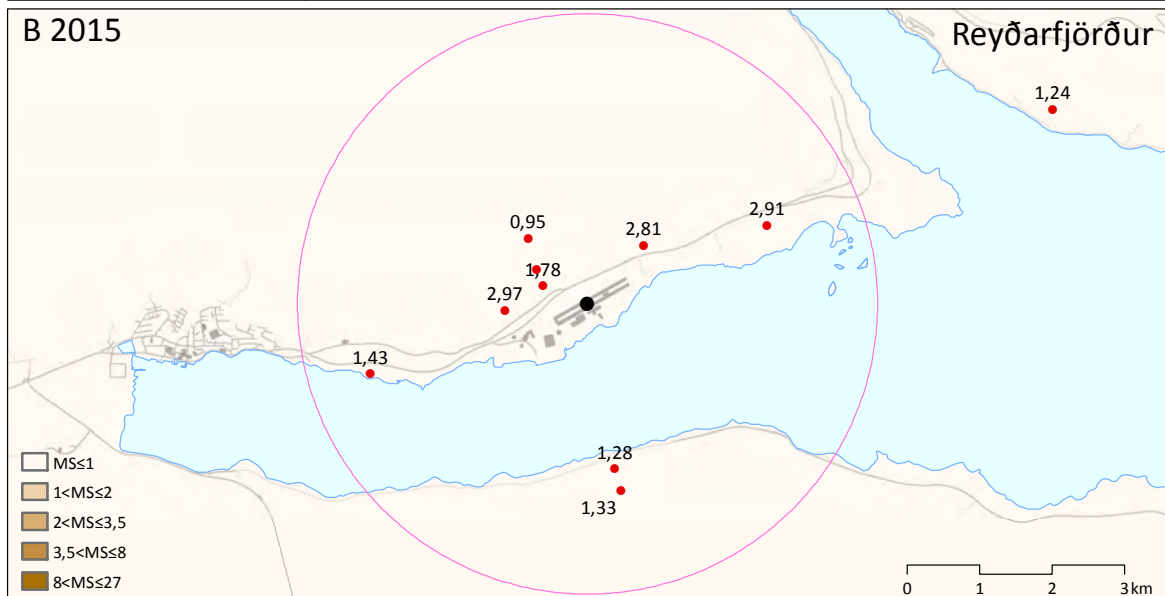
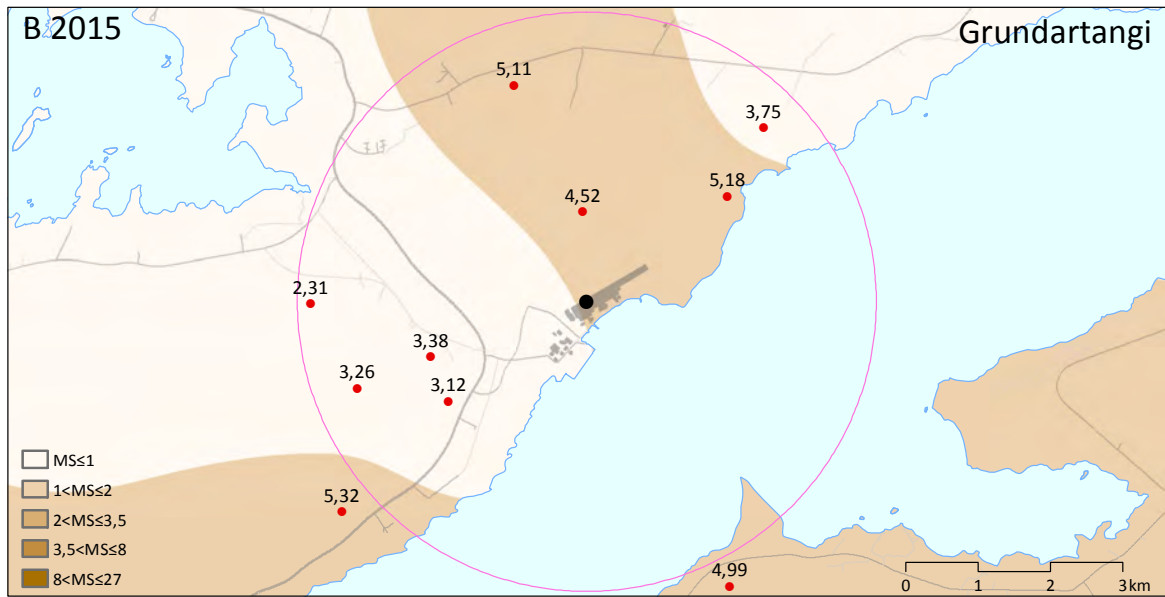
Bór (B)

Styrkur bórs í mosa var í fyrsta sinn mældur árið 2015 og samanburður í tíma því ekki mögulegur. Samanburður eftir svæðum sýnir að styrkur bórs er svipaður á öllum iðnaðarsvæðunum þremur en hann er hins vegar marktækt lægri í Reyðarfirði en á svæðum utan iðnaðarsvæðanna (>4 km) (43. mynd).

Kort yfir styrk bórs í mosa við iðnaðarsvæðin þrjú bendir ekki til mikilla áhrifa af völdum veranna (44. mynd). Samkvæmt mengunarkvarðanum sem notaður er í þessari rannsókn telst mengun við Grundartanga vera *engin* eða *vísbending um mengun*. Í Reyðarfirði falla öll sýni í flokkinn *engin mengun*. Við Straumsvík eru öll sýni í lægsta flokki mengunar nema austast á Völlunum, þar er eitt sýni sem er það hátt að það fellur í flokkinn *nokkur mengun*.



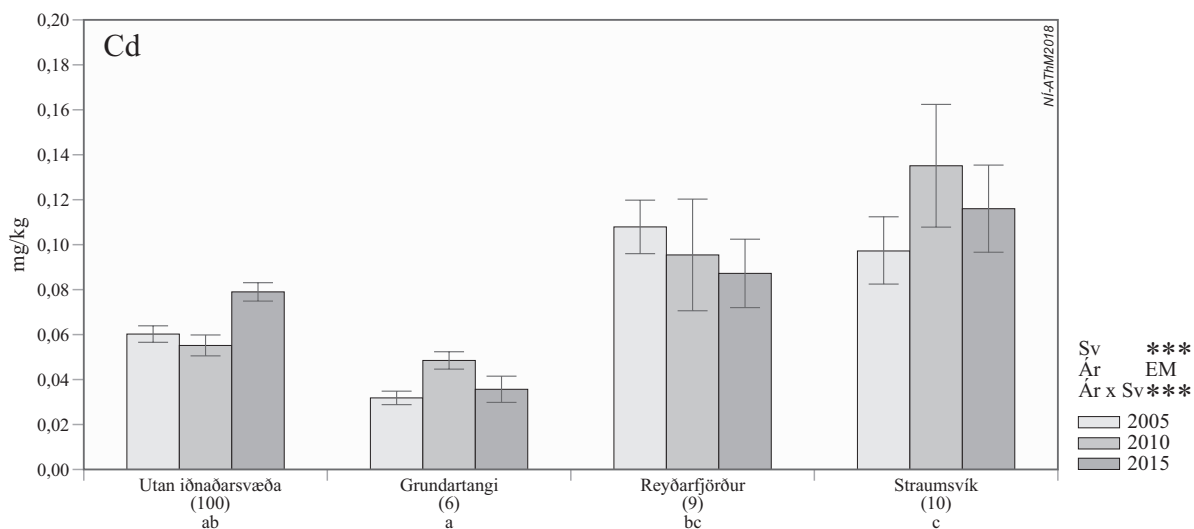
43. mynd. Styrkur (mg/kg) bórs (B) í tildurmosa árið 2015 utan iðnaðarsvæða (>4 km) og við iðnaðarsvæðin á Grundartanga, í Reyðarfirði og við Straumsvík. Lóðrétt strik tákna staðalskekkju. Tölfræðilegur samanburður svæða (Sv) er sýndur t.h. Bókstafir tákna mun á svæðum. Innan sviga er fjöldi sýna. Marktækur munur: * = $p < 0,05$.



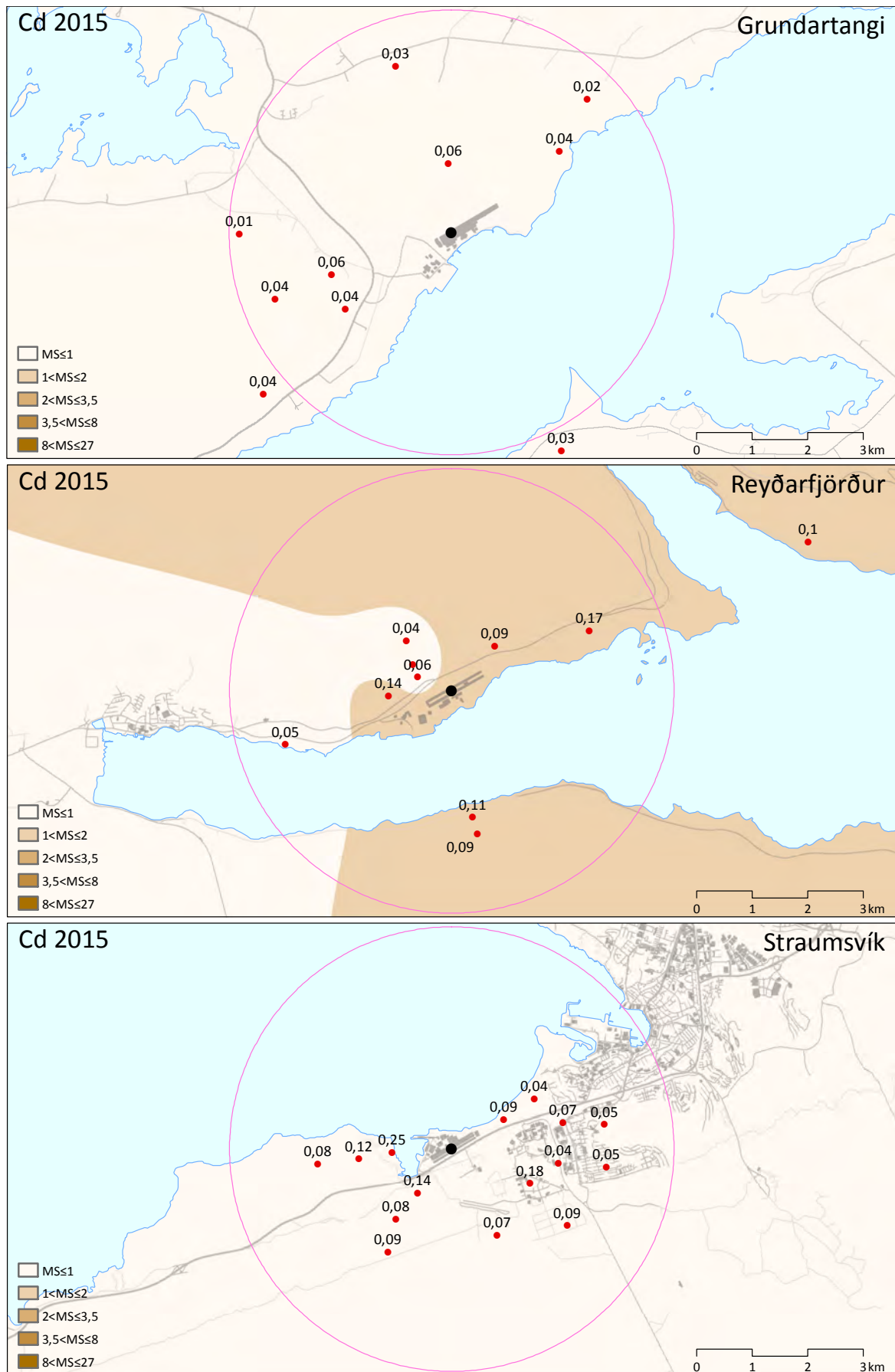
44. mynd. Styrkur (mg/kg) bórs (B) í tildurmosa árið 2015 við iðjuverin á Grundartanga, í Reyðarfirði og í Straumsvík. Mismunandi litir sýna mengunarflokka byggða á reiknuðum mengunarstuðlum (MS), sjá 3. töflu.

Kadmín (Cd)

Samanburður á styrk kadmíns eftir svæðum og milli áraanna 2005, 2010 og 2015 sýndi marktækan mun milli svæða en ekki milli ára. Samspil ára og svæða var marktækt (45. mynd). Af iðnaðarsvæðunum var styrkur kadmíns lægstur á Grundartanga en talsvert hærri á bæði í Reyðarfirði og við Straumsvík (46. mynd).



45. mynd. Styrkur (mg/kg) kadmíns (Cd) í tildurmosa árin 2005, 2010 og 2015 utan iðnaðarsvæða (>4 km) og við iðnaðarsvæðin á Grundartanga, í Reyðarfirði og við Straumsvík (pöruð gildi). Lóðrétt strik tákna staðalskekkju. Tölfræðilegur samanburður svæða (Sv), ára (År) og samspil (Sv×År) er sýnt t.h. Bókstafir tákna mun á svæðum. Innan sviga er fjöldi sýna. Marktækur munur: *** = $p < 0,001$, EM = ekki marktækt.



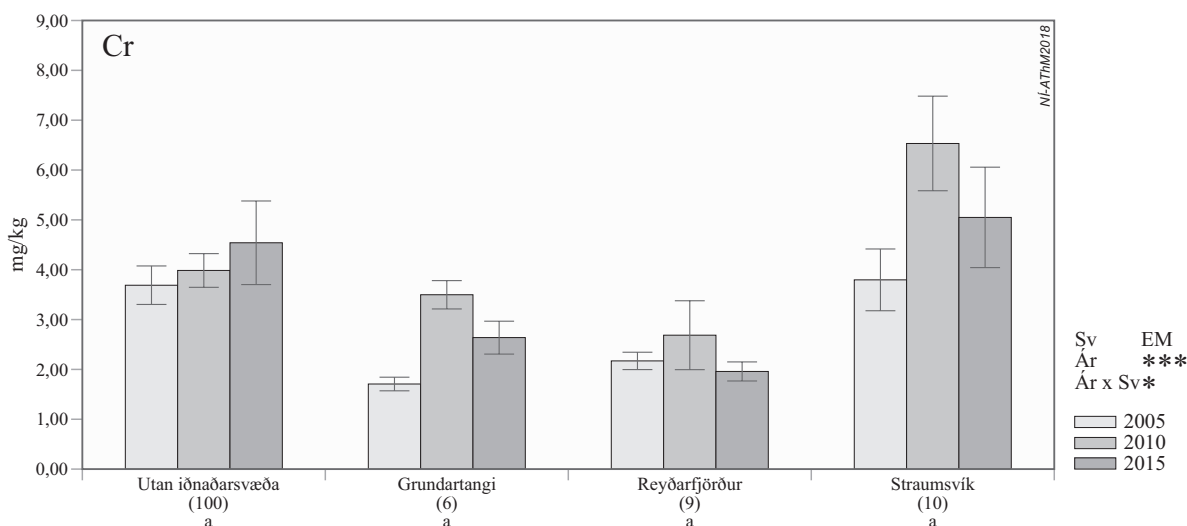
46. mynd. Styrkur (mg/kg) kadmíns (Cd) í tildurmosa árið 2015 við iðjuverin á Grundartanga, í Reyðarfirði og í Straumsvík. Mismunandi litir sýna mengunarflokka byggða á reiknuðum mengunarstuðlum (MS), sjá 3. töflu.

Króm (Cr)

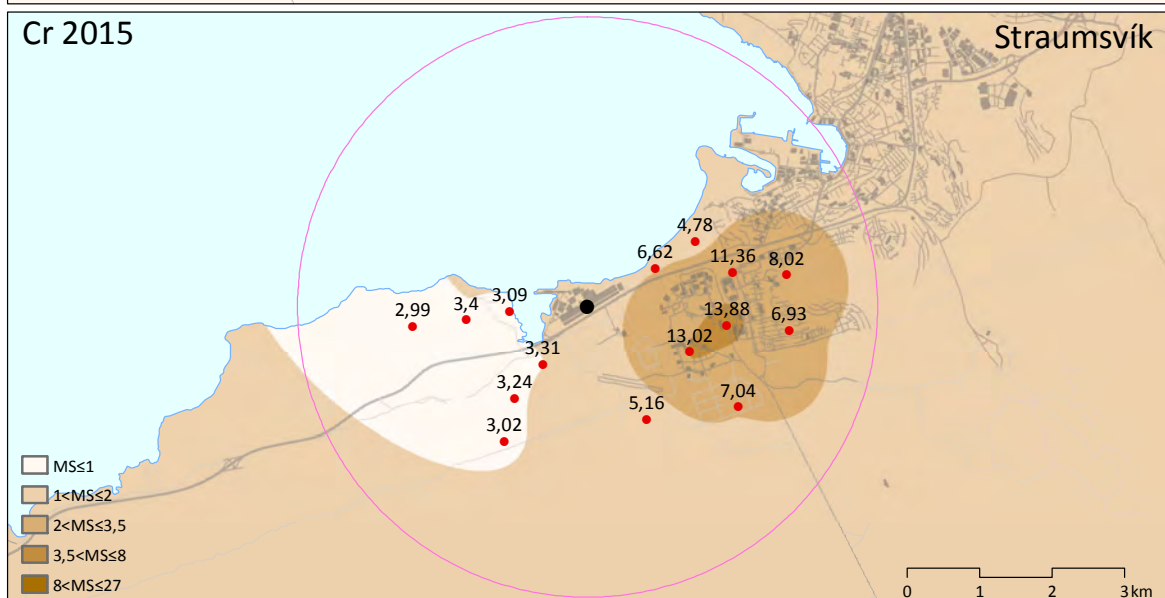
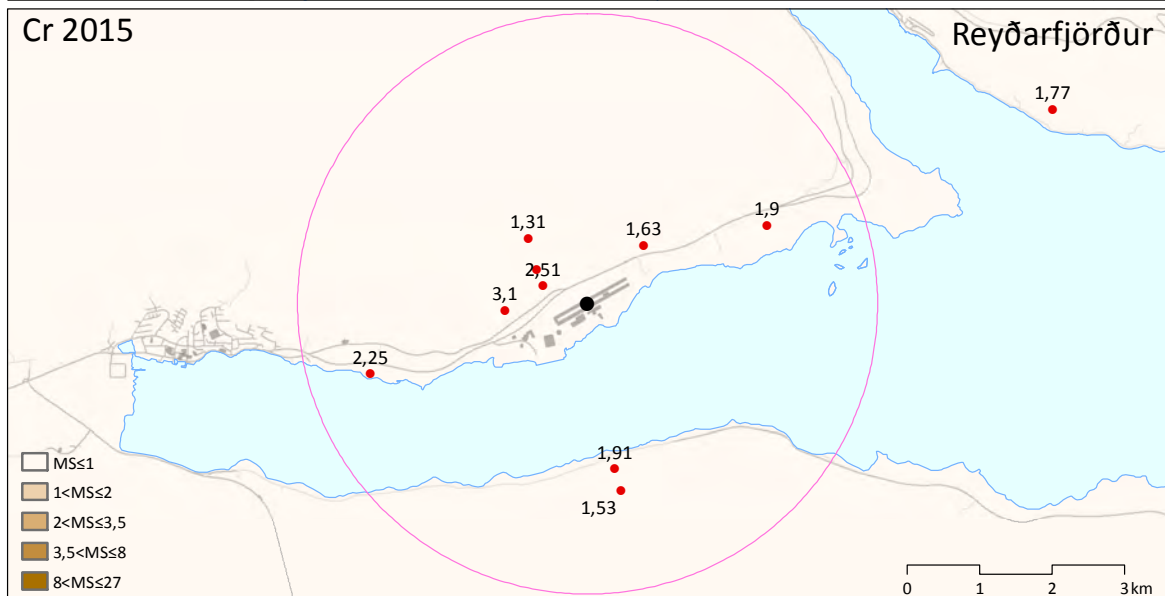
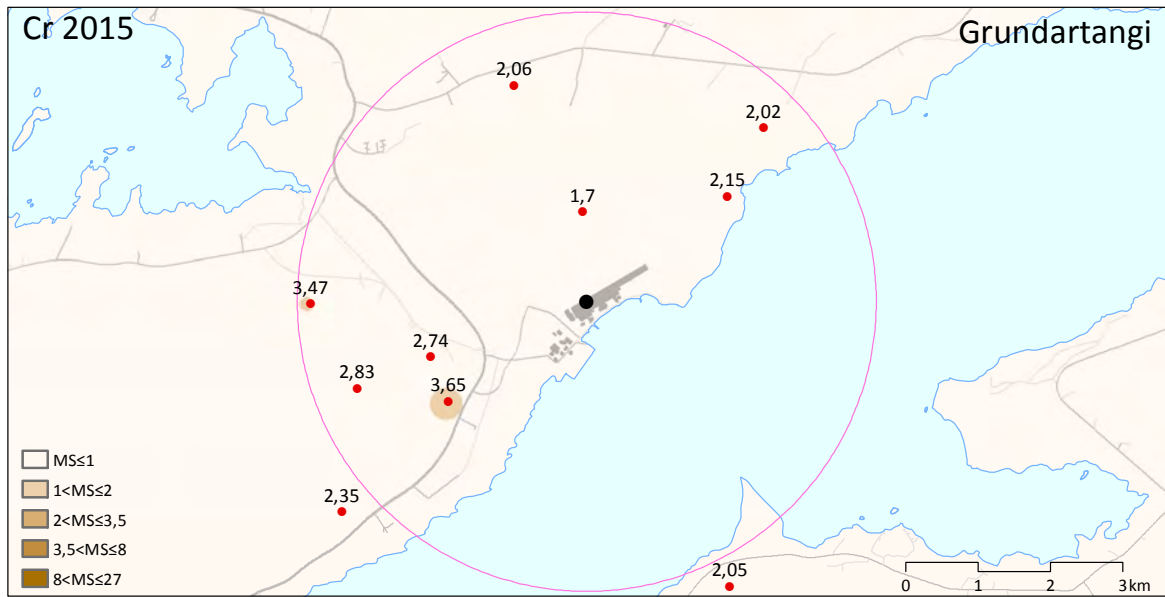
Samanburður á styrk króms við iðjuverin og utan þeirra árin 2005, 2010 og 2015 sýndi ekki marktækan mun á svæðum en mikinn mun eftir árum. Samspil svæða og ára var einnig marktækt (47. mynd). Það þýðir að styrkur breytist misjafnlega á einstökum svæðum eftir árum. Þegar styrkur síðustu mælinga, þ.e. 2010 og 2015 er skoðaður mælist hann alls staðar lægri við iðjuverin í síðara skiptið en utan iðjuvera mælist styrkurinn hins vegar að jafnaði hærri árið 2015 en 2010.

Dreifing króms næst iðnaðarsvæðunum árið 2015 sýnir ekki áberandi mynstur, hvorki á Grundartanga né í Reyðarfirði. Í Straumsvík má hins vegar merkja greinilega þungamiðju í styrk við iðnaðarsvæðið í Hellnahrauni (48. mynd).

Miðað við reiknaða mengunarstuðla er styrkur króms í Reyðarfirði alls staðar í lægsta mengunarflokki, þ.e. *engin mengun*. Á einum stað á Grundartanga nær styrkur yfir þau mörk og flokkast sem *vísbending um mengun*. Í Straumsvík eru hæstu gildin það há að þar telst mengun vera *nokkur* þar sem mest er (48. mynd).



47. mynd. Styrkur (mg/kg) króms (Cr) í tildurmosa árin 2005, 2010 og 2015 utan iðnaðarsvæða (>4 km) og við iðnaðarsvæðin á Grundartanga, í Reyðarfirði og við Straumsvík (þöruð gildi). Lóðrétt strik tákna staðalskekkju. Tölfræðilegur samanburður svæða (Sv), ára (Ár) og samspil (Sv×Ár) er sýnt t.h. Bókstafir tákna mun á svæðum. Innan sviga er fjöldi sýna. Marktækur munur: *** = $p < 0,001$, * = $p < 0,05$, EM = ekki marktækt.



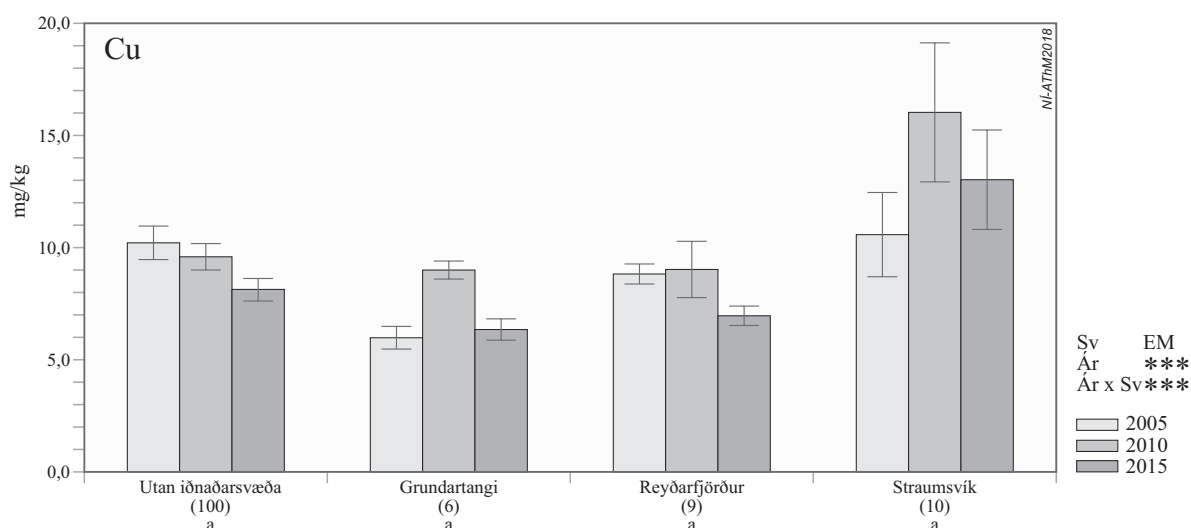
48. mynd. Styrkur (mg/kg) króms (Cr) í tildurmosa árið 2015 við iðjuverin á Grundartanga, í Reyðarfirði og í Straumsvík. Mismunandi litir sýna mengunarflokka byggða á reiknuðum mengunarstuðlum (MS), sjá 3. töflu.

Kopar (Cu)

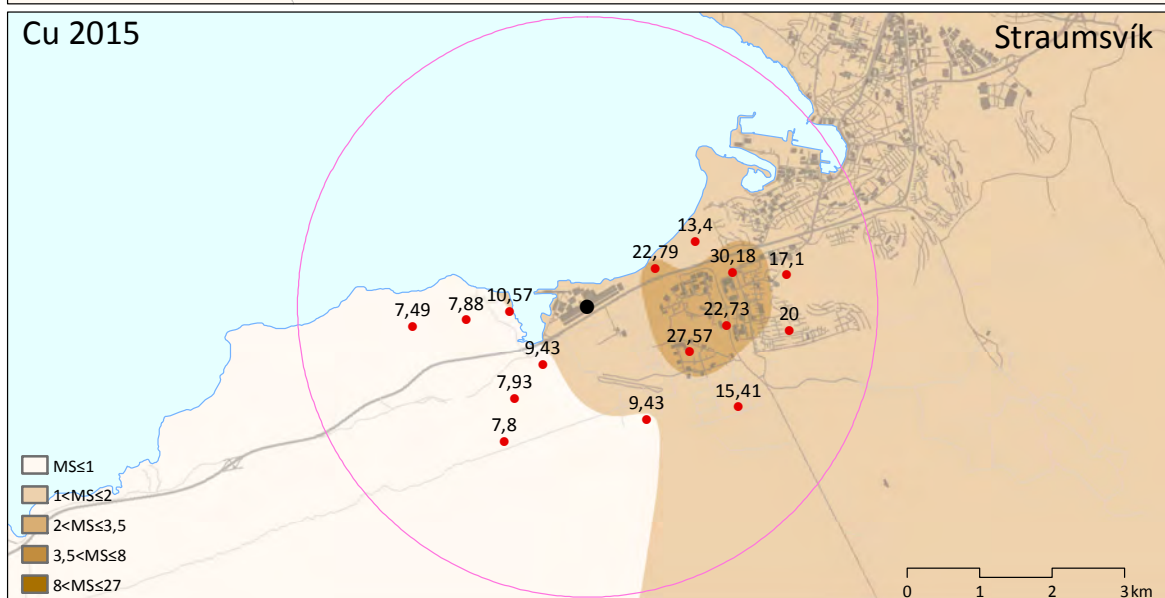
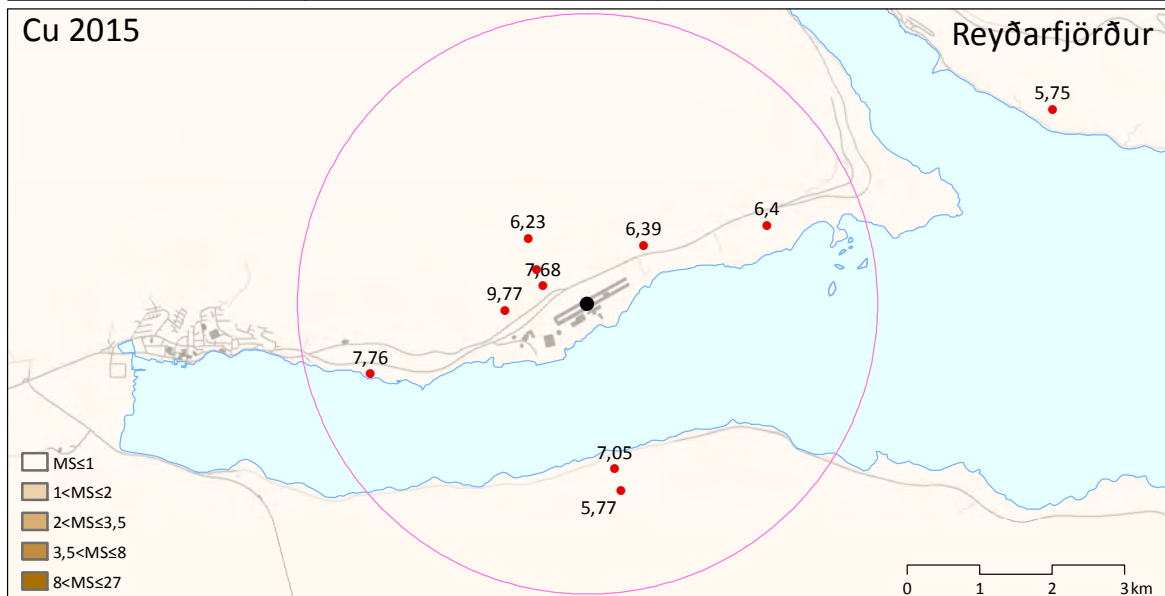
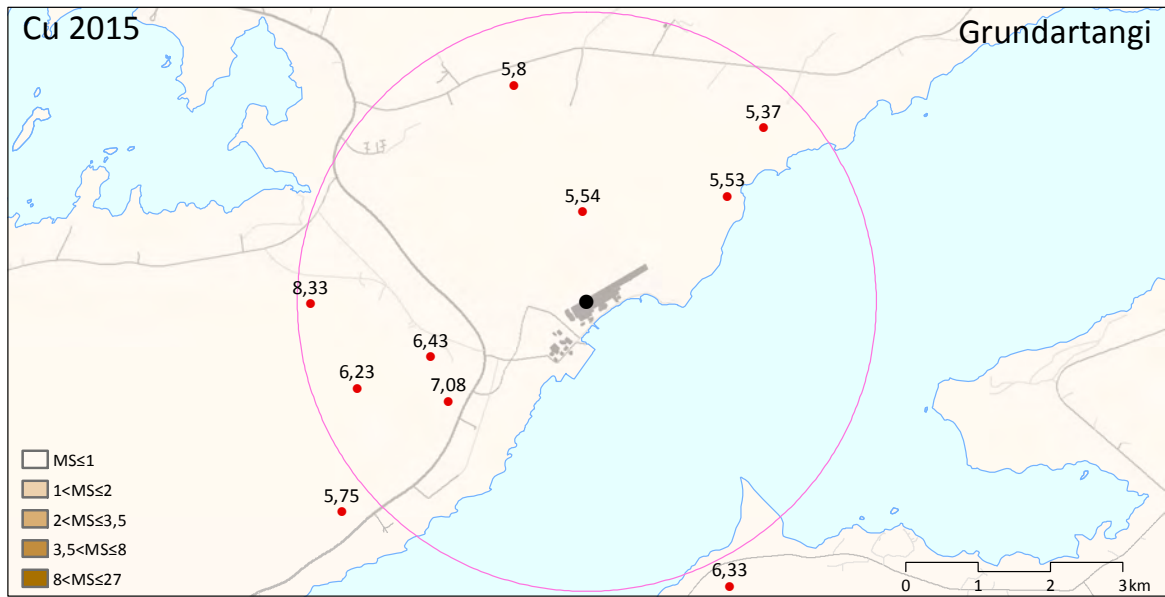
Samanburður á styrk kopars eftir svæðum árabilið 2005–2015 sýndi marktækan mun á milli ára en ekki á milli svæða. Samspil svæða og ára var einnig marktækt (49. mynd) sem þýðir að breytingar á styrk milli ára eru misjafnar eftir svæðum.

Styrkur kopars í mosasýnum við Grundartanga árið 2015 sýnir ekki áberandi mynstur sem tengist iðjuverunum. Í Reyðarfirði eru hæstu gildin norðvestur af álverinu og gildi lækka yfirleitt með aukinni fjarlægð frá veri. Í Straumsvík var styrkur kopars mjög misjafn. Langhæstur var hann við iðnaðarsvæðið í Hellnahrauni og við íbúðabyggðina á Völlunum á svæði sem er 1–2,5 km austan við álverið (50. mynd).

Samkvæmt þeim mengunarkvarða sem hér er notaður telst mengun af völdum kopars *ekki vera nein* á Grundartanga og í Reyðarfirði en í Straumsvík falla hæstu gildin austur af álverinu í flokkinn *lítilsháttar mengun* (50. mynd).



49. mynd. Styrkur (mg/kg) kopars (Cu) í tildurmosa árin 2005, 2010 og 2015 utan iðnaðarsvæða (>4 km) og við iðnaðarsvæðin á Grundartanga, í Reyðarfirði og við Straumsvík (þöruð gildi). Lóðrétt strik tákna staðalskekkju. Tölfræðilegur samanburður svæða (Sv), ára (Ár) og samspil (Sv x Ár) er sýnt t.h. Bókstafir tákna mun á svæðum. Innan sviga er fjöldi sýna. Marktækur munur: *** = $p < 0,001$, EM = ekki marktækt.



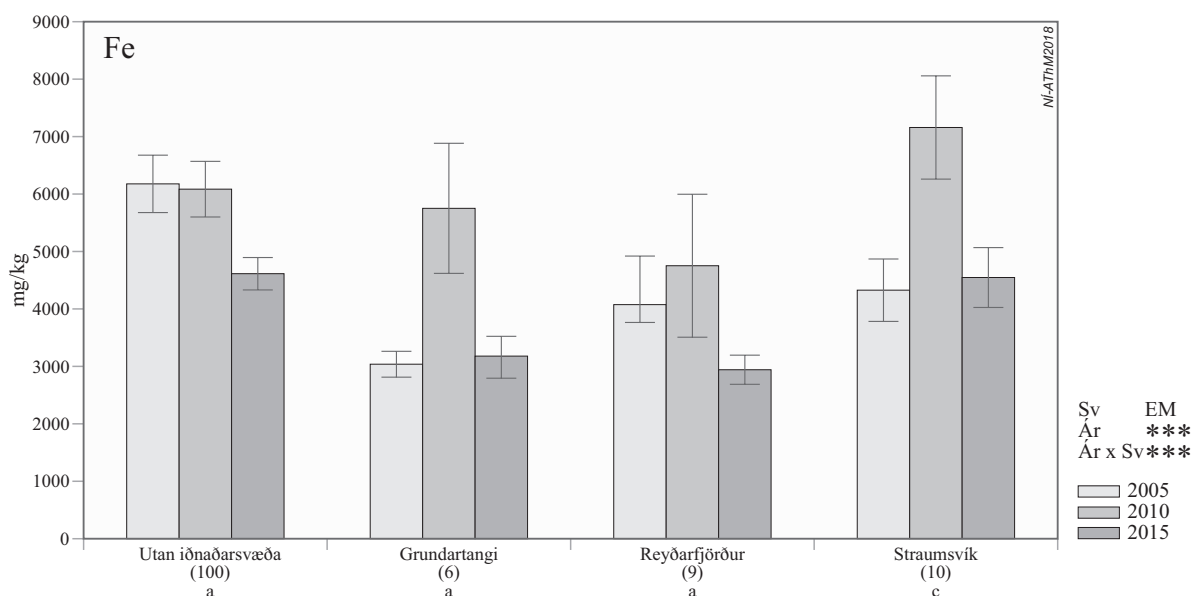
50. mynd. Styrkur (mg/kg) kopars (Cu) í tildurmosa árið 2015 við iðjuverin á Grundartanga, í Reyðarfirði og í Straumsvík. Mismunandi litir sýna mengunarflokka byggða á reiknuðum mengunarstuðlum (MS), sjá 3. töflu.

Járn (Fe)

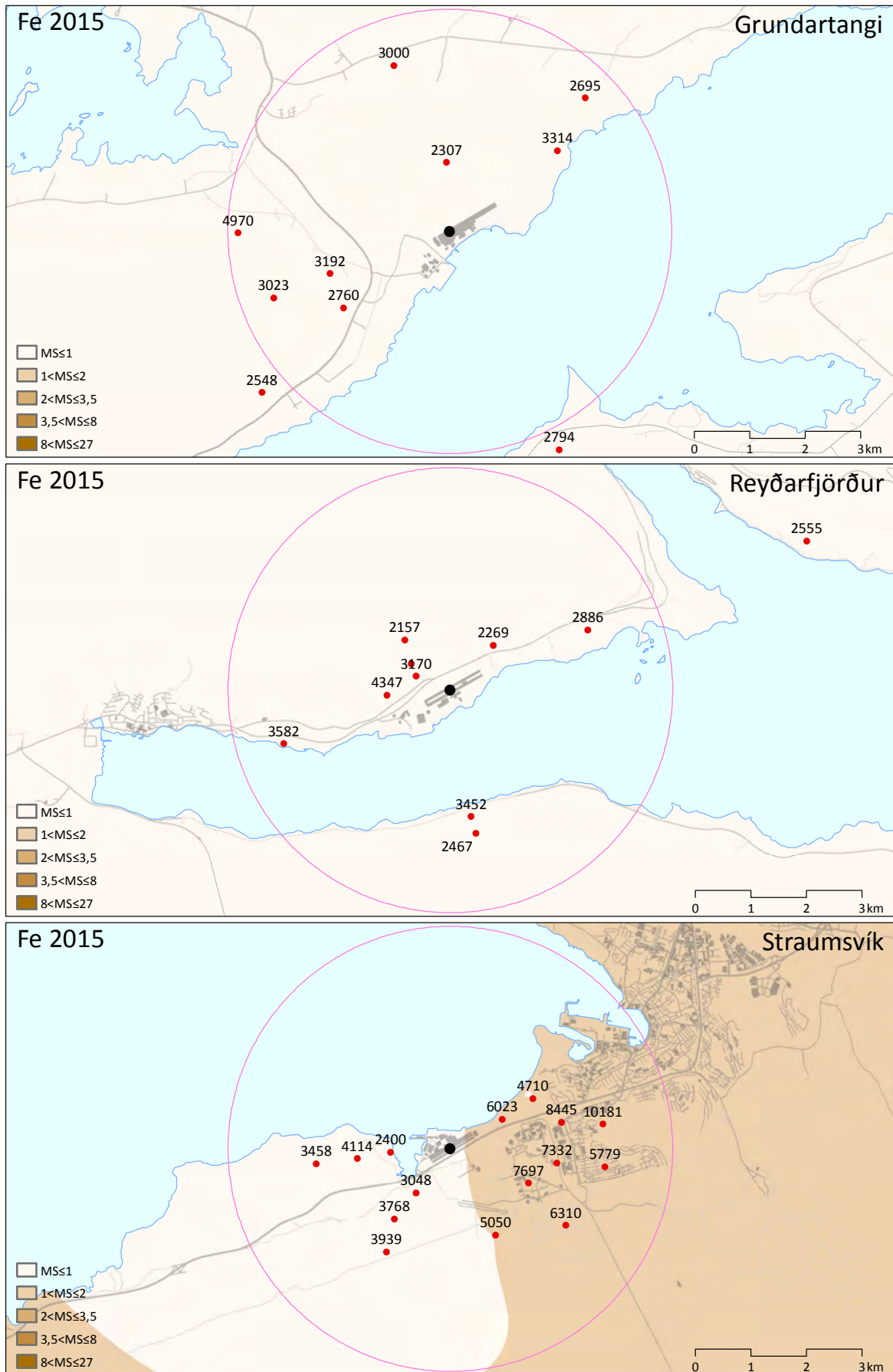
Samanburður á styrk járn timerabilið 2005–2015 sýndi ekki marktækan mun á svæðum en áramunur og samspil ára og svæða var það aftur á móti (51. mynd). Styrkur járn timer var því breytilegur á milli ára eftir því hvaða svæði átti í hlut. Á iðnaðarsvæðunum þremur mælist styrkur járn timer að jafnaði hæstur árið 2010 en styrkurinn hafði þar lækkað verulega árið 2015. Það átti einnig við um land utan iðnaðarsvæða.

Þegar styrkur járn timer árið 2015 er skoðaður í næsta nágrenni iðjuveranna er ekki að sjá sterkt dreifingarmynstur hvorki á Grundartanga né í Reyðarfirði. Hins vegar benda niðurstöður frá Straumsvík til þess að austur af verinu sé styrkur talsvert hærri en vestan við verið (52. mynd).

Miðað við reiknaða mengunarstuðla er *ekki um neina* mengun að ræða af völdum járn timer hvorki á Grundartanga né í Reyðarfirði. Við Straumsvík flokkast hæstu gildin sem annað hvort sem *visbending um mengun* eða *lítillsháttar mengun* (52. mynd).



51. mynd. Styrkur (mg/kg) járn timer (*Fe*) í tildurmosa árin 2005, 2010 og 2015 utan iðnaðarsvæða (>4 km) og við iðnaðarsvæðin á Grundartanga, í Reyðarfirði og við Straumsvík (þöruð gildi). Lóðrétt strik tákna staðalskekkju. Tölfræðilegur samanburður svæða (Sv), ára (År) og samspil (Sv×År) er sýnt t.h. Bókstafir tákna mun á svæðum. Innan sviga er fjöldi sýna. Marktækur munur: *** = $p < 0,001$, EM = ekki marktækt.

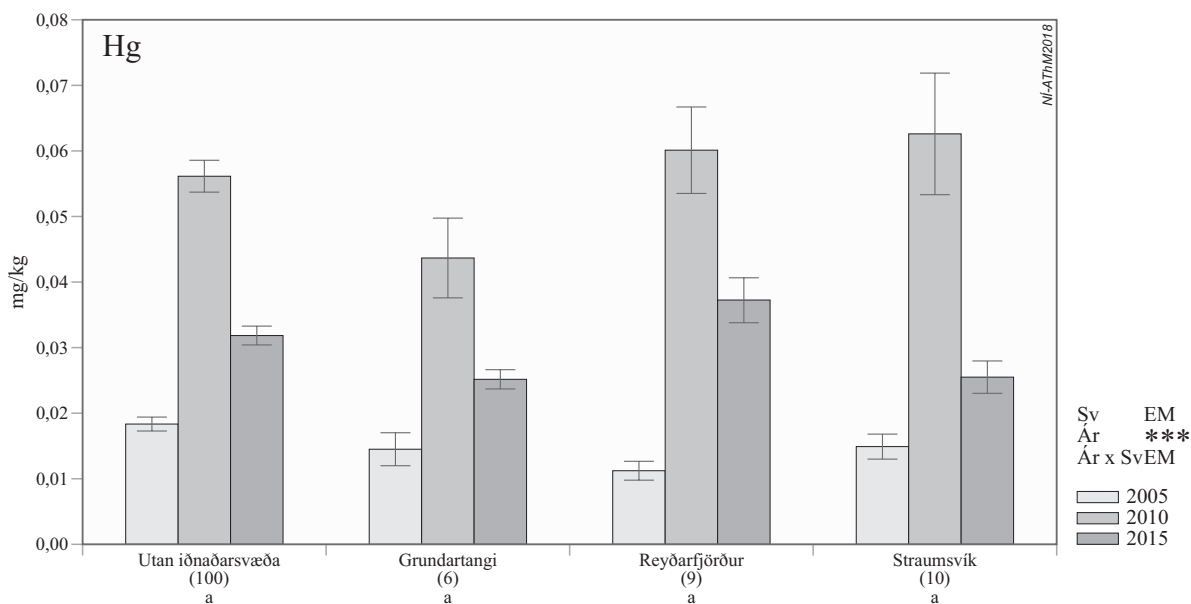


52. mynd. Styrkur (mg/kg) járns (Fe) í tildurmosa árið 2015 við iðjuverin á Grundartanga, í Reyðarfirði og í Straumsvík. Mismunandi litir sýna mengunarflokka byggða á reiknuðum mengunarstuðlum (MS), sjá 3. töflu.

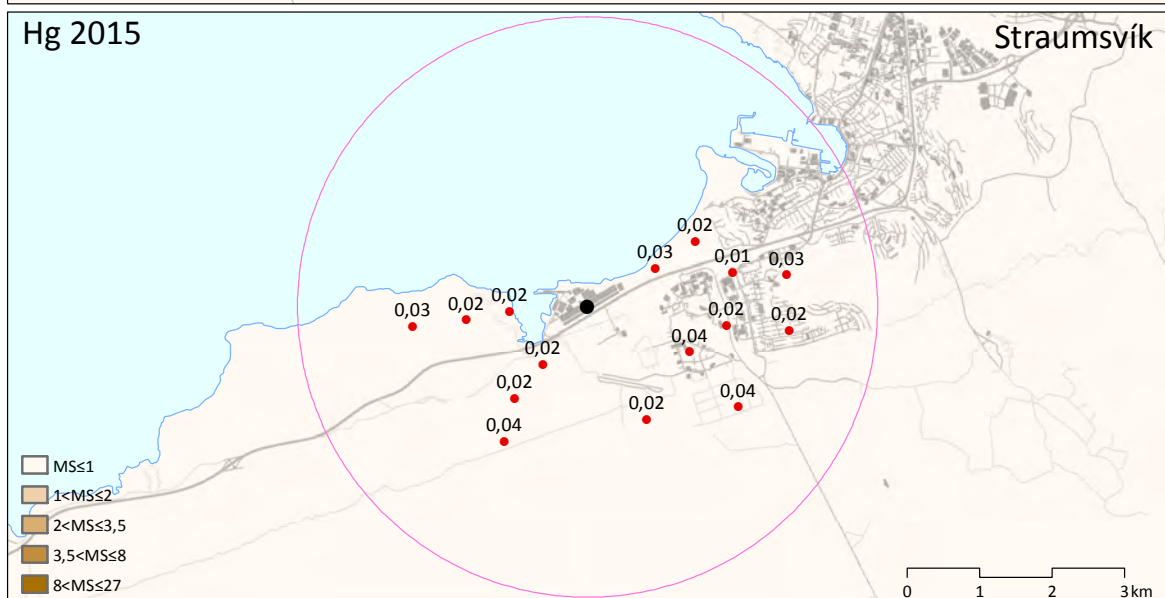
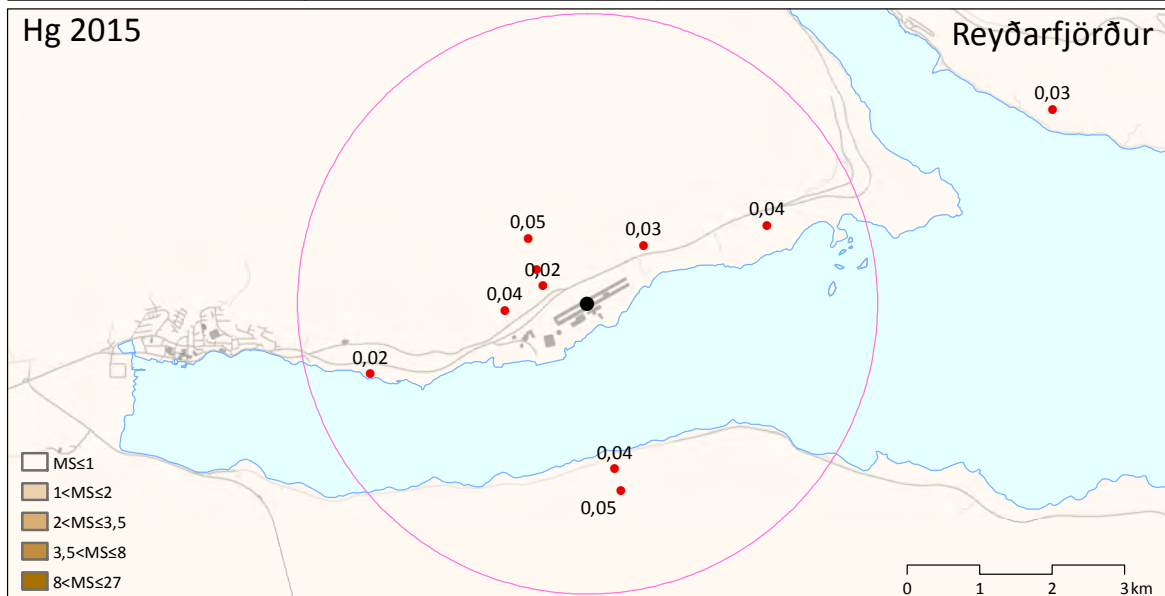
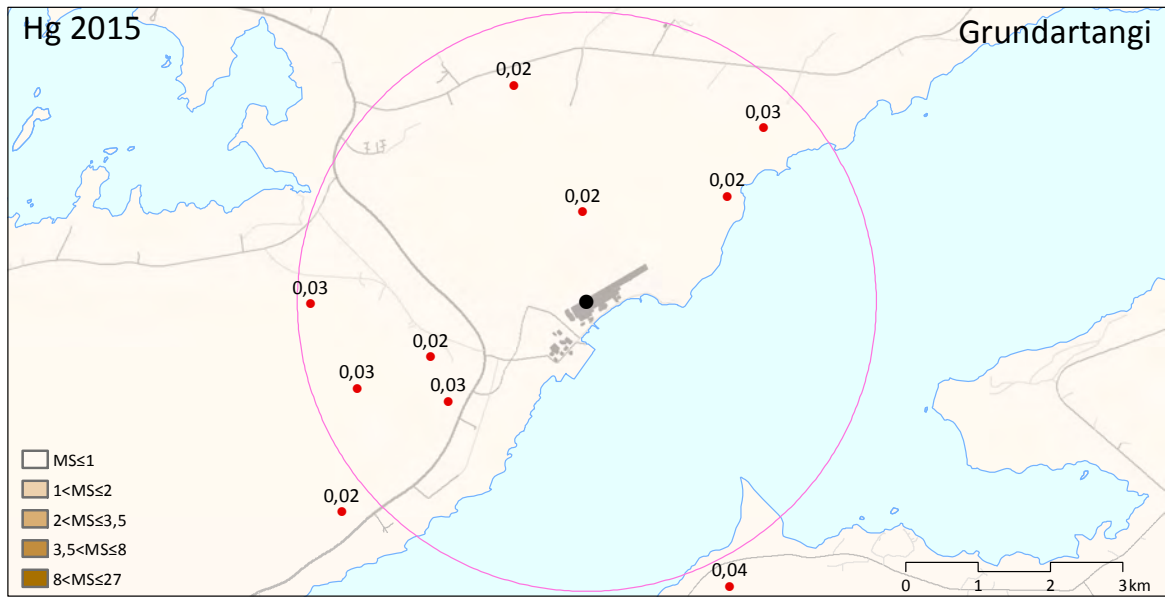
Kvikasilfur (Hg)

Mikill og marktækur munur var á styrk kvikasilfurs á milli ára tímabilið 2005–2015 en hvorki var munur á svæðum né á samspili milli ára og svæða (53. mynd). Styrkur kvikasilfurs var á öllum svæðunum hæstur árið 2010, talsvert lægri árið 2015 en lægstur árið 2005.

Styrkur efnisins árið 2015 gefur ekki til kynna mikinn mun í næsta nágrenni iðjuveranna og miðað við mengunarstuðla tilheyra öll sýni lægsta mengunarflokki, þ.e. *engin mengun* (54. mynd).



53. mynd. Styrkur (mg/kg) kvikasilfurs (Hg) í tildurmosa árin 2005, 2010 og 2015 utan iðnaðarsvæða (>4 km) og við iðnaðarsvæðin á Grundartanga, í Reyðarfirði og við Straumsvík. Lóðrétt strik tákna staðalskekkju. Tölfræðilegur samanburður svæða (Sv), ára (Ár) og samspil (Sv×Ár) er sýnt t.h. Bókstafir tákna mun á svæðum. Innan sviga er fjöldi sýna. Marktækur munur: *** = $p < 0,001$, EM = ekki marktækt.



54. mynd. Styrkur (mg/kg) kvikasilfurs (Hg) í tildurmosa árið 2015 við iðjuverin á Grundartanga, í Reyðarfirði og í Straumsvík. Mismunandi litir sýna mengunarflokka byggða á reiknuðum mengunarstuðlum (MS), sjá 3. töflu.

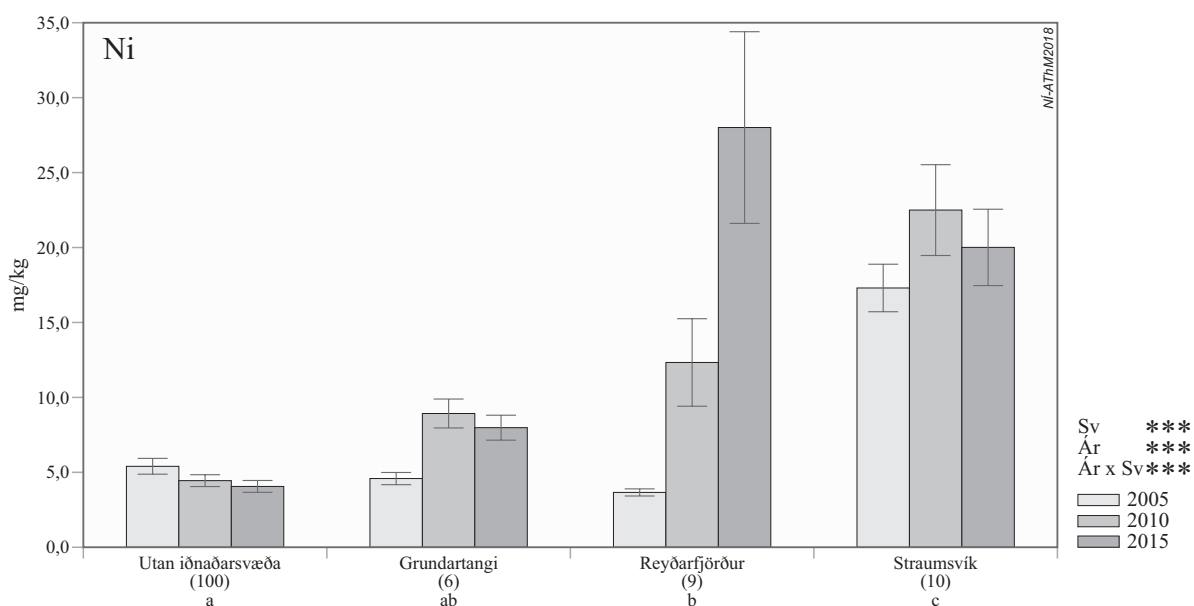
Nikkel (Ni)

Samanburður á styrk nikkels eftir svæðum og árum tímabilið 2005–2015 sýnir marktækan mun bæði milli ára og svæða. Samspil ára og svæða var einnig marktækt (55. mynd).

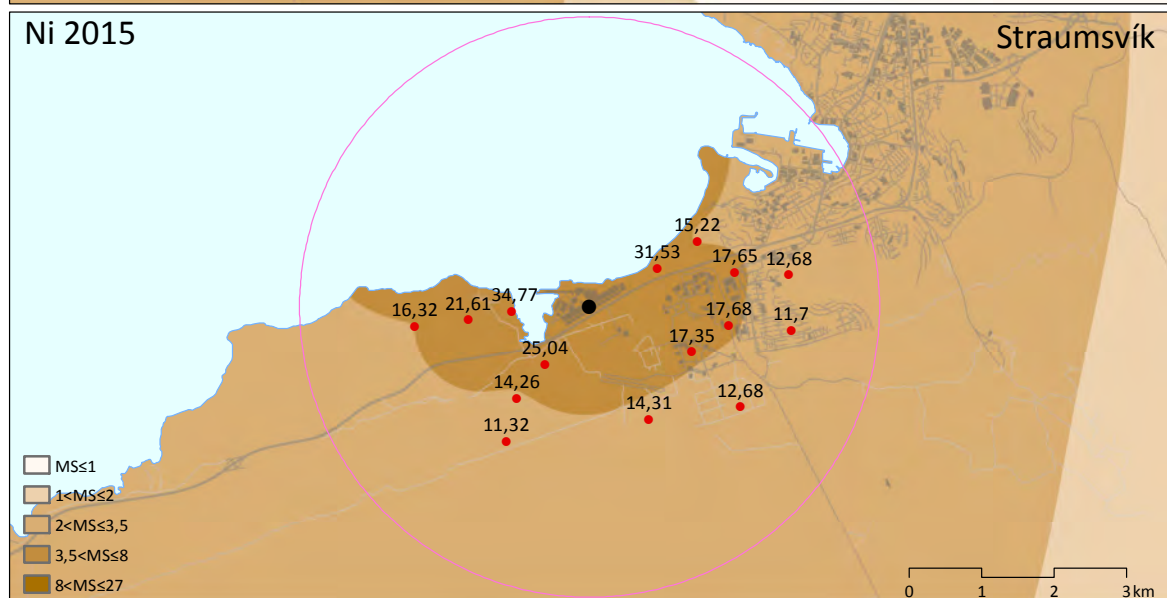
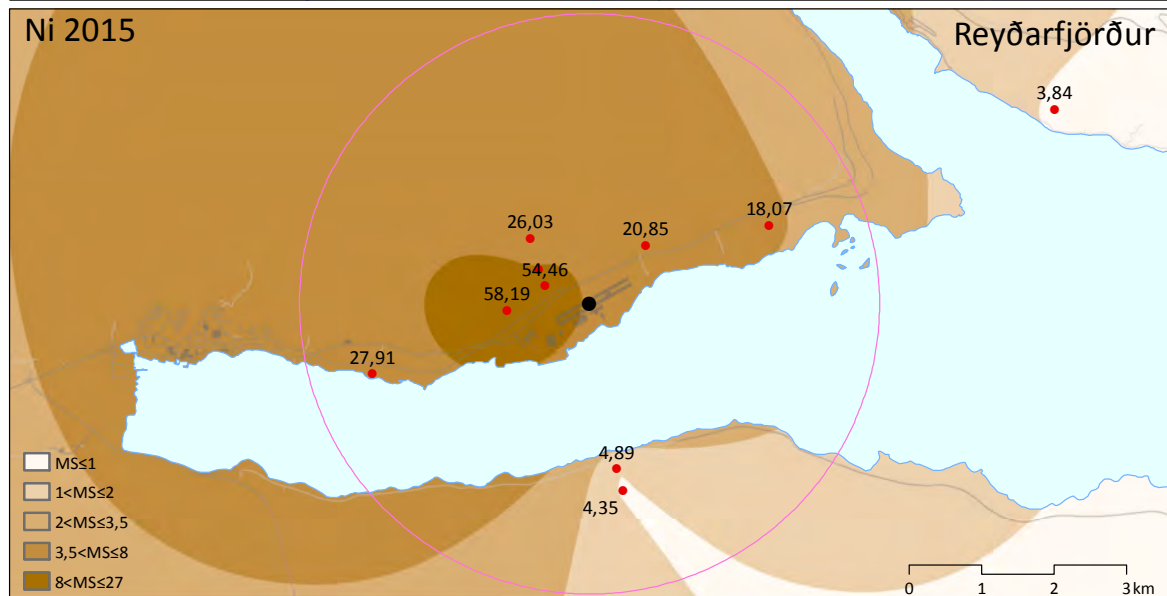
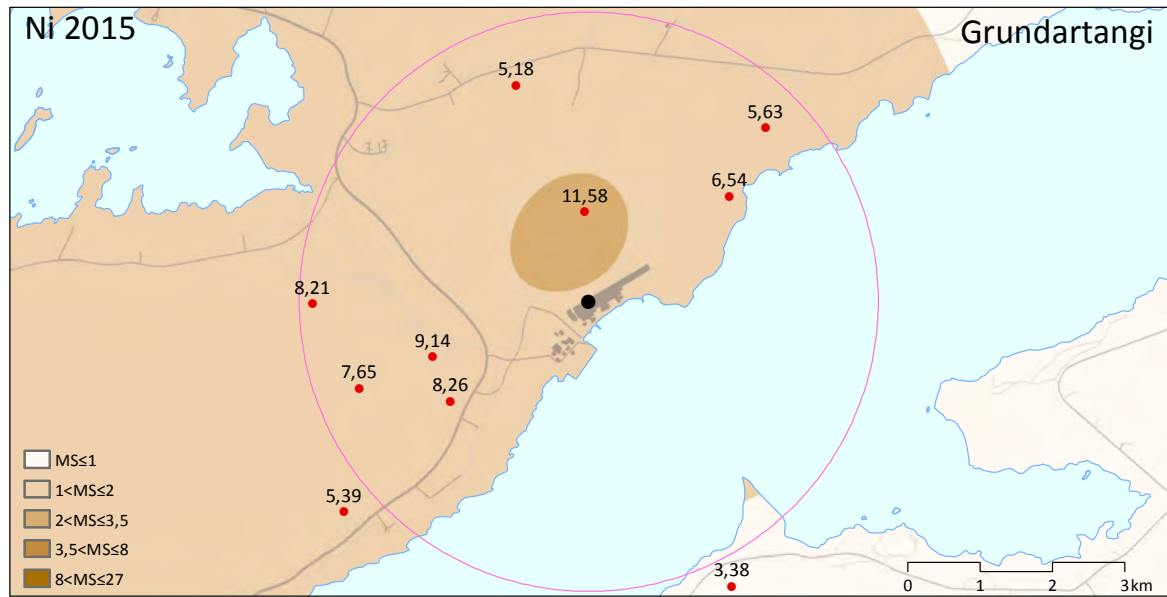
Að jafnaði var styrkur nikkels lægstur utan iðnaðarsvæða en ekki marktækt frábrugðinn styrk efnisins á Grundartanga. Við Straumsvík var styrkur nikkels að jafnaði hæstur. Þá sýna niðurstöður að styrkur efnisins hefur á þessum árum hækkað mikið í Reyðarfirði en árið 2015 var hann þar næstum áttfalt hærri en hann var árið 2005 (55. mynd).

Árið 2015 var dreifingarmynstur nikkels við iðjuverin svipað þótt styrkurinn sé misjafn eftir því hvaða ver á í hlut. Styrkur var í stórum dráttum hæstur næst verunum en lækkaði með aukinni fjarlægð (56. mynd). Í Reyðarfirði er mynstrið nokkuð skekkt en hæstu gildin eru í norðvestur frá álverinu.

Samkvæmt þeim mengunarstuðlum sem notaðir eru í þessari rannsókn flokkast hæsta gildið á Grundartanga sem *lítillsháttar mengun*, hæstu gildin í Reyðarfirði sem *veruleg mengun* og í Straumsvík sem *nokkur mengun* (56. mynd).



55. mynd. Styrkur (mg/kg) nikkels (Ni) í tildurmosa árin 2005, 2010 og 2015 utan iðnaðarsvæða (>4 km) og við iðnaðarsvæðin á Grundartanga, í Reyðarfirði og við Straumsvík. Lóðrétt strik tákna staðalskekkju. Tölfræðilegur samanburður svæða (Sv), ára (Ár) og samspil (Sv×Ár) er sýnt t.h. Bókstafir tákna mun á svæðum. Innan sviga er fjöldi sýna. Marktækur munur: *** = $p < 0,001$.



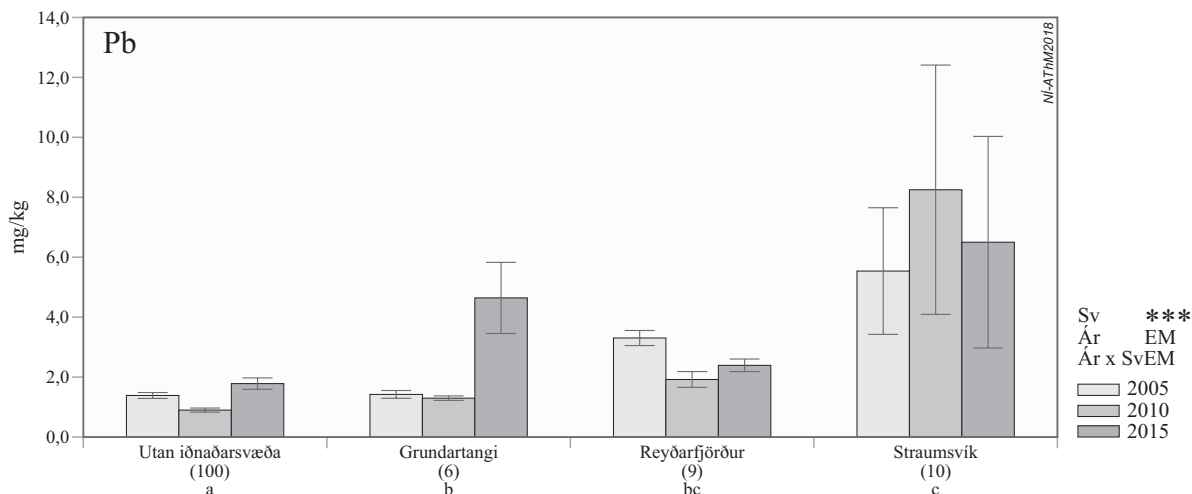
56. mynd. Styrkur (mg/kg) nikkels (Ni) í tildurmosa árið 2015 við iðjuverin á Grundartanga, í Reyðarfirði og í Straumsvík. Mismunandi litir sýna mengunarflokka byggða á reiknuðum mengunarstuðlum (MS), sjá 3. töflu.

Blý (Pb)

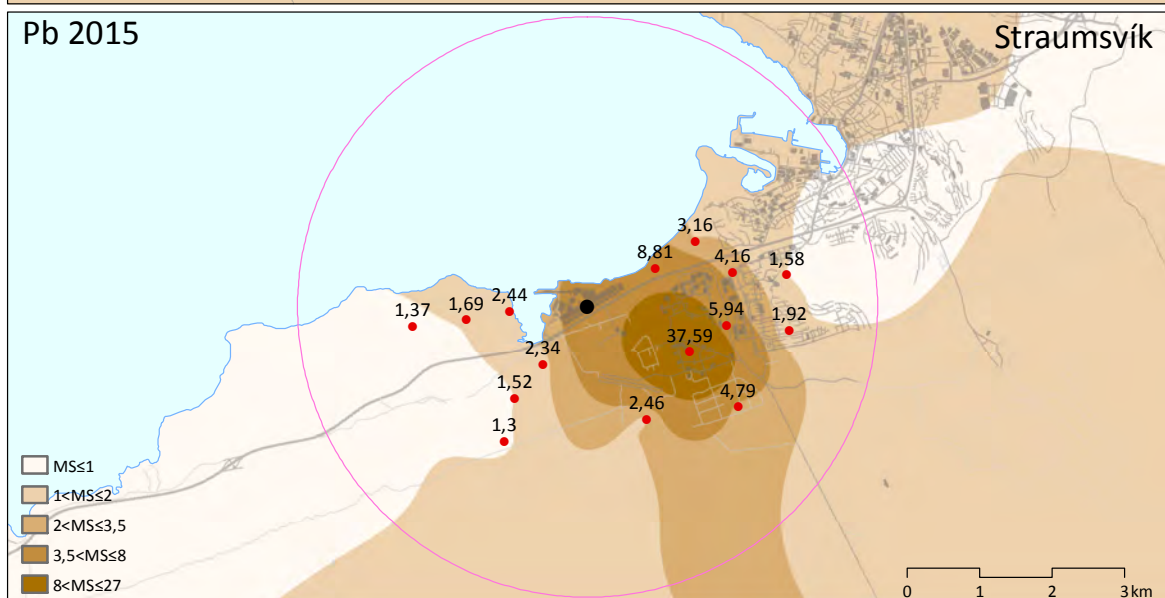
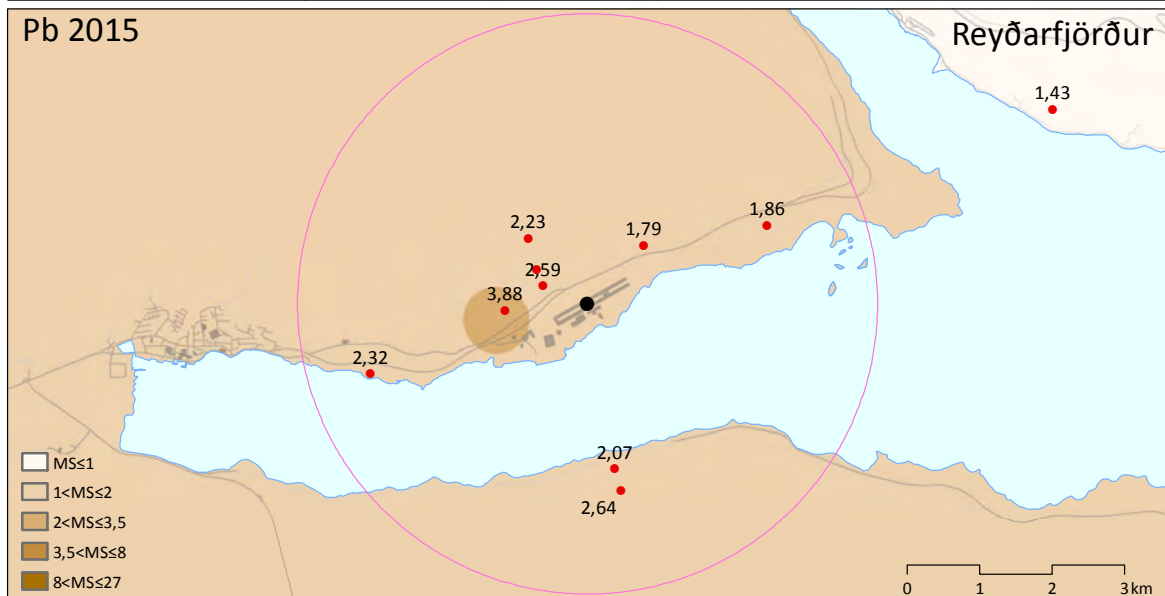
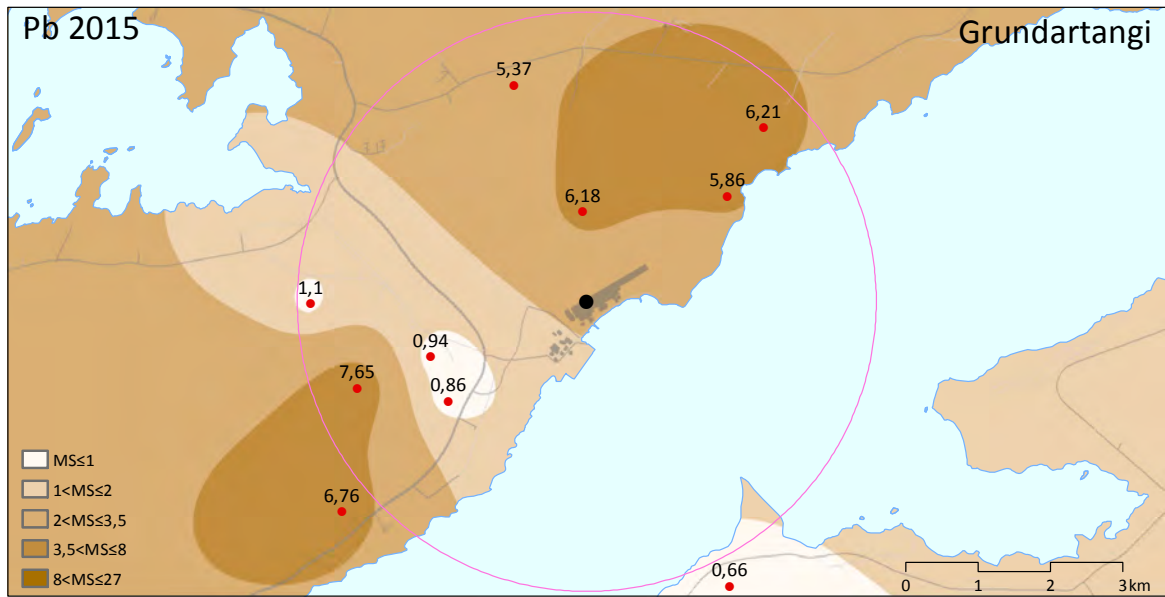
Samanburður á styrk blýs eftir svæðum og árum tímabilið 2005–2015 sýnir marktækan mun milli svæða en ekki milli ára. Samspil ára og svæða var ekki marktækt (57. mynd). Að jafnaði er styrkur blýs lægstur utan iðnaðarsvæðanna en hæstur í Straumsvík. Niðurstöður frá Straumsvík sýna einnig að á tímabilinu 2005–2015 er mikill munur innan svæðisins þar sem sýnum var safnað (<4 km)

Dreifing blýs árið 2015 er talsvert ólík eftir svæðum (58. mynd). Á Grundartanga eru hæstu gildin annars vegar uppi í Akrafjalli, 2–3 km suðvestur af verksmiðjunum, en hins vegar 1–3 km norðaustur af þeim. Í Reyðarfirði er ekki að sjá greinilegt mynstur eftir staðsetningu en hann er svipaður í öllum sýnum í nágrenni álversins. Í Straumsvík kemur fram mjög greinilegt útbreiðslumynstur fyrir blý. Styrkurinn er langhæstur í sýni 95A (37,59 mg/kg) suðvestur af iðnaðarsvæðinu í Hellnahrauni en fellur síðan með aukinni fjarlægð frá þeim stað.

Miðað við reiknaða mengunarstuðla telst mengun af völdum blýs vera *nokkur* á Grundartanga þar sem hún var hæst, *lítillsháttar* í Reyðarfirði en *veruleg* í Straumsvík (58. mynd).



57. mynd. Styrkur (mg/kg) blýs (Pb) í tildurmosa árin 2005, 2010 og 2015 utan iðnaðarsvæða (>4 km) og við iðnaðarsvæðin á Grundartanga, í Reyðarfirði og við Straumsvík (pöruð gildi). Lóðrétt strik tákna staðalskekkju. Tölfræðilegur samanburður svæða (Sv), ára (Ar) og samspil (Sv×Ar) er sýnt t.h. Bókstafir tákna mun á svæðum. Innan sviga er fjöldi sýna. Marktækur munur: *** = $p < 0,001$, EM = ekki marktækt.



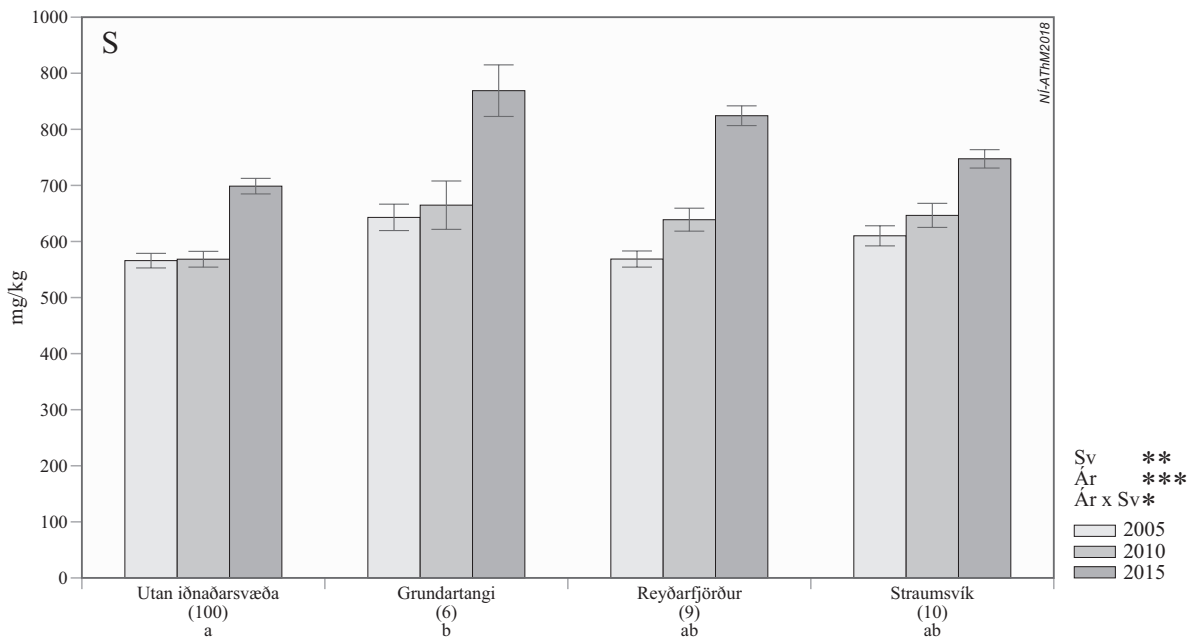
58. mynd. Styrkur (mg/kg) blýs (Pb) í tildurmosa árið 2015 við iðjuverin á Grundartanga, í Reyðarfirði og í Straumsvík. Mismunandi litir sýna mengunarflokka byggða á reiknuðum mengunarstuðlum (MS), sjá 3. töflu.

Brennisteinn (S)

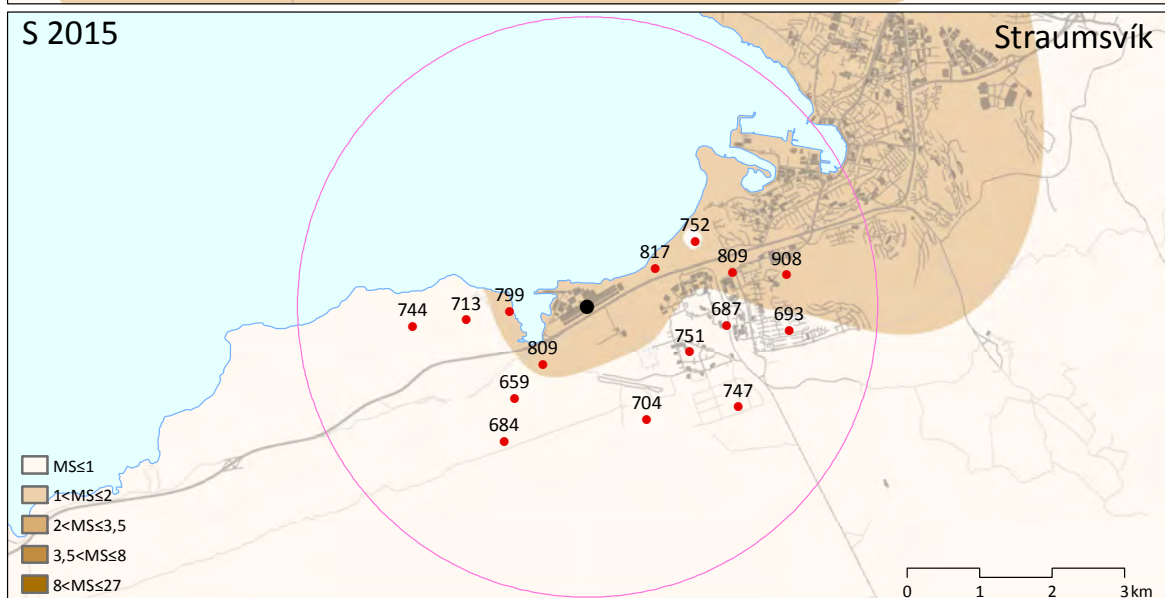
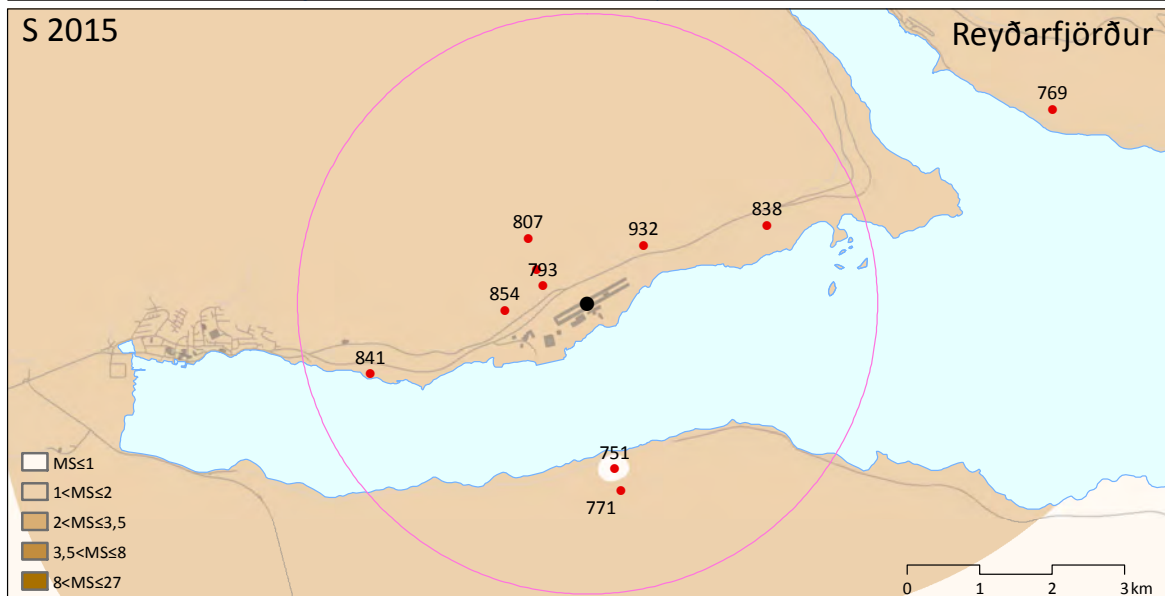
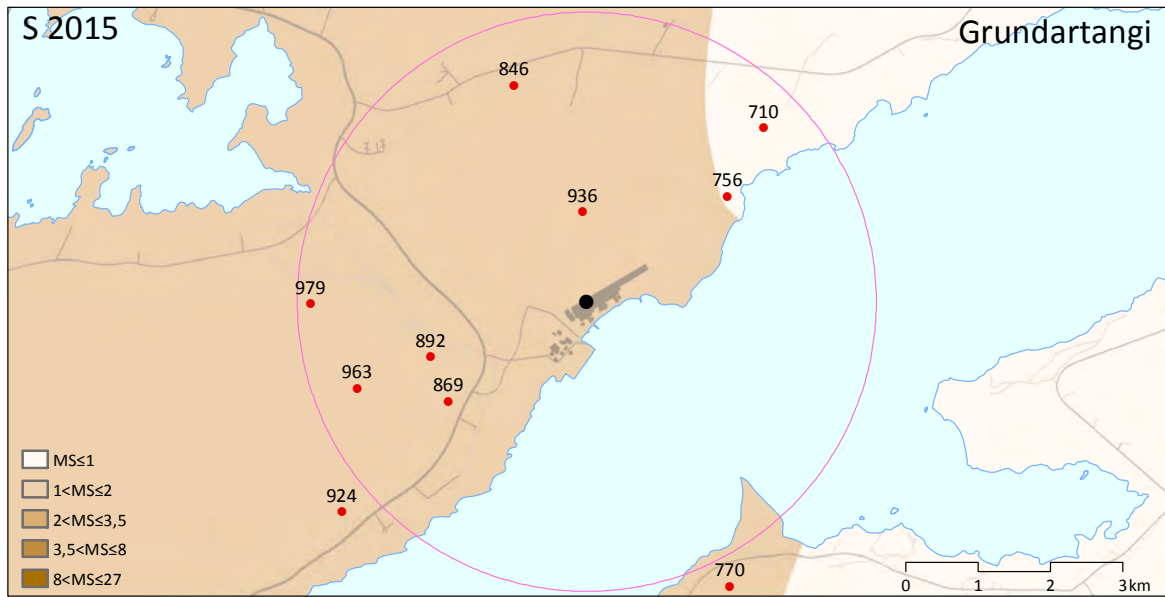
Samanburður á styrk brennisteins árin 2005, 2010 og 2015 sýnir marktækan mun á milli svæða og ára. Samspil ára og svæða er einnig marktækt (59. mynd) en það þýðir að breyting á styrk milli ára er misjöfn eftir svæðum. Alls staðar reynist styrkur brennisteins hæstur árið 2015. Að jafnaði er styrkur brennisteins utan iðnaðarsvæðanna lægri en í nágrenni þeirra. Hann skilur sig þó ekki marktækt frá styrk brennisteins í Reyðarfirði og í Straumsvík en hins vegar frá styrk brennisteins á Grundartanga. Þegar litið er á styrk brennisteins eftir árum kemur fram að hann er langhæstur árið 2015.

Árið 2015 er ekki að sjá mjög greinilegt útbreiðslumynstur í styrk brennisteins í nágrenni iðjuveranna (60. mynd). Á Grundartanga eru hæstu gildin þó vestur af verksmiðjunum uppi í Akrafjalli en í Straumsvík eru hæstu gildin að finna næst álverinu og norðaustur af því.

Miðað við reiknaða mengunarstuðla fyrir brennistein árið 2015 fellur mengun á öllum svæðunum yfirleitt í næstlægsta flokk, þ.e. *viðbending um mengun*, eða í þann lægsta, *engin mengun* (60. mynd).



59. mynd. Styrkur (mg/kg) brennisteins (S) í tildurmosa árin 2005–2015 utan iðnaðarsvæða (>4 km) og við iðnaðarsvæðin á Grundartanga, í Reyðarfirði og við Straumsvík (pöruð gildi). Lóðrétt strik tákna staðalskekkju. Tölfræðilegur samanburður svæða (Sv), ára (Ár) og samspil (Sv x Ár) er sýnt t.h. Bókstafir tákna mun á svæðum. Innan sviga er fjöldi sýna. Marktækur munur: * = $p < 0,05$, ** = $p < 0,01$, *** = $p < 0,001$.

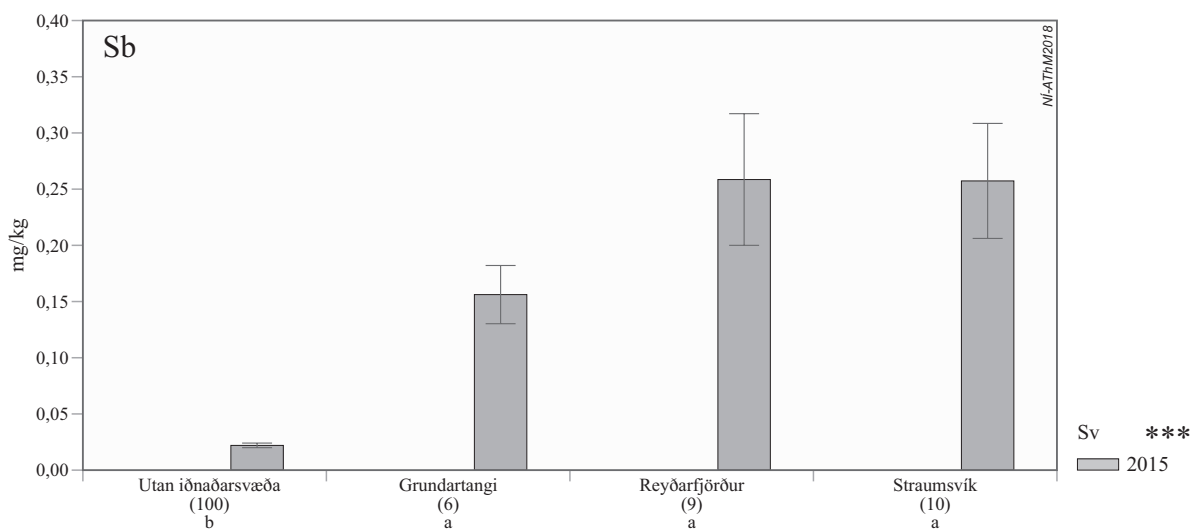


60. mynd. Styrkur (mg/kg) brennisteins (S) í tildurmosa árið 2015 við iðjuverin á Grundartanga, í Reyðarfirði og í Straumsvík. Mismunandi litir sýna mengunarflokka byggða á reiknuðum mengunarstuðlum (MS), sjá 3. töflu.

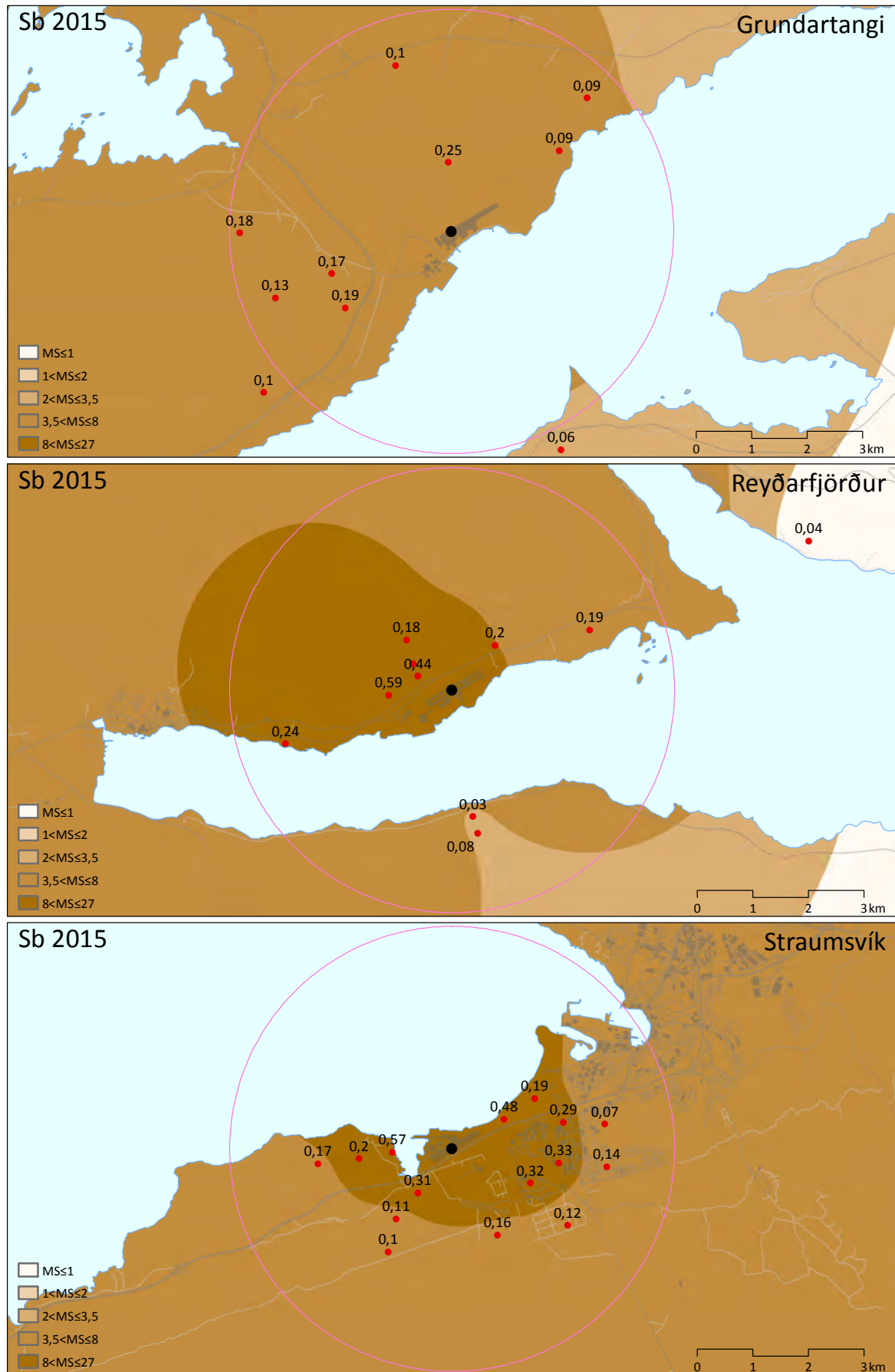
Antimon (Sb)

Niðurstöður mælinga á styrk antimons, sem mældur var í fyrsta sinn árið 2015, sýna mjög mikinn og marktækan mun á milli svæða. Styrkur efnisins er miklu hærri við iðjuverin en utan þeirra (61. mynd). Að jafnaði var styrkur antimons t.d. sjöfalt hærri á Grundartanga en utan iðjuvera og tólfalt hærri bæði í Reyðarfirði og í Straumsvík.

Útbreiðsla antimons gefur til kynna sterkt samband við iðjuverin. Á öllum stöðunum eru hæstu gildin næst þeim (62. mynd). Samkvæmt reiknuðum mengunarstuðlum falla hæstu gildin á öllum svæðunum í flokkinn *veruleg mengun*.



61. mynd. Styrkur (mg/kg) antimons (Sb) í tildurmosa árið 2015 utan iðnaðarsvæða (>4 km) og við iðnaðarsvæðin á Grundartanga, í Reyðarfirði og við Straumsvík. Lóðrétt strik tákna staðalskekkju. Tölfræðilegur samanburður svæða (Sv) er sýndur t.h. Bókstafir tákna mun á svæðum. Innan sviga er fjöldi sýna. Marktækur munur: *** = $p < 0,001$.



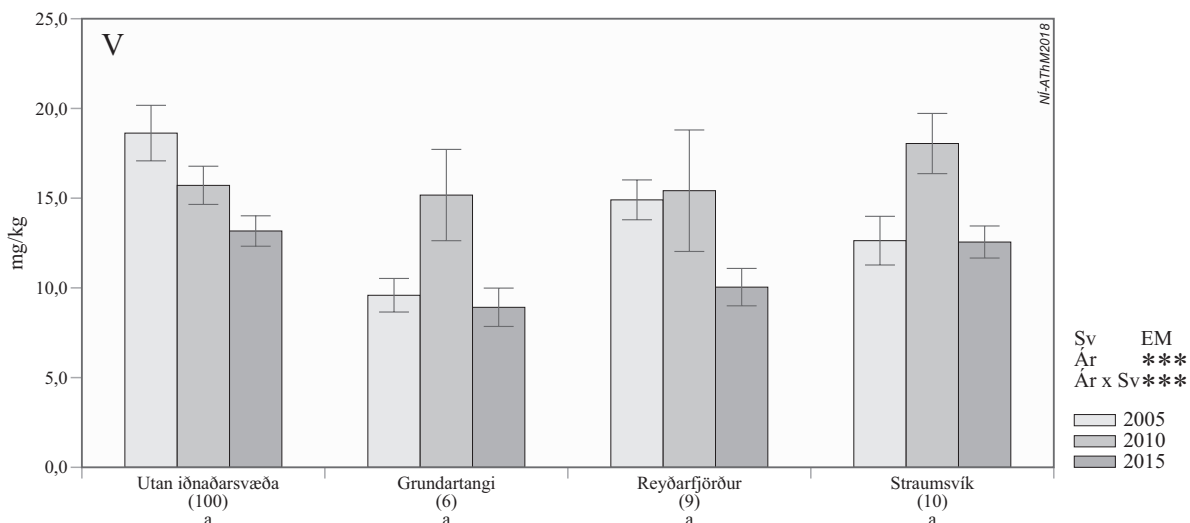
62. mynd. Styrkur (mg/kg) antimons (Sb) í tildurmosa árið 2015 við iðjuverin á Grundartanga, í Reyðarfirði og í Straumsvík. Mismunandi litir sýna mengunarflokka byggða á reiknuðum mengunarstuðlum (MS), sjá 3. töflu.

Vanadín (V)

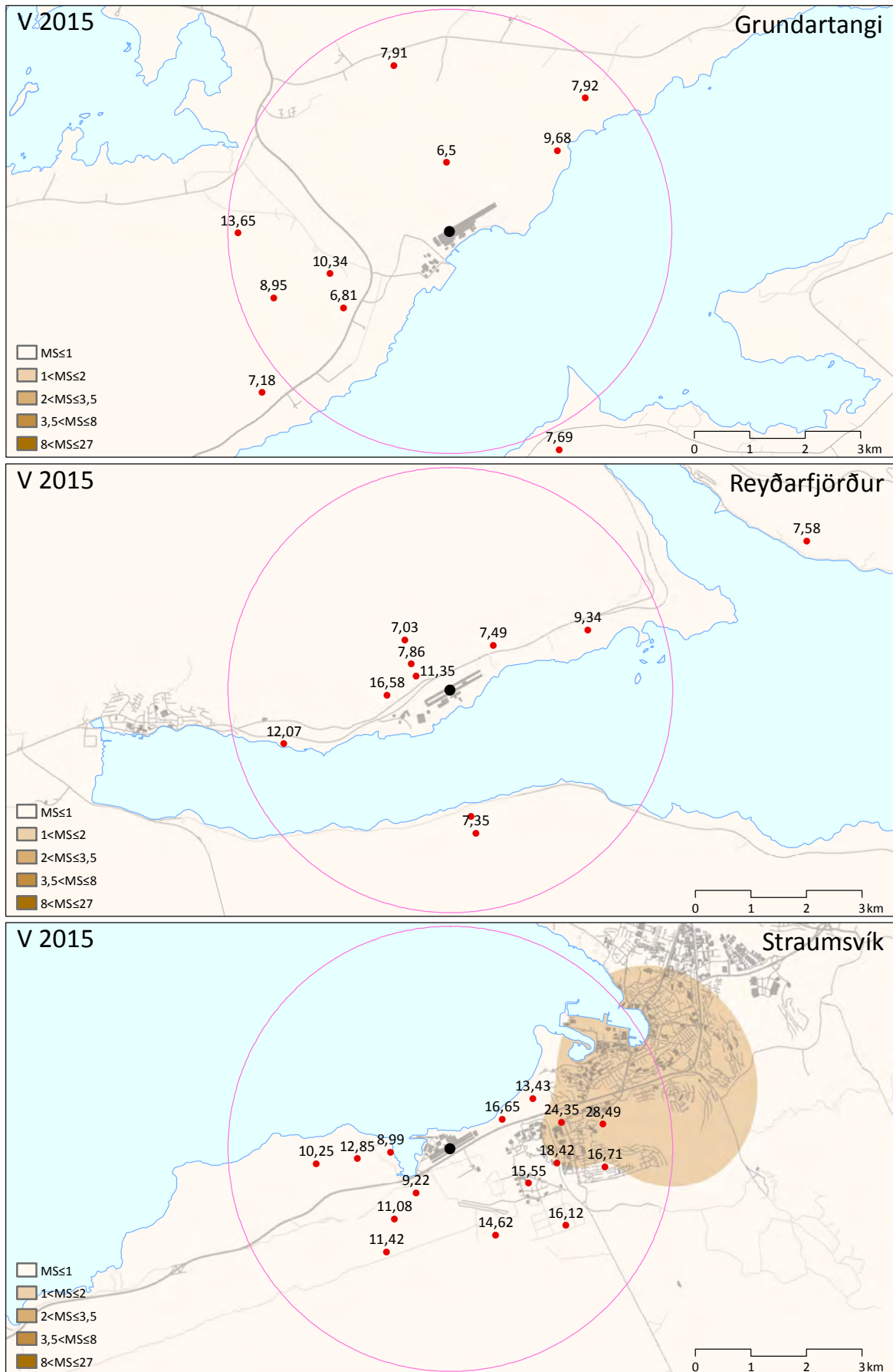
Samanburður á styrk vanadíns tímabilið 2005–2015 gaf ekki marktækan mun á milli svæða en hins vegar var mikill áramunur á styrk efnisins. Samspil ára og svæða var einnig marktækt sem sýnir að styrkurinn hefur breyst misjafnlega eftir svæðum (63. mynd). Á iðnaðarsvæðunum mældist styrkur vanadíns hæstur árið 2010. Utan iðnaðarsvæða var styrkurinn hæstur árið 2005 en hann hefur síðan lækkað talsvert.

Árið 2015 var útbreiðslumynstur vanadíns nokkuð breytilegt milli svæða. Hvorki á Grundartanga né í Reyðarfirði var að sjá áberandi mynstur í styrk. Í Straumsvík var styrkur hins vegar einna hæstur austur af álverinu, einkum á iðnaðarsvæðinu í Hellnahnrauni og í sýnum sem tekin voru innan íbúðabyggðarinnar á Völlunum í Hafnarfirði (64. mynd).

Samkvæmt reiknuðum mengunarstuðlum er *ekki um neina mengun* að ræða af völdum vanadíns hvorki á Grundartanga né í Reyðarfirði. Hæstu gildin í Straumsvík falla í flokkinn *vísbending um mengun* (64. mynd).



63. mynd. Styrkur (mg/kg) vanadíns (V) í tildurmosa árin 2005, 2010 og 2015 utan iðnaðarsvæða (>4 km) og við iðnaðarsvæðin á Grundartanga, í Reyðarfirði og við Straumsvík (pöruð gildi). Lóðrétt strik tákna staðalskekkju. Tölfræðilegur samanburður svæða (Sv), ára (Ár) og samspil (Sv×Ár) er sýnt t.h. Bókstafir tákna mun á svæðum. Innan sviga er fjöldi sýna. Marktækur munur: *** = $p < 0,001$.



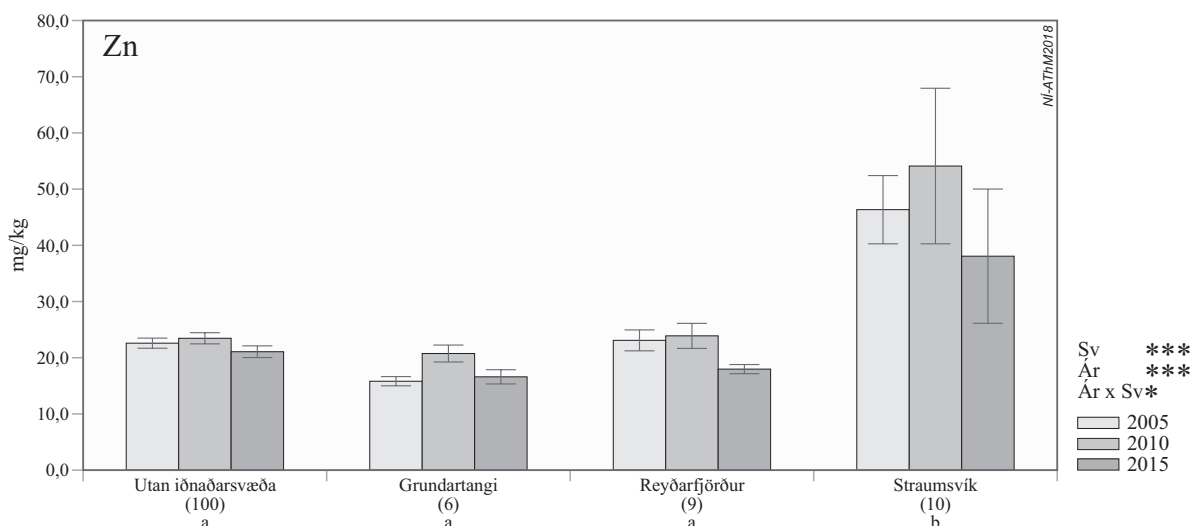
64. mynd. Styrkur (mg/kg) vanadíns (V) í tildurmosa árið 2015 við iðjuverin á Grundartanga, í Reyðarfirði og í Straumsvík. Mismunandi litir sýna mengunarflokka byggða á reiknuðum mengunarstuðlum (MS), sjá 3. töflu.

Sink (Zn)

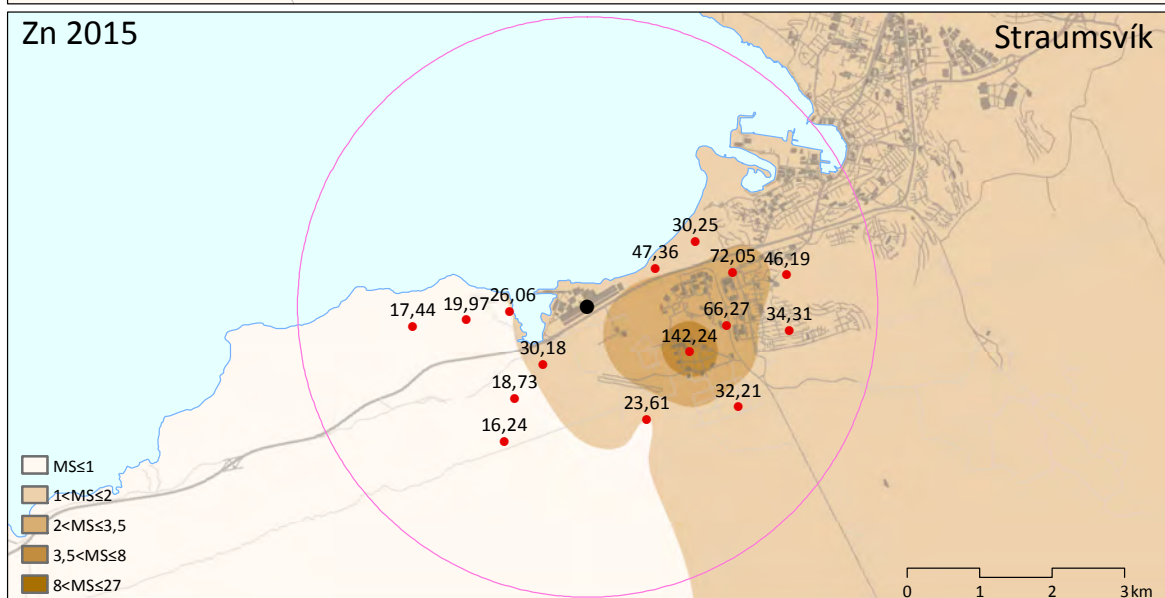
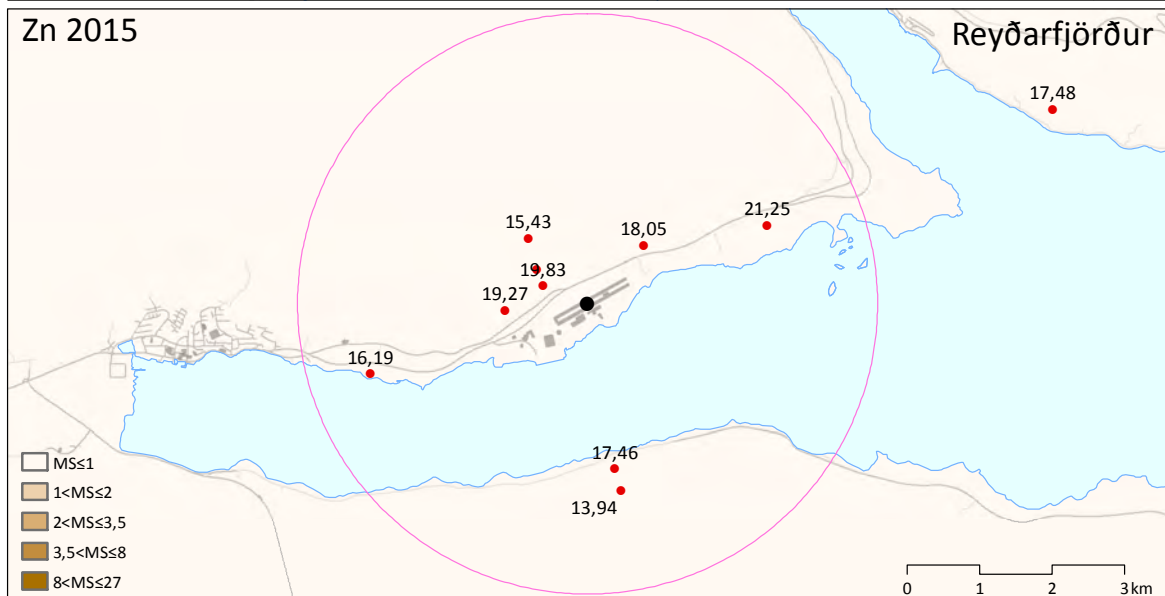
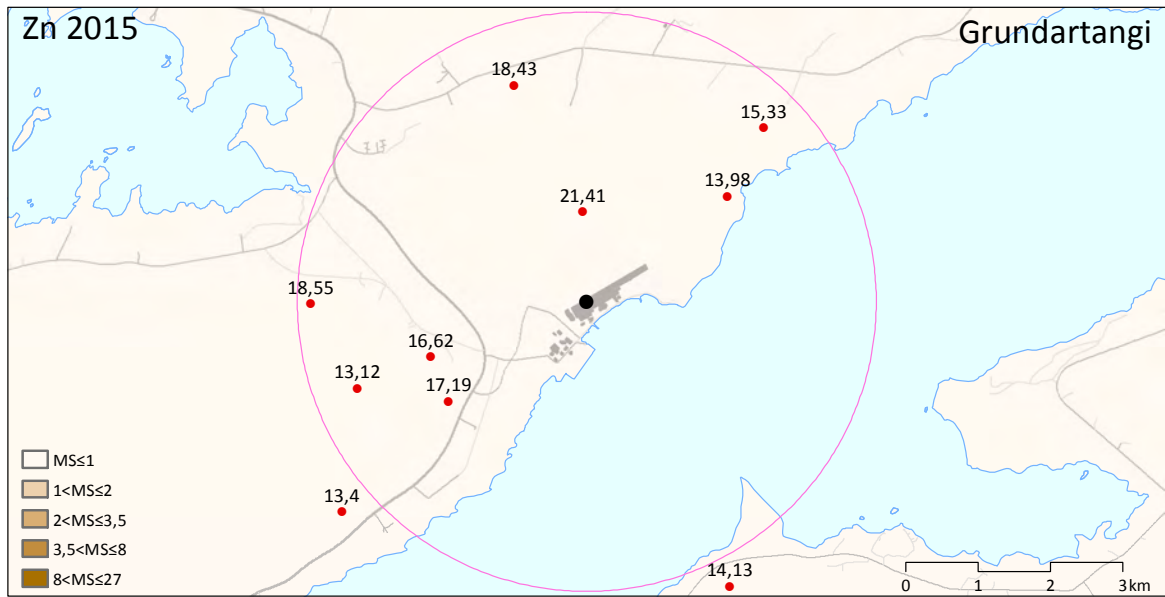
Samanburður á styrk sinks árin 2005, 2010 og 2015 gaf marktækan mun á milli svæða og ára. Samspil milli svæða og ára var einnig marktækt sem sýnir að breytingar á milli ára eru misjafnar eftir svæðum. Styrkur sinks er nokkuð svipaður á Grundartanga, Reyðarfirði og utan iðnaðarsvæða. Straumsvík er hins vegar í sérflokki með mun hærri styrk. Þá er einnig ljóst að mikill breytileiki er við Straumsvík eftir því hvar sýni eru tekin (65. mynd).

Mælingar árið 2015 sýna að hvorki á Grundartanga né í Reyðarfirði er að finna sterkt útbreiðslumynstur fyrir sink. Í Straumsvík er hins vegar greinilegt mynstur með þungamiðju við iðnaðarsvæðið í Hellnahrauni. Þaðan minnkar styrkurinn með aukinni fjarlægð (66. mynd).

Þegar litið er á reiknaða mengunarstuðla er styrkur sinks árið 2015 bæði á Grundartanga og í Reyðarfirði í lægsta mengunarflokki, þ.e. *engin mengun*. Í Straumsvík er styrkur sinks það hár að mengun telst vera *nokkur* þar sem mest er (66. mynd).



65. mynd. Styrkur (mg/kg) sinks (Zn) í tildurmosa árin 2005, 2010 og 2015 utan iðnaðarsvæða (>4 km) og við iðnaðarsvæðin á Grundartanga, í Reyðarfirði og við Straumsvík (pöruð gildi). Lóðrétt strik tákna staðalskekkju. Tölfræðilegur samanburður svæða (Sv), ára (Ár) og samspil (Sv×Ár) er sýnt t.h. Bókstafir tákna mun á svæðum. Innan sviga er fjöldi sýna. Marktækur munur: * = $p < 0,05$, *** = $p < 0,001$.



66. mynd. Styrkur (mg/kg) sinks (Zn) í tildurmosa árið 2015 við iðjuverin á Grundartanga, í Reyðarfirði og í Straumsvík. Mismunandi litir sýna mengunarflokka byggða á reiknuðum mengunarstuðlum (MS), sjá 3. töflu.

5.4 Klasagreining

Við klasagreiningu flokkast sýni tildurmosa frá 2015 ($n=156$) fyrst í tvo meginflokka. Annars vegar eru 147 sýni sem greinast síðan niður í þrjá flokka (klasi 1–3) og hins vegar níu sýni sem greinast í tvennt (klasi 4–5) (67. mynd). Sýni í klasa 1 eru aðallega af gosbeltinu og af jaðri þess, m.a. allmörg af Reykjanesskaga, þar á meðal sýni allnærri álverinu í Straumsvík. Einkennandi fyrir klasann er hlutfallslega hár styrkur af Fe og V. Sýni í klasa 2 eru af Reykjanesskaga, Vesturlandi, Vestfjörðum og Norðvesturlandi, en einnig af Austfjörðum. Einkennandi fyrir þennan flokk er hlutfallslega lágur styrkur flestra efna. Í klasa 3 (20 staðir) eru sýni sem safnað hefur verið í nágrenni iðjuveranna, einkum á Grundartanga og í Reyðarfirði. Það sem einkennir þennan flokk er hlutfallslega hár styrkur af As, Ni, S og Sb. Í klasa 4–5 eru fimm sýni af miðhálendinu og tvö sem tekin voru við iðnaðarsvæðið við Straumsvík. Í þessum hópi er styrkur margra efna að jafnaði hlutfallslega hár, einkum af Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, V og Zn.

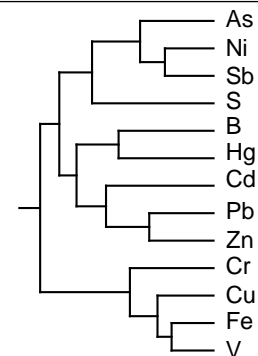
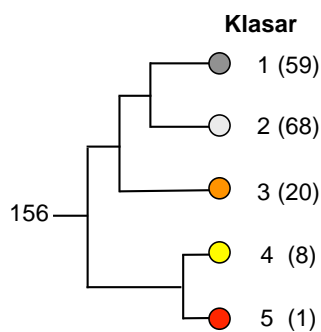
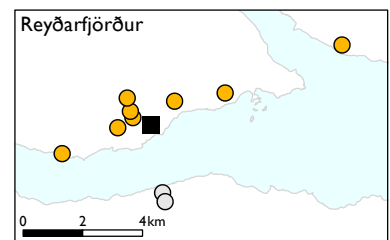
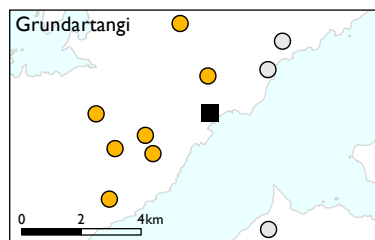
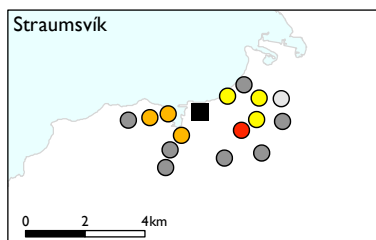
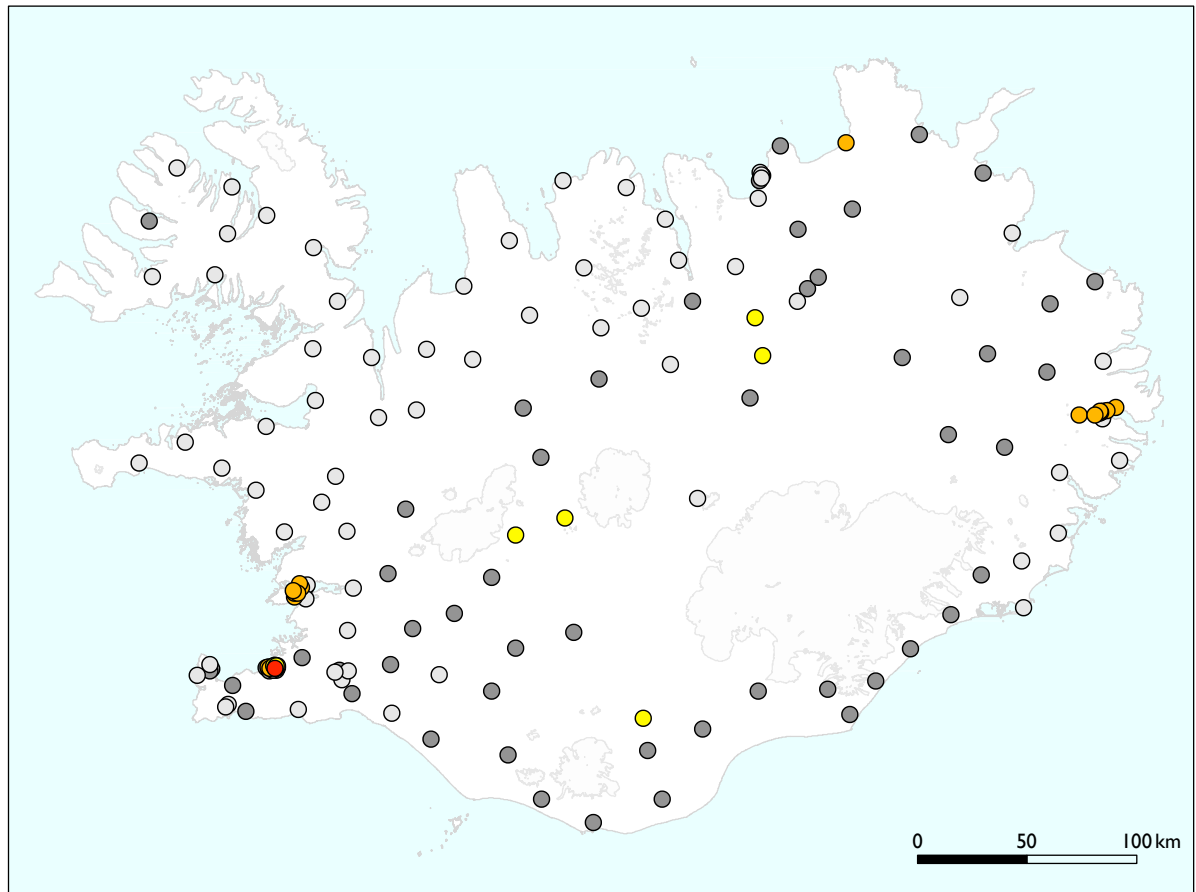
Klasagreiningin flokkar efnin í þrjá meginflokka. Í þeim fyrsta eru As, Ni, Sb og S, í öðrum eru B, Hg, Cd, Pb og Zn, en í þeim þriðja Cr, Cu, Fe og V (67. mynd).

5.5 Mosaskemmdir sumarið 2015

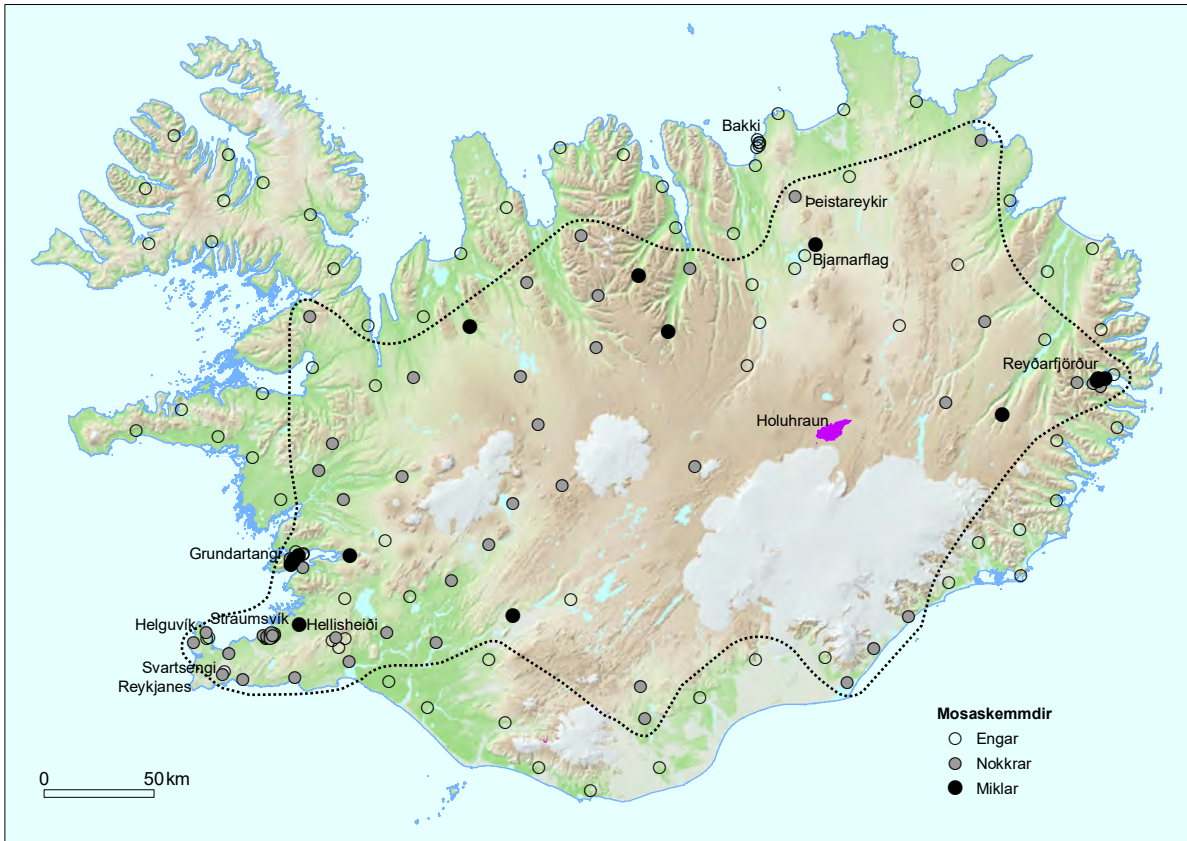
Af þeim 156 stöðum þar sem tildurmosa var safnað sumarið 2015 reyndist hann án skemmda á 89 stöðum, nokkrar skemmdir fundust á 51 stað og miklar skemmdir á 16 stöðum (68. mynd). Staði án skemmda var að finna nánast um allt land. Skemmdir voru hins vegar mjög misdreifðar en þær fundust allvíða á stóru svæði á miðhálendinu og niður í daladrög í hálendisbrúninni og sums staðar niður á láglandi eins og í Örafum, á Reykjanesskaga og við öll álverin. Svæði án skemmda voru Vestfirðir, Snæfellsnes, láglandi Suðurlands og útsveitir og strandsvæði á Norður- og Austurlandi.

Þótt það væri ekki metið sérstaklega virtust skemmdir vera einna algengastar utan í þúfum en síður uppi á þeim eða í lautum á milli þúfna.

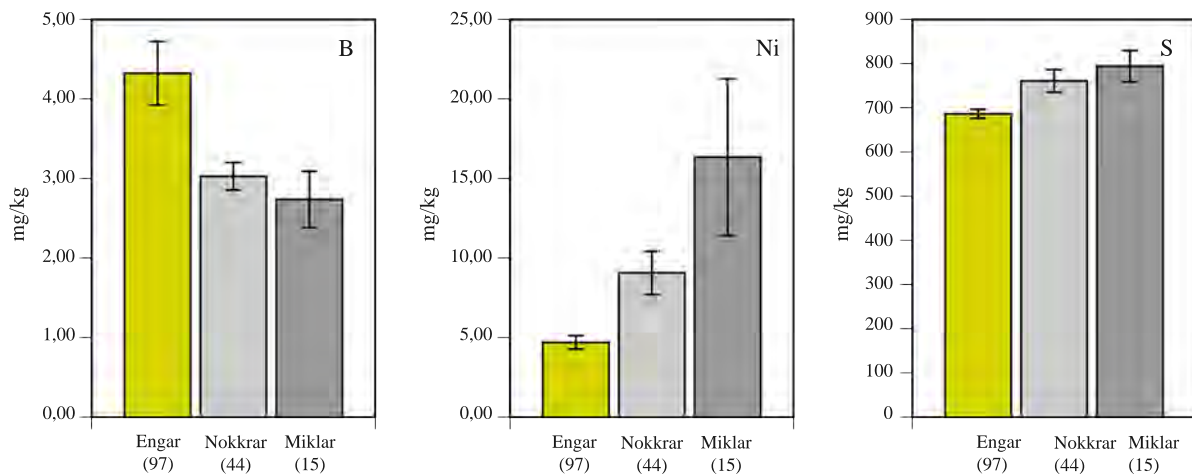
Öfug „logistic“ fylgniþrófun (e. *backward logistic regression*) þar sem kannað var samband styrks mældra efna og skemmda (engar skemmdir/skemmdir) gaf marktæka fylgni við styrk þriggja efna, þ.e. nikkels (Ni), brennisteins (S) og bórs (B) ($n=156$, $r^2=0,18$). Langsterkast og jákvætt samband var við styrk nikkels (Ni) ($p=0,0049$) og brennisteins (S) ($p=0,0050$) en styrkur þessara efna var marktækt hærri þar sem skemmda varð vart en þar sem engar skemmdir var að finna. Neikvætt samband var hins vegar milli styrks bórs og skemmda en að jafnaði var styrkur bórs lægri á þeim stöðum þar sem skemmdir fundust en þar sem mosi var óskemmdur (69. mynd). Rétt er að minna á að sýni voru ekki tekin af skemmdum mosa heldur eingöngu af mosa sem var nokkurn veginn óskemmdur en sýnatökustaðir voru hins vegar flokkaðir eftir því hvort þar fundust skemmdir og hve miklar.



67. mynd. Niðurstöður klasagreiningar á styrk frumefna í tildurmosa árið 2015 fyrir sýnatökustaði og frumefnin 13. Á litlu myndunum er sýnd flokkun sýna við iðnaðarsvæðin í Straumsvík, á Grundartanga og í Reyðarfirði. Innan sviga er fjöldi sýna.



68. mynd. Útbreiðsla skemmda í tildurmosa sumarið 2015. Punktalína afmarkar nokkurn veginn það svæði þar sem skemmda varð vart.



69. mynd. Styrkur bórs (B), nikkels (Ni) og brennisteins (S) í tildurmosa sumarið 2015. Sýnatökustaðir voru flokkaðir eftir því hvort þar fundust skemmdir; engar, nokkrar eða miklar. Lóðrétt strik tákna staðalskekkju en tölur innan sviga fjölda mosasýna. Styrkur er aðeins sýndur fyrir þau efni sem sýndu marktæka fylgni við skemmdarflokka.

5.6 Styrkur efna við jarðvarmavirkjanir

Þegar fjallað er um styrk efna í mosa við jarðvarmavirkjanir er mikilvægt að hafa í huga að sýni í nágrenni þeirra eru fá og mælingar ná í besta falli til fárra ára (5.–9. mynd). Auk þess er rétt að minna á að ein þeirra, Þeistareykjavirkjun, hafði ekki verið tekin í notkun þegar mosa var safnað árið 2015.

Aðhvarfsgreining milli fjarlægðar frá virkjunum (<35 km) og styrks efna árin 2005, 2010 og 2015 sýndi marktækt samband í fáeinum tilvikum. Tekið skal fram að í allmörgum tilvikum eru sýni það fá að tölfræðigreining var ekki gerð (5. tafla). Við Hellisheiðarvirkjun fannst marktækt neikvætt samband með fjarlægð fyrir arsen árið 2015, fyrir brennistein 2010 og fyrir blý öll árin sem þetta var kannað, þ.e. 2005–2015. Við Bjarnarflag og Þeistareyki fannst einnig marktækt neikvætt samband milli fjarlægðar og styrks antimons en það efni var mælt í fyrsta sinn árið 2015. Hins vegar kom fram marktækt jákvætt samband milli fjarlægðar og styrks brennisteins bæði miðað við Bjarnarflag og Þeistareyki árið 2010.

Við Hellisheiðarvirkjun, þar sem gögn eru einna best, flokkast styrkur arsens árið 2015 næst virkjuninni í flokkinn *vísbending um mengun* eða *lítilsháttar mengun* (2. viðauki). Hvað varðar brennistein er styrkur hans næst virkjuninni árið 2010 í flokknum *vísbending um mengun* þar sem hann er hæstur. Næst virkjuninni flokkast styrkur blýs árin 2010 og 2015 sem *engin mengun* eða *vísbending um mengun*.

Samanburður á styrk efna milli árána 2010 og 2015 innan 35 km fjarlægðar frá virkjununum bendir til þess að styrkur flestra efna hafi lækkað á þessum svæðum á milli ára (2. viðauki). Styrkur arsens lækkaði t.d. marktækt milli ára á svæðum innan 35 km frá Hellisheiðarvirkjun og Svartsengi; kopar, járn og vanadín innan 35 km frá Hellisheiðarvirkjun, Svartsengi og Þeistareykjum og kvikasilfur innan 35 km frá Bjarnarflagi, Svartsengi og Þeistareykjum. Sama gilti fyrir blý á svæði innan 35 km frá Hellisheiðarvirkjun og Svartsengi og fyrir sink við Svartsengi. Hins vegar kom fram marktæk hækkun á brennisteini milli 2010 og 2015 á svæðum (<35 km) við allar virkjanirnar og sama gilti einnig um kadmín miðað við Bjarnarflag (2. viðauki).

Við Reykjanesvirkjun voru tekin sýni af hraungambra en ekki af tildurmosa. Styrkur efna þar er því ekki sambærilegur við flest önnur sýni sem tekin voru á landinu. Sýni eru aðeins þrjú og því lítið hægt að segja um breytingar með fjarlægð frá losunarstað sem hér miðast við stöðvarhús virkjunarinnar (9. mynd). Styrkur nokkurra efna (Cr, Cu, Fe, Pb, Sb, V og Zn) mældist hæstur í sýni RN1 sem er næst stöðvarhúsinu (0,97 km) en lægstur í sýni RN2 sem er í mestri fjarlægð (1,86 km) (2. viðauki).

5.7 Styrkur efna við kísilver

Sumarið 2015 voru tekin sýni í fyrsta sinn af tildurmosa við kísilverin á Bakka norðan Húsavíkur og í Helguvík við Keflavík, en bæði verin voru þá í byggingu.

Árin 2005 og 2010 voru sýni innan 35 km radíuss frá verunum aðeins 2–3 og aðhvarfsgreining því óraunhæf. Greining fyrir árið 2015 sem byggði á 6–8 sýnatökustöðum gaf marktækt neikvætt samband með fjarlægð fyrir antimon í Helguvík en jákvætt samband fyrir sink á Bakka (6. tafla).

Þegar einstök gildi eru skoðuð kemur fram að styrkur antimons í sýnum sem tekin voru næst kísilverinu í Helguvík er það hár að mengun flokkast þar sem *lítilsháttar* eða *nokkur* (3. viðauki). Á Bakka er styrkur blýs einnig tiltölulega hár næst verinu því mengun í þeim sýnum flokkast þar sem *lítilsháttar* eða *nokkur*.

5. tafla. Samband styrks efna í tildurmosa 2005–2015 og fjarlægðar frá jarðvarmavirkjunum metið með línulegri aðhvarfsgreiningu, reiknuð á \log_{10} -umbreytt gildi. Í greininguna voru tekin sýni sem voru innan við 35 km frá viðkomandi virkjun. Marktækt samband er: ** = $P < 0,01$; * = $P < 0,05$; EM = ekki marktækt. Tölur innan sviga tákna fjölda sýna.

Efni	Svæði	2005	2010	2015
As	Bjarnarflag	(3)	EM (5)	EM (5)
	Hellisheiðarvirkjun	EM (6)	EM (9)	–* (9)
	Svartsengi	(4)	EM (6)	EM (6)
	Þeistareykir	(3)	EM (5)	EM (5)
B	Bjarnarflag			EM (5)
	Hellisheiðarvirkjun			EM (9)
	Svartsengi			EM (6)
	Þeistareykir			EM (5)
Cd	Bjarnarflag	(3)	EM (5)	EM (5)
	Hellisheiðarvirkjun	EM (6)	EM (9)	EM (9)
	Svartsengi	(4)	EM (6)	EM (6)
	Þeistareykir	(3)	EM (5)	EM (5)
Cr	Bjarnarflag	(3)	EM (5)	EM (5)
	Hellisheiðarvirkjun	EM (6)	EM (9)	EM (9)
	Svartsengi	(4)	EM (6)	EM (6)
	Þeistareykir	(3)	EM (5)	EM (5)
Cu	Bjarnarflag	(3)	EM (5)	EM (5)
	Hellisheiðarvirkjun	EM (6)	EM (9)	EM (9)
	Svartsengi	(4)	EM (6)	EM (6)
	Þeistareykir	(3)	EM (5)	EM (5)
Fe	Bjarnarflag	(3)	EM (5)	EM (5)
	Hellisheiðarvirkjun	EM (6)	EM (9)	EM (9)
	Svartsengi	(4)	EM (6)	EM (6)
	Þeistareykir	(3)	EM (5)	EM (5)
Hg	Bjarnarflag	(3)	EM (5)	EM (5)
	Hellisheiðarvirkjun	EM (6)	EM (9)	EM (9)
	Svartsengi	(4)	EM (6)	EM (6)
	Þeistareykir	(3)	EM (5)	EM (5)
Ni	Bjarnarflag	(3)	EM (5)	EM (5)
	Hellisheiðarvirkjun	EM (6)	EM (9)	EM (9)
	Svartsengi	(4)	EM (6)	EM (6)
	Þeistareykir	(3)	EM (5)	EM (5)
Pb	Bjarnarflag	(3)	EM (5)	EM (5)
	Hellisheiðarvirkjun	–** (6)	–** (9)	–* (9)
	Svartsengi	(4)	EM (6)	EM (6)
	Þeistareykir	(3)	EM (5)	EM (5)
S	Bjarnarflag	(3)	+* (5)	EM (5)
	Hellisheiðarvirkjun	EM (6)	–* (9)	EM (9)
	Svartsengi	(4)	EM (6)	EM (6)
	Þeistareykir	(3)	+* (5)	EM (5)
Sb	Bjarnarflag			–* (5)
	Hellisheiðarvirkjun			EM (9)
	Svartsengi			EM (6)
	Þeistareykir			–* (5)
V	Bjarnarflag	(3)	EM (5)	EM (5)
	Hellisheiðarvirkjun	EM (6)	EM (9)	EM (9)
	Svartsengi	(4)	EM (6)	EM (6)
	Þeistareykir	(3)	EM (5)	EM (5)
Zn	Bjarnarflag	(3)	EM (5)	EM (5)
	Hellisheiðarvirkjun	EM (6)	EM (9)	EM (9)
	Svartsengi	(4)	EM (6)	EM (6)
	Þeistareykir	(3)	EM (5)	EM (5)

6. tafla. Samband styrks efna í tildurmosa 2005–2015 og fjarlægðar frá kísilverunum á Bakka og í Helguvík metið með línulegri aðhvarfsgreiningu, reiknuð á \log_{10} -umbreytt gildi. Í greininguna voru tekin sýni sem voru innan við 35 km frá viðkomandi kísilveri. Marktækt samband er: ** = $P < 0,01$; * = $P < 0,05$; EM = ekki marktækt. Tölur innan sviga tákna fjölda sýna.

Efni	Svæði	2005	2010	2015
As	Bakki	(2)	(3)	EM (8)
	Helguvík	(3)	(3)	EM (6)
B	Bakki			EM (8)
	Helguvík			EM (6)
Cd	Bakki	(2)	(3)	EM (8)
	Helguvík	(3)	(3)	EM (6)
Cr	Bakki	(2)	(3)	EM (8)
	Helguvík	(3)	(3)	EM (6)
Cu	Bakki	(2)	(3)	EM (8)
	Helguvík	(3)	(3)	EM (6)
Fe	Bakki	(2)	(3)	EM (8)
	Helguvík	(3)	(3)	EM (6)
Hg	Bakki	(2)	(3)	EM (8)
	Helguvík	(3)	(3)	EM (6)
Ni	Bakki	(2)	(3)	EM (8)
	Helguvík	(3)	(3)	EM (6)
Pb	Bakki	(2)	(3)	EM (8)
	Helguvík	(3)	(3)	EM (6)
S	Bakki	(2)	(3)	EM (8)
	Helguvík	(3)	(3)	EM (6)
Sb	Bakki			EM (8)
	Helguvík			–** (6)
V	Bakki	(2)	(3)	EM (8)
	Helguvík	(3)	(3)	EM (6)
Zn	Bakki	(2)	(3)	+* (8)
	Helguvík	(3)	(3)	EM (6)

5.8 Samanburður á styrk efna í tildurmosa og hraungambra

Í ljósi þess að samanburður byggir aðeins á sjö sýnum verða ekki dregnar víðtækar ályktanir af niðurstöðunum. Þó koma þar fram nokkrar vísbendingar. Að jafnaði var styrkur efna hærri í tildurmosa en í hraungambra (7. tafla). Hlutfall styrks efna í mosategundunum var allt frá því að vera um 1 fyrir Fe, Cr og Hg upp í að vera um þrefalt hærri í tildurmosa en í hraungambra, þ.e. hvað varðar B og V.

Fylgni milli styrks efna í tildurmosa og hraungambra var misjöfn. Marktæk jákvæð fylgni milli efna í tegundunum tveimur var fyrir Cr, Cu, Hg, Ni, Sb, Zn og þó sérstaklega fyrir Pb en þar var fylgni mjög sterk, eða 0,99. Hins vegar var neikvæð marktæk fylgni fyrir S, þ.e. því hærri sem styrkurinn var í tildurmosa þeim mun lægri var hann í hraungambra.

5.9 Styrkur efna í hraungambra

Alls voru tekin 14 sýni af mosanum hraungambra. Á helmingi staðanna einnig sýni af tildurmosa. Á sjö stöðum eru því eingöngu tiltækar upplýsingar um styrk efna í hraungambra, þ.e. á einum stað í Laugahrauni í Hvannalindum (1. mynd), þremur stöðum við Reykjanesvirkjun (RN1–RN3) (9. mynd), einum á Grundartanga (G4) (3. mynd) og tveimur stöðum í Straumsvík (94A, D1B) (2. mynd, 8. tafla).

Þegar styrkur efna er skoðaður í þessum sýnum kemur fram að sýni D1B í Straumsvík, sem tekið var um 150 m sunnan við athafnasvæði málmendurvinnslunnar Furu, er í algerum sérflokki. Þar mældist styrkur bórs, króms, kopars, járns, blýs og sinks hæstur allra þessara 14 sýna. Styrkur kopars, blýs og sinks var þar t.d. tvöfalt hærri en í því sýni sem næst var í röðinni. Styrkur allra annarra efna nema kadmíns var þarna hlutfallslega hár, þ.e. arsens, kvikasilfurs, nikkels, brennisteins, antimons og vanadíns. Á þessum stað eru miklar mosaskemmdir og á þar mosinn greinilega undir högg að sækja (70. mynd).

Í sýni G4 sem tekið var á Grundartanga rúma 400 m frá álverinu var styrkur arsens, nikkels, brennisteins og antimons hæstur þessara 14 sýna sem mæld voru (8. tafla). Á þessum stað var mosinn talsvert skemmdur (71. mynd).

Sýnið sem tekið var í Laugahrauni í Hvannalindum um 25 km austan við gosstöðvarnar í Holuhrauni reyndist innihalda hlutfallslega mikið af vanadín og járn en lítið af blýi, brennisteini, antimon og bór (8. tafla). Miðað við önnur hraungambra sýni var styrkur hlutfallslega lágur í sýnum RN2 og RN3 sem tekin voru við Reykjanesvirkjun. Styrkur efna í sýni RN1 sem er næst virkjuninni var hins vegar talsvert hærri, einkum hvað snertir bór og króm (8. tafla).

7. tafla. Fylgni milli styrks efna í tildurmosa og hraungambra reiknuð á \log_{10} -umbreytt gildi í sjö sýnum sem tekin voru á Hellisheiði, við Svínahraun, í Straumsvík og á Völlunum í Hafnarfirði. Marktæk fylgni er feitletruð.

	As	B	Cd	Cr	Cu	Fe	Hg	Ni	Pb	S	Sb	V	Zn
Fylgnistuðull (e. <i>Pearson corr. coefficient</i>)	0,48	0,44	0,12	0,76	0,90	0,68	0,77	0,82	0,99	-0,88	0,84	0,02	0,92
P-gildi	0,281	0,329	0,852	0,015	0,006	0,092	0,044	0,025	<0,0001	0,008	0,017	0,969	0,004
Hlutfall styrks efna tildurmosi/hraungambri	1,5	2,9	1,3	1,1	1,3	1,0	1,2	1,6	1,5	2,1	1,4	3,2	1,7

8. tafla. Styrkur efna í hraungambasýnum. Öll sýni voru tekin sumarið 2015 nema H1–H3, sem voru tekin í júní 2016.

Svæði	Sýni	Hnit	As	B	Cd	Cr	Cu	Fe	Hg	Ni	Pb	S	Sb	V	Zn	
Hvannnalindir	HVL	-16.29884	64.85812	0,10	0,94	0,033	4,26	18,00	8.154	0,023	4,68	0,51	273	0,007	22,41	10,74
Jarðvarmavirkjanir																
Hverahlíð	H1	-21.36796	64.00619	0,36	2,87	0,261	2,91	5,39	2.646	0,048	5,79	0,61	407	0,069	7,09	22,96
Hellisheiði	H2	-21.31132	64.04305	0,20	1,16	0,032	3,48	5,59	3.311	0,045	4,28	0,54	377	0,056	8,84	14,92
Svínahraun	H3	-21.43339	64.03543	0,37	1,93	0,176	4,78	7,48	4.702	0,067	5,50	1,06	364	0,036	13,05	11,07
Reykjanes	RN1	-22.71477	63.82647	0,24	3,53	0,026	10,14	11,97	7.166	0,050	4,70	1,48	514	0,023	20,46	11,08
Reykjanes	RN2	-22.68545	63.81592	0,20	3,19	0,016	0,47	6,69	4.304	0,055	2,33	1,10	493	0,009	10,90	7,17
Reykjanes	RN3	-22.67156	63.82372	0,06	2,27	0,016	9,34	10,97	6.631	0,017	4,74	1,26	334	0,011	15,52	9,91
Álver, iðnaðarsvæði																
Grundartangi	G4	-21.78090	64.36745	1,07	1,37	0,067	3,08	9,43	3.492	0,022	41,09	3,85	649	0,802	10,89	18,86
Straumsvík	94A	-22.00786	64.04342	0,56	2,00	0,093	9,86	22,69	6.528	0,049	17,06	30,47	347	0,279	15,88	59,27
Straumsvík	95A	-21.99829	64.04030	0,30	1,53	0,117	6,32	13,87	4.128	0,030	8,74	18,65	301	0,256	0,88	62,07
Straumsvík	99A	-21.98386	64.03375	0,21	0,92	0,028	6,40	10,84	6.275	0,024	7,86	2,72	297	0,063	17,02	14,86
Straumsvík	HF1	-22.00948	64.03175	0,33	1,08	0,053	3,95	7,42	5.862	0,034	7,13	1,69	324	0,067	18,51	11,68
Straumsvík	HF5	-21.97053	64.04357	0,08	1,46	0,031	9,20	22,00	7.053	0,036	10,41	1,39	360	0,078	20,42	21,91
Straumsvík	D1B	-22.00056	64.04227	0,81	3,56	0,103	14,52	45,81	10.127	0,066	18,89	75,16	516	0,377	21,89	149,71



70. mynd. Sýnatökustaður D1B í Straumsvík. Mosinn hraungambri er mikið skemmdur. Tildurmosi finnst þarna hvergi. Áberandi æðplöntur eru krækilyng, beitilyng, loðvíðir og birki. Staðsetning er sýnd á 2. mynd. Ljós. Sigurður H. Magnússon, 30. júlí 2014.



71. mynd. Sýnatökustaður G4 á Grundartanga. Allmiklar skemmdir á mosanum hraungambra. Staðsetning er sýnd á 3. mynd. Ljósmynd. Sigurður H. Magnússon, 3. september 2015.

6 UMRÆÐA

Klasagreining efna árið 2015 bendir til þess að uppsprettur arsens, nikkels, antimons og brennisteins séu að hluta til þær sömu. Svipað má segja um króm, kopar, járn og vanadín og að nokkru leyti einnig um bór, kvikasilfur, kadmín, blý og sink.

Hér að neðan verður fjallað um einstök efni, líklegar uppsprettur, helstu breytingar sem orðið hafa með tíma og niðurstöður bornar saman við samskonar rannsóknir á meginlandi Evrópu.

6.1 Arsen, nikkell, antimon og brennisteinn

Arsen

Af niðurstöðum að dæma eru meginuppsprettur arsens í mosa hér á landi álver og eldgos. Mælingar árið 2015 sýna t.d. að arsen dreifist í nokkrum mæli frá álverunum þremur og hafa fyrri mælingar einnig sýnt það sama (Sigurður H. Magnússon og Björn Thomas 2007a, 2007b, Sigurður H. Magnússon 2013) Áhrif álveranna eru frekar staðbundin en þó má greina hækkun á styrk efnisins í a.m.k. 20 km fjarlægð frá álverinu í Reyðarfirði árið 2015 en þar hefur styrkur efnisins hækkað verulega á síðustu árum. Árið 2015 var hann orðinn það hár að mengun af völdum arsens flokkast þar sem *veruleg* (yfir 1,32 mg/kg) þar sem styrkur var hæstur í firðinum (41.–42. mynd).

Hvað varðar eldgos er greinilegt að gosið í Eyjafjallajökli árið 2010 hækkaði styrk arsens í tildurmosa (16. mynd) en styrkur efnisins var þá einna hæstur á svæði umhverfis jökulinn þar sem öskufall var hvað mest (Gudmundsson o.fl. 2012). Við gosið í Holuhrauni 2014–2015

barst arsen í nokkrum mæli út í andrúmsloft (Gauthier o.fl. 2016) en það virðist hins vegar ekki hafa haft mikil áhrif á styrk í tildurmosa því ekki kemur fram greinilegt dreifingarmynstur sem auðvelt er að tengja gosinu (16. mynd).

Jarðhitasvæði eru þekkt fyrir að vera uppsprettur arsens (Tyrovola og Nikolaidis 2009, Sigfússon o.fl. 2011) og við virkjun jarðgufu má reikna með að efnið geti dreifst út í andrúmsloft (Hrefna Kristmannsdóttir og Halldór Ármannsson 2003). Niðurstöður mælinga á styrk í mosa sýna einnig nokkra hækkun á styrk arsens í nágrenni Hellisheiðarvirkjunar. Það bendir til að arsen berist þaðan í nokkrum mæli en hæstu gildin í nágrenni virkjunarinnar flokkast sem *lítillsháttar mengun* (2. viðauki, 16. mynd). Mælingar á styrk arsens í skiljuvatni frá Hellisheiðarvirkjun sýna að hann er um fjórum sinnum hærri en hámarksgildi fyrir neysluvatn (Hólmfríður Sigurðardóttir og Þorsteinn Ari Þorgeirsson 2016). Í þessu sambandi er einnig rétt að geta þess að styrkur arsens í jarðhitavökva hér á landi er að jafnaði lágur í samanburði við jarðhitavökva á jarðhitasvæðum erlendis (Giroud 2008). Athygli vekur að styrkur arsens er nokkuð hár við Axarfjörð og þar í kring (16. mynd). Hvað þessu veldur er ekki ljóst en hugsanlega gæti verið um áhrif jarðhita á svæðinu að ræða.

Ef eingöngu er miðað við svæði utan iðjuvera (>4 km) hefur styrkur arsens á landinu lítið breyst frá árinu 2000 er fyrst var farið að mæla efnið í öllum sýnum sem tekin voru (15. mynd). Mælingar á mosa á meginlandi Evrópu til 2010 til benda hins vegar til þess að styrkur arsens hafi víðast hvar farið lækkandi (Harmens o.fl. 2013b). Í Noregi hefur styrkur arsens t.d. lækkað frá 1977 er fyrst var farið að mæla efnið til ársins 2005 en litlar breytingar hafa orðið eftir það (Steinnes o.fl. 2016). Í Svíþjóð hefur styrkur arsens í mosa lækkað frá 1975 til 2010. Síðustu mælingar árið 2015 benda hins vegar til nokkurrar hækkunar sem þó gæti stafað af breyttum mæliaðferðum (Danielsson og Karlsson 2016).

Hér á landi var styrkur arsens í mosa árið 2015 utan iðnaðarsvæða í megindráttum svipaður og í norðvesturhluta Evrópu; Svíþjóð, Írlandi, Þýskalandi, Eistlandi og Noregi (miðgildi landa 0,07–0,13 mg/kg) en mun lægri en í suðausturhluta álfunnar svo sem í Búlgaríu, Makedóníu, Serbíu, Rúmeníu og Grikklandi (miðgildi landa 0,46–1,62 mg/kg) (ICP vegetation, óbirt gögn).

Nikkel

Styrkur nikkels í tildurmosa er mjög misjafn eftir svæðum en hann hefur frá upphafi mælinga árið 1990 mælst hlutfallslega hár á gosbeltinu, einkum þó á svæði umhverfis Langjökul (Rühling o.fl. 1992, Sigurður H. Magnússon 2013). Að öllum líkindum tengist það efnasamsetningu bergs og áfoki á því svæði (30. mynd). Styrkur nikkels er greinilega tengdur álverunum en hann fellur með aukinni fjarlægð frá þeim (30. og 56. mynd, 4. tafla). Á Grundartanga virðast áhrif á styrk nikkels vera lítil en mun meiri í Reyðarfirði og í Straumsvík (55. mynd). Í Straumsvík voru þessi áhrif komin fram strax þegar mælingar hófust árið 1990, árið 2005 á Grundartanga og 2010 í Reyðarfirði (4. tafla) sem er í samræmi við starfsemi álveranna. Í Reyðarfirði hefur styrkur nikkels lækkað mikið norðvestur af álverinu og telst mengun árið 2015 samkvæmt reiknuðum mengunarstuðlum þar vera *veruleg* (>37,85 mg/kg).

Utan iðnaðarsvæða, breyttist styrkur nikkels frekar lítið árin 1990–2000. Veruleg hækkun mældist árið 2005 en styrkur efnisins hefur síðan lækkað (29. mynd). Á meginlandi Evrópu og í Skandinavíu hefur styrkur nikkels að jafnaði farið lækkandi frá 1990 til 2010 (Harmens o.fl. 2013b). Líkt og með arsen lækkaði styrkur nikkels í Noregi tímabilið 1977–2005 en hefur lítið breyst eftir það. Í Svíþjóð hefur styrkur nikkels í mosa lækkað verulega og nokkuð stöðugt frá 1977 til 2015 (Danielsson og Karlsson 2016).

Í samanburði við nágrannalönd okkar í Evrópu er styrkur nikkels í mosa fremur hár hér á landi sem að öllum líkindum tengist efnasamsetningu bergs og áfoki. Árið 2015 var styrkur nikkels hér svipaður og í mörgum löndum Suðaustur-Evrópu eins og í Rúmeníu, Serbíu, Úkraínu og Moldavíu (miðgildi landa, 3,11–4,73 mg/kg) sem er mun hærra en norðar og vestar í álfunni eins og í Svíþjóð, Eistlandi, Írlandi, Þýskalandi og Noregi (miðgildi landa, 0,45–1,09 mg/kg) (ICP vegetation, óbirt gögn).

Antimon

Styrkur antimons í mosa, sem mældur var í fyrsta sinn árið 2015, reyndist vera hlutfallslega lágur víðast hvar á landinu nema í nágrenni iðjuveranna á Grundartanga, í Reyðarfirði og Straumsvík (36. mynd). Allhá gildi mældust einnig í mosa við Helguvík (3. viðauki). Vitað er að antimon eins, og fjölmargir aðrir þungmálmar, getur borist út í umhverfið í eldgosum (Edmonds o.fl. 2018). Mælingar á efnum í gosmekkinum frá gosinu í Holuhrauni sýndu að nokkuð af efninu barst þaðan (Gauthier o.fl. 2016). Útbreiðslumynstrið bendir þó eindregið til þess að meginuppsprettur antimons hér á landi séu álverin eða tengd starfsemi (36. og 62. mynd). Á nokkrum stöðum í Straumsvík og í Reyðarfirði var styrkur efnisins yfir 0,21 mg/kg, sem samkvæmt reiknuðum mengunarstuðlum telst *veruleg mengun*.

Borið saman við Evrópu er styrkur antimons utan iðnaðarsvæða lágur (Harmens o.fl. 2013b) en miðgildi fyrir Ísland árið 2015 var 0,02 mg/kg sem var lægst allra landa í Evrópu þar sem efnið var mælt árið 2015 (ICP vegetation, óbirt gögn). Gott er til þess að vita að styrkur antimons skuli víðast hvar vera mjög lágur hér á landi því eituráhrif efnisins eru talin sambærileg við blý. Antimon er nú ofar á lista eittraðra snefilefna á norðurskautssvæðinu og er talið geta haft víðtæk áhrif á vistkerfi og heilsu manna í framtíðinni (Krachler o.fl. 2005). Antimon er eitt þeirra efna sem talið er að geti valdið breytingum á erfðafni (e. *genotoxic*) en það er hvorki nauðsynlegt plöntum né dýrum (Smichowski 2008).

Brennisteinn

Styrkur brennisteins í mosa var fyrst mældur árið 1995 og þá aðeins í hluta þeirra sýna sem tekin voru. Frá árinu 2000 hefur verið mælt í öllum sýnum. Styrkurinn hefur verið misjafn eftir árum, lægstur árin 2005 og 2010 en mun hærri árið 2000 og þó sérstaklega árið 2015 (33. mynd).

Niðurstöðurnar benda til þess að uppsprettur brennisteins séu nokkrar og mjög misöflugar. Í fyrsta lagi er svæði austan við Mýrdalsjökul en þar hefur styrkur brennisteins ávallt mælst hlutfallslega hár í sýnum sem tekin hafa verið við Syðri-Ófæru, Gröf í Skaftártungu og við Holt í Álftaveri (34. mynd). Allir þessir staðir eru nálægt Skaftá og líklegt að brennisteinn sem losnar í hlaupum í ánni skýri þessi háu gildi.

Niðurstöður gefa einnig til kynna nokkra hækkun á styrk brennisteins í tildurmosa í nágrenni Hellisheiðarvirkjunar (2. viðauki, 5. tafla) en við því var að búast því virkjunin losar allmikið af brennisteinsvetni. Fyrri rannsóknir hafa gefið svipaða niðurstöðu. Mælingar á sýnum af hraungambra sem tekin voru við virkjunina haustið 2008 bentu t.d. til þess að brennisteinn safnist fyrir í plöntum í nánasta umhverfi virkjuninnar (Árni Bragason og Eva Yngvadóttir 2009). Niðurstöður sem fengust með rannsóknum árið 2014 á hraungambra í mismunandi fjarlægð (0,25–4,0 km) frá Hellisheiðarvirkjun og Nesjavallavirkun sýndu að styrkur brennisteins við Nesjavallavirkjun lækkaði með aukinni fjarlægð. Þetta mynstur var hins vegar ekki greinilegt við Hellisheiðarvirkjun (Mutia 2016). Endurtekna mælingar (0,25–4,0 km) árið 2017 sýndu að styrkur brennisteins féll marktækt með aukinni fjarlægð frá báðum virkjununum (Járngerður

Grétarsdóttir o.fl. 2019, í útgáfu). Hvað varðar aðrar jarðvarmavirkjanir sem þessi rannsókn náði til þá virðast þær ekki hafa haft mikil áhrif á styrk brennisteins í mosa.

Þriðja meginuppspretta brennisteins í mosa eru álverin þrjú en styrkur brennisteins er þar að jafnaði hærri en á svæðum utan þeirra (4. tafla, 59. mynd) enda losa þau talsvert af brennisteini. Árið 2014 losaði álverið í Straumsvík um 2.877 tonn af SO₂ (Grænt bókhald 2014: Rio Tinto Alcan á Íslandi), álverið á Grundartanga um 3.252 tonn (Grænt bókhald 2014: Norðurál) og álverið í Reyðarfirði um 5.215 tonn (Grænt bókhald 2015: Alcoa Fjarðaál).

Fjórdi en langöflugasta uppspretta brennisteins undanfarin ár var hins vegar eldgosið í Holuhrauni sem sem hófst 31. ágúst 2014 og stóð fram í febrúar 2015. Þekkt er að í eldgosum losnar oft mikið af brennisteini út í andrúmsloft (Thordarson o.fl. 2001, Flaathen og Gíslason 2007). Áætlað hefur verið að í Holuhraungosinu hafi 11±4,1 megatonn af SO₂ borist út í andrúmsloft (Gíslason o.fl. 2015, Stefánsson o.fl. 2017) síðar lækkað niður í 9,6 megatonn (Pfeffer o.fl. 2018). Í ljósi þessa gríðarlega magns og að gosmökkurinn dreifðist mjög víða um land (Gíslason o.fl. 2015) kemur ekki á óvart að styrkur brennisteins í mosa hafi hækkað verulega frá 2010 til 2015 (59. mynd). Þessa hækkun má finna nánast alls staðar á landinu bæði í nágrenni iðjuvera, jarðvarmavirkjana og annars staðar (59. mynd, 2. viðauki).

Ljóst er að magn brennisteins sem losnaði í Holuhraungosinu á sex mánuðum 2014–2015 er margfalt hærri en það sem álverin og jarðvarmavirkjanir losa. Árið 2014 losuðu álverin þrjú um 11.300 tonn sem þýðir að losun frá Holuhrauni var um þúsundföld losun álveranna. Losun brennisteinsvetnis (H₂S) árið 2014 frá þeim jarðvarmavirkjunum þar sem mosa hefur verið safnað, þ.e. Hellsheiðarvirkjun, Svartsengi, Bjarnarflagi og Reykjanesvirkjun var alls um 11.000 tonn (sjá kafla 2.2.4). Þótt losun á SO₂ og H₂S sé ekki fyllilega sambærileg var magnið sem losnaði af SO₂ í Holuhraungosinu í tonnum talið um fimmhundruðfalt á við það sem álverin þrjú og jarðvarmavirkjanirnar losuðu árið 2014.

6.2 Króm, kopar, járn og vanadín

Króm, kopar, járn og vanadín sýna svipaða dreifingu hér á landi en styrkur þeirra er að jafnaði hæstur á gosbeltinu (22., 24., 26. og 38. mynd). Þekkt er að áfok getur haft mikil áhrif á styrk sumra efna í mosa því efni úr jarðvegi og berggrunni á lítt grónum svæðum geta hækkað styrk þeirra verulega (Berg o.fl. 1995, Steinnes 1995, Reimann o.fl. 2001, Poikolainen o.fl. 2004). Meginuppspretta þessara efna er væntanlega áfok frá gróðurlitlum svæðum. Styrk þessara efna má því nota til að meta áfok á landinu. Í því sambandi má benda á að góð samsvörum er á milli styrks járn í mosa og áfoks eins og það hefur verið metið af Ólafi Arnalds (2010). Miðað við þetta hefur dregið úr áfoki á landinu frá 2010 til 2015 en styrkur járn, kopars og vanadíns hefur lækkað verulega á þessu tímabili.

Þrátt fyrir að meginuppsprettur þessara efna megi rekja til áfoks kemur fleira til. Norðaustur af álverinu í Straumsvík, nánar tiltekið við iðnaðarsvæðið í Hellnahrauni í Hafnarfirði, er styrkur allra efnanna hlutfallslega hár. Einkum á þetta við um króm en styrkur þess er það hár þar að flokkast sem *nokkur mengun* (48. mynd). Styrkur efnanna og dreifing á þessu svæði bendir til þess að þau tengist iðnaði sem þar er rekinn.

Í ljósi þess að styrkur þessara efna í mosa hér á landi er sterklega tengdur áfoki, sérstaklega járn og vanadíns, er samamburður við önnur Evrópulönd varla raunhæfur. Í sameiginlegum skýrslum sem gefnar hafa verið út um þungmálmaverkefnið hefur því járn og vanadín verið

sleppt (t.d. Harmens o.fl. 2008a, Harmens o.fl. 2010, Harmens o.fl. 2013b) þótt á því séu undantekningar (Harmens o.fl. 2007). Hvað varðar króm var styrkur þess hér á landi árið 2015 svipaður og í Suður- og Suðaustur-Evrópu svo sem í Frakklandi, Búlgaríu, Slóvakíu og Makedóníu (miðgildi landa 2,71–2,83 mg/kg) en miklu hærrí en í nágrannalöndunum Svíþjóð, Írlandi, Þýskalandi og Noregi (miðgildi landa 0,26–0,66 mg/kg) (ICP vegetation, óbirt gögn). Styrkur kopars hér á landi árið 2015 var svipaður og víða í Suðaustur-Evrópu eins og í Rúmeníu og Búlgaríu (miðgildi landa 5,77–7,28 mg/kg) en t.d. mun hærrí en í nágrannalöndunum Írlandi, Svíþjóð og Noregi (miðgildi landa 3,23–4,20 mg/kg) (ICP vegetation, óbirt gögn).

6.3 Bór, kvikasilfur, kadmín, blý og sink

Bór

Þar sem efnið var mælt í fyrsta sinn árið 2015 er ekki unnt að sjá hvort eða hverjar breytingar hafa orðið með tíma. Útbreiðslumynstur bórs bendir ekki til staðbundinna uppspretta en styrkur efnisins er þó einna hæstur á norðurhluta landsins (18. mynd). Hvað veldur þessum milli landshluta er ekki ljóst. Bór tengist víða jarðhita en styrkur þess er sums staðar í heiminum mjög hár í jarðhitavatni (t.d. Howe 1998, Gemici og Tarcan 2004). Hér á landi er styrkur bórs í vatni lágur á köldum svæðum en talsvert hærrí á jarðhitasvæðum og hækkar eftir því sem hiti eykst (Arnórsson og Andrésdóttir 1995). Þótt mun meira sé af efninu í vatni á jarðhitasvæðum hér á landi telst styrkur þess lágur því lítið er af efninu í basalti (Stefán Arnórsson 2017).

Niðurstöður þessarar rannsóknar benda ekki til að jarðvarmavirkjanir hafi haft mikil áhrif á styrk bórs í mosa, hvorki í tildurmosa né hraungambra (5. tafla, 2. viðauki). Er það í samræmi við niðurstöður mælinga sem gerðar voru á hraungambra við Helligheiðarvirkjun og Nesjavallavirkjun árið 2014 en dreifingarmynstur bórs kringum virkjanirnar benti ekki til mikilla áhrifa frá þeim (Mutia 2016). Aðrar rannsóknir hafa þó sýnt nokkuð annað mynstur. Mælingar árið 2008 á sýnum af hraungambra gáfu t.d. til kynna að bórstyrkur væri hærrí í nágrenni Helligheiðarvirkjunar en á viðmiðunarsvæði í um 14 km fjarlægð í Bláfjöllum (Árni Bragason og Eva Yngvadóttir 2009). Sömu leiðis sýndu mælingar árið 2017 við Helligheiðarvirkjun og Nesjavallavirkjun að styrkur bórs í hraungambra var mjög breytilegur en lækkaði að jafnaði á tveimur af fjórum rannsóknarsniðum með aukinni fjarlægð (0,25–4,0 km) frá virkjununum (Járngerður Grétarsdóttir o.fl. 2019, í útgáfu).

Kvikasilfur

Styrkur kvikasilfurs utan iðnaðarsvæða hefur verið mjög breytilegur eftir árum, lægstur árið 2005 en hæstur árið 2010 (27. mynd). Greinilegar uppsprettur er ekki að sjá innanlands, hvorki við iðjuver né utan þeirra (28. mynd, 4. tafla). Ekki verður séð að jarðvarmavirkjanir hafi þar mikil áhrif (2. viðauki). Þar sem breytingar á styrk kvikasilfurs ganga nokkuð jafnt yfir hvar sem er á landinu er hugsanlegt að styrkurinn ráðist að miklu leyti af flutningi annars staðar frá en kvikasilfur er einn þeirra málma sem borist getur um langan veg á milli svæða (Poikolainen o.fl. 2004, Lin o.fl. 2012).

Miðað við meginland Evrópu var styrkur kvikasilfurs í mosa hér á landi árið 2015 mjög lágur en Ísland er meðal þeirra landa þar sem styrkur er hvað lægstur (ICP vegetation, óbirt gögn).

Kadmín

Frá því að byrjað var að vakta þungmálma í mosa árið 1990 hefur styrkur kadmíns lækkað mikið en styrkurinn hækkaði þó nokkuð milli 2010 og 2015 (19. mynd). Styrkur kadmíns árið 2015 var hlutfallslega hár á Vestfjörðum og Norðvesturlandi sem hefur ekki gerst áður (20. mynd).

Ekki er ljóst hvað þessu veldur en engar þekktar uppsprettur eru á þessu svæði. Í Holuhraunsgosinu losnaði nokkuð af kadmíni út í andrúmsloft (Gauthier o.fl. 2016) sem gæti hafa stuðlað að hækkun á þessu svæði. Í ljósi þess að gosmökkur dreifðist mjög víða um landið verður það að teljast fremur ólíklegt því þá ætti slík hækkun koma víðar fram. Hugsanlegt er að hér sé um að ræða mengum sem borist hefur um langan veg með því sem kallað hefur verið hlýtemprað bakflæði en þá berst loft frá norðanverðri Evrópu að Íslandi að norðan. Nefna má að í febrúar 2014 voru austan- og norðanvindar yfir landinu óvenju miklir (Guðrún Nína Petersen, munnlegar upplýsingar 23. nóv. 2018). Þetta gæti einnig skýrt hækkaðan styrk blýs í mosa á sama svæði, sjá umfjöllun um blý hér að neðan.

Eins og áður var styrkur kadmíns árið 2015 við Straumsvík hærri en í nágrenninu (4. tafla). Hvað varðar jarðvarmavirkjanir er ekkert sem bendir til að þaðan berist mikið af kadmíni (5. tafla, 2. viðauki).

Í samanburði við Evrópu var styrkur kadmíns árið 2015 mjög lágur hér á landi og með því allra lægsta sem gerist á meginlandinu. Styrkurinn er svipaður og á Írlandi og í Noregi (miðgildi landa 0,05–0,08 mg/kg) en miklu lægri en í Suðaustur-Evrópu svo sem í Rúmeníu, Úkraínu og Hvíta Rússlandi (miðgildi landa 0,27–0,39 mg/kg) (ICP vegetation, óbirt gögn).

Blý

Styrkur blýs í mosa hér á landi hefur lækkað frá því fyrst var farið að mæla hann árið 1990 (31. mynd). Lækkunin kemur ekki á óvart því að eftir að hætt var að blanda blýi í bensín hefur styrkur þess í umhverfinu lækkað verulega bæði hér og á meginlandi Evrópu (Harmens o.fl. 2008a). Hér á landi hefur þó orðið breyting frá 2010 því árið 2015 hækkaði styrkur blýs að nýju (31. mynd).

Uppsprettur blýs hér á landi hafa hingað til verið taldar í meginatriðum vera tvær. Annars vegar þéttbýli innanlands, einkum á suðvesturhorni landsins, og hins vegar aðkomin mengun sem hefur þá komið fram á Suðausturlandi þar sem úrkoma er einna mest (Rühling o.fl. 1992, Sigurður H. Magnússon 2013). Niðurstöður 2015 sýna talsvert annað mynstur í dreifingu blýs í mosa því styrkur var þá hlutfallslega hár á Vestfjörðum og Norðvesturlandi (32. mynd). Þar sem engar þekktar uppsprettur blýs er að finna á þessum slóðum er líkleggra að hér sé um aðflutning efnisins annars staðar frá að ræða. Mögulega gildir sama skýring og fyrir kadmín, þ.e. að blý hafi borist með lofti úr austri frá norðanverðri Evrópu að Íslandi að norðan, sjá einnig umfjöllun um kadmín hér að framan (Guðrún Nína Petersen, munnlegar upplýsingar 23. nóv. 2018).

Niðurstöður benda til þess að sú starfsemi sem rekin er á Grundartanga og í Reyðarfirði hækki styrk blýs í mosa (4. tafla). Öflugustu uppsprettu blýs er hins vegar að finna á iðnaðarsvæðinu í Hellnahrauni í Hafnarfirði suðaustur af álverinu í Straumsvík en þar reyndist hæsta gildi árið 2015 vera 37,59 mg/kg sem telst *veruleg mengun* (58. mynd). Útbreiðsla blýs þarna er þó frekar takmörkuð en nær þó inn í íbúðabyggðina á Völlunum. Þá kom fram að styrkur blýs í tildurmosa við Helligheiðarvirkjun féll marktækt með fjarlægð frá virkjuninni (5. tafla, 2. viðauki). Ólíklegt er að blýið sé komið úr jarðhitavatni því styrkur í skiljuvatni (<0,01 µg/kg) og þéttivatni (0,027 µg/kg) virkjunarinnar er langt undir hámarksgildi neysluvatns (10 µg/kg) (Hólmfríður Sigurðardóttir og Þorsteinn Ari Þorgeirsson 2016). Hins vegar er hugsanlegt að starfsemi á virkjunarstað losi blý út í umhverfið sem síðan mælist í mosa. Mælingar á hraungambra árið 2017 í 250-4000 í m fjarlægð sýndu þó ekki slíkt samband (Járngerður Grétarsdóttir o.fl. 2019, í útgáfu).

Við kísilverið á Bakka reyndist styrkur blýs haustið 2015 vera nokkuð hár næst verinu sem þá var í byggingu (3. viðauki). Vel má vera að þau umsvif sem fylgja byggingaframkvæmdum hafi hækkað styrk blýs í mosa næst byggingarstað.

Þegar á heildina er litið er styrkur blýs hér á landi svipaður og í nágrannalöndunum Írlandi, Svíþjóð og Noregi (miðgildi landa, 0,74–1,58 mg/kg) en mun lægri en í suðaustur Evrópu svo sem í Rúmeníu, Serbíu, Makedóníu og Búlgaríu (miðgildi landa, 4,20–10,72 mg/kg) (ICP vegetation, óbirt gögn).

Rétt er að nefna að mosaaðferðin hefur reynst sérstaklega heppileg við mælingar á blýi því efnið binst vel í mosa (Gjengedal og Steinnes 1990) og sterk samsvörun er á milli styrks í mosa og magns í ákomu (Berg o.fl. 1995).

Sink

Styrkur sinks í tildurmosa utan iðnaðarsvæðanna þriggja á Grundartanga, í Reyðarfirði og í Straumsvík hefur verið misjafn eftir árum, hæstur árið 2000 og hefur hann að jafnaði farið lækkandi síðan (39. mynd). Þessi breyting er í samræmi við það sem gerst hefur víðast hvar á meginlandi Evrópu, a.m.k. til 2010 (Harmens o.fl. 2013b).

Hvað varðar uppsprettur sinks benda útbreiðslukort til þess að nokkuð af efninu komi frá áfoki því styrkur þess er að jafnaði hæstur á gosbeltinu (40. mynd). Ekki verður séð að þær jarðvarmavirkjanir sem kannaðar voru, þ.e. við Bjarnarflag, Hellisheiði, Svartsengi og á Reykjanesi eða byggingastaðir kísilvera (Helguvík og Bakki) séu miklar uppsprettur sinks. Sama má segja um álverin þrjú. Hins vegar er styrkur sinks talsvert hár við iðnaðarsvæðið í Hellnahrauni suðaustur af álverinu í Straumsvík (66. mynd) en svo hefur verið um alllangt skeið (Sigurður H. Magnússon 2002a, Sigurður H. Magnússon og Björn Thomas 2007a, Sigurður H. Magnússon 2013). Útbreiðsla sinks í mosa á þessu svæði bendir eindregið til að frá starfsemi á svæðinu dreifist sink í nokkrum mæli um iðnaðarsvæðið og að hluta inn í íbúðabyggðina á Völlunum (66. mynd).

Miðað við önnur Evrópulönd var styrkur sinks árið 2015 utan iðnaðarsvæða hér á landi með því lægsta sem gerist í álfunni, eða svipaður og í Albaníu, Írlandi og Serbíu (miðgildi landa, 18,36–22,39 mg/kg) og miklu lægri en í löndum eins og í Rúmeníu, Grikklandi og Póllandi (miðgildi landa 47,66–100,40 mg/kg) (ICP vegetation, óbirt gögn).

6.4 Eyðing mosa og mosaskemmdir

Lengi hefur verið þekkt að margar mosategundir eru viðkvæmar fyrir loftmengun (LeBlanc og Rao 1973, Nash og Nash 1974, Tretiach o.fl. 2007). Sumarið 2010 voru skemmdir á mosa í fyrsta sinn metnar kerfisbundið í þessu verkefni en fyrr á því ári gaus Eyjafjallajökull og því mátti búast við að mosi hefði orðið fyrir skemmdum (Sigurður H. Magnússon 2013). Þetta var síðan endurtekið sumarið 2015 en þá var nýafstaðið mikið gos í Holuhrauni þar sem gríðarlegt magn brennisteinstvíoxíðs barst út í andrúmsloft (Gíslason o.fl. 2015, Stefánsson o.fl. 2017).

6.4.1 Hvar fundust skemmdir?

Niðurstöður athugana sumarið 2015 sýndu að tildurmosi hafði skemmst, aðallega á miðhálandinu og í hálendisbrúninni en einnig við álverin og á Reykjaneseskaga (68. mynd).

Athygli vekur að skemmdir voru ekki meiri næst gosstöðvunum í Holuhrauni en annars staðar á hálendinu eða í hálendisbrúninni. Styrkur einstakra efna var heldur ekki hærri allra næst gosstöðvunum en annars staðar á hálendinu (16., 18., 20., 22., 24., 26., 28., 30., 32., 34., 36., 38. og 40. mynd). Sýnið sem tekið var af hraungambra í Hvannalindum innihélt t.d. hlutfallslega lágan styrk af brennisteini en hins vegar háan af vanadíni og járni sem bendir frekar til mikils áfoks en áhrifa frá gosinu í Holuhrauni (8. tafla).

Þá kom fram að tildurmosi hafði algerlega eyðst á sumum sýnatökustöðum. Á Grundartanga árið 2010 skammt vestan við álverið (G4) og árið 2015 á tveimur stöðum til viðbótar (G6 og 88) (3. mynd). Við Straumsvík fannst tildurmosi ekki lengur árið 2015 vestan við iðnaðarsvæðið í Hellnahrauni (94A) (2. mynd). Í Reyðarfirði komu árið 2010 fram allmiklar skemmdir á mosanum bleytubura (*Sphagnum teres*) norðvestan við álverið (R42) (Sigurður H. Magnússon 2013) og árið 2015 var þar mjög lítið orðið eftir af tildurmosa og sama var að segja um stað R37-2 (4. mynd). Þekkt er að þekja mosa getur minnkað verulega vegna samkeppni við annan gróður svo sem ef grasþekja eykst (Borgþór Magnússon o.fl. 2006, Sigurður H. Magnússon 2016). Þó að þetta geti haft áhrif í einhverjum mæli er það örugglega ekki megin skýringin á þessum breytingum. Á nánast öllum stöðunum höfðu áður komið fram skemmdir. Staðirnir eru allir skammt frá iðnaðarsvæðum (álverum eða öðrum iðnaði) þar sem styrkur margra efna hefur mælst hvað hæstur og mosinn því undir miklu efnaálagi.

6.4.2 Hverjar eru orsakir mosaskemmda?

Niðurstöður af „backwards multiple logistic regression“ fyrir öll mæld efni sýndu jákvætt marktækt samband milli styrks nikkels og brennisteins í mosa og skemmda en hins vegar neikvætt samband við styrk bórs (69. mynd). Öll þessi efni geta valdið eituráhrifum á plöntur.

Nikkel sem er nauðsynlegt snefilefni fyrir plöntur veldur eiturverkunum ef það er í háum styrk (Cempel og Nikel 2006). Áhrifin lýsa sér með því að það dregur úr vexti eða hann stöðvast, blöð gulna og drep myndast í vefi (Bhalerao o.fl. 2015).

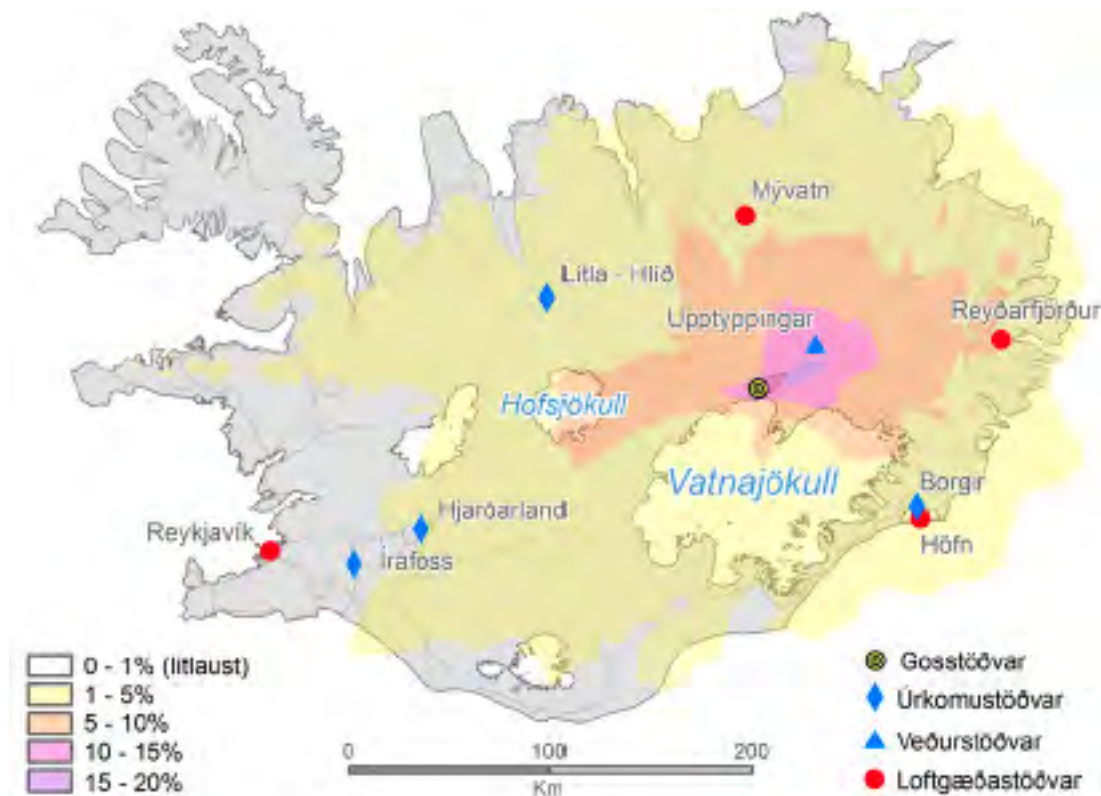
Brennisteinn, sem er nauðsynlegt meginefni fyrir plöntur (e. *macronutrient*), getur valdið eiturverkunum verði of mikið af honum. Það fer þó mikið eftir því á hvaða formi hann er (Mengel og Kirkby 1982). Brennisteinstvíoxíð (SO_2) sem losað er frá öllum álverunum og barst í stórum stíl í andrúmslofti í Holuhraungosinu getur haft mikil áhrif á gróður. Þekkt er að áhrifin geta bæði verið bráð eða hægfara, allt eftir styrk eða hve lengi efnið verkar. Brennisteinstvíoxíð getur hindrað ljóstillífun með því að trufla tillífunarferlið og hefur því áhrif á vöxt (Varshney og Garg 1979). Brennisteinstvíoxíð getur síðan oxast í andrúmslofti yfir í brennisteinssýru sem þá getur hreinlega brennt gróður og valdið útskolun efna úr gróðri og jarðvegi (Varshney og Garg 1979).

Áhrif brennisteinsvetnis (H_2S), sem hér á landi er losað frá jarðvarmavirkjunum í allmiklum mæli, á gróður eru frekar illa þekkt (Bussotti o.fl. 1997, Thompson og Kats 1978). Rannsóknir í nágrenni jarðvarmavirkjana erlendis gefa til kynna að það geti haft neikvæð áhrif á fléttur og fleiri tegundir en rétt er að benda á að frá virkjununum koma yfirleitt fleiri efni sem einnig geta haft neikvæð áhrif á gróður (Loppi 2000, Loppi o.fl. 2006, Paoli og Loppi 2008). Tilraunir með ræktun í gróðurhúsi hafa einnig sýnt að H_2S í hlutfallslega lágum styrk (30–100 ppb H_2S) eykur vöxt planta en við hærri styrk (300–3000 ppb) dregur úr vexti, blaðskemmdir koma í ljós og viðkvæmar plöntur drepast (Thompson og Kats 1978). Skammtímatilraunir (90 daga) með að vökva mosann hraungambra, sem hér á landi er algengur í nágrenni margra jarðvarmavirkjana, með H_2S í vatnslausn benda til þess að efri þolmörk mosans séu við 30 $\mu\text{g/l}$ sem samsvarar

um 10 ppm í lofti. Við styrk sem nam 300 $\mu\text{g}/\text{l}$ ppb sem samsvarar 110 ppm í lofti dró hins vegar úr vexti mosans (Mutia 2016). Við oxun brennisteinsvetnis breytist það í SO_2 og síðan í brennisteinssýru. Áhrif þessara efnasambanda eru því eins og lýst hefur verið hér að ofan.

Athyglisvert er að styrkur bórs í tildurmosa reyndist lægri þar sem skemmda varð vart en þar sem engar skemmdir var að finna (69. mynd). Bór er nauðsynlegt snefilefni fyrir plöntur en veldur eiturverkan verði of mikið af því (Gupta o.fl. 1985, Howe 1998). Bór er m.a. nauðsynlegt við frumskiptingu og er hluti frumveggjar planta. Í flestum plöntutegundum er bór frekar fast bundið en í jarðvegi er það hins vegar lausara og skolast auðveldlega út þar sem úrkoma er mikil (Gupta o.fl. 1985). Ekki er ljóst hvað veldur því að minna mælist í mosa þar sem skemmdir fundust en hugsanlegt er að þar losni um bór sem síðan skolast út.

Ljóst er að ýmis önnur efni geta skaðað gróður og þar með mosa. Vel er þekkt að flúor getur spillt gróðri en flúor er ekki talinn nauðsynlegur plöntum en getur haft veruleg eituráhrif (Weinstein og Davison 2004, Hong o.fl. 2016). Flúor kemur í nokkrum mæli frá álverunum þremur (Guðrún Þóra Magnúsdóttir 2017, Eva Yngvadóttir o.fl. 2016, Grænt bókhald 2015: Alcoa Fjarðarál). Verulega hefur dregið úr losun efnisins á síðustu áratugum vegna betri hreinsibúnaðar (Þór Tómasson og Hörður Þormar 1998). Áætlað hefur verið að í gosinu í Holuhrauni hafi um 0,05 megatonn af HF borist út í andrúmsloft (Stefansson o.fl. 2017). Mælingar á meðan á gosinu stóð sýndu að flúor dreifðist víða en styrkurinn var mældur á allmörgum stöðum á landinu og var styrkur flúors á Írafossi þá t.d. 68 faldur styrkur fyrri ára (Sigurður R. Gíslason o.fl. 2017).



72. mynd. Dreifing SO_2 í andrúmslofti sem tíðni klukkustundarmeðalgilda sem fóru yfir $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$ heilsuverndarmörkin alla 181 gosdagana. Til dæmis merkir 1% tíðni, að styrkur SO_2 hafi farið samtals 1,8 sólarhringa eða rúmlega 43 klukkustundir yfir heilsuverndarmörk á gostímanum. Myndin er úr grein Sigurðar R. Gíslasonar o.fl. 2017 og birt með leyfi Söru Barsotti.

Áhugavert er að bera saman útbreiðslu mosaskemmda sumarið 2015 (68. mynd) og líkan fyrir tíðnidreifingu SO_2 í andrúmslofti er gosið í Holuhrauni stóð (72. mynd) en þar kemur fram veruleg samsvörun. Þó er ljóst að skemmdir eru mun algengari á Reykjaneskaga og á Vesturlandi en sjaldgæfari á útnesjum norðanlands og á Suðausturlandi en ætla má út frá tíðnidreifingu SO_2 . Þegar litið er til hvað skemmdir á mosa var víða að finna á landinu sumarið 2015, má telja víst að þær séu að stórum hluta til komnar vegna gossins í Holuhrauni. Ástæður skemmda á Reykjaneskaga, og við iðnaðarsvæðin við Straumsvík, á Grundartanga og við Reyðarfjörð eru sennilega ekki aðeins af völdum gossins heldur einnig vegna efnaálags frá iðnaði og þéttbýli á þessum stöðum sem kemur til viðbótar því sem frá gosinu kemur. Á það hefur verið bent að oxun SO_2 yfir í brennisteinssýru gerist hraðar í birtu en myrkri og hraðar í raka en þurrki (Sigurður R. Gíslason o.fl. 2017). Það þýðir að áhrif af brennisteinssýru ættu að vera meiri á suðurhluta landsins en norðanlands. Þetta kemur einnig heim og saman við að á góstiánum var úrkoma oftast súr á suðurhluta landsins en norðanlands (Sigurður R. Gíslason o.fl. 2017) og gæti að hluta skýrt hlutfallslega meiri skemmdir á Suðvesturlandi en á útnesjum norðanlands.

Miðað við dreifingu og útlit skemmda má ætla að helsti áhrifavaldur sé brennisteinn og þá að öllum líkindum brennisteinssýra en mosi var víða sem brenndur væri (13., 14. og 73. mynd). Ekki er hægt að útiloka að flúor komi einnig við sögu en þekkt er að sameiginleg áhrif af SO_2 og flúors séu t.d. meiri en af hvoru efni um sig (Varshney og Garg 1979). Í nágrenni iðnaðarsvæðanna í Straumsvík, á Grundartanga og í Reyðarfirði má gera ráð fyrir að fleiri efni komi við sögu.

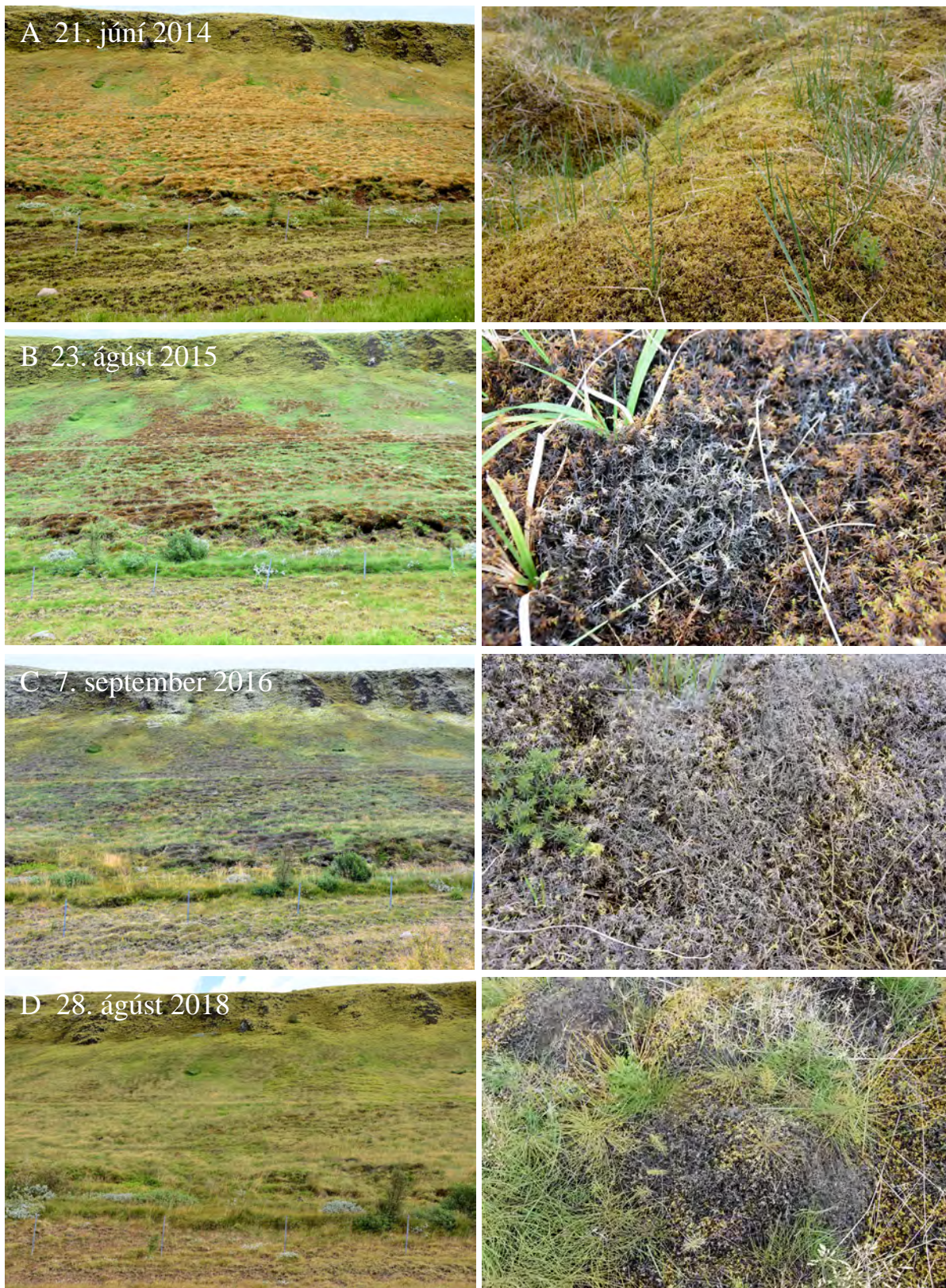
7 LOKAORÐ

Vöktun með mælingum á efnum í mosa hófst hér á landi árið 1990 og hefur farið fram á fimm ára fresti frá þeim tíma, síðast árið 2015. Verkefnið sem á sér lengri sögu á meginlandi Evrópu hefur það að markmiði að kortleggja uppsprettur mengandi þungmálma í andrúmslofti og fylgjast með breytingum sem verða með tíma. Vöktunin hér á landi hefur leitt í ljós að helstu uppsprettur þungmálma og brennisteins eru eldgos (As, S), áfok af lítt grónum svæðum (Cr, Cu, Fe, Ni, V), álver (As, Ni, S, Sb), annar iðnaður (Cr, Cu, Fe, Pb, V, Zn) og jarðvarmavirkjanir (As, S). Erlendis frá berast hingað þungmálmar með loftstraumum en í frekar litlum mæli (Cd, Pb).

Á þeim 25 árum sem liðin eru frá því að vöktun þungmálma hófst hér á landi hefur styrkur kopars (Cu) í mosa lækkað. Sama er að segja um styrk kadmíns (Cd) og blýs (Pb) sem hefur þó hækkað lítilsháttar á ný. Styrkur króms (Cr) hefur heldur hækkað en styrkur arsens (As) lítið breyst. Styrkur annarra efna (Hg, Fe, Ni, S) hefur verið breytilegur eftir árum.

Mikilvirkustu uppsprettur loftmengunar eru eldgos, sem geta haft tímabundin áhrif á stórum hluta landsins. Aðrar uppsprettur mengunar eru álver, annar iðnaður og jarðvarmavirkjanir, sem hafa fremur staðbundin en viðvarandi áhrif.

Mengun er mjög misjöfn eftir árum og svæðum. Í kjölfar gossins í Holuhrauni 2014–2015 hækkaði styrkur brennisteins í tildurmosa og skemmdir á mosanum komu fram á stórum hluta landsins. Árið 2015 komu fram skemmdir á mosa við álverin þrjú sem eru hér á landi. Sums staðar hafði mosi horfið þar með öllu, að líkindum vegna efnaálags. Í Reyðarfirði hafði styrkur arsens (As) og nikkels (Ni) hækkað verulega. Þá er ljóst að á og við iðnaðarsvæðið Hellnahrauni í Hafnarfirði er talsverð mengun en þar hefur mælst hlutfallslega hár styrkur margra efna (Cr, Cu, Fe, Pb, Zn) sem að öllum líkindum má rekja til málmiðnaðar á svæðinu. Inn á svæðið berast einnig efni í allmiklum mæli frá álverinu í Straumsvík (As, Ni, Sb, S). Mengun á þessu svæði



73. mynd. Breytingar á tildurmosa á beitarfriðuðu landi á Kópavatni í Hrunamannahreppi 2014–2018.

A. Mikil og heilbrigð mosaþekja.

B. Tildurmosi verulega skemmdur á stóru svæði. Greinar og blöð mikið brunnin og skemmd.

C. Enn meiri skemmdir komnar fram. Mikið af dauðum greinum og blöðum. Nokkrir mosasprotar byrjaðir að vaxa.

D. Verulegar breytingar hafa átt sér stað. Grös og blómjurtir hafa aukist að þekju og tildurmosi er farinn að vaxa að nýju.

er áhyggjuefni því að áhrif álversins og þess iðnaðar sem rekinn er í Hellnahrauni ná að hluta til inn í íbúðabyggð á Völlunum austan við iðnaðarhverfið og álverið.

Framhald rannsókna

Vöktun þungmálma með mælingum á mosa um allt land hefur nú staðið frá 1990; við álverið í Straumsvík frá árinu 2000 og á Grundartanga og í Reyðarfirði frá 2005. Í ljósi þess að iðnaður, umferð og byggð er sífellt að aukast hér á landi og að ætíð má búast við eldgosum er mikilvægt að fylgjast með mengun í andrúmslofti. Því verður að telja eðlilegt að þessari vöktun verði haldið áfram. Við álverin hefur tildurmosi sums staðar drepist og sýnum því fækkað. Þar þyrfti að fjölga sýnum á ný, einkum væri æskilegt að taka sýni í meiri fjarlægð frá álverunum en nú er gert til þess að fá betri upplýsingar um dreifingu efna fjær þeim. Hingað til hafa verið tekin mjög fá sýni við jarðvarmavirkjanir. Æskilegt væri að fjölga þeim til að fá betri upplýsingar um dreifingu efna í nágrenni þeirra. Þar sem tildurmosi er sums staðar sjaldgæfur en hraungambri algengur, einkum við jarðvarmavirkjanir, væri æskilegt að kanna nánar samband á efnastyrk í mosategundunum tveimur, hraungambra og tildurmosa.

8 ÞAKKIR

Verkefnið hefur verið fjármagnað af ýmsum aðilum í gegnum árin; Rannsóknastofnun landbúnaðarins, Náttúrufræðistofnun Íslands, Norrænu ráðherranefndinni, umhverfis- og auðlindaráðuneyti, atvinnuvega- og nýsköpunarráðuneyti, Vegagerðinni, Landsvirkjun, Umhverfisstofnun, Alcan á Íslandi, Alcoa Fjarðaáli í Reyðarfirði, Norðuráli og Elkem Ísland á Grundartanga o.fl. Árið 2015 var verkefnið styrkt sérstaklega með fjárveitingu frá íslenska ríkinu vegna upplýsingaöflunar um áhrif gossins í Holuhrauni á umhverfi og heilsu.

Úrvinnsla gagna og útgáfa þessarar skýrslu hefur verið kostuð af mörgum aðilum; öllum álfyrirtækjunum þremur, þ.e. í Straumsvík, á Grundartanga og í Reyðarfirði og Elkem Ísland á Grundartanga. Auk þess af Landsvirkjun, kísilverinu á Bakka við Húsavík, HS Orku, Vegagerðinni, Hafnarfjarðarbæ og Náttúrufræðistofnun Íslands.

Margir hafa unnið við verkefnið. Árin 1990 og 1995 var það unnið á Rannsóknastofnun landbúnaðarins en eftir það á Náttúrufræðistofnun Íslands. Ýmsir starfsmenn þessara stofnana hafa einnig komið að verkefninu. Starfsmenn iðjuveranna í Straumsvík, á Grundartanga og í Reyðarfirði hafa veitt ýmsar gagnlegar upplýsingar. Starfsmenn annarra stofnana hafa látið upplýsingar í té sem nýst hafa við verkefnið og ýmsir landeigendur eða umsjónarmenn lands. Vegna þessarar skýrslu má einkum nefna Gerði Stefánsdóttur, Guðrúnu Nínu Petersen, Olgeir Sigmarsson og Stefán Arnórsson.

Hreinsun sýna frá árunum 2000, 2005 og 2010 var unnin af starfsfólki á Fræðasetrinu í Sandgerði en sýni frá árinu 2015 af starfsfólki Náttúrufræðistofnunar Íslands. Efnagreiningar hafa öll árin verið unnar á Vistfræðideild háskólans í Lundi í Svíþjóð.

Að gerð þessarar skýrslu hafa auk höfundar unnið Hans H. Hansen sem teiknaði kort og Anette Meyer sem teiknaði flestar myndanna. Hólmgeir Björnsson og Heiða María Sigurðardóttir veittu ráð við tölfræðilega úrvinnslu. Borgþór Magnússon las yfir handrit.

Öllum sem styrkt hafa verkefnið fjárhagslega eða lagt því lið með öðrum hætti eru færðar bestu þakkir.

9 HEIMILDIR

- Arnór Þ. Sigfússon 2008. *Grænt bókhald 2007*. Reyðarfjörður: Alcoa Fjarðaál sf.
- Arnorsson, S. og A. Andrésdóttir 1995. Processes controlling the distribution of boron and chlorine in natural waters in Iceland. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59 (20): 4125–46. doi:10.1016/0016-7037(95)00278-8
- Árni Bragason og Eva Yngvadóttir 2009. *Rannsóknir á mosa við jarðvarmavirkjun Orkuveitu Reykjavíkur á Hellisheiði*. Unnið fyrir Orkuveitu Reykjavíkur. Reykjavík: Efla verkfræðistofa.
- Berg, T. og E. Steinnes 1997. Use of mosses (*Hylocomium splendens* and *Pleurozium schreberi*) as biomonitors of heavy metal deposition: From relative to absolute deposition values. *Environmental Pollution* 98(1): 61–71.
- Berg, T., O. Røyset og E. Steinnes 1995. Moss (*Hylocomium splendens*) used as biomonitor of atmospheric trace element deposition: estimation of uptake efficiencies. *Atmospheric Environment* 29(3): 353–360. doi:10.1016/1352-2310(94)00259-N.
- Bhalerao, S.A., A.S Sharma og A.C Poojari 2015. Toxicity of nickel in plants. *International Journal of Pure & Applied Bioscience* 3(2): 345–355.
- Borgþór Magnússon, Björn H. Barkarson, Bjarni E. Guðleifsson, Bjarni P. Maronsson, Starri Heiðmarsson, Guðmundur A. Guðmundsson, Sigurður H. Magnússon og Sigþrúður Jónsdóttir 2006. Vöktun á ástandi og líffræðilegri fjölbreytni úthaga 2005. *Fræðabing landbúnaðarins 2006*: 221–232. [http://www.landbunadur.is/landbunadur/wgsamvef.nsf/0/edfa5984712715df0025710100497171/\\$FILE/44.pdf](http://www.landbunadur.is/landbunadur/wgsamvef.nsf/0/edfa5984712715df0025710100497171/$FILE/44.pdf) [skoðað 18.12.2018]
- Borys, R.D. og K.A. Rahn 1981. Long-range atmospheric transport of cloud-active aerosol to Iceland. *Atmospheric Environment* 15(8): 1491–1501. doi:10.1016/0004-6981(81)90357-7
- Bussotti, F., E. Cenni, A. Cozzi og M. Ferretti 1997. The impact of geothermal power plants on forest vegetation. A case study at Travale (Tuscany, Central Italy). *Environmental Monitoring and Assessment* 45(2): 181–194. doi: 10.1023/A:1005790728441
- Carballeira, C.B., J.R. Aboal, J.A. Fernandez og A. Carballeira 2008. Comparison of the accumulation of elements in two terrestrial moss species. *Atmospheric Environment* 42(20): 4904–4917. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.02.028>
- Cempel, M. og G. Nickel 2006. Nickel: a review of its sources and environmental toxicology. *Polish Journal of Environmental Studies* 15(3): 375–382.
- Danielsson, H. og G.P. Karlsson 2016. *Metaller i mossa 2015*. Stokkhólmi, Svíþjóð: IVL, Svenska Miljöinstitutet AB. www.ivl.se/download/18.76c6e08e1573302315f20e/1474381195136/C204.pdf [skoðað 26.11.2018]
- Edmonds, M., T.A. Mather og E.J. Liu 2018. A distinct metal fingerprint in arc volcanic emissions. *Nature Geoscience* 11: 490–794. doi: 10.1038/s41561-018-0214-5
- Einar Gunnlaugsson 2015. *Hellisheiði. Vinnsluskýrsla 2014. Afl, vatnsborð, vinnsla efnafræði. Yfirlit yfir rannsóknir*. 2015-OR-023. Reykjavík: Orkuveita Reykjavíkur.
- Elín Guðmundsdóttir, Erlín Emma Jóhannsdóttir, Guðrún Óskarsdóttir, Helga Dögg Flosadóttir, Hermann Þórðarson og Kristín Ágústsdóttir 2016. *Umhverfissvöktun 2015*. Unnið fyrir Alcoa Fjarðaál. Neskaupsstaður: Náttúrustofa Austurlands. www.alcoa.com/iceland/ic/pdfs/2015_umhverfissvoktun.pdf [skoðað 20.12.2018]

- Elkem Ísland. *Framleiðsluferlið*. www.elkem.is/framleioslan2/framleiosluferlio [skoðað 17.4.2018]
- Eva Yngvadóttir, Gyða M. Ingólfssdóttir, Friðrik K. Gunnarsson, Alexandra Kjeld og Snævarr Ö. Georgsson 2016. *Umhverfissvöktun iðnaðarsvæðisins á Grundartanga: niðurstöður ársins 2015*. Reykjavík: Efla. <https://www.ust.is/library/Skrar/Atvinnulif/Starfsleyfi/Eftirlitsskýrslur/alver/I%3%B0na%3%B0arv%3%A6%3%B0i-Grundartanga-Umhverfissv%3%B6ktun%202015.pdf> [skoðað 20.12.2018]
- Fernandez, J.A., A. Ederra, E. Núñez, J. Martínez-Abaigar, M. Infante, P. Heras, M.J. Elías, V. Mazimpaka og A. Carballeira 2002. Biomonitoring of metal deposition in northern Spain by moss analysis. *Sci Total Environ.* 300: 115–127. doi:10.1016/S0048-9697(02)00230-9
- Flaathen, T.K. og S.R. Gislason 2007. The effect of volcanic eruptions on the chemistry of surface waters: the 1991 and 2000 eruptions of Mt. Hekla, Iceland. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 164: 293–316.
- Foan, L., S. Leblond, L. Thoni, C. Raynaud, J.M. Santamaria, M. Sebiló og V. Simon 2014. Spatial distribution of PAH concentrations and stable isotope signatures ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$) in mosses from three European areas – Characterization by multivariate analysis. *Environmental Pollution* 184: 113–122. doi:10.1016/j.envpol.2013.08.006
- Folkesson, L. 1979. Interspecies calibration of heavy-metal concentrations in 9 mosses and lichens: applicability to deposition measurements. *Water, Air, and Soil Pollution* 11(2): 253–260.
- Gauthier, P.-J., O. Sigmarsson, M. Gouhier, B. Haddadi og S. Moune 2016. Elevated gas flux and trace metal degassing from the 2014–2015 fissure eruption at the Bárðarbunga volcanic system, Iceland. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 121: 1610–1630. doi:10.1002/2015JB012111
- Gemici, Ü. og G. Tarcan 2004. Hydrogeological and hydrogeochemical features of the Heybeli Spa, Afyon, Turkey: Arsenic and the other contaminants in the thermal waters. *Bulletin of environmental contamination and toxicology* 72(6): 1107–1114. doi: 10.1007/s00128-004-0358-4.
- Giroud, N. 2008. *A chemical study of arsenic, boron and gases in high-temperature geothermal fluids in Iceland*. Doktorsritgerð við Háskóla Íslands, Reykjavík.
- Gíslason, S.R., G. Stefánsdóttir, M.A. Pfeffer, S. Barsotti, Th. Jóhannsson, I. Galeczka, E. Bali, O. Sigmarsson, A. Stefánsson, N.S. Keller, Á. Sigurdsson, B. Bergsson, B. Galle, V.C. Jacobo, S. Arellano, A. Aiuppa, E.B. Jónasdóttir, E.S. Eiríksdóttir, S. Jakobsson, G.H. Guðfinnsson, S.A. Halldórsson, H. Gunnarsson, B. Haddadi, I. Jónsdóttir, Th. Thordarson, M. Riishuus, Th. Högnadóttir, T. Dürig, G.B.M. Pedersen, Á. Höskuldsson, M.T. Gudmundsson 2015. Environmental pressure from the 2014–15 eruption of Bárðarbunga volcano, Iceland. *Geochemical Perspectives Letters* 1(1): 84–93. doi:10.7185/geochemlet.1509
- Gjengedal, E. og E. Steinnes 1990. Uptake of metal ions in moss from artificial precipitation. *Environmental Monitoring And Assessment* 14(1): 77–87. doi:10.1007/BF00394359
- Gonçalves, E.P.R., H.M.V.M. Soares, R.A.R. Boaventura, A.A.S.C. Machado og J.C.G.E. da Silva 1994. Seasonal variations of heavy metals in sediments and aquatic mosses from the Cávado river basin (Portugal). *Science of the Total Environment* 142(3): 143–156. doi:10.1016/0048-9697(94)90322-0
- Grænt bókhald 2009: *Alcoa Fjarðaál* 2010. Reyðarfjörður: Alcoa Fjarðaál sf.

- Grænt bókhald 2014: Alcoa Fjarðaál* 2015. Reyðafjörður: Alcoa Fjarðaál sf. https://ust.is/library/Skrar/Graent-bokhald/2014/Alcoa_Grb_2014.pdf [skoðað 20.12.2018]
- Grænt bókhald 2015: Alcoa Fjarðaál* 2016. Reyðafjörður: Alcoa Fjarðaál sf. https://www.ust.is/library/Skrar/Graent-bokhald/2015/Fjardaal_2015.pdf [skoðað 20.12.2018]
- Grænt bókhald 2014: Norðurál* 2015. Akranes: Norðurál. www.nordural.is/wp-content/uploads/2018/02/GB_2014.pdf [skoðað 19.12.2018]
- Grænt bókhald 2010: Norðurál Grundartangi ehf.* 2011 Akranes: Norðurál Grundartangi ehf. www.ust.is/library/Skrar/Graent-bokhald/2010/Nor%C3%B0ural_Graent_bokhald_2010.pdf [skoðað 20.12.2018]
- Grænt bókhald 2014: Rio Tinto Alcan á Íslandi* 2015. Hafnarfjörður: Rio Tinto Alcan. https://www.ust.is/library/Skrar/Graent-bokhald/2014/ISAL_Grb_2014.pdf [skoðað 19.12.2018]
- Gudmundsson, M.T., T. Thordarson, Á. Höskuldsson, G. Larsen, H. Björnsson, F.J. Prata, B. Oddsson, E. Magnússon, T. Högnadóttir, G.N. Petersen, C.L. Hayward, J.A. Stevenson og I. Jónsdóttir 2012. Ash generation and distribution from the April-May 2010 eruption of Eyjafjallajökull, Iceland. *Scientific Reports* 2: 572. 1-12. doi: 10.1038/srep00572
- Guðrún Þóra Magnúsdóttir ritstj. 2017. *Grænt bókhald ISAL 2016*. Hafnarfjörður: Rio Tinto á Íslandi hf. www.ust.is/library/Skrar/Graent-bokhald/2016/RT_Graent_bokhald_2016.pdf [skoðað 13.4.2018]
- Gupta, U.C, Y.W Jame, C.A Campell, A.J Leyshon og W. Nicholaishuk 1985. Boron toxicity and deficiency: a Review. *Canadian Journal of Soil Science* 65(3): 381–409. doi:10.4141/cjss85-044.
- Harmens, H. 2010. *Monitoring of atmospheric deposition of heavy metals, nitrogen and pops in Europe using bryophytes: monitoring manual: 2010 survey*. Gwyneddd, UK: Centre for Ecology and Hydrology. http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/9952/1/UNECEHEAVYMETALSMOSSMANUAL2010POPsadaptedfinal_220510_.pdf [skoðað 20.12.2018]
- Harmens, H., D.A. Norris, G.R. Koerber, A. Buse, E. Steinnes og A. Rühling 2007. Temporal trends in the concentration of arsenic, chromium, copper, iron, nickel, vanadium and zinc in mosses across Europe between 1990 and 2000. *Atmospheric Environment* 41: 6673–6687.
- Harmens, H., D. Norris and the participants of the moss survey 2008a. *Spatial and temporal trends in heavy metal accumulation in mosses in Europe (1990–2005)*. Bangor: ICP Vegetation Programme Coordination Centre, Centre for Ecology and Hydrology. nora.nerc.ac.uk/id/eprint/8672 [skoðað 20.12.2018]
- Harmens, H., D.A. Norris, G.R. Koerber, A. Buse, E. Steinnes og A. Rühling 2008b. Temporal trends (1990–2000) in the concentration of cadmium, lead and mercury in mosses across Europe. *Environmental Pollution* 151(2): 368–376. doi:10.1016/j.envpol.2007.06.043
- Harmens, H., D.A. Norris, E. Steinnes, E. Kubin, J. Piispanen, R. Alber, Y. Aleksiyaynak, O. Blum, M. Coskun, M. Dam, L. de Temmerman, J.A. Fernandez, M. Frolova, M. Frontasyeva, L. González-Miqueo, K. Grodzinska, Z. Jeran, S. Korzekwa, M. Krmar, K. Kvietskusr, S. Leblond, S. Liiv, S.H. Magnusson, B. Mankovska, R. Pesch, A. Ruehling, J.M. Santamaria, W. Schröder, Z. Spiric, I. Suchara, L. Thoni, V. Urumov, L. Yurukova og H.G. Zechmeister 2010. Mosses as biomonitors of atmospheric heavy metal deposition: spatial patterns and temporal trends in Europe. *Environmental Pollution* 158: 3144–3156.

- Harmens, H., D.A. Norris, D.M. Cooper, G. Mills, E. Steinnes, E. Kubin, L. Thöni, J.R. Aboal, R. Alber, A. Carballeira, M. Coskun, L. De Temmerman, M. Frolova, L. González-Miqueo, Z. Jeran, S. Leblond, S. Liiv, B. Maňkovská, R. Pesch, J. Poikolainen, Å. Rühling, J.M. Santamaria, P. Simonè, W. Schröder, I. Suchara, L. Yurukova og H.G. Zechmeister 2011. Nitrogen concentrations in mosses indicate the spatial distribution of atmospheric nitrogen deposition in Europe. *Environmental Pollution* 159(10): 2852–2860. doi:10.1016/j.envpol.2011.04.041
- Harmens, H., I. Ilyin, G. Mills, J.R. Aboal, T. Alber, O. Blum, M. Coşkun, L. De Temmerman, J.Á. Fernández, R. Figueira, M. Frontasyeva, B. Godzik, N. Goltsova, Z. Jeran, S. Korzekwa, E. Kubin, K. Kvietskus, S. Leblond, S. Liiv, S.H. Magnússon, B. Maňkovská, O. Nikodemus, R. Pesch, J. Poikolainen, D. Radnović, Å. Rühling, J.M. Santamaria, W. Schröder, Z. Spiric, T. Stafilov, E. Steinnes, I. Suchara, G. Tabors, L. Thöni, G. Turcsányi, L. Yurukova og H.G. Zechmeister 2012. Country-specific correlations across Europe between modelled atmospheric cadmium and lead deposition and concentrations in mosses. *Environmental Pollution* 166: 1–9. doi:10.1016/j.envpol.2012.02.013
- Harmens, H., L. Foan, V. Simon og G. Mill 2013a. Terrestrial mosses as biomonitors of atmospheric POPs pollution: a review. *Environmental Pollution* 173: 245–254. doi:10.1016/j.envpol.2012.10.005
- Harmens, H., D. Norris, G. Mills and the participants of the moss survey 2013b. *Heavy metals and nitrogen in mosses: spatial patterns in 2010/2011 and long-term temporal trends in Europe*. Bangor: ICP Vegetation Programme Coordination Centre, Centre for Ecology and Hydrology.
- Harmens, H., E. Schnyder, L. Thöni, D.M. Cooper, G. Mills, S. Leblond, K. Mohr, J. Poikolainen, J. Santamaria, M. Skudnik, H.G. Zechmeister, A.J. Lindroos og A. Hanus-Ilmarinen 2014. Relationship between site-specific nitrogen concentrations in mosses and measured wet bulk atmospheric nitrogen deposition across Europe. *Environmental Pollution* 194: 50–59. doi:10.1016/j.envpol.2014.07.016
- Harmens, H., D.A. Norris, K. Sharps, G. Mills, R. Alber, Y. Aleksiyenak O. Blum, S.-M. Cucu-Man, M. Dam, L. De Temmerman, A. Ene, J.A. Fernández, J. Martinez-Abaigar, M. Frontasyeva, B. Godzik, Z. Jeran, P. Lazo, S. Leblond, S. Liiv, S.H. Magnússon, B. Maňkovská, G. Pihl Karlsson, J. Piispanen, J. Poikolainen, J.M. Santamaria, M. Skudnik, Z. Spiric, T. Stafilov, E. Steinnes, C. Stihl, I. Suchara, L. Thöni, R. Todoran, L. Yurukova og H.G. Zechmeister 2015. Heavy metal and nitrogen concentrations in mosses are declining across Europe whilst some “hotspots” remain in 2010. *Environmental Pollution* 200: 93–104. doi:10.1016/j.envpol.2015.01.036
- Holy, M., R. Pesch, W. Schroeder, H. Harmens, I. Ilyin, R. Alber, Y. Aleksiyenak, O. Blum, M. Coşkun, M. Dam, L. De Temmerman, N. Fedorets, R. Figueira, M. Frolova, M. Frontasyeva, N. Goltsova, L. Gonzalez Miqueo, K. Grodzińska, Z. Jeran, S. Korzekwa, M. Krmar, E. Kubin, K. Kvietskus, M. Larsen, S. Leblond, S. Liiv, S. Magnússon, B. Maňkovská, R. Mocanu, J. Piispanen, Å. Rühling, J. Santamaria, E. Steinnes, I. Suchara, L. Thöni, G. Turcsányi, V. Urumov, B. Wolterbeek, L. Yurukova og H.G. Zechmeister 2009. First thorough identification of factors associated with Cd, Hg and Pb concentrations in mosses sampled in the European Surveys 1990, 1995, 2000 and 2005. *Journal of Atmospheric Chemistry* 63(2): 109–124. doi:10.1007/s10874-010-9160-3
- Hong, B.D, R.N Joo, K.S Lee, D.S Lee, J.H Rhie, S.W Min, S.G Song og D.Y Chung 2016. Fluoride in Soil and Plant. *Korean Journal of Agricultural Science* 43(4): 522–536. doi:10.7744/kjoas.20160054

- Howe, P.D. 1998. A review of boron effects in the environment. *Biological trace element research* 66(1–3): 153–166. doi:10.1007/BF02783135
- Hólmfríður Sigurðardóttir og Þorsteinn Ari Þorgeirsson ritstj. 2016. *Umhverfisskýrsla OR 2016*. Reykjavík: Orkuveita Reykjavíkur. https://www.or.is/sites/or.is/files/umhverfisskyrsla_or_2016.pdf [skoðað 20.12.2018]
- Hrefna Kristmannsdóttir og Halldór Ármannsson 2003. Environmental aspects of geothermal energy utilization. *Geothermics* 32: 451–461. doi: 10.1016/S0375-6505(03)00052-X
- HS Orka. *Orkuverið í Svartsengi*. www.hsorka.is/orkuverin/orkuverid-i-svartsengi [skoðað 5.6.2018]
- Ívar Baldvinsson o.fl. 2011. *Gaslosun jarðvarmavirkjana á Íslandi 1970–2009*. Orkustofnun, OS-2001/02. Reykjavík: Orkustofnun. <https://orkustofnun.is/gogn/Skyrslur/OS-2011/OS-2011-02.pdf> [skoðað 19.12.2018]
- Járngerður Grétarsdóttir, Ágústa Helgadóttir og Rannveig Thoroddsen 2019. *Vöktun mosaþembugróðurs við Hellisheiðarvirkjun og Nesjavallavirkjun. Niðurstöður gróður- og efnamælinga 2017*. Garðabær: Náttúrufræðistofnun Íslands. Í útgáfu.
- Jón Hálfðanarson 2003. *Hvað er járnblandi og hvernig er það framleitt? Vísindavefurinn*. www.visindavefur.is/svar.php?id=3924 [skoðað 20.2.2013]
- Krachler, M., J. Zheng, R. Koerner, C. Zdanowicz, D. Fisher og W. Shotyk 2005. Increasing atmospheric antimony contamination in the northern hemisphere: snow and ice evidence from Devon Island, Arctic Canada. *Journal of Environmental Monitoring* 7(12): 1169–8. <http://doi.org/10.1039/b509373b>
- Kristbjörn Egilsson Guðmundur Guðjónsson, Ásrún Elmarsdóttir, Svenja N.V. Auhage og Rannveig Thoroddsen 2008. *Virkjunarsvæði á Reykjanesi*. Náttúrufræðistofnun Íslands, NI-08012. Unnið fyrir Hitaveitu Suðurnesja. Reykjavík: Náttúrufræðistofnun Íslands.
- Kristmannsdóttir, H. og H. Ármannsson 2003. Environmental aspects of geothermal energy utilization. *Geothermics* 32: 451–461. doi:10.1016/S0375-6505(03)00052-X
- Kristmannsdóttir, H., M. Sigurgeirsson, H. Ármannsson, H. Hjartarson og M. Ólafsson 2000. Sulfur gas emissions from geothermal power plants in Iceland. *Geothermics* 29(4–5): 525–538. doi:10.1016/S0375-6505(00)00020-1
- Landsvirkjun 2016. *Jarðvarmastöð á Þeistareikjum: uppbygging orkunýtingar á Norðausturlandi*. Reykjavík: Landsvirkjun. <https://www.landsvirkjun.is/Media/lvtheistareykjabrefa4121.pdf> [skoðað 20.12.2018]
- LeBlanc, F. og D.N Rao 1973. Effects of Sulphur Dioxide on Lichen and Moss Transplants. *Ecology* 54(3): 612–17. doi:10.2307/1935347
- Lin, Y., R. Vogt og T. Larssen 2012. Environmental Mercury in China: a Review. *Environmental Toxicology and Chemistry* 31 (11): 2431–44. doi: 10.1002/etc.1980
- Loppi, S. 2000. Lichen biomonitoring as a tool for assessing air quality in geothermal areas. Í *Proceedings of the World geothermal congress 2000*. Kyushu – Tohoku, Japan.
- Loppi, S., L. Paoli og C. Gaggi 2006. Diversity of epiphytic lichens and Hg contents of *Xanthoria parietina* Thalli as monitors of geothermal air pollution in the Mt. Amiata area (Central Italy). *Journal of Atmospheric Chemistry* 53(2): 93–105. <http://doi.org/10.1007/s10874-006-6648-y>
- Matschullat, J., R. Ottenstein og C. Reimann 2000. Geochemical background: can we calculate it? *Environmental Geology* 39: 990–1000. doi:10.1007/s002549900084

- Mengel, K. og E.A. Kirkby 1982. *Principles of Plant Nutrition*. 3. útg. Bern, Sviss: International Potash Institute.
- Mutia, T.M. 2016. *The impacts of geothermal power plant emissions on terrestrial ecosystems in contrasting bioclimatic zones*. Doktorsritgerð við Háskóla Íslands, Reykjavík.
- Nash, T.H. og E.H. Nash 1974. Sensitivity of Mosses to Sulfur Dioxide. *Oecologia* 17(3): 257–63. doi:10.1007/BF00344925
- Náttúrufræðistofnun Íslands a. *Tildurmosi* (*Hylocomium splendens*). <https://www.ni.is/biota/plantae/bryophyta/tildurmosi-hylocomium-splendens> [skoðað 19.12.2018]
- Náttúrufræðistofnun Íslands b. *Mosaskemmdir við iðnaðarsvæðið í Hellnahrauni í Hafnarfirði*. <https://www.ni.is/frettir/2014/11/mosaskemmdir-vid-idnadarsvaedid-i-hellnahrauni-i-hafnarfirdi> [skoðað 19.12.2018]
- Norðurál. *Svona gerum við*. nordural.is/svona-gerum-vid [skoðað 19.12.2018]
- Ólafur Arnalds 2010. Dust sources and deposition of aeolian materials in Iceland. *Icelandic Agricultural Sciences* 23: 3–21.
- Paoli, L. og S. Loppi 2008. A biological method to monitor early effects of the air pollution caused by the industrial exploitation of geothermal energy. *Environmental Pollution* 155(2): 383–388. doi:10.1016/j.envpol.2007.11.004
- Pfeffer, M., B. Bergsson, S. Barsotti, G. Stefánsdóttir, B. Galle, S. Arellano, V. Conde, A. Donovan, E. Ilyinskaya, M. Burton, A. Aiuppa, R.C.W. Whitty, I.C. Simmons, Þ. Arason, E.B. Jónasdóttir, N.S. Keller, R.F. Yeo, H. Arngrímsson, Þ. Jóhannsson, M.K. Butwin, R.A. Askew, S. Dumont, S. von Löwis, Þ. Ingvarsson, A. La Spina, H. Thomas, F. Prata, F. Grassa, G. Giudice, A. Stefánsson, F. Marzano, M. Montopoli og L. Mereu 2018. Ground-Based Measurements of the 2014–2015 Holuhraun Volcanic Cloud (Iceland). *Geosciences*, 8(1), 29–25. doi: 10.3390/geosciences8010029
- Poikolainen, J., E. Kubin, J. Piispanen og J. Karhu 2004. Atmospheric heavy metal deposition in Finland during 1985–2000 using mosses as bioindicators. *Science of the Total Environment* 318: 171–185.
- Reimann, C., H. Niskavaara, G. Kashulina, P. Filzmoser, R. Boyd, T. Volden, O. Tomilina og I. Bogatyrev 2001. Critical remarks on the use of terrestrial moss (*Hylocomium splendens* and *Pleurozium schreberi*) for monitoring of airborne pollution. *Environmental Pollution* 113: 41–57.
- Rio Tinto Alcan. *Upphafið*. <http://www.riotinto.is/?PageID=27> [skoðað 13.4.2018]
- Rühling, Å. og E. Steinnes 1998. *Atmospheric heavy metal deposition in Europe 1995–1996*. NORD 1998:15. Kaupmannahöfn: Norðurlandaráð.
- Rühling, A. og G. Tyler 1971. Regional differences in the deposition of heavy metals over Scandinavia. *The Journal of Applied Ecology* 8(2): 497–507. doi:10.2307/2402886
- Rühling, A. og G. Tyler 1973. Heavy metal deposition in Scandinavia. *Water, Air, and Soil Pollution* 2(4): 445–455. doi:10.1007/BF00585089
- Rühling, Å., B. Brumelis, N. Goltsova, K. Kvietskus, E. Kubin, S. Liiv, S. Magnusson, A. Mäkinen, K. Pilegaard, L. Rasmussen, E. Sander og E. Steinnes 1992. *Atmospheric heavy metal deposition in Northern Europe 1990*. NORD 1992: 12. Kaupmannahöfn: Norðurlandaráð.

- Salemaa, M., R. Makipaa og J. Oksanen 2008. Differences in the growth response of three bryophyte species to nitrogen. *Environmental Pollution* 152(1): 82–91. doi:10.1016/j.envpol.2007.05.019
- SAS Institute Inc. 2010. *Using JMP 9*. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Schröder, W., M. Holy, R. Pesch, H. Harmens, I. Ilyin, E. Steinnes, R. Alber, Y. Aleksiyenak, O. Blum, M. Coşkun, M. Dam, L. De Temmerman, M. Frolova, M. Frontasyeva, L. Gonzalez Miqueo, K. Grodzińska, Z. Jeran, S. Korzekwa, M. Krmar, E. Kubin, K. Kvietkus, S. Leblond, S. Liiv, S. Magnússon, B. Maňkiovská, J. Piispanen, Å. Rühling, J. Santamaria, Z. Spiric, I. Suchara L. Thöni, V. Urumov, L. Yurukova og H.G. Zechmeister 2010. Are cadmium, lead and mercury concentrations in mosses across Europe primarily determined by atmospheric deposition of these metals? *Journal of Soils and Sediments* 10(8): 1572–1584. doi:10.1007/s11368-010-0254-y
- Schröder, W., S. Nickel, S. Schönrock, M. Meyer, W. Wosniok, H. Harmens, M.V. Frontasyeva, R. Alber, J. Aleksiyenak, L. Barandovski, A. Carballeira, H. Danielsson, L. de Temmermann, B. Godzik, Z. Jeran, G.P. Karlsson, P. Lazo, S. Leblond, A-J Lindroos, S. Liiv, S.H. Magnússon, B. Mankovska, J. Martínez-Abaigar, J. Piispanen, J. Poikolainen, I.V. Popescu, F. Qarri, J.M. Santamaria, M. Skudnik, Z. Špirić, T. Stafilov, E. Steinnes, C. Stihl, L. Thöni, H.T. Uggerud og H.G. Zechmeister 2016. Spatially valid data of atmospheric deposition of heavy metals and nitrogen derived by moss surveys for pollution risk assessments of ecosystems. *Environmental Science and Pollution Research* 23(11): 1–22. doi:10.1007/s11356-016-6577-5
- Schröder, W., S. Nickel, S. Schönrock, R. Schmalfuß, W. Wosniok, M. Meyer, H. Harmens, M.V. Frontasyeva, R. Alber, J. Aleksiyenak, L. Barandovski, O. Blum, A. Carballeira, M. Dam, H. Danielsson, L. De Temmermann, A.M. Dunaev, B. Godzik, K. Hoydal, Z. Jeran, G.P. Karlsson, P. Lazo, S. Leblond, J. Lindroos, S. Liiv, S.H. Magnússon, B. Mankovska, E. Núñez-Oliviera, J. Piispanen, J. Poikolainen, I.V. Popescu, F. Qarri, J.M. Santamaria, M. Skudnik, Z. Špirić, T. Stafilov, E. Steinnes, C. Stihl, I. Suchara, L. Thöni, H.T. Uggerud, H.G. Zechmeister 2017. Bioindication and modelling of atmospheric deposition in forests enable exposure and effect monitoring at high spatial density across scales. *Annals of Forest Science* 74(2): 31. doi:10.1007/s13595-017-0621-6
- Sigfusson, B., S.R. Gíslason og A.A. Meharg 2011. A field and reactive transport model study of arsenic in a basaltic rock aquifer. *Applied Geochemistry* 26: 553–564. doi: 10.1016/j.apgeochem.2011.01.013
- Sigurður H. Magnússon 2002a. *Pungmálmar í mosa í nágrenni álversins í Straumsvík árið 2000*. Náttúrufræðistofnun Íslands, NÍ-02010. Reykjavík: Náttúrufræðistofnun Íslands.
- Sigurður H. Magnússon 2002b. *Pungmálmar í mosa í nágrenni fyrirhugaðs álvers í Reyðarfirði árið 2000*. Náttúrufræðistofnun Íslands, NÍ-02011. Reykjavík: Náttúrufræðistofnun Íslands.
- Sigurður H. Magnússon 2013. *Pungmálmar og brennisteinn í mosa á Íslandi 1990–2010: áhrif iðjuvera*. Náttúrufræðistofnun Íslands, NÍ-13003. Garðabær: Náttúrufræðistofnun Íslands.
- Sigurður H. Magnússon 2014. *Pungmálmar og brennisteinn í tildurmosa við iðnaðarsvæðið í Hellnahnrauni í Hafnarfirði haustið 2013*. Náttúrufræðistofnun Íslands, NÍ-14001. Garðabær: Náttúrufræðistofnun Íslands.
- Sigurður H. Magnússon 2016. *Áhrif Lagarfossvirkjunar og Kárahnjúkavirkjunar á gróður og landbrot við Lagarfjót 1976–2014*. Náttúrufræðistofnun Íslands, NÍ-16001. Unnið fyrir Orkusöluna ohf. Garðabær: Náttúrufræðistofnun Íslands.

- Sigurður H. Magnússon og Björn Thomas 2007a. *Heavy metals and sulphur in mosses around the aluminium smelter in Straumsvík in 2005*. Náttúrufræðistofnun Íslands, NÍ-07003. Reykjavík: Náttúrufræðistofnun Íslands.
- Sigurður H. Magnússon og Björn Thomas 2007b. *Heavy metals and sulphur in mosses at Grundartangi in 2005*. Náttúrufræðistofnun Íslands, NÍ-07004. Reykjavík: Náttúrufræðistofnun Íslands.
- Sigurður H. Magnússon og Björn Thomas 2007c. *Heavy metals and sulphur in mosses around the aluminium smelter site in in Reyðarfjörður in 2005*. Náttúrufræðistofnun Íslands, NÍ-07005. Reykjavík: Náttúrufræðistofnun Íslands.
- Sigurður Reynir Gíslason, Gerður Stefánsdóttir, Melissa A. Pfeffer, Sara Barsotti, Þorsteinn Jóhannsson, Iwona M. Galeczka, Eniko Bali, Olgeir Sigmarsson, Andri Stefánsson, Nicole S. Keller, Árni Sigurdsson, Baldur H. Bergsson, Bo Galle, Valdimir C. Jacobo, Santiago Arellano, Alessandro Aiuppa, Elín B. Jónasdóttir, Eydís S. Eiríksdóttir, Sigurður Jakobsson, Guðmundur H. Guðfinnsson, Sæmundur A. Halldórsson, Haraldur Gunnarsson, Babtiste Haddadi, Ingibjörg Jónsdóttir, Þorvaldur Þórðarson, Morten Riishuus, Þórdís Högnadóttir, Tobias Dürig, Gro B. M. Pedersen, Ármann Höskuldsson og Magnús T. Guðmundsson 2017. Gosið í Holuhrauni 2014–2015. Magn gosefna, dreifing mengunar og mikilvægi tímasetningar og staðsetningar eldgosa með tilliti til umhverfisáhrifa. Í Bjarni Diðrik Sigurðsson og Gerður Stefánsdóttir ritstj. *Áhrif Holuhraungossins á umhverfi og heilsu*. Rit Lbhi nr. 83. Reykjavík: Landbúnaðarháskóli Íslands og Veðurstofa Íslands. www.lbhi.is/sites/lbhi.is/files/gogn/vidhengi/thjonusta/utgefid_efni/RitLbhi/ahrif_holuhraungossins_a_umhverfi_og_heilsu_rit_lbhi_83_ed3.pdf [skoðað 20.12.2018]
- Sjálfbæriskýrsla ISAL 2011*. Hafnarfjörður: Rio Tinto Alcan. <https://www.ust.is/library/Skrar/Graent-bokhald/2011/Rio%20Tinto%20Alcan.pdf> [skoðað 13.4.2018]
- Skipulagsstofnun 2008. *Stækkun Reykjanesvirkjunar: Álit Skipulagsstofnunar um mat á umhverfisáhrifum*. <http://www.skipulag.is/media/attachments/Umhverfismat/641/2008120052.pdf> [skoðað 19.12.2018]
- Smichowski, P., 2008. Antimony in the environment as a global pollutant: a review on analytical methodologies for its determination in atmospheric aerosols. *Talanta* 75: 2–14. doi: 10.1016/j.talanta.2007.11.005
- Solga, A., J. Burkhardt, H.G. Zechmeister og J.P. Frahm 2005. Nitrogen content, ¹⁵N natural abundance and biomass of the two pleurocarpous mosses *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. and *Scleropodium purum* (Hedw.) Limpr. in relation to atmospheric nitrogen deposition. *Environmental Pollution* 134(3): 465–473. doi:10.1016/j.envpol.2004.09.008
- Stefán Arnórsson 2017. *Jarðhiti og jarðhitaauðlindir*. Reykjavík: Hið íslenska bókmenntafélag, Reykjavík.
- Stefansson, A., G. Stefánsdóttir, N.S. Keller, S. Barsotti, Á. Sigurdsson, S.B. Thorlákssdóttir, M.A. Pfeffer, E.S. Eiríksdóttir, E.B. Jónasdóttir, S. von Löwis og S.R. Gíslason 2017. Major impact of volcanic gases on the chemical composition of precipitation in Iceland during the 2014–2015 Holuhraun eruption. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 122(3): 1971–1982. <http://doi.org/10.1002/2015JD024093>
- Steinnes, E. 1995. A Critical Evaluation of the Use of Naturally Growing Moss to Monitor the Deposition of Atmospheric Metals. *The Science of the Total Environment* 160–161 (C): 243–249.

- Steinnes, E., T. Berg og H.T. Uggerud 2011. Three decades of atmospheric metal deposition in Norway as evident from analysis of moss samples. *Science of the Total Environment* 412–413: 351–358. doi:10.1016/j.scitotenv.2011.09.086
- Steinnes, E., H.T. Uggerud, K.A. Pfaffhuber og T. Berg 2016. *Atmospheric deposition of heavy metals in Norway: national moss survey 2015*. Miljødirektoratet rapport, M-594/2016, NILU report, 28/2016. Kjeller, Noregi: Norwegian Institute for Air Research.
- Thompson, C.R. og G. Kats 1978. Effects of continuous hydrogen sulfide fumigation on crop and forest plants. *Environmental Science & Technology* 12(5): 550–553. <http://doi.org/10.1021/es60141a001>
- Thordarson, T., D.J. Miller, G. Larsen, S. Self og H. Sigurdsson 2001. New estimates of sulfur degassing and atmospheric mass-loading by the 934 AD Eldgjá eruption, Iceland. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 108: 33–54.
- Trausti Hauksson 2015. *Krafla og Bjarnarflag. Afköst borhola og efnainnihald vatns og gufu í borholum og vinnslurás árið 2014*. Skýrsla Landsvirkjunar, LV-2015-081. Reykjavík: Landsvirkjun.
- Tretiach, M., P. Adamo, R. Bargagli, L. Baruffo, L. Carletti, P. Crisafulli, S. Giordano, P. Modenesi, S. Orlando og E. Pittao 2007. Lichen and moss bags as monitoring devices in urban areas. Part I: influence of exposure on sample vitality. *Environmental Pollution* 146(2): 380–391. doi:10.1016/j.envpol.2006.03.046
- Tyrovola, K. og N.P. Nikolaidis 2009. Arsenic mobility and stabilization in topsoils. *Water Research* 43: 1589–1596.
- Umhverfisstofnun 2016. *Af eftirliti í Helgúvík*. www.ust.is/einstaklingar/frettir/frett/2016/11/23/Af-eftirliti-i-Helguvik [skoðað 29.10.2018]
- Umhverfisstofnun 2017. *Starfsemi United Silicon stöðvud*. <https://www.ust.is/einstaklingar/frettir/frett/2017/09/04/Starfsemi-United-Silicon-stodvud> [skoðað 19.12.2018]
- Varshney, C K. og J.K. Garg 1979. Plant Responses to Sulfur-Dioxide Pollution. *CRC Critical Reviews in Environmental Control* 9(1): 27–49. doi:10.1080/10643387909381667
- Weinstein, L.H. og A.W. Davison 2004. *Fluorides in the Environment*. Cambridge, MA: CABI Publishing.
- Wikipedia 2013. *Bjarnarflag*. <https://is.wikipedia.org/wiki/Bjarnarflag> [skoðað 19.12.2018]
- Þór Tómasson og Hörður Þormar 1998. Loftmengun frá álverinu í Straumsvík. *Náttúrufræðingurinn* 67(3–4): 233–240.

10 VIÐAUKAR

1. viðauki. Losun CO₂ og H₂S frá Hellisheiðarvirkjun árin 2002–2017. Losun frá Aðalhúsi miðast við kæliturna virkjunarinnar norðan við Reykjafell (64,03460, -21,40168) en losun frá Sleggju við kæliturna í Sleggjubeinsdal um 1,5 km norðaustan við Aðalhús (64,04387, -21,38245). Upplýsingar frá Bergi Sigfússyni, 25. júní 2018.

Ár	CO ₂			H ₂ S		
	Aðalhús	Sleggja	Borholur	Aðalhús	Sleggja	Borholur
2002			957			157
2003			3.602			1.283
2004			1.943			748
2005			4.581			819
2006						
2007	24.210		4.140	6.902		747
2008	32.937		5.363	10.323		1.681
2009	35.325		1.386	8.581		332
2010	42.334		4.142	13.600		1.324
2011	32.824	6.655	3.386	10.961		566
2012	21.760	21.398	2.807	8.416	3.628	783
2013	22.655	22.279	1.185	8.646	3.728	326
2014	19.593	19.268	178	5.928	2.556	32
2015	16.677	16.400	172	4.461	1.923	30
2016	13.160	12.942	3	2.720	1.173	1
2017	11.876	11.679	41	2.003	863	6

2. viðauki. Styrkur efna (mg/kg) í mosa á svæðum umhverfis (<35 km) jarðvarmavirkjanirnar í Bjarnarflagi, við Hellisheiði, í Svartsengi, á Þeistareykjum og á Reykjanesi árin 2010 og 2015. Mismunandi litir tákna reiknaða mengunarflokk; engin mengun, vísbending um mengun, lítillhátar mengun, nokkur mengun, veruleg mengun. Marktækur munur á árum (þöruð gildi borin saman), *** = $P < 0,001$, ** = $P < 0,01$, * = $P < 0,05$; EM = ekki marktækt.

Jarðvarmavirkjanir	Km frá losunarstað	As 2010	As 2015	B 2015	Cd 2010	Cd 2015	Cr 2010	Cr 2015	Cu 2010	Cu 2015	Fe 2010	Fe 2015	Hg 2010	Hg 2015	Ni 2010	Ni 2015	Pb 2010	Pb 2015	S 2010	S 2015	Sb 2015	V 2010	V 2015	Zn 2010	Zn 2015
Bjarnarflagsv., tildurmosi																									
Námaskarð B2	2,50	0,13	0,15	1,58	0,024	0,066	8,04	11,74	12,91	13,43	8,947	9,108	0,034	0,023	4,71	5,45	0,43	0,45	699	1,069	0,006	27,41	34,49	31,76	30,63
Mývatn B1	4,66	0,07	0,09	2,50	0,034	0,085	5,16	4,72	11,71	9,03	6,806	5,528	0,042	0,022	4,57	4,23	0,39	0,33	547	668	0,006	18,32	15,48	44,86	35,49
Skúnstaðir 58	11,90	0,07	0,07	3,70	0,039	0,091	3,99	2,60	8,06	7,14	4,900	3,289	0,069	0,023	3,62	3,02	0,27	0,52	572	687	0,015	21,31	9,11	25,91	27,15
Þeistareykir T1	24,00	0,13	0,09	1,84	0,050	0,124	5,92	6,99	11,60	10,30	9,263	6,893	0,038	0,024	4,66	5,09	0,68	0,44	463	621	0,023	19,64	18,25	33,95	35,83
Sandvík Bárðardal	32,00	0,07	0,07	7,68	0,045	0,059	4,71	48,26	10,37	9,77	5,121	5,179	0,054	0,021	3,48	3,61	0,37	0,25	555	574	0,009	16,28	16,19	18,69	21,13
Hellisheiðarv., tildurmosi																									
Koivíðarhöll 1	1,10	0,36	0,16	4,39	0,049	0,056	8,74	3,85	13,20	6,95	10,094	4,343	0,059	0,031	7,92	3,81	2,54	1,87	779	835	0,041	23,24	11,53	44,94	75,95
Svínhraun H3	1,34	0,30	0,47	2,92	0,120	0,038	10,12	4,18	13,73	7,40	10,422	3,726	0,045	0,098	8,21	9,08	1,82	0,99	651	722	0,020	24,26	9,62	25,00	18,51
Hverahlöf H1	3,58	0,42	0,29	6,41	0,243	0,056	5,91	2,99	8,76	6,25	8,446	2,897	0,045	0,089	6,40	9,20	1,58	1,11	619	668	0,052	20,28	7,19	38,51	25,03
Skarðsmýri H2	4,50	0,31	0,37	7,86	0,092	0,025	7,76	2,17	11,45	5,73	9,451	2,213	0,040	0,057	7,34	6,27	1,76	0,67	601	698	0,059	23,40	5,66	26,10	18,01
Bakki Ölfusi	11,70	0,21	0,16	2,22	0,032	0,057	5,16	4,35	8,81	7,35	6,510	5,434	0,039	0,029	5,61	4,50	0,73	0,82	603	791	0,019	16,42	14,43	19,93	20,09
Rauðhólar v. Reykjavík	17,69	0,17	0,11	2,12	0,033	0,052	5,65	3,67	10,11	5,88	5,480	3,614	0,034	0,034	6,31	4,45	1,05	0,96	542	656	0,041	13,80	9,38	24,99	25,62
Mosfellsheiði	19,00	0,14	0,06	8,52	0,036	0,035	4,10	2,71	7,64	5,07	5,644	3,302	0,057	0,026	4,39	3,26	1,05	0,54	524	640	0,016	12,65	8,68	24,39	17,05
Búrfell Grímsnesi	23,90	0,18	0,10	2,07	0,031	0,053	5,95	4,65	9,59	7,85	6,977	4,925	0,033	0,031	6,89	5,04	0,91	0,69	468	708	0,018	16,09	12,82	29,92	30,42
Rússtaðir í Flóa	30,90	0,27	0,10	2,63	0,060	0,048	5,96	2,73	9,25	5,57	8,663	3,843	0,040	0,035	6,09	3,11	0,85	0,53	567	708	0,019	19,60	10,00	26,31	14,63
Svartsengi, tildurmosi																									
Badsvellir SV2	0,65	0,20	0,07	2,86	0,033	0,027	4,38	2,86	7,79	5,16	4,112	2,883	0,058	0,029	3,91	4,28	1,40	0,84	651	757	0,038	11,25	7,32	16,01	13,57
Svartsengi SV1	1,00	0,13	0,08	4,44	0,038	0,027	2,75	2,82	5,70	5,01	2,875	2,187	0,035	0,031	3,07	3,19	0,77	0,64	572	703	0,019	8,00	5,23	14,80	13,58
Melunnuklif	9,50	0,32	0,20	3,71	0,052	0,062	13,56	11,65	18,26	13,80	12,781	9,303	0,077	0,029	9,57	7,73	1,26	1,20	668	735	0,008	32,64	27,48	28,68	23,18
Vogastapi	9,60	0,24	0,19	3,28	0,065	0,053	5,48	5,36	10,97	9,14	7,737	7,279	0,064	0,007	6,23	5,37	5,94	2,29	561	730	0,041	21,05	22,11	27,43	18,02
Nes við Hvalnes	19,00	0,29	0,21	7,51	0,031	0,043	4,55	3,79	7,07	5,72	4,163	3,376	0,090	0,027	4,12	3,66	1,64	1,11	618	691	0,035	10,99	9,74	17,53	14,54
Hlíðarvatn 13	33,00	0,26	0,14	2,19	0,155	0,067	4,94	2,90	8,88	5,82	6,443	3,535	0,042	0,027	4,92	3,31	1,35	0,91	547	725	0,025	15,53	9,18	28,52	19,39
Þeistareykir tildurmosi																									
Þeistareykir T1	4,22	0,13	0,09	1,84	0,050	0,124	5,92	6,99	11,60	10,30	9,263	6,893	0,038	0,024	4,66	5,09	0,68	0,44	463	621	0,023	19,64	18,25	33,95	35,83
Laxamýri 57	21,30	0,09	0,12	3,57	0,025	0,019	2,63	2,52	6,88	6,54	3,205	3,056	0,056	0,029	2,20	2,35	0,61	0,52	523	681	0,016	8,90	8,19	17,95	16,25
Sýðri-Álftafléir	24,30	0,11	0,12	1,99	0,055	0,094	7,59	5,92	16,10	12,09	10,942	7,615	0,057	0,015	5,90	5,09	0,57	0,53	506	559	0,009	28,90	21,92	36,97	31,10
Mývatn B1	31,25	0,07	0,09	2,50	0,034	0,085	5,16	4,72	11,71	9,03	6,806	5,528	0,042	0,022	4,57	4,23	0,39	0,33	547	668	0,006	18,32	15,48	44,86	35,49
Mánárþakki	34,96	0,19	0,17	5,47	0,066	0,101	5,61	4,74	13,61	9,14	9,010	6,174	0,093	0,038	4,54	4,55	2,06	0,42	533	677	0,008	22,35	18,02	17,98	19,05
R-nesvirkjun, hraungambri																									
RN1	0,97	0,24	0,24	3,53	0,026	0,026	10,14	10,14	11,97	11,97	7,166	7,166	0,050	0,050	4,70	4,70	1,48	1,48	514	514	0,023	20,46	20,46	11,08	11,08
RN3	1,60	0,06	0,06	2,27	0,016	0,016	9,34	9,34	10,97	10,97	6,631	6,631	0,017	0,017	4,74	4,74	1,26	1,26	334	334	0,011	15,52	15,52	9,91	9,91
RN2	1,86	0,20	0,20	3,19	0,016	0,016	0,47	0,47	6,69	6,69	4,304	4,304	0,055	0,055	2,33	2,33	1,10	1,10	493	493	0,009	10,90	10,90	7,17	7,17

3. viðauki. Styrkur efna (mg/kg) í tildurmosa á svæðum umhverfis (<35 km) kísilverin á Bakka við Húsavík og í Helguvík árin 2010 og 2015. Mismunandi litir tákna reiknaða mengunarflokka; engin mengun, vísbending um mengun, lítilsháttar mengun, nokkur mengun, veruleg mengun.

Kísilver	Km frá losunarstað	As 2010	As 2015	B 2015	Cd 2010	Cd 2015	Cr 2010	Cr 2015	Cu 2010	Cu 2015	Fe 2010	Fe 2015	Hg 2010	Hg 2015	Ni 2010	Ni 2015	Pb 2010	Pb 2015	S 2010	S 2015	Sb 2015	V 2010	V 2015	Zn 2010	Zn 2015	
Bakki v. Húsav., tildurmosi																										
BA4	0,65		0,07	3,83	0,058	3,58		6,51	4,103	0,029	3,73	5,55	606	0,022	11,41	13,64		8,90	681	0,016	0,024	17,45	11,41		17,95	16,25
BA5	1,20		0,11	5,38	0,069	6,39		11,41	6,720	0,041	7,09	6,39	634	0,008	7,09	21,83		22,35	677	0,008	0,008	17,45	17,45		17,98	19,05
BA3	1,45		0,08	12,92	0,034	2,42		5,19	2,625	0,044	2,10	5,29	609	0,011	2,10	10,61		8,90	693	0,024	0,014	10,69	10,69		17,98	19,05
BA2	1,48		0,11	4,14	0,092	4,78		8,09	4,927	0,041	4,80	0,89	648	0,014	4,80	18,41		8,90	693	0,024	0,014	12,31	12,31		17,98	19,05
BA1	2,56		0,22	1,49	0,099	1,85		4,89	2,457	0,033	1,72	0,53	693	0,033	1,72	13,51		8,90	681	0,016	0,024	6,72	6,72		17,98	19,05
Laxamýri	9,42	0,09	0,12	3,57	0,025	2,63	2,52	6,54	3,205	0,056	2,20	3,056	0,029	0,029	2,20	2,35	0,61	0,52	523	0,016	0,016	8,19	8,19		17,98	19,05
Mánárþakki	17,13	0,19	0,17	5,47	0,066	5,61	4,74	9,14	9,010	0,093	4,54	6,174	0,038	0,038	4,54	4,55	2,06	0,42	533	0,008	0,008	22,35	18,02		17,98	19,05
Peistareykir T1	29,00	0,13	0,09	1,84	0,050	5,92	6,99	10,30	9,263	0,038	4,66	6,893	0,024	0,024	4,66	5,09	0,68	0,44	463	0,023	0,023	19,64	18,25		33,95	35,83
Helguvík, tildurmosi																										
HV2	0,93		0,15	3,11	0,064	9,09		15,11	8,704	0,020	8,36	2,81	718	0,148	8,36	25,45		1,17	730	0,074	0,074	26,46	26,46		21,22	21,22
HV3	2,00		0,07	2,63	0,084	8,71		11,69	8,507	0,016	6,94	1,17	730	0,074	6,94	21,22		0,68	692	0,053	0,053	27,16	27,16		12,36	12,36
HV1	2,88		0,15	1,74	0,035	2,60		4,50	2,544	0,021	2,99	0,68	692	0,021	2,99	12,36		1,11	691	0,035	0,035	7,66	7,66		17,53	14,54
Nes v. Hvalsnes	8,10	0,29	0,21	7,51	0,031	4,55	3,79	5,72	4,163	0,090	4,12	3,376	0,027	0,027	4,12	3,66	1,64	1,11	618	0,035	0,035	10,99	9,74		27,43	18,02
Vogastapi	11,15	0,24	0,19	3,28	0,065	5,48	5,36	9,14	7,737	0,064	6,23	5,94	0,007	0,007	6,23	5,37	5,94	2,29	561	0,041	0,041	21,05	22,11		27,43	18,02
Melunnuklif	24,20	0,32	0,20	3,71	0,052	13,56	11,65	13,80	12,781	0,077	9,57	7,73	0,029	0,029	9,57	7,73	1,26	1,20	668	0,008	0,008	32,64	27,48		28,68	23,18