



Þungmálmar og brennisteinn í tildurmosa við iðnaðarsvæðið í Hellnahrauni í Hafnarfirði haustið 2013

Sigurður H. Magnússon

Unnið fyrir Hafnarfjarðarbæ



**Þungmálmar og brennisteinn í tildurmosa við
iðnaðarsvæðið í Hellnahrauni í Hafnarfirði haustið 2013**

Sigurður H. Magnússon

Unnið fyrir Hafnarfjarðarbæ


NÍ-14001 Garðabær, apríl 2014



NÁTTÚRUFRAEÐISTOFNUN ÍSLANDS

*Mynd á kápu: Horft til norðurs yfir rannsóknasvæðið. Álverið í Straumsvík t.v.
Iðnaðarsvæðið í Hellnahrauni til hægri. Ljósmynd. Sigurður H. Magnússon, 31. mars 2014.*

ISSN 1670-0120

	Urriðaholtsstræti 6-8 212 Garðabæ Sími 590 0500 Fax 590 0595 http://www.ni.is ni@ni.is	Borgum við Norðurslóð 602 Akureyri Sími 460 0500 Fax 460 0501 http://www.ni.is nia@ni.is
Skýrsla nr. NI-14001	Dags, Mán, Ár Apríl 2014	Dreifing Opin
Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill Þungmálmur og brennisteinn í tildurmosa við iðnaðarsvæðið í Hellnahrauni í Hafnarfirði haustið 2013		Upplag 15 Fjöldi síðna 34 Kort / Mælikvarði Verknúmer 5986 Málsnúmer 2013120008
Höfundar Sigurður H. Magnússon		
Unnið fyrir Hafnarfjarðarbær		
Samvinnuaðilar		
Útdráttur <p>Hér á landi hefur um árabíl verið fylgst með styrk nokkurra þungmálma og brennisteins í andrúmslofti með söfnun og mælingum á styrk þeirra í mosa. Í nágrenni álversins í Straumsvík hafa þessi efni verið vöktuð á 11 stöðum á fimm ára fresti frá árinu 2000, síðast árið 2010.</p> <p>Skammt suðaustur af álverinu og nálægt iðnaðarsvæðinu í Hellnahrauni í Hafnarfirði (1. áfanga) hefur styrkur nokkurra efna mælst hlutfallslega hár, einkum blýs og sinks en einnig kadmíns, króms og kopars.</p> <p>Í ljósi þess að hæstu gildin hafa mælst í sýnum skammt frá íbúðabyggðinni á Völlumum í Hafnarfirði óskaði bæjarstjórn Hafnarfjarðar í samráði við heilbrigðiseftirlit Hafnarfjarðar- og Kópavogssvæðis haustið 2013 eftir því að Náttúrufræðistofnun Íslands sæi um frekari rannsókn á styrk þungmálma og brennisteins í mosa í þeim tilgangi að fá fyllri upplýsingar um styrk efna við iðnaðarsvæðið í Hellnahrauni og á íbúðarsvæðinu á Völlumum.</p> <p>Náttúrufræðistofnun tók að sér þetta verk og var sjö sýnum safnað í lok október 2013, bæði innan byggðarinnar og suðvestur af henni. Sýnin voru síðan meðhöndluð og efnagreind með sama hætti og við fyrri mælingar. Við úrvinnslu voru niðurstöður mælinga frá 2010 notaðar til viðmiðunar til að fá heildarmynd af dreifingu efna á svæðinu.</p> <p>Niðurstöður sýna að á rannsóknarsvæðinu eru tvær meginuppsprettur þungmálma. Annars vegar er álverið í Straumsvík sem losar arsen og nikkell auk brennisteins og hins vegar iðnaðarsvæðið í Hellnahrauni (1. áfangi) en þar er uppspretta nokkurra málma, einkum þó sinks og blýs. Dreifing þeirra er þó frekar staðbundin og að mestu bundin við iðnaðarsvæðið sjálft en nær í nokkrum mæli út fyrir það. Vegna nálægðar íbúðabyggðar við iðnaðarsvæðið er mikilvægt að fylgjast vel með styrk þungmálma á þessu svæði, einkum þó blýs.</p>		
Lykilorð Vöktun, þungmálmur, brennisteinn, iðnaður, ákoma, bakgrunnsgildi, mengunarstuðull, tildurmosi, <i>Hylocomium splendens</i> .	Yfirfarið MH, BM, ÁBS	

EFNISYFIRLIT

1 INNGANGUR	7
2 RANNSÓKNARSVÆÐI	8
3 AÐFERÐIR	9
4 ÚRVINNSLA	11
4.1 Bakgrunnsgildi og mengunarstuðull	11
4.2 Kortlagning	11
4.3 Klasagreining	12
5 NIÐURSTÖÐUR	13
5.1 Styrkur þungmálma	13
5.2 Klasagreining	24
6 UMRÆÐA	25
6.1 Breytingar á styrk milli ára	25
6.2 Útbreiðsla efna	25
7 ÁLYKTANIR OG LOKAORÐ	27
8 ÞAKKIR	28
9 HEIMILDIR	28
10 VIÐAUKAR	31
1. viðauki. Staðsetning og helstu einkenni á sýnatökustöðum á rannsóknarsvæðinu við Hafnarfjörð.	31
2. viðauki. Þungmálmur og áhrif þeirra	32

1 INNGANGUR

Hér á landi hefur um árabíl verið fylgst með styrk nokkurra þungmálma og brennisteins í andrúmslofti með söfnun og mælingum á mosa. Sýni hafa verið tekin víðs vegar um land á fimm ára fresti frá árinu 1990 og styrkur efna í þeim mældur. Þessi vöktun er hluti af fjölþjóðlegu vöktunarverkefni sem skipulagt hefur verið á vegum efnahagsnefndar Sameinuðu þjóðanna fyrir Evrópu (UNECE) og sem margar þjóðir álfunnar taka þátt í (UNECE, United Nations Economic Commission for Europe). Mosar eru hentugir til að fylgjast með loftmengun því að þeir eru rótalausir og hafa ekki vel þróað hlífðarlag. Yfirborð blaða er mikið miðað við rúmmál og vefir þeirra hleypa fremur greiðlega inn málmjónum úr loftbornum ögnum sem á þá setjast. Mosar hafa greið jónskipti við umhverfið og geta bundið mikið af mengunarefnum (Fernandez o.fl. 2002). Með því að mæla styrk efna í mosa má því fá upplýsingar um styrk þeirra í lofti og úrkomu. Sýnataka er einföld og greiningar frekar auðveldar í framkvæmd því að efnin eru í mun meiri styrk í mosanum en í andrúmslofti. Mosar geta safnað upp efnum sem berast að með ójöfnum eða árstíðabundnum hætti (Gonçalves o.fl. 1994) en slíka toppa er oft erfitt og kostnaðarsamt að fanga og greina með beinum efnamælingum. Með aðferðinni er hægt að fá allgóða vitneskju um ákomu efna á stórum landsvæðum (Steinnes o.fl. 2011).

Hér á landi hefur tildurmosi (*Hylocomium splendens* (Hedw.) Schimp.) verið notaður við vöktunina en hann er breiðumyndandi og er algengur um land allt nema á hálendinu þar sem frekar lítið er af honum, einkum innan gosbeltisins (Flóra Íslands). Tildurmosi hefur reynst heppilegur til mælinga á þungmálmum (Berg og Steinnes 1997) og hefur hann víða verið notaður í þeim tilgangi í Norður-Evrópu (Harmens 2008, Harmens o.fl. 2013). Frá upphafi mælinga hér á landi hefur styrkur Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, V og Zn verið mældur í mosanum en frá 1995 einnig As, Hg og S (Sigurður H. Magnússon 2013).

Niðurstöður þessara rannsókna eru birtar í sameiginlegum skýrslum fyrir öll þáttökulönd í verkefninu (Harmens o.fl. 2013) en hafa einnig verið birtar sérstaklega fyrir einstök lönd (t.d. Poikolainen o.fl. 2004, Danielsson og Karlsson 2011, Steinnes o.fl. 2011). Hér á landi hafa verið birtar skýrslur um verkefnið með áherslu á styrk þungmálma við iðjuverin í Straumsvík, á Grundartanga og í Reyðarfirði en þar hefur sýnum verið safnað sérstaklega til að fylgjast með styrk efnanna í næsta nágrenni veranna (Sigurður H. Magnússon 2002, Sigurður H. Magnússon og Björn Thomas 2007, Sigurður H. Magnússon 2013). Niðurstöður benda til þess að starfsemi iðjuveranna á þessum stöðum hækki styrk nokkurra efna, einkum arsens, nikkels og brennisteins. Skammt suðaustur af álverinu í Straumsvík hefur styrkur margra efna mælst hlutfallslega hár, einkum blýs og sinks en einnig kadmíns, króms og kopars og eru hæstu gildin í sýnum sem tekin voru nálægt iðnaðarsvæðinu í Hellnahrauni (1. áfanga) (Sigurður H. Magnússon 2013). Eftir að niðurstöður síðustu rannsókna á mosa voru kynntar haustið 2013 spannst talsverð umræða um hugsanlega mengun á þessu svæði, einkum í ljósi þess að hæstu gildin mældust skammt frá íbúðabyggðinni á Völlunum í Hafnarfirði (mbl.is 2013, RÚV 2013). Í kjölfar þessa óskaði bæjarstjórn Hafnarfjarðar í samráði við heilbrigðiseftirlit Hafnarfjarðar- og Kópavogssvæðis eftir að Náttúrufræðistofnun Íslands sæi um frekari rannsókn á styrk þungmálma í mosa við iðnaðarsvæðið í Hellnahrauni og á íbúðasvæðinu á Völlunum. Lögðu fulltrúar Hafnarfjarðar til að tekin yrðu sjö mosasýni strax haustið 2013 á ákveðnum stöðum á svæðinu og efni greind með sömu aðferðum og áður hafði verið beitt. Náttúrufræðistofnun tók að sér þetta verk og var sýnum safnað strax í lok október 2013.

Tilgangur þessara rannsókna sem hér eru kynntar er að fá fyllri upplýsingar um styrk þungmálma og brennisteins í mosa í nágrenni iðnaðarsvæðisins í Hellnahrauni (1. áfanga), einkum dreifingu efna inn yfir íbúðasvæðið á Völlunum.

2 RANNSÓKNARSVÆÐI

Svæðið þar sem sýni voru tekin haustið 2013 er sunnan Reykjanesbrautar. Það nær frá Ásvöllum og Hafravöllum í austri vestur að kvartmílubrautinni í Kapelluhrauni (1. mynd). Það spannar því yfir íbúðabyggðina vestan við Ástjörn, þ.e. Vellina vestur fyrir iðnaðarsvæðið í Kapelluhrauni sem kallað hefur verið Hellnahraun 1. áfangi (Helga Stefánsdóttir, munnlegar upplýsingar 7. febrúar 2014). Í nágrenni álversins í Straumsvík hafa þungmálmar og brennisteinn verið mældir frá árinu 2000 á fimm ára fresti á 11 stöðum og eru niðurstöður þaðan frá árinu 2010 notaðar til viðmiðunar í þessari rannsókn. Rannsóknarsvæðið sem hér er fjallað um nær því yfir allt næsta nágrenni álversins í Straumsvík, frá eystri hluta íbúðabyggðarinnar á Völlum vestur að Óttarsstöðum, eða um 5,5 km og um 2,5 km til suðurs frá ströndinni (1. mynd). Berggrunnur á svæðinu eru hraun, mismunandi gömul. Svæðið liggur allt undir 40 m hæð yfir sjó.

Á undanförunum áratugum hefur verið ráðist í miklar framkvæmdir á rannsóknarsvæðinu og hefur það breyst mikið á síðustu 50 árum. Eftir því endilöngu liggur Reykjanesbrautin, sem tekin var í notkun árið 1965 (Birgitta María Vilbergsdóttir o.fl. 2009). Árið 2012 er áætlað að eftir brautinni hafi á þessum slóðum farið að jafnaði 12.845 bílar á sólarhring (Friðleifur Ingi Brynjarsson, munnlegar upplýsingar 10. feb. 2014). Álverið í Straumsvík var reist á sjöunda áratug síðustu aldar og var það formlega tekið í notkun árið 1970. Framleiðslugeta var í upphafi um 33.000 tonn (Rio Tinto Alcan) en hefur aukist mikið síðan. Árið 2012 var framleiðslan um 190.000 tonn af áli (Guðrún Þóra Magnúsdóttir og Ívar Örn Indriðason 2011).

Miklar framkvæmdir hafa einnig verið á svæðinu milli Ástjarnar og álversins. Iðnaðarsvæðið í Hellnahrauni (Hellnahraun 1. áfangi) fór að byggjast upp um 1986 og hefur þar nú verið komið á fót margs konar iðnaði (Helga Stefánsdóttir, munnlegar upplýsingar 7. febrúar 2014). Skipulögð hafa verið iðnaðarsvæði bæði norðan við kvartmílubrautina (Kapelluhraun 1. áfangi) og einnig á hraununum sunnan og ofan við fyrsta iðnaðarsvæðið, þ.e. Hellnahraun 2. og 3. áfangi. Á þessum svæðum er nú rekin margs konar iðnaðarstarfsemi nema á efsta svæðinu (Hellnahraun 3. áfangi). Þar lauk gatnagerð árið 2009 en uppbygging er að öðru leyti ekki hafin (Helga Stefánsdóttir, munnlegar upplýsingar 7. febrúar 2014).

Á íbúðasvæðinu á Völlum var hafist handa við gatnagerð árið 2002 og stóð mesta uppbyggingin þar til 2009 (Helga Stefánsdóttir, munnlegar upplýsingar 7. febrúar 2014). Alls eru íbúar þar nú tæplega 5000 að tölu (Helga Stefánsdóttir, munnlegar upplýsingar 11. febrúar 2014). Í Hvaleyrarhrauni austan álversins og norðan Reykjanesbrautar hefur land einnig breyst talsvert því að á árunum 1992-1994 var þar gerður 9 holu golfvöllur þegar Hvaleyrarvöllur var stækkaður út á hraunið og var hann tekinn í notkun 1996 (Ágúst Hubertsson munnlegar upplýsingar 7. mars 2014). Vegna allra þessara framkvæmda hefur land á hraununum austan Straumsvíkur, þ.e. í Kapelluhrauni og Hvaleyrarhrauni, breyst mikið á undanförunum áratugum. Þrátt fyrir þetta er þó enn að finna allstórar spildur og skika, fremur lítið breytta, inni á milli vega og bygginga.

Hraunin á rannsóknarsvæðinu eru víðast hvar óslétt en í þeim skiptast á hraunbungur, lautir og bollar. Á bungunum einkennist gróður af fléttum og af mosanum hraungambra sem er þar yfirleitt ríkjandi. Með mosanum vaxa ýmsar lyngtegundir, einkum krækilyng. Í lautum er lynggróður víða ráðandi; algengar tegundir eru krækilyng, bláberjalyng, beitleyng og sortulyng. Þar sem jarðvegur er einna þykkastur og næringarríkastur er gróður lautanna grasleitur; ýmsar gras- tegundir eru þar áberandi, svo sem blávingull, túnvingull, bugðupuntur, ilmreyr og hálingresi. Allvíða er krossmaðra áberandi og á nokkrum stöðum einnig gulmaðra. Sums staðar finnast lágvaxnar birkihríslur, einkum suðaustur af álverinu (1. mynd).

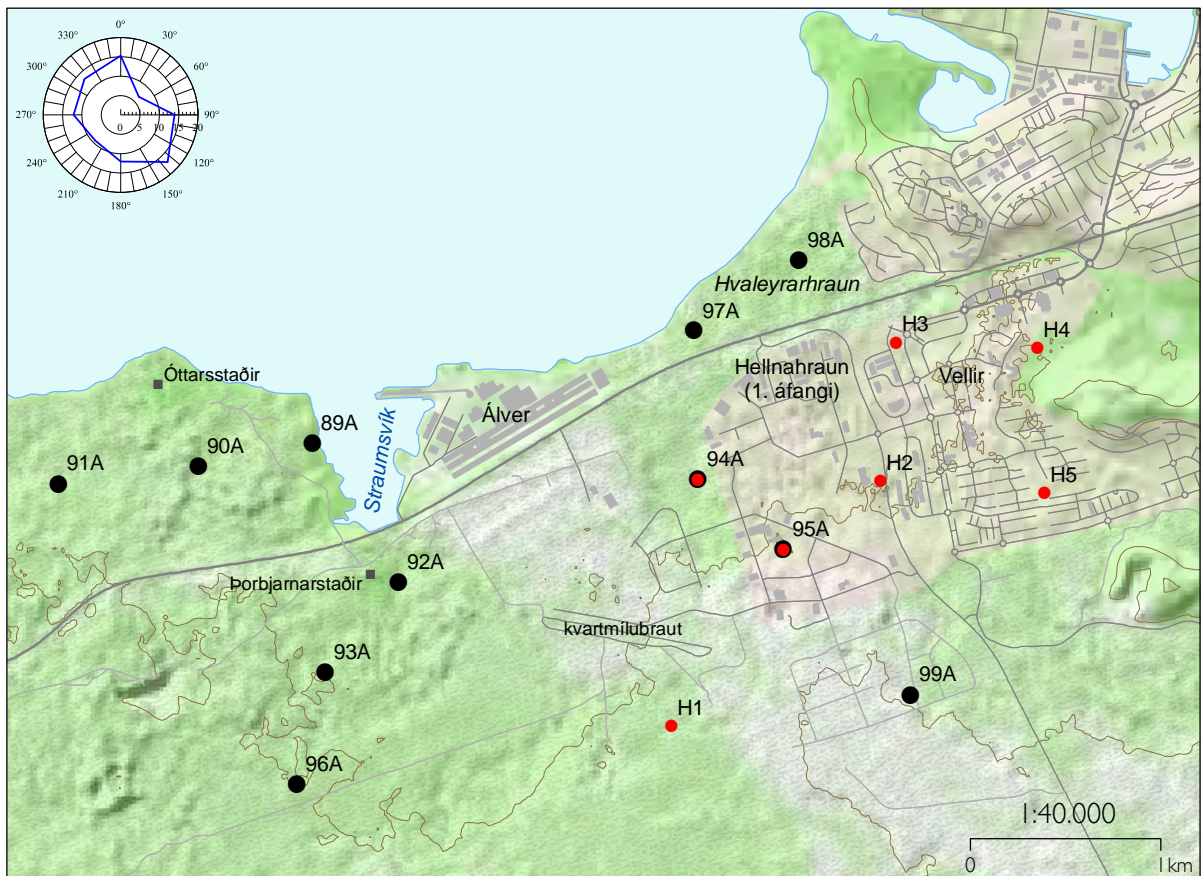
Mosategundin tildurmosi (*Hylocomium splendens*), sem notaður hefur verið til að vakta styrk þungmálma hér á landi, er nokkuð algengur á rannsóknarsvæðinu og finnst þar yfirleitt í lautum. Hann vex þó á einstaka stað utan þeirra og jafnvel á bungum en þá eingöngu þar sem gróður er grasleitur og næringarástand jarðvegs væntanlega einna best.

3 AÐFERÐIR

Söfnun, hreinsun og efnagreining sýna

Dagana 30.-31. október 2013 var sjö sýnum af tildurmosa safnað sunnan Reykjanesbrautar, á svæði sem nær frá Ásvöllum og Hvannavöllum í austri vestur að kvartmílubrautinni í Kapelluhrauni (1. mynd). Fjöldi sýna og staðsetning var ákvörðuð af starfsmönnum Hafnarfjarðarbæjar. Við staðsetningu var miðað við að fá sem gleggstar upplýsingar um styrk þungmálma við iðnaðarsvæðið í Hellnahrauni (1. áfanga) og innan íbúðabyggðarinnar á Völlunum. Tvö sýnanna (94A og 95A) voru tekin á stöðum þar sem mosa hefur áður verið safnað til mælinga á þungmálmum og brennisteini (1. mynd) (Sigurður H. Magnússon 2002, Sigurður H. Magnússon og Björn Thomas 2007, Sigurður H. Magnússon 2013). Eitt sýni (H1) var tekið sunnan kvartmílubrautarinnar vestan við aðstöðu Skotíþróttafélags Hafnarfjarðar og tvö (H2 og H3) milli iðnaðarsvæðisins og íbúðabyggðarinnar á Völlunum. Austustu sýnin tvö voru tekin innan byggðarinnar á Völlunum (H5) og í austurjaðri hennar (H4).

Við sýnatöku var notuð sama aðferð og beitt hefur verið við vöktun þungmálma í mosa hér á landi og á meginlandi Evrópu allt frá því skipulögð vöktun á þungmálmum með mosaaðferðinni hófst (Sigurður H. Magnússon 2002) (ICP Vegetation Coordination Centre 2010). Á hverjum



1. mynd. Yfirlit yfir rannsóknarsvæðið í Hafnarfirði. Sýnatökustaðir frá 2010 eru sýndir sem svartir punktar en frá haustinu 2013 sem rauðir. Á stöðum 94A og 95A voru sýni tekin í bæði skiptin. Vindrós sýnir hlutfallslega tíðni vindstefnu mælt vestan við álverið tímabilið maí-ágúst árin 2002-2010.

stað eru tekin 5-10 smásýni og þeim slegið saman í eitt samsýni. Samkvæmt leiðbeiningum sem gefnar hafa verið út um söfnun mosa til mælinga á þungmálmum skal safna á um 50 x 50 m svæði, einnig ber að forðast að safna undir runnum eða þar sem mosinn er mjög hulinn öðrum gróðri. Yfirlétt fannst mosinn eingöngu í lægðum og víða undir eða nálægt runnum. Til þess að fá nægilega stór sýni var ekki hægt að fara nákvæmlega eftir settum reglum og því var sums staðar nauðsynlegt að safna á stærra svæði og jafnvel við runna (1. viðauki).

Við söfnun voru sýnin sett í plastpoka. Þau voru síðan fryst og geymd þannig í nokkra daga. Þá voru þau þídd við herbergishita og hreinsuð. Var það gert þannig að vaxtarsproti frá sumrinu 2013 var slitinn frá en vöxtur þriggja ára þar á undan tekinn til efnagreiningar. Sprotarnir voru þá settir í bréfpoka og þurrkaðir við herbergishita. Söfnun sýna og öll meðferð þeirra var unnin með plathönskum eða hendi stungið í plastpoka þegar sýnin voru meðhöndluð til þess að forðast beina snertingu við mosann og til að hamla gegn því að aðskotaefni bærust í hann.

Þurrkuð sýnin voru send til IVL Svenska Miljöinstitutet í Gautaborg sem sá um efnagreiningar (1. tafla). Efnagreining As, Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, S, V og Zn var gerð með ICP-MS tækni eftir meðhöndlun í sterkri saltpéturssýru og H₂O₂ í örbylgjuofni. Greining á Hg; sýni voru undirbúin með votoxun í blöndu af óþynntum sýrum, þ.e. saltpéturssýru (HNO₃) og brennisteinssýru (H₂SO₄). Kaldeimsmæling kvikasilfurs með atómflúrljómunarskynjara (CVAFS) þar sem kvikasilfursjónir eru afoxaðar í óhlaðin atóm Hg(0). Styrkur efnanna miðast við rakainnihald sýna við 40°C.

Sýnunum frá 2010, sem notuð eru til viðmiðunar í þessari rannsókn, var safnað 2. september 2010 með sömu aðferð og hér hefur verið lýst að framan. Þau voru þá fryst og geymd þannig í nokkra mánuði en voru síðan hreinsuð á sama hátt og gert var haustið 2013. Þau voru þá þurrkuð við herbergishita og send til Vistfræðideildar háskólans í Lundi í Svíþjóð þar sem þau voru efnagreind (1. tafla). Þá líkt og haustið 2013 var sums staðar mjög lítið af tildurmosa og því nauðsynlegt að safna á stærra svæði en mælt var fyrir um í leiðbeiningum. Átti það einkum við um sýnatökustað 94A. Á þeim tíma var mosinn sums staðar skemmdur, þ.e. á stöðum 89A, 90A, 91A, 92A, 93A, 97A og 98A (1. viðauki) og voru líkur leiddar að því að skemmdirnar stöfuðu af samverkandi áhrifum af gosi í Örfafjökli fyrr á árinu 2010 og starfsemi álversins (Sigurður H. Magnússon 2013).

1. tafla. Yfirlit yfir greiningaraðferðir og greiningarmörk. Sýnin frá 2010 voru efnagreind á rannsóknastofu við Vistfræðideild háskólans í Lundi í Svíþjóð en frá 2013 við IVL í Gautaborg. Því eru greiningarmörk ekki þau sömu bæði árin.

Efni	2010		2013	
	Aðferð	Greiningarmörk mg/kg	Aðferð	Greiningarmörk mg/kg
As	ICP MS	0,05	ICP MS	0,05
Cd	ICP MS	0,002	ICP MS	0,005
Cr	ICP ES	0,02	ICP MS	0,06
Cu	ICP ES	0,01	ICP MS	0,03
Fe	ICP ES	1	ICP MS	2
Hg	ICP MS	0,005	CVAFS	0,1
Ni	ICP ES	0,1	ICP MS	0,6
Pb	ICP MS	0,05	ICP MS	0,2
S	ICP ES	1	ICP MS	1-10
V	ICP ES	0,05	ICP MS	0,02
Zn	ICP ES	0,1	ICP MS	0,4

4 ÚRVINNSLA

4.1 Bakgrunnsgildi og mengunarstuðull

Til þess að setja mæliniðurstöður í samhengi við fyrri mælingar eru í þessari skýrslu notuð bakgrunnsgildi sem reiknuð hafa verið út frá öllum mælingum á styrk þungmálma og brennisteins í mosa frá upphafi vöktunar árið 1990 til ársins 2010 og birt voru árið 2013 (Sigurður H. Magnússon 2013). Þar var notuð svokölluð 2-sigma-aðferð (Matschullat o.fl. 2000). Aðferðin er þannig að fyrst er reiknað út meðaltal og staðalfrávik fyrir styrk viðkomandi efnis. Öllum gildum sem eru hærri eða lægri en tvær staðalfrávikseiningar frá meðaltali er þá sleppt. Sams konar útreikningum er þá beitt á þau gildi sem eftir standa og útreikningar endurteknir koll af kalli uns öll gildi liggja innan ± 2 staðalfrávikseininga frá meðaltali. Bakgrunnsgildi er loka-meðaltal +2 staðalfrávikseiningar fyrir viðkomandi efni.

Fyrir hvert efni var fundinn stuðull sem hér er kallaður mengunarstuðull MS (e. contamination factor CF) samkvæmt skilgreiningum Fernandez o.fl. (2002) en mengunarstuðull er hlutfallið á milli styrks efnis í sýni og bakgrunnsgildis viðkomandi efnis.

$$\text{Mengunarstuðull MS} = \frac{\text{styrkur í sýni}}{\text{bakgrunnsgildi efnis}}$$

Við mat á mengun var notaður sex flokka kvarði sem Fernandez og félagar (2002) hafa sett fram:

1. flokkur	MS<1	engin mengun (e. no contamination)
2. flokkur	MS 1-2	vísbinding um mengun (e. suspected contamination)
3. flokkur	MS 2-3,5	lítilsháttar mengun (e. slight contamination)
4. flokkur	MS 3,5-8	nokkur mengun (e. moderate contamination)
5. flokkur	MS 8-27	veruleg mengun (e. serious contamination)
6. flokkur	MS>27	mjög mikil mengun (e. extremely serious contamination)

Rétt er ítreka að flokkun á mengun með þessari aðferð ræðst af bakgrunnsgildi viðkomandi efnis en segir ekki til um möguleg áhrif þess á lífverur. Ef bakgrunnsgildi eru lág þarf minni hækkun á styrk efnis til að færa það til um flokk en ef bakgrunnsgildi eru há.

4.2 Kortlagning

Til þess að lýsa dreifingu efna voru teiknuð kort af rannsóknarsvæðinu. Á kortunum eru allir sýnatökustaðir, bæði frá 2010 og 2013, merktir og styrkur einstakra efna gefin upp. Á þeim stöðum þar sem sýni voru tekin bæði árin (94A og 95A) var við úrvinnslu korta tekið meðaltal efna og það notað við gerð kortanna. Á kortunum er dreifing efna sýnd samkvæmt mengunarflokkum einstakra efna og eru kortin sömu gerðar og þau sem birt voru í skýrslu um þungmálma í mosa á landinu árið 2010 (Sigurður H. Magnússon 2013).

Við gerð kortanna var beitt eftirfarandi aðferð: Styrkur efna var lesinn inn í forritið ArcMap. Punktur með styrk hvers efnis 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. 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 svæðið við Straumsvík var 100×100 m. Kortin voru síðan lituð eftir jafngildislínunum samkvæmt reiknuðum mengunarstuðlum (2. tafla).

2. tafla. Mengunarstuðlar og mengunarflokkar fyrir einstök efni í mosa á Íslandi reiknuð út frá öllum sýnum sem mæld hafa verið árin 1990-2010 og reiknuð samkvæmt 2-sigma-aðferð (frá Sigurði H. Magnússyni 2013). Innan sviga er fjöldi sýna sem liggur að baki útreikningunum. Mengunarstuðull (MS mg/kg) er hlutfallið á milli styrks efnis og bakgrunnsgildis. Mengunarflokkar eru samkvæmt tillögum Fernandez og félaga (Fernandez o.fl. 2002).

	Mengunarstuðull (mg/kg)								
	MS × 1	MS × 2	MS × 3,5	MS × 8	MS × 27				
As (442)	0,16	0,32	0,56	1,28	4,34				
Cd (628)	0,076	0,152	0,265	0,606	2,045				
Cr (628)	3,24	6,47	11,33	25,90	87,40				
Cu (628)	11,09	22,18	38,81	88,70	299,37				
Fe (628)	4999	9999	17.498	39.996	134.985				
Hg (442)	0,07	0,14	0,24	0,56	1,87				
Ni (628)	4,71	9,42	16,49	37,70	127,22				
Pb (628)	1,73	3,46	6,06	13,85	46,74				
S (442)	722	1.445	2.529	5.780	19.507				
V (628)	19,17	38,33	67,08	153,33	517,48				
Zn (628)	27,55	55,10	96,42	220,39	743,81				

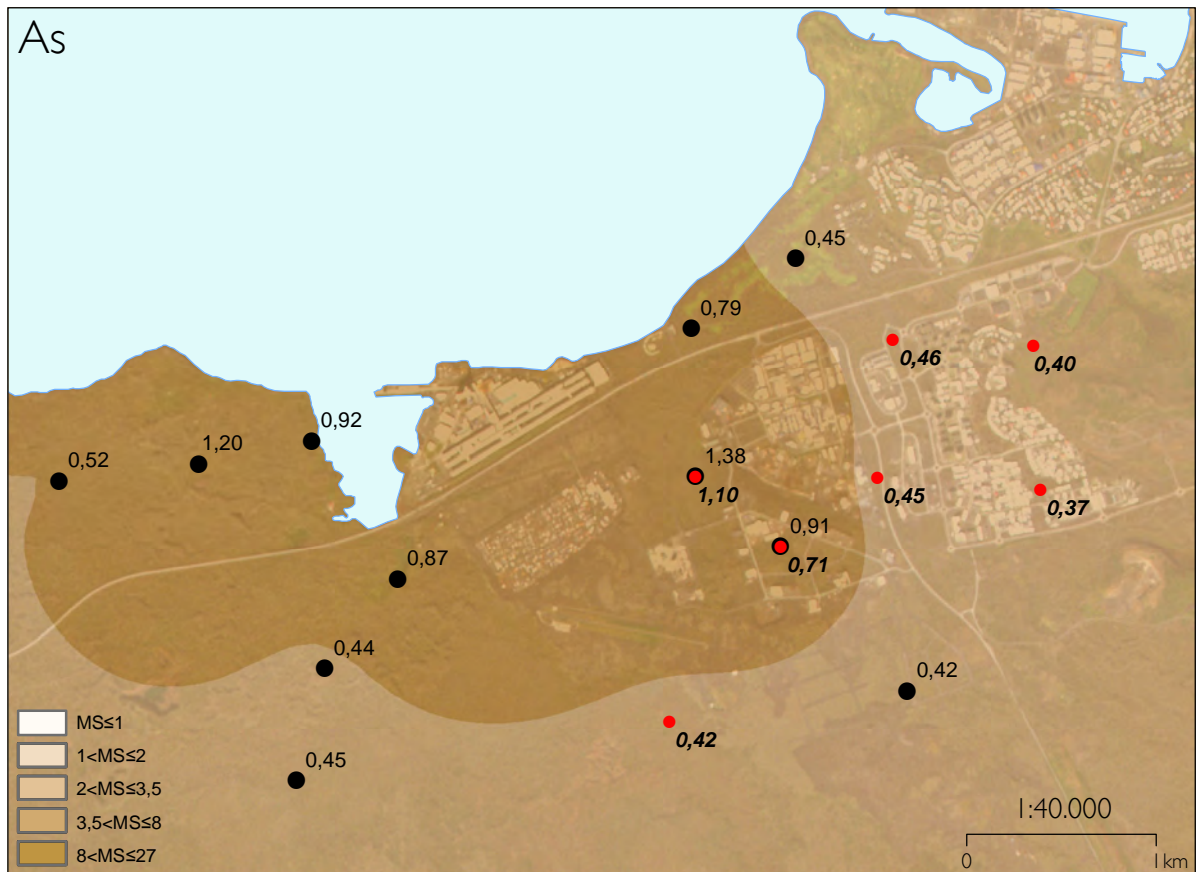
4.3 Klasagreining

Til þess að kanna hvaða efni hefðu svipaða útbreiðslu á rannsóknarsvæðinu var gerð klasagreining á styrk efna eftir stöðum. Notuð var stigskipt, tvíhliða (e. two way clustering) Ward aðferð og gildi stöðluð við greininguna. Greiningin var unnin með forritinu JMP 9.01 frá SAS (SAS Institute Inc. 2010).

5 NIÐURSTÖÐUR

5.1 Styrkur þungmálma

Arsen (As)

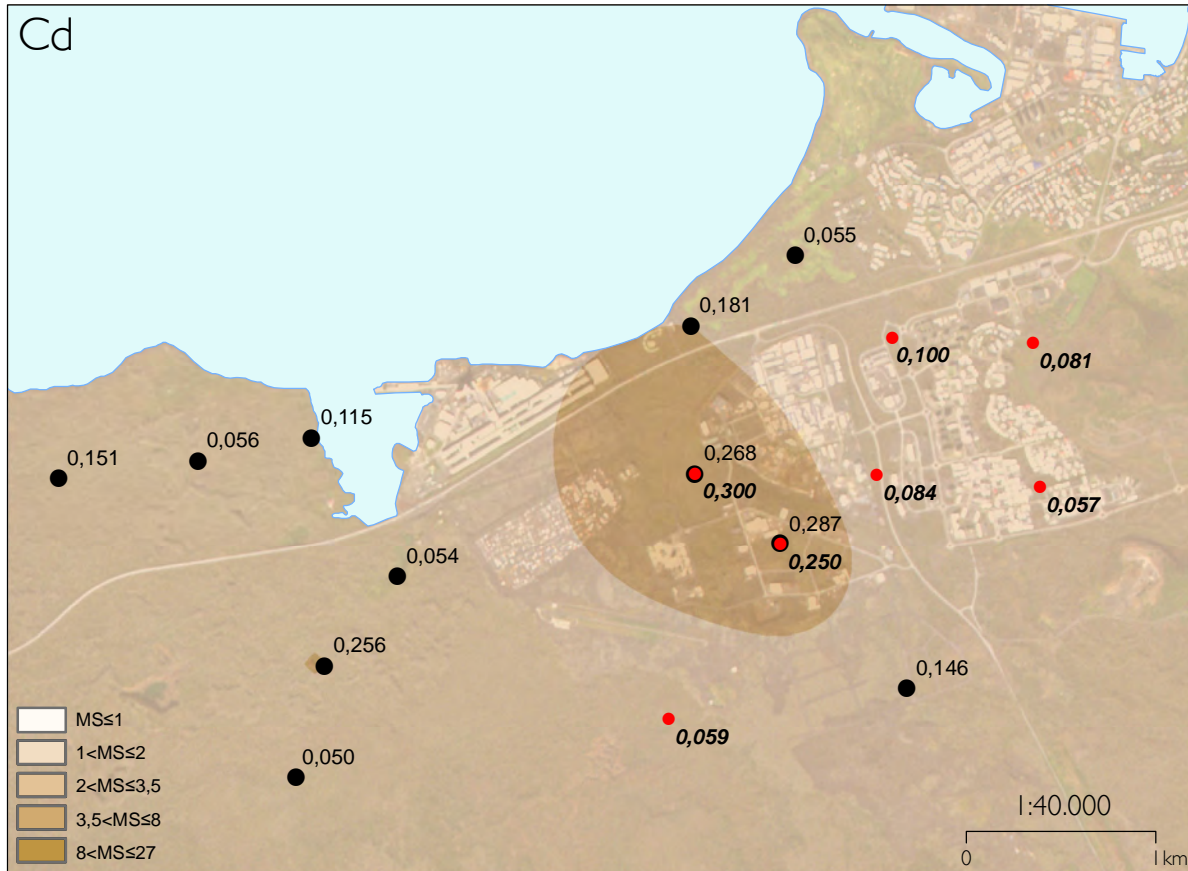


2. mynd. Styrkur arsens (mg/kg) í mosa sumarið 2010 (óbreytt letur) og 2013 (feitiletrað skáletur) á rannsóknarsvæðinu við Hafnarfjörð. Sýnatökustaðir frá 2010 eru sýndir með svörtum punktum en frá haustinu 2013 með rauðum. Mismunandi skygging tákna mismunandi mengunarflokka byggða á reiknuðum mengunarstuðlum (MS), sjá 2. töflu.

Haustið 2013 mældist styrkur arsens í þeim sjö sýnum sem tekin voru á rannsóknarsvæðinu á bilinu 0,37-1,10 mg/kg (2. mynd). Styrkurinn var lægstur í sýni H5 við Hafravelli en hæstur í sýni 94A vestan við iðnaðarsvæðið í Hellnahrauni (1. áfanga).

Styrkur arsens mældist nokkru lægri árið 2013 en 2010 í þeim sýnum sem tekin voru á sömu stöðum bæði árin (94A og 95A) og nam lækkunin 21%. Dreifingarmynstur arsens sýnir að það er hæst næst álverinu en lækkar síðan nokkuð bratt til allra átta með aukinni fjarlægð (2. mynd). Í sýnum sem tekin voru innan við byggðina á Völlunum eða næst henni mældist styrkur þess á bilinu 0,37-0,46 mg/kg. Miðað við gögn frá 2010 og 2013 og reiknaða mengunarstuðla telst mengun vera *nokkur* innan 2 km fjarlægðar frá álverinu og jafnvel veruleg á einum stað um einn km suðaustur af því (94A). Annars staðar á rannsóknarsvæðinu telst mengunin *lítillsháttar* (2. tafla, 2. mynd).

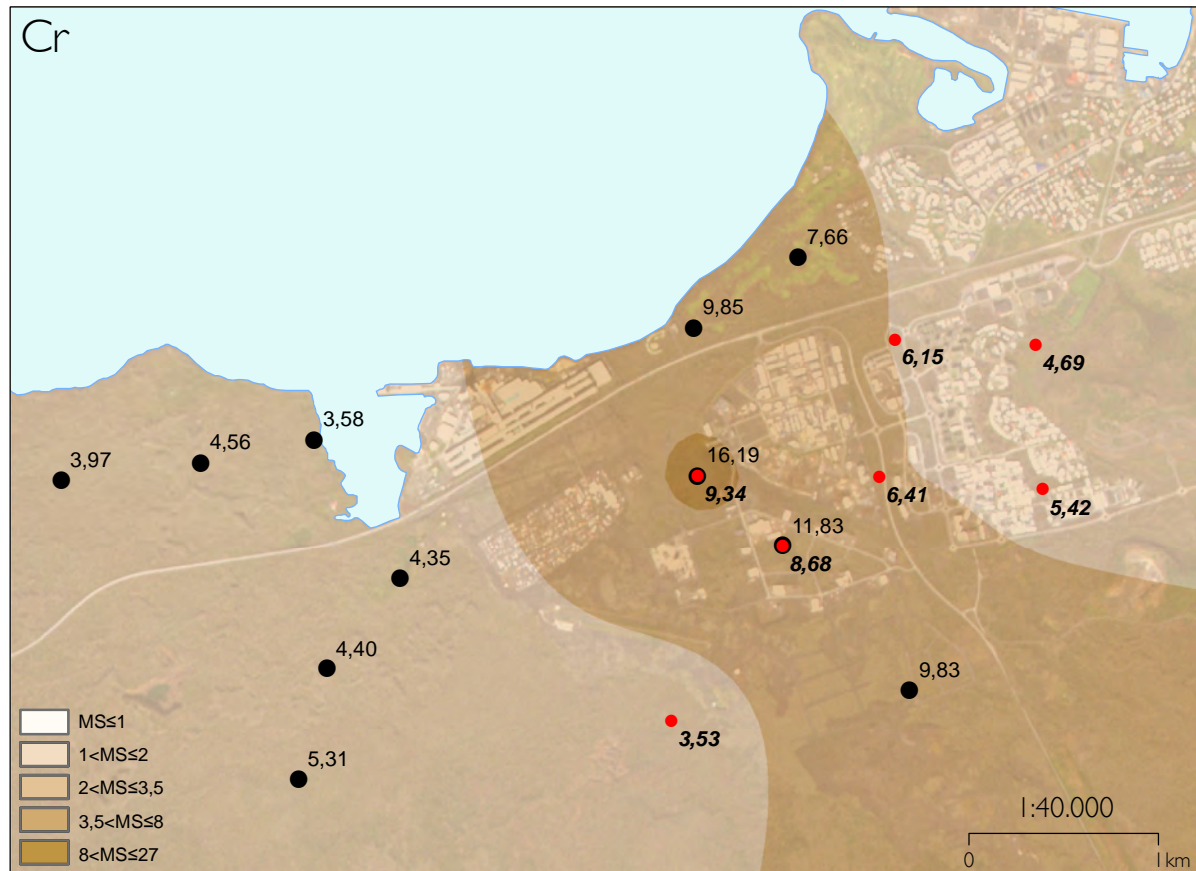
Kadmín (Cd)



3. mynd. Styrkur kadmíns (mg/kg) í mosa sumarið 2010 (óbreytt letur) og 2013 (feitlettrað skáletur) á rannsóknarsvæðinu við Hafnarfjörð. Sýnatökustaðir frá 2010 eru sýndir með svörtum punktum en frá haustinu 2013 með rauðum. Mismunandi skygging táknar mismunandi mengunarflokka byggða á reiknuðum mengunarstuðlum (MS), sjá 2. töflu.

Haustið 2013 mældist styrkur kadmíns í þeim sjö sýnum sem tekin voru á rannsóknarsvæðinu við Hafnarfjörð á bilinu 0,057-0,300 mg/kg (3. mynd). Styrkurinn var lægstur í sýni H5 við Hafravelli en hæstur í sýni 94A suðvestan við iðnaðarsvæðið í Hellnahrauni (1. áfanga). Styrkur efnisins var svipaður árið 2010 og 2013 í þeim sýnum sem tekin voru á sömu stöðum bæði árin (94A og 95A) (3. mynd). Dreifingarmynstur kadmíns árin 2010 og 2013 sýnir þungamiðju suðvestur af iðnaðarsvæðinu í Hellnahrauni þar sem styrkurinn nær 0,300 mg/kg. Innan íbúðabyggðarinnar á Völlunum og í nágrenni hennar var styrkurinn alls staðar nokkuð svipaður, eða á bilinu 0,057-0,100 mg/kg með nokkuð greinilegum fallanda til austurs. Miðað við gögn frá 2010 og 2013 og samkvæmt reiknuðum mengunarstuðlum telst mengun vera *nokkur* þar sem styrkurinn er hæstur, þ.e. við iðnaðarsvæðið suðaustur af álverinu, en víðast hvar annars staðar á rannsóknarsvæðinu flokkast hún sem *vísbending* um mengun eða *engin* mengun (2. tafla, 3. mynd).

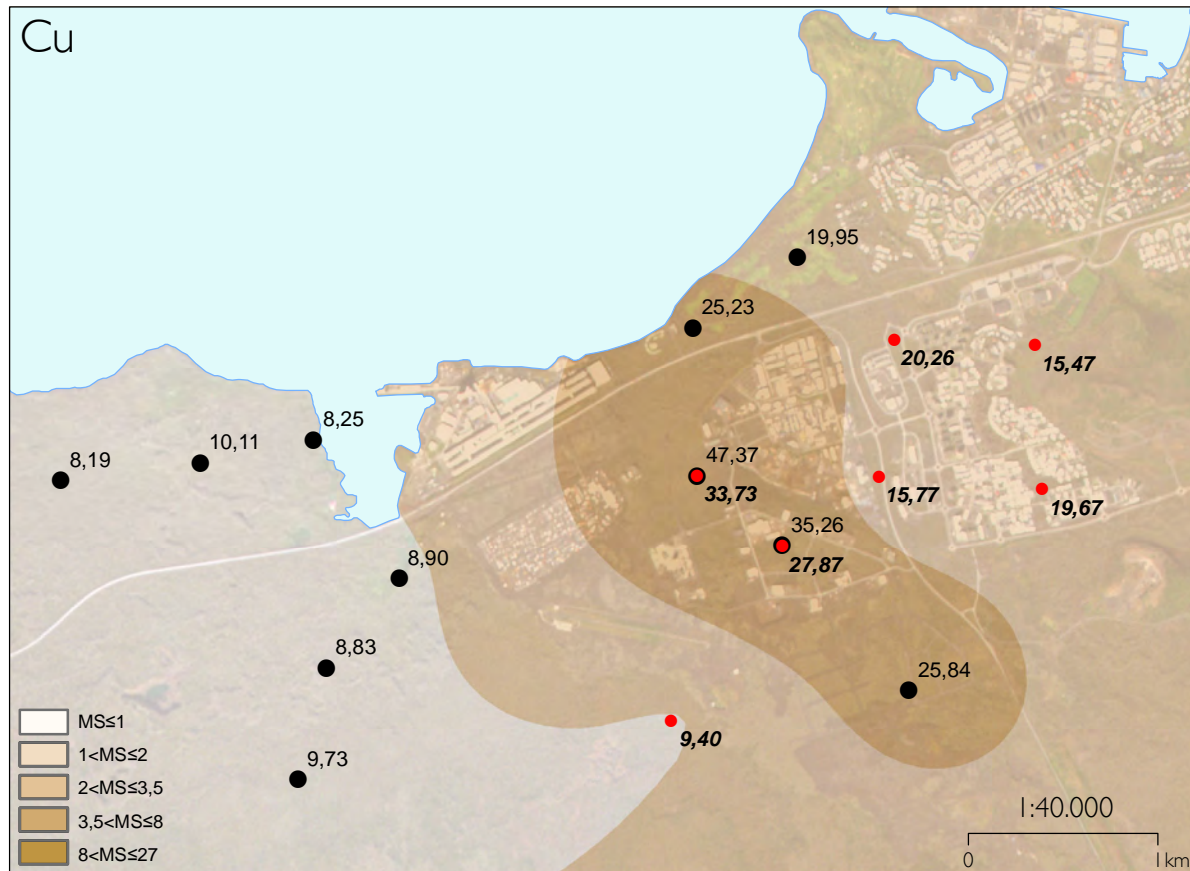
Króm (Cr)



4. mynd. Styrkur króms (mg/kg) í mosa sumarið 2010 (óbreytt letur) og 2013 (feitlettrað skáletur) á rannsóknarsvæðinu við Hafnarfjörð. Sýnatökustaðir frá 2010 eru sýndir með svörtum punktum en frá haustinu 2013 með rauðum. Mismunandi skygging táknar mismunandi mengunarflokka byggða á reiknuðum mengunarstuðlum (MS), sjá 2. töflu.

Haustið 2013 mældist styrkur króms í þeim sjö sýnum sem tekin voru á rannsóknarsvæðinu við Hafnarfjörð á bilinu 3,53-9,34 mg/kg (4. mynd). Styrkurinn var lægstur í sýni H1 sem tekið var sunnan við kvartmílubrautina suður af álverinu en hæstur í sýni 94A suðvestan við iðnaðarsvæðið í Hellnahrauni (1. áfanga). Styrkur efnisins var talsvert lægri árið 2013 en 2010 í þeim sýnum sem tekin voru á sömu stöðum bæði árin (94A og 95A) sem svarar til 42 og 27% lækkunar. Dreifingarmynstur króms árin 2010 og 2013 sýnir þungamiðju suðvestur af iðnaðarsvæðinu í Hellnahrauni og fellur styrkurinn talsvert til austurs inn í íbúðabyggðina á Völlunum en þar mældist hann lægstur 4,69 mg/kg. Miðað við reiknaða mengunarstuðla og gögn bæði frá 2010 og 2013 er mengun af völdum þessa efnis mest við iðnaðarsvæðið í Hellnahrauni (1. áfanga) og flokkast megnunin þar sem *nokkur*. Utan þessa svæðis flokkast hún sem *lítillsháttar* eða *vísbending* um mengun (2. tafla, 4. mynd).

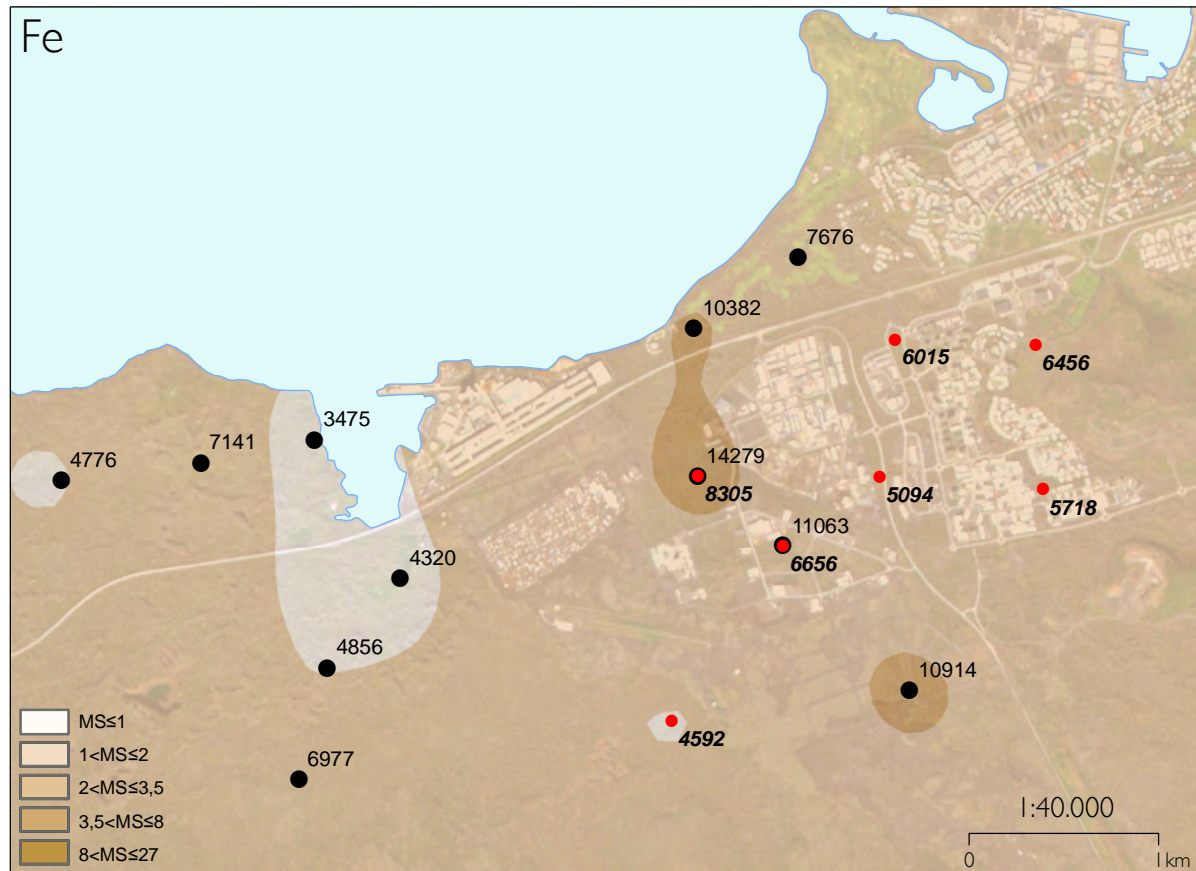
Kopar (Cu)



5. mynd. Styrkur kopars (mg/kg) í mosa sumarið 2010 (óbreytt letur) og 2013 (feitletrað skáletur) á rannsóknarsvæðinu við Hafnarfjörð. Sýnatökustaðir frá 2010 eru sýndir með svörtum punktum en frá haustinu 2013 með rauðum. Mismunandi skygging táknar mismunandi mengunarflokka byggða á reiknuðum mengunarstuðlum (MS), sjá 2. töflu.

Haustið 2013 mældist styrkur kopars í þeim sjö sýnum sem tekin voru á rannsóknarsvæðinu við Hafnarfjörð á bilinu 9,40-33,73 mg/kg (5. mynd). Styrkurinn var lægstur í sýni H1 sem tekið var sunnan við kvartmílubrautina suður af álverinu en hæstur í sýni 94A suðvestan við iðnaðarsvæðið í Hellnahrauni (1. áfanga). Styrkur efnisins var lægri árið 2013 en 2010 í þeim sýnum sem tekin voru á sömu stöðum bæði árin (94A og 95A) sem samsvarar 29 og 21% lækkingu (5. mynd). Dreifingarmynstur kopars sýnir þungamiðju á svæði sem nær frá sjónum austan við álverið á iðnaðarsvæðinu í Hellnahrauni og upp í hraunin til suðausturs. Í og við íbúðabyggðina á Völlunum mældist styrkurinn alls staðar nokkuð svipaður, eða á bilinu 15-20 mg/kg. Miðað við reiknaða mengunarstuðla og gögn bæði frá 2010 og 2013 telst mengun af völdum kopars vera *nokkur* eða *lítillsháttar* þar sem styrkurinn er hæstur. Utan þessa svæðis, svo sem innan íbúðabyggðarinnar á Völlunum, er styrkur kopars í flokknum *visbending* um mengun. Suðvestan við álverið er styrkurinn lægstur og samkvæmt mengunarkvarðanum er þar ekki um mengun að ræða af völdum kopars (2. tafla, 5. mynd).

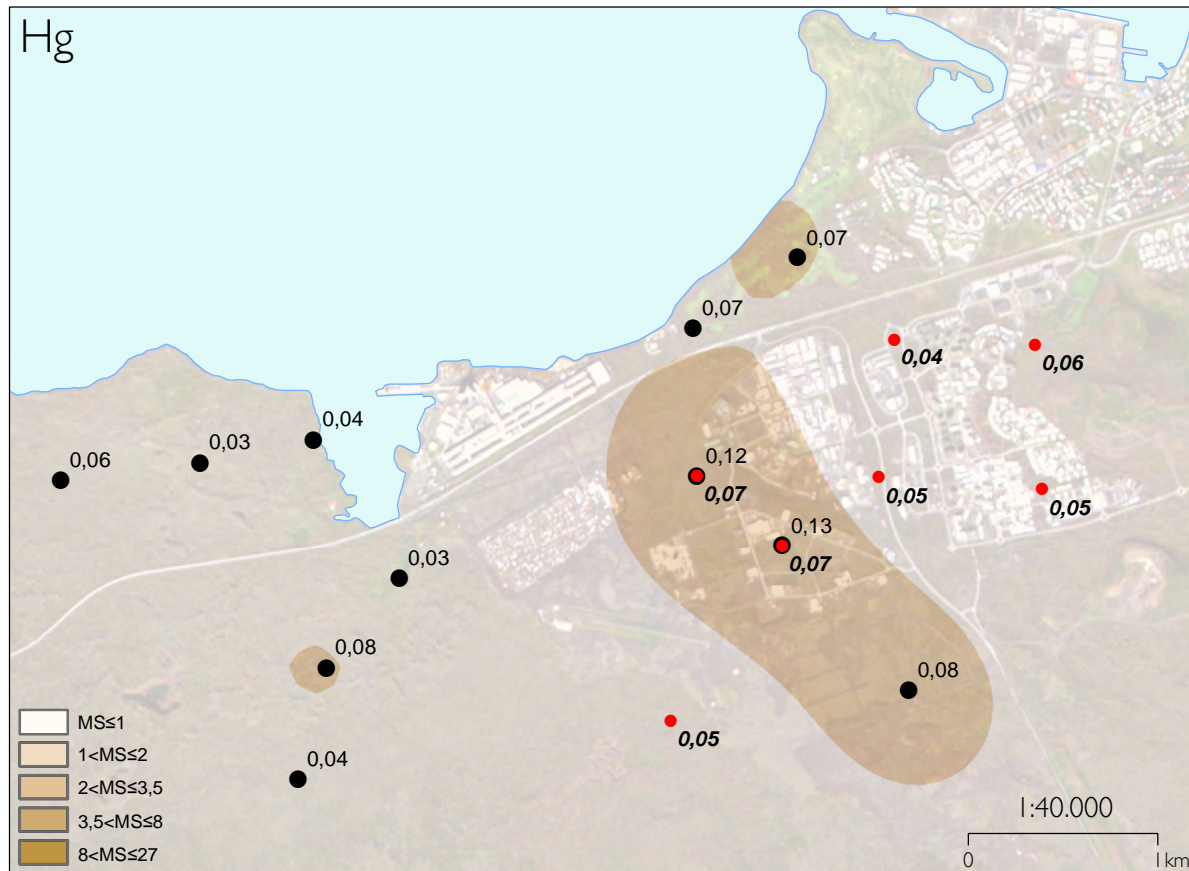
Járn (Fe)



6. mynd. Styrkur járn (mg/kg) í mosa sumarið 2010 (óbreytt letur) og 2013 (feitletrað skáletur) á rannsóknarsvæðinu við Hafnarfjörð. Sýnatökustaðir frá 2010 eru sýndir með svörtum punktum en frá haustinu 2013 með rauðum. Mismunandi skygging táknar mismunandi mengunarflokka byggða á reiknuðum mengunarstuðlum (MS), sjá 2. töflu.

Haustið 2013 mældist styrkur járn í þeim sjö sýnum sem tekin voru á rannsóknarsvæðinu við Hafnarfjörð á bilinu 4592-8305 mg/kg (6. mynd). Breytileiki milli sýna var því hlutfallslega lítill. Styrkurinn var lægstur í sýni H1 sem tekið var sunnan við kvartmílubrautina suður af álverinu en hæstur í sýni 94A suðvestan við iðnaðarsvæðið í Hellnahrauni (1. áfanga). Styrkur efnisins var mun lægri árið 2013 en 2010 í þeim sýnum sem tekin voru á sömu stöðum bæði árin (94A og 95A) sem svarar til um 40% lækkunar. Innan íbúðabyggðarinnar á Völlunum eða í næsta nágrenni hennar var styrkurinn svipaður, eða 5194-6456 mg/kg (6. mynd). Ekki kemur fram sterkt mynstur í styrk járn en hann er einna hæstur á svæði sem nær frá sjónum austan við álverið um iðnaðarsvæðið í Hellnahrauni (1. áfanga) og upp í hraunin til suðausturs. Dreifingarmynstur járn árin 2010 og 2013 sýnir þungamiðju suðvestur af iðnaðarsvæðinu í Hellnahrauni. Miðað við reiknaða mengunarstuðla og gögn bæði frá 2010 og 2013 telst mengun af völdum járn alls staðar vera *lítillsháttar* eða minni (2. tafla, 6. mynd).

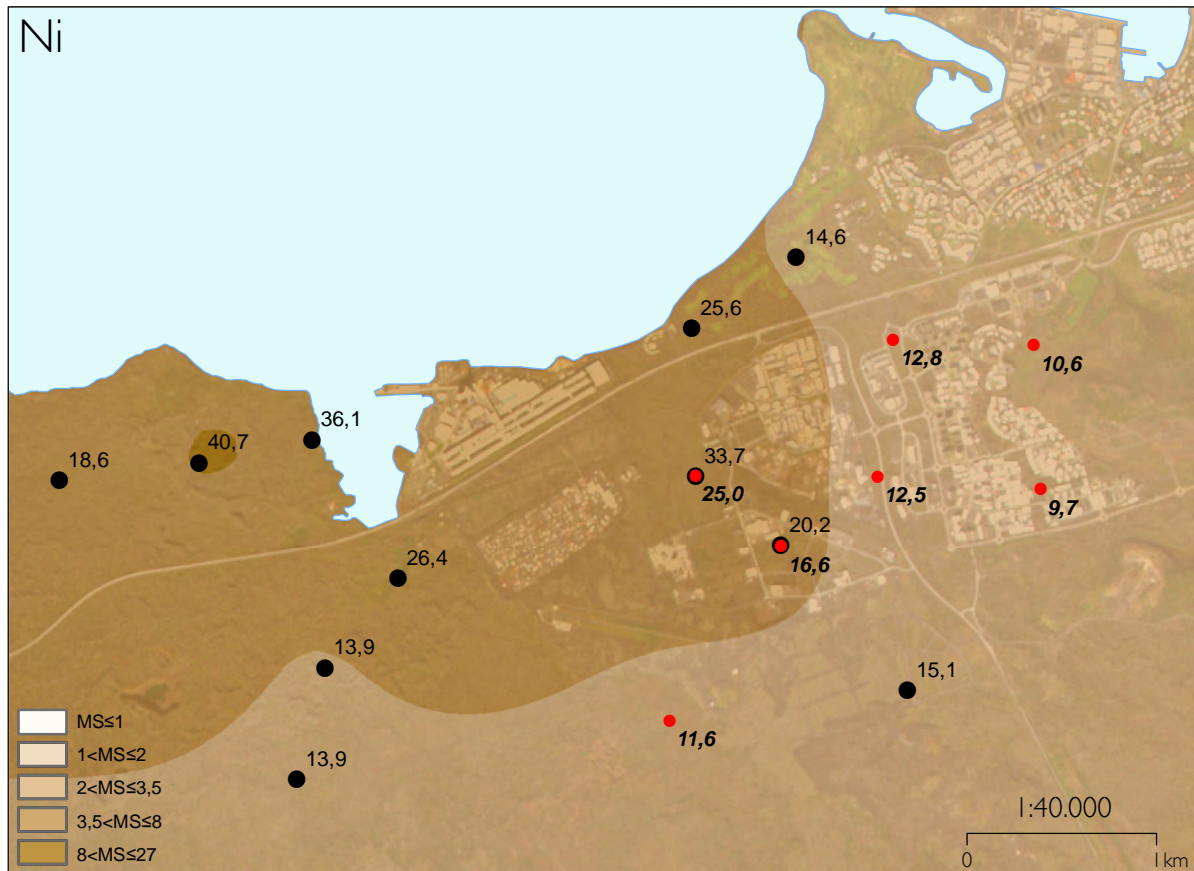
Kvikasilfur (Hg)



7. mynd. Styrkur kvikasilfurs (mg/kg) í mosa sumarið 2010 (óbreytt letur) og 2013 (feitletrað skáletur) á rannsóknarsvæðinu við Hafnarfjörð. Sýnatökustaðir frá 2010 eru sýndir með svörtum punktum en frá haustinu 2013 með rauðum. Mismunandi skygging táknar mismunandi mengunarflokka byggða á reiknuðum mengunarstuðlum (MS), sjá 2. töflu.

Haustið 2013 mældist styrkur kvikasilfurs í þeim sjö sýnum sem tekin voru á rannsóknarsvæðinu við Hafnarfjörð á bilinu 0,04-0,07 mg/kg og því mjög lítill breytileiki milli sýna (7. mynd). Styrkurinn var lægstur í sýni H3 sem tekið var við Krúvelli um 230 m sunnan við Reykjanesbraut en hæstur í sýni 94A suðvestan við iðnaðarsvæðið í Hellnahrauni (1. áfanga). Styrkur efnisins mældist mun lægri árið 2013 en 2010 í þeim sýnum sem tekin voru á sömu stöðum bæði árin (94A og 95A) sem jafngildir um 46 og 48% lækkun. Innan íbúðabyggðarinnar á Völlunum og í nágrenni hennar var styrkurinn svipaður, eða 0,04-0,06 mg/kg (7. mynd). Ekki kemur fram sterkt mynstur í dreifingu kvikasilfurs en styrkur þess er þó einna hæstur við iðnaðarsvæðið í Hellnahrauni og suður af því. Miðað við reiknaða mengunarstuðla og gögn bæði frá 2010 og 2013 telst mengun af völdum kvikasilfurs alls staðar vera í lægsta flokki (*engin* mengun) nema við iðnaðarsvæðið þar sem er *visbending* um mengun (2. tafla, 7. mynd).

Nikkel (Ni)

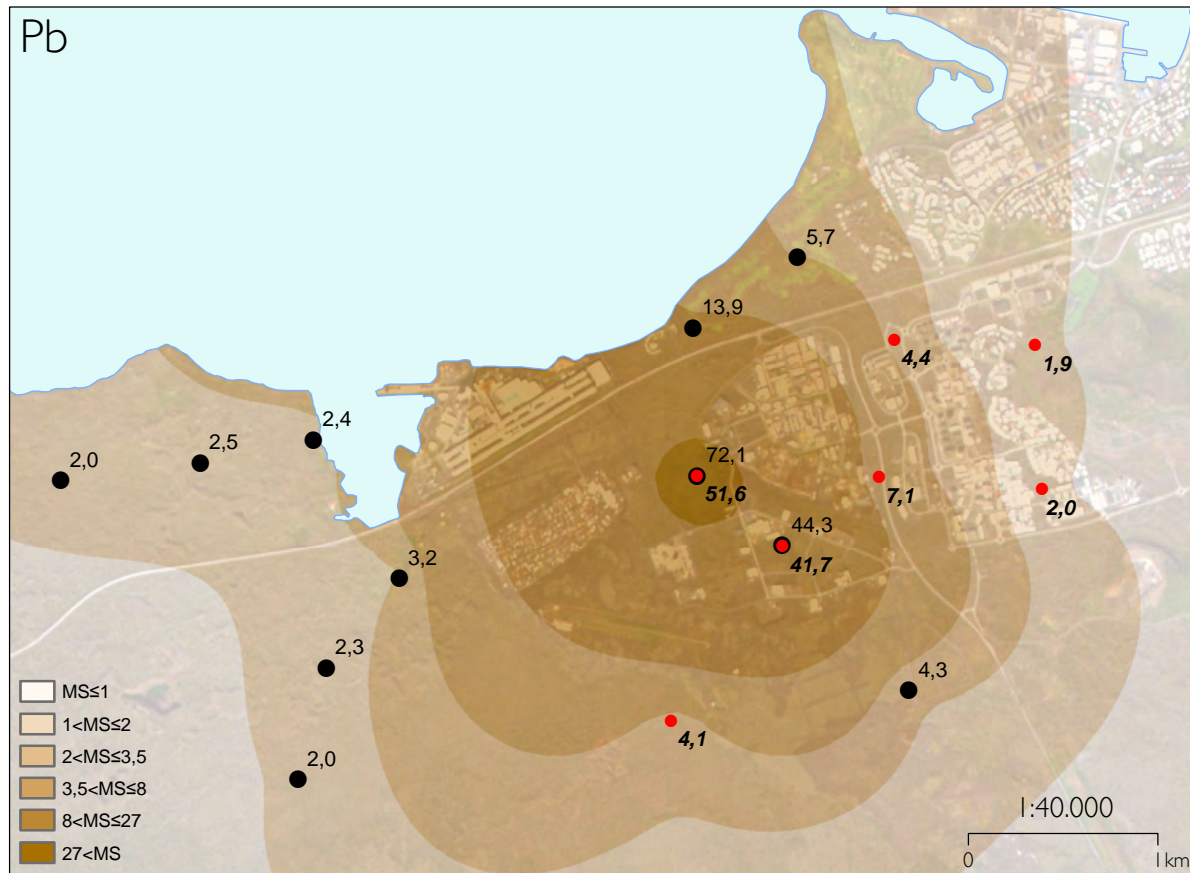


8. mynd. Styrkur nikkels (mg/kg) í mosa sumarið 2010 (óbreytt letur) og 2013 (feitletrað skáletur) á rannsóknarsvæðinu við Hafnarfjörð. Sýnatökustaðir frá 2010 eru sýndir með svörtum punktum en frá haustinu 2013 með rauðum. Mismunandi skygging táknar mismunandi mengunarflokka byggða á reiknuðum mengunarstuðlum (MS), sjá 2. töflu.

Haustið 2013 mældist styrkur nikkels í þeim sjö sýnum sem tekin voru á rannsóknarsvæðinu við Hafnarfjörð á bilinu 9,7-25,0 mg/kg. Styrkurinn var lægstur í sýnum H4 og H5 sem tekin voru austast í íbúðahverfinu á Völlunum en hæstur í sýni 94A suðvestan við iðnaðarsvæðið í Hellnahrauni (1. áfanga). Styrkur efnisins var lægri árið 2013 en 2010 í þeim sýnum sem tekin voru á sömu stöðum bæði árin (94A og 95A) sem svarar til 26 og 18% lækkunar. Innan íbúðabyggðarinnar á Völlunum og í nágrenni hennar var styrkurinn 9,7-12,8 mg/kg með fallanda til austurs.

Dreifingarmynstur nikkels árin 2010 og 2013 sýnir að styrkurinn er hæstur við álverið en fellur með aukinni fjarlægð frá því. Miðað við reiknaða mengunarstuðla og gögn bæði frá 2010 og 2013 telst mengun af völdum nikkels næst álverinu vera *veruleg* eða *nokkur*. Þegar komið er um 2 km frá verinu hefur hún lækkað það mikið að hún flokkast sem *lítillsháttar* (2. tafla, 8. mynd).

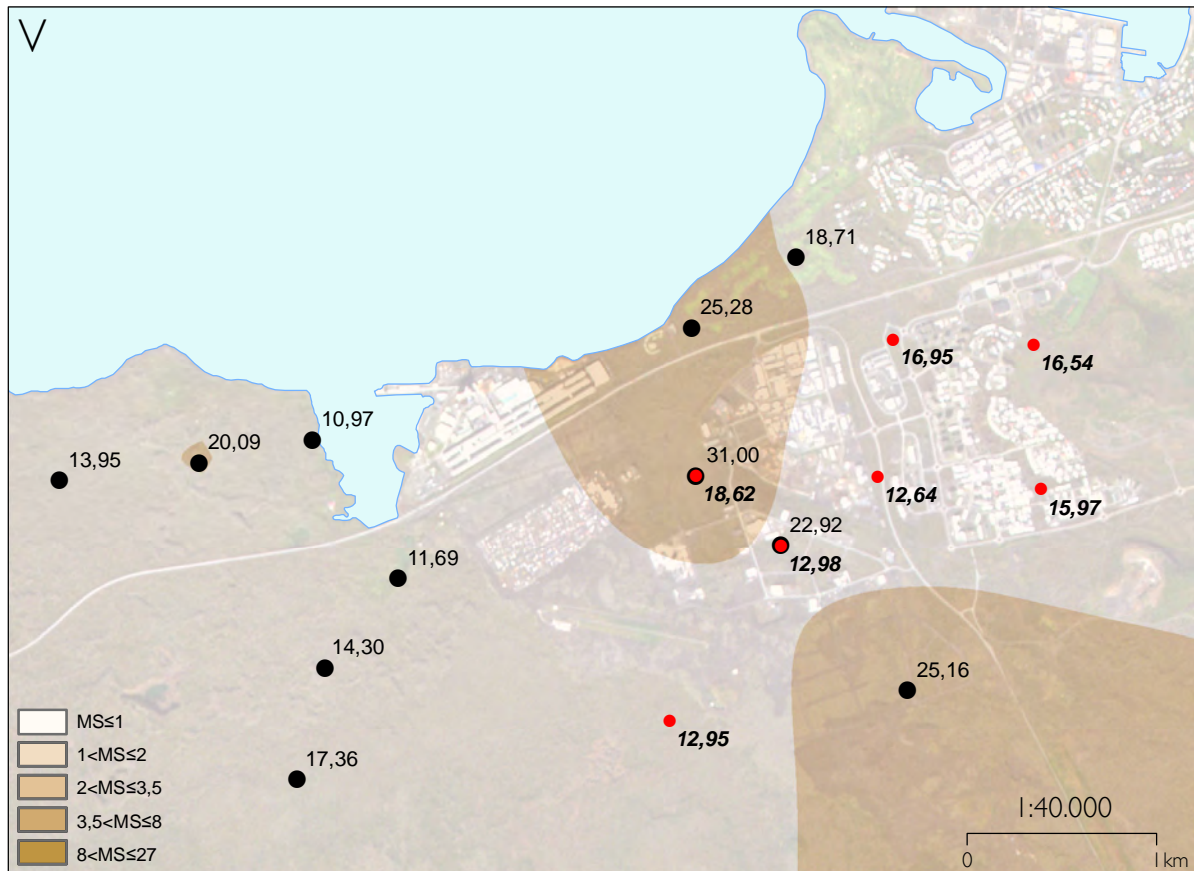
Blý (Pb)



9. mynd. Styrkur blýs (mg/kg) í mosa sumarið 2010 (óbreytt letur) og 2013 (feitletrað skáletur) á rannsóknarsvæðinu við Hafnarfjörð. Sýnatökustaðir frá 2010 eru sýndir með svörtum punktum en frá haustinu 2013 með rauðum. Mismunandi skygging táknar mismunandi mengunarflokka byggða á reiknuðum mengunarstuðlum (MS), sjá 2. töflu.

Haustið 2013 mældist styrkur blýs í þeim sjö sýnum sem tekin voru á rannsóknarsvæðinu við Hafnarfjörð á bilinu 1,9-51,6 mg/kg og því er munur á lægsta og hæsta styrk mikill eða 27-faldur (9. mynd). Styrkurinn var lægstur í sýnum H4 og H5 sem tekin voru austast í íbúðahverfinu á Völlunum en hæstur í sýni 94A suðvestan við iðnaðarsvæðið í Hellnahrauni (1. áfanga). Styrkur efnisins mældist heldur lægri árið 2013 en 2010 í þeim sýnum sem tekin voru á sömu stöðum bæði árin (94A og 95A) sem svarar til 28 og 6% lækkunar. Dreifingarmynstur blýs árin 2010 og 2013 sýnir hæstan styrk suðvestur af iðnaðarsvæðinu í Hellnahrauni (1. áfanga) en þaðan fellur styrkurinn til allra átta mjög bratt. Miðað við reiknaða mengunarstuðla og gögn bæði frá 2010 og 2013 telst mengun af völdum blýs þar sem styrkurinn er hæstur vera *mjög mikil* og *veruleg mengun* er á hringlaga svæði sem er um 2 km í þvermál umhverfis þessa þungamiðju. Þegar komið er í um 2 km fjarlægð frá henni er styrkurinn kominn niður í 2 mg/kg. Miðað við styrk blýs og reiknaða mengunarstuðla telst mengun vestast á íbúðasvæðinu á Völlunum vera *lítilsháttar* en austast fellur hún í flokkinn *visbending* um mengun (1,9-2,0 mg/kg) (2. tafla, 9. mynd).

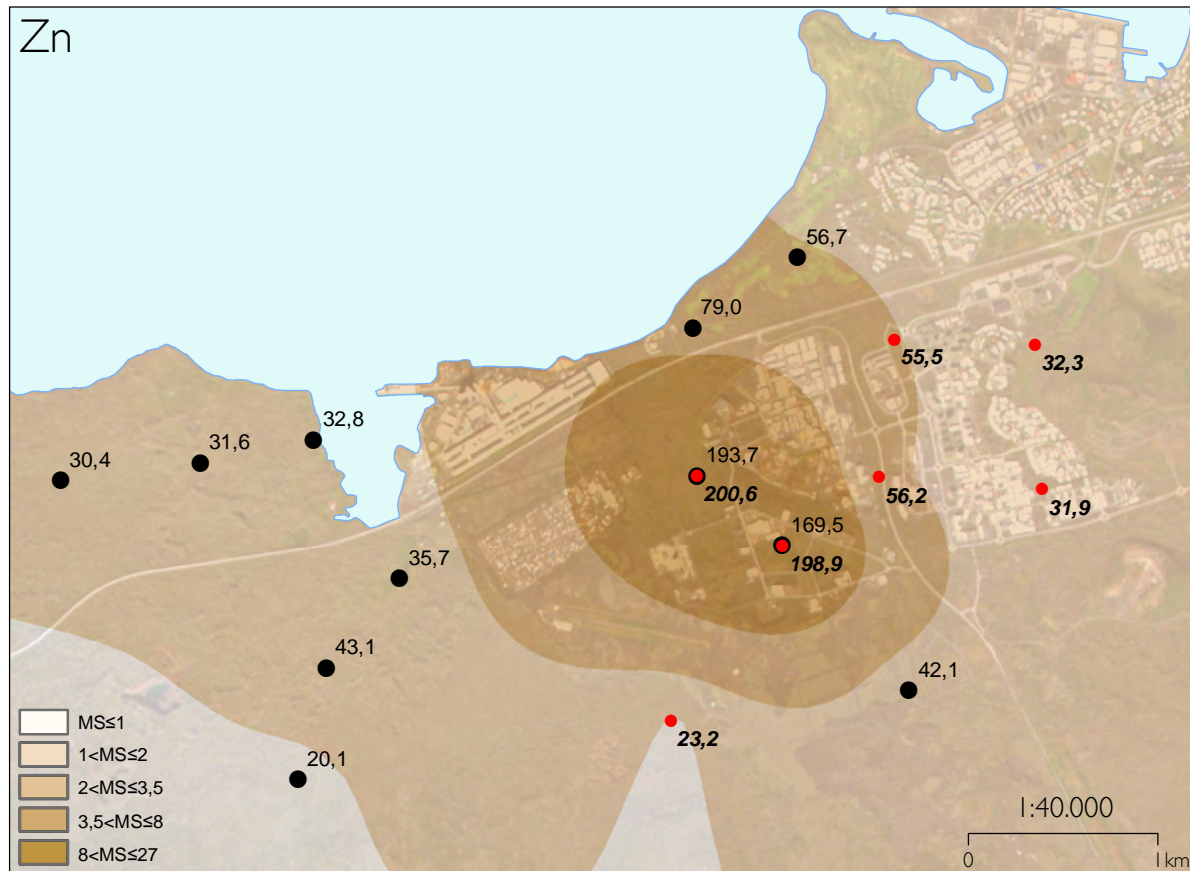
Vanadín (V)



10. mynd. Styrkur vanadíns (mg/kg) í mosa sumarið 2010 (óbreytt letur) og 2013 (feitletrað skáletur) á rannsóknarsvæðinu við Hafnarfjörð. Sýnatökustaðir frá 2010 eru sýndir með svörtum punktum en frá haustinu 2013 með raudum. Mismunandi skygging táknar mismunandi mengunarflokka byggða á reiknuðum mengunarstuðlum (MS), sjá 2. töflu.

Haustið 2013 mældist styrkur vanadíns í þeim sjö sýnum sem tekin voru á rannsóknarsvæðinu við Hafnarfjörð á bilinu 12,64-18,62 mg/kg (10. mynd). Hlutfallslegur munur á milli sýna var því lítill. Styrkurinn mældist lægstur í sýni H2 sem tekið var við Krýsuvíkurveg austast á iðnaðarsvæðinu í Hellnahrauni (1. áfanga) en hæstur í sýni 94A suðvestan við svæðið. Styrkur efnisins mældist mun lægri árið 2013 en 2010 í þeim sýnum sem tekin voru á sömu stöðum bæði árin (94A og 95A) sem svarar til 40 og 26% lækkunar. Innan íbúðabyggðarinnar á Völlunum og næst henni mældist styrkurinn á bilinu 12,64-16,95 mg/kg. Ekki kemur fram sterkt mynstur í dreifingu vanadíns á rannsóknarsvæðinu. Styrkurinn er þó einna hæstur á svæði sem nær frá sjó austan við álverið til suðaustur upp í hraunin (10. mynd). Miðað við reiknaða mengunarstuðla og gögn bæði frá 2010 og 2013 telst mengun af völdum vanadíns alls staðar vera í lægsta flokki (engin mengun) nema á áður nefndu svæði þar sem er *visbending* um mengun (2. tafla, 10. mynd).

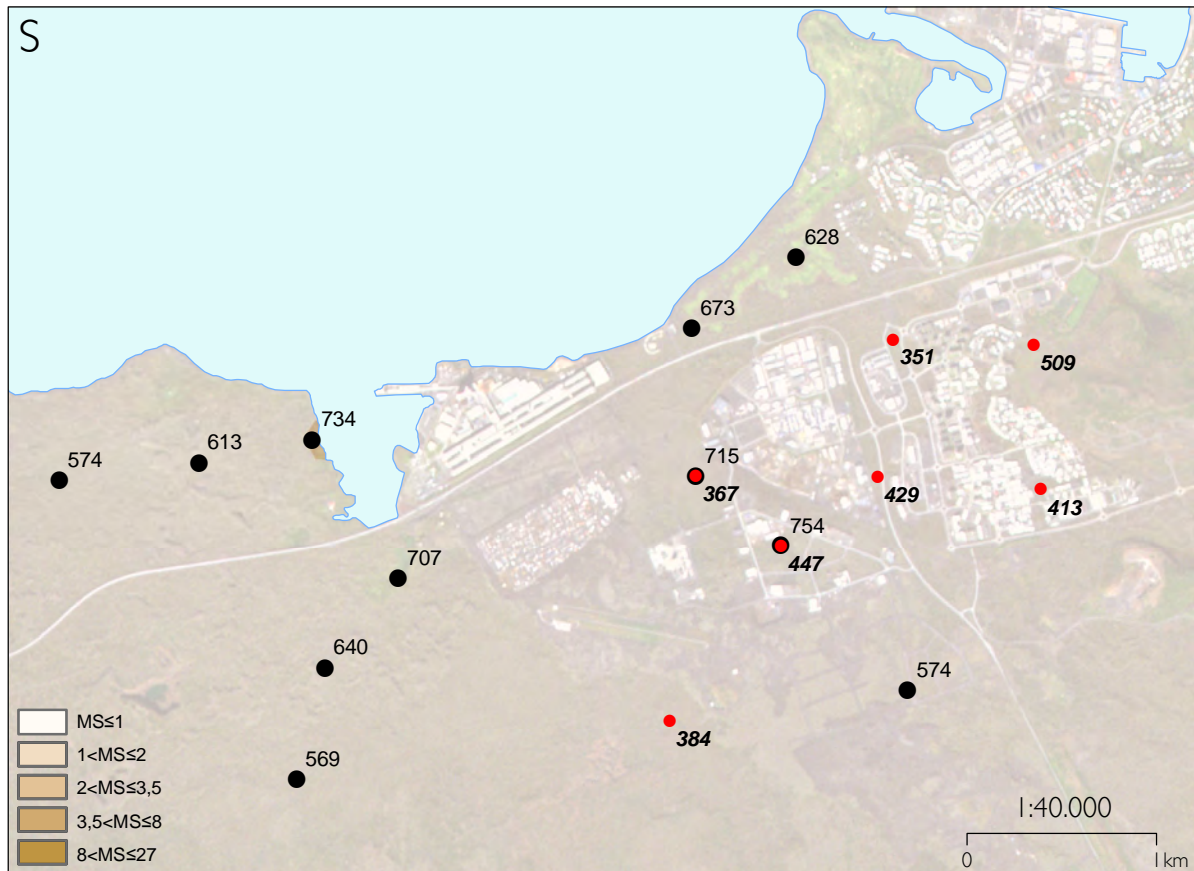
Sink (Zn)



11. mynd. Styrkur sinks (mg/kg) í mosa sumarið 2010 (óbreytt letur) og 2013 (feitletrað skáletur) á rannsóknarsvæðinu við Hafnarfjörð. Sýnatökustaðir frá 2010 eru sýndir með svörtum punktum en frá haustinu 2013 með rauðum. Mismunandi skygging táknar mismunandi mengunarflokka byggða á reiknuðum mengunarstuðlum (MS), sjá 2. töflu.

Haustið 2013 mældist styrkur sinks í þeim sjö sýnum sem tekin voru á rannsóknarsvæðinu við Hafnarfjörð á bilinu 23,2-200,6 mg/kg (11. mynd). Hlutfallslegur munur á milli sýna var því verulegur eða u.þ.b. nífaldir. Styrkurinn var lægstur í sýni H1 sem tekið sunnan við kvartmílubrautina suður af álverinu en hæstur í sýni 94A suðvestan við iðnaðarsvæðið í Hellnahrauni (1. áfanga). Styrkur efnisins mældist heldur hærrí árið 2013 en 2010 í þeim sýnum sem tekin voru á sömu stöðum bæði árin (94A og 95A) og er hækkunin um 4 og 17% (mynd). Dreifingarmynstur sinks árin 2010 og 2013 sýnir hlutfallslega háan styrk við iðnaðarsvæðið í Hellnahrauni (1. áfanga) en þaðan lækkar styrkurinn bratt til allra átta. Miðað við reiknaða mengunarstuðla og gögn bæði frá 2010 og 2013 telst mengun af völdum sinks þar sem styrkurinn er hæstur vera *nokkur* eða *lítillsháttar* á hringlaga svæði sem er um 2 km í þvermál. Utan þessa svæðis telst mengun af völdum sinks vera í næstlægsta flokki, þ.e. *vísbending* um mengun, eða í þeim lægsta, *engin* mengun. Innan íbúðabyggðarinnar á Völlunum og í jaðri hennar var styrkur sinks á bilinu 31,9-56,2 mg/kg með bröttum fallanda til austurs. Innan byggðarinnar telst mengun af völdum sinks því vera *lítillsháttar* en við vesturjaðar hennar flokkast hún sem *vísbending* um mengun (11. mynd).

Brennisteinn (S)



12. mynd. Styrkur brennisteins (mg/kg) í mosa sumarið 2010 (óbreytt letur) og 2013 (feitletrað skáletur) á rannsóknarsvæðinu við Hafnarfjörð. Sýnatökustaðir frá 2010 eru sýndir með svörtum punktum en frá haustinu 2013 með rauðum. Mismunandi skygging táknar mismunandi mengunarflokka byggða á reiknuðum mengunarstuðlum (MS), sjá 2. töflu.

Haustið 2013 mældist styrkur brennisteins í þeim sjö sýnum sem tekin voru á rannsóknarsvæðinu við Hafnarfjörð á bilinu 351-509 mg/kg (12. mynd). Hlutfallslegur munur á milli sýna var því mjög lítill. Styrkurinn mældist lægstur í sýni H3 sem tekið var við Kríuvelli um 230 m sunnan við Reykjanesbraut en hæstur í sýni H4 sem tekið var við Burknaveili austast í byggðinni á Völlunum. Styrkur efnisins mældist mun lægri árið 2013 en 2010 í þeim sýnum sem tekin voru á sömu stöðum bæði árin (94A og 95A) og nemur lækkunin 49 og 41%. Dreifingarmynstur brennisteins árin 2010 og 2013 sýnir að styrkur hans var einna hæstur næst álverinu. Innan 2 km fjarlægðar var styrkur brennisteins víðast hvar yfir 600 mg/kg en lækkar síðan yfirleitt með aukinni fjarlægð frá verinu. Tekið skal fram að sé eingöngu litið á gögn frá 2013 kemur þetta mynstur ekki fram því að ekki er greinanlegur fallandi í styrk með aukinni fjarlægð. Innan íbúðabyggðarinnar á Völlunum og í nágrenni hennar var styrkur brennisteins á bilinu 351-509 mg/kg (12. mynd). Miðað við reiknaða mengunarstuðla og gögn bæði frá 2010 og 2013 telst mengun af völdum brennisteins nánast alls staðar vera í lægsta flokki, þ.e. engin mengun (12. mynd).

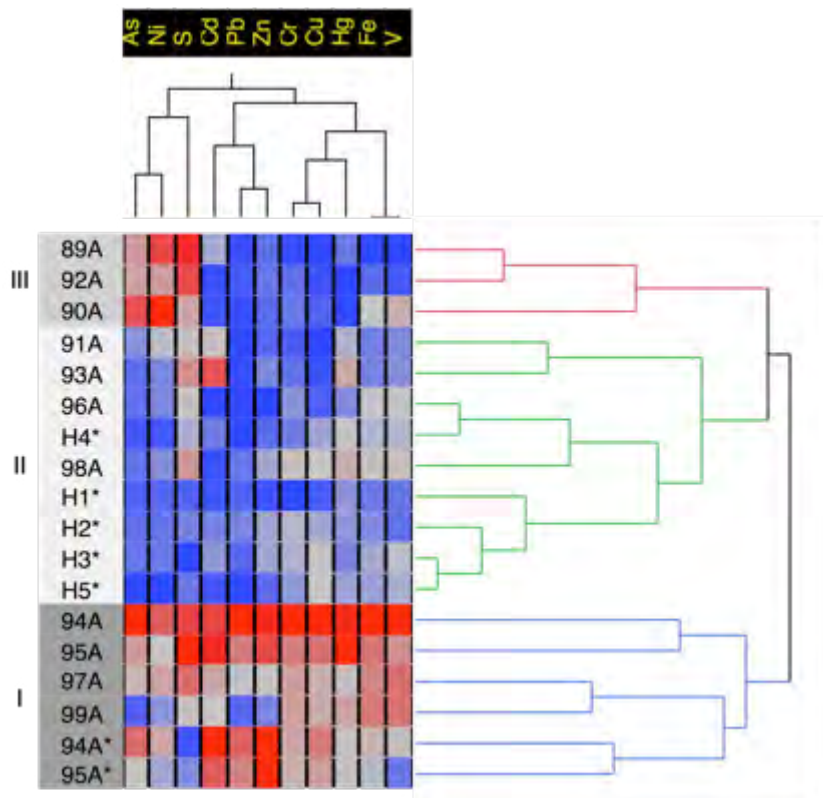
5.2 Klasagreining

Við klasagreininguna greindust sýnin 18 í þrjá meginflokka (13. mynd). Í fyrsta flokki eru sýni sem öll eru staðsett á svæði sem nær frá sjó austan við álverið og sem liggur um vestanvert iðnaðarsvæðið í Hellnahrauni (1. áfangi) á ská upp í hraunin til suðausturs. Styrkur flestra efna er þarna hlutfallslega hár, einkum í sýnum 94A og 95A sem eru skammt suðvestan við iðnaðarsvæðið í Hellnahrauni (1. áfanga) (1. mynd).

Í öðrum flokki eru sýni sem eru bæði austan og vestan þessa svæðis, þ.e. annars vegar í og við íbúðabyggðina á Völlunum og hins vegar á svæði sem nær frá hrauninum við Óttarsstaði í áttina að aðstöðu Skotíþróttafélags Hafnarfjarðar suður af kvartmílubrautinni. Sýni í öðrum flokki eiga það einkum sameiginlegt að ekkert efni er þar í mjög háum styrk.

Í þriðja flokki eru svo þrjú sýni sem öll eru skammt suðvestan og vestan við álverið bæði við Þorbjarnarstaði og vestan við Straumsvík (1. mynd). Í þessum sýnum er styrkur arsens, nikkels og brennisteins hlutfallslega hár en styrkur annarra efna ekki.

Með klasagreiningunni fást upplýsingar um hvaða efni hafa svipaða útbreiðslu. Greinast efnin í þrjá meginflokka. Í fyrsta lagi eru brennisteinn, arsen og nikkell sem öll hafa svipaða útbreiðslu, einkum tvö þau síðastnefndu. Í öðru lagi eru kadmín, blý og sink sem hafa svipað útbreiðslumynstur, sérstaklega blý og sink. Í þriðja flokki eru svo efnin króm, kopar, kvikasilfur, járn og vanadín. Þar hafa járn og vanadín nokkra sérstöðu því að þau hafa mjög svipað útbreiðslumynstur (13. mynd).



13. mynd. Niðurstöður tvíhliða klasagreiningar á styrk frumefna í mosa á rannsóknarsvæðinu við Hafnarfjörð. Sýni sem tekin voru haustið 2013 eru merkt með stjörnu. Litir gefa til kynna hlutfallslegan styrk efna. Dökkblár merkir lágan styrk en dökkraudur háan. Meginflokkarnir þrír eru táknaðir með rómverskum tölum.

6 UMRÆÐA

6.1 Breytingar á styrk milli ára

Mælingarnar haustið 2013 gefa nákvæmara mat á útbreiðslu efna á rannsóknarsvæðinu við Hafnarfjörð þar eð fjöldi og þéttleiki sýna var nú aukinn talsvert. Einkum á það við um íbúðasvæðið á Völlunum en telja verður að niðurstöðurnar þaðan gefi allgóða mynd af ákomu þungmálma þar.

Niðurstöðum um útbreiðslu efna á öllu rannsóknarsvæðinu verður þó að taka með ákveðinni gætni því að sýni voru ekki tekin á öllum sýnatökustöðum haustið 2013 en það hefði verið æskilegt til þess að fá heildaryfirlit um styrk þungmálma og brennisteins á svæðinu öllu á þeim tíma. Niðurstöðurnar benda til þess að styrkur sumra efna hafi breyst nokkuð frá því safnað var árið 2010. Í þeim sýnum sem tekin voru á sömu stöðum bæði árin (94A og 95A) mældist styrkur níu efna lægri haustið 2013 en sumarið 2010 (Pb, As, Ni, Cu, Cr, Fe, V, S og Hg) og nam lækkunin frá 17-47%. Aðeins eitt efni hækkaði í styrk á milli ára (Zn) og annað (Cd) var svipað bæði árin.

Hvort hér er um raunverulega breytingu að ræða er ekki ljóst því að ekki er unnt að draga miklar ályktanir af tveimur sýnum. Þó er rétt að taka það sem sterka vísbendingu ef breytingin er mikil og nálæg sýni sem tekin voru sumarið 2010 eru mjög frábrugðin að styrk. Á þetta einkum við um járn, kvikasilfur, vanadín og brennistein sem öll voru áberandi lægri að styrk haustið 2013 en 2010 í þeim sýnum sem mæld voru bæði árin og einnig talsvert lægri á Vallarsvæðinu en í næsta nágrenni þess árið 2010 (6., 7., 10. og 12. mynd).

Verulegar breytingar á styrk á milli mælinga á rannsóknarsvæðinu við Hafnarfjörð er ekki einsdæmi. Af efnunum ellefu hækkaði t.d. styrkur sjö (As, Cr, Cu, Fe, Hg, Ni og V) marktækt á svæðinu frá 2005 til 2010 og sum þeirra verulega, eins og króm, kopar, járn, kvikasilfur og vanadín (Sigurður H. Magnússon 2013).

6.2 Útbreiðsla efna

Arsen, nikkell og brennisteinn

Klasagreining gefur til kynna hvaða efni sýna svipað dreifingarmynstur og hana má m.a. nota sem hjálpartæki til að finna uppsprettur efna. Niðurstöðurnar sýna að arsen, nikkell og brennisteinn flokkast saman og dreifast því með svipuðum hætti (13. mynd). Á rannsóknarsvæðinu er styrkur allra þessara efna hæstur við álverið í Straumsvík en síðan fellur styrkur þeirra með aukinni fjarlægð frá verinu. Þessar niðurstöður eru í samræmi við fyrri rannsóknir í nágrenni álvera en þær benda sterklega til þess að efnin komi frá þeim þótt á landinu sé um ýmsar aðrar uppsprettur að ræða, svo sem eldgos (arsen, brennisteinn) jarðvegsrof (nikkell) og jarðhitasvæði (arsen, brennisteinn) (Sigurður H. Magnússon 2013). Álver losa umtalsvert magn af brennisteini en samkvæmt upplýsingum frá álverinu í Straumsvík losaði það árlega á bilinu 2.600 til 2.800 tonn af SO₂ árin 2009-2012 (Guðrún Þóra Magnúsdóttir og Ívar Örn Indriðason 2011). Um losun arsens og nikkels hefur minna verið fjallað en þekkt er að þessi efni koma frá álverum í nokkrum mæli (Steinnes o.fl. 2001). Miðað við íslenskar aðstæður á landinu í heild er styrkur brennisteins í mosa á rannsóknarsvæðinu í Hafnarfirði ekki hár og er hann nánast alls staðar í lægsta mengunarflokki, þ.e. *engin* mengun (12. mynd). Öðru máli gegnir um arsen og nikkell. Bæði styrkur arsens og nikkels er það hár næst álverinu að mengun flokkast þar sem *nokkur* og jafnvel *veruleg* þar sem hún er mest (2. og 8. mynd). Innan íbúðabyggðarinnar á Völlunum eins og annars staðar í svipaðri fjarlægð frá álverinu er styrkur arsens og nikkels hærri en víðast hvar á landinu (Sigurður H. Magnússon 2013) og flokkast sem *lítillsháttar* mengun.

Kadmín, blý og sink

Samkvæmt klasagreiningunni flokkast kadmín, blý og sink saman, sem sýnir að þessi efni dreifast með svipuðum hætti á rannsóknarsvæðinu, einkum þó blý og sink sem hafa mjög áþekka útbreiðslu (3. 9. og 11. mynd). Öll hafa efnin örllítið sporöskjulagaða dreifingu í stefnu NNV-SSA með þungamiðju skammt suðvestur af iðnaðarsvæðinu í Hellnahrauni (1. áfanga). Þaðan lækkar styrkur þeirra með aukinni fjarlægð frá svæðinu. Miðað við þetta útbreiðslumynstur og þá staðreynd að þessir málmar hafa frá upphafi mælinga árið 2000 og ætíð síðan (2005 og 2010) mælst í hlutfallslega háum styrk á sýnatökustöðum 94A og 95A verður að ætla að meginuppspretta þessara efna sé á iðnaðarsvæðinu í Hellnahrauni (1. áfanga). Væri uppsprettan nú aðallega á öðrum iðnaðarsvæðum, svo sem í Hellnahrauni 2. áfanga eða í Kapelluhrauni (1. áfanga), hefði útbreiðslumynstrið breyst með tíma sem ekki er raunin. Ekki er hægt að útiloka að álverið eigi hlut að máli hvað varðar blý og sink því að fram hafa komið væg áhrif til hækkunar við álver bæði á Grundartanga og í Reyðarfirði (Sigurður H. Magnússon 2013).

Miðað við niðurstöður síðustu mosarannsóknar árið 2010 (Sigurður H. Magnússon 2013) er styrkur sinks og blýs hlutfallslega hár á rannsóknarsvæðinu í Hafnarfirði. Samkvæmt rannsóknunum er styrkur þessara efna hvergi hærrí á landinu. Hæsta gildi sinks er t.d. um þrefalt hærrí í Hafnarfirði (193,7 mg/kg) en þar sem það mældist hæst annars staðar (63,3 mg/kg). Munurinn á blýi er enn meiri því að árið 2010 var hæsta gildið í Hafnarfirði (72,1 mg/kg) um 12 falt hærrí en þar sem það mældist hæst annars staðar (5,9 mg/kg). Þetta kemur einnig glöggt fram þegar flokkar mengunar eru skoðaðir. Hvað varðar kadmín og sink flokkast mengun sem *nokkur* þar sem hún er mest á rannsóknarsvæðinu (3. og 11. mynd) en mengun af völdum blýs telst *veruleg* og jafnvel *mjög mikil* þar sem hún er mest (9. mynd). Tekið skal fram að í samanburði við meginland Evrópu er styrkur blýs fyrir landið í heild mjög lágur. Ef miðað er við miðgildi fyrir einstök lönd var styrkur blýs árið 2010 t.d. hvergi lægri en hér á landi (Harmens o.fl. 2013).

Á rannsóknarsvæðinu í Hafnarfirði er sýnatökustaður 94A, þar sem hæstu gildin mældust, um 590 m frá Reykjanesbraut og um 170 m frá næstu byggingu á iðnaðarsvæðinu á Völlunum (1. áfanga). Við sýnatöku í mosaverkefninu er miðað við að sýni séu ekki tekin nær stórum vegum, þéttbýli og iðnaði en 300 m og a.m.k. 100 m frá einstökum húsum og litlum vegum (ICP Vegetation Coordination Centre 2010). Vegna útfærslu iðnaðarsvæðisins á Völlunum (1. áfanga) uppfyllir sýnatökustaður 94A ekki skilyrðið hvað varðar fjarlægð frá iðnaði þótt fjarlægð að iðnaðarsvæðinu og næstu byggingum hafi verið mun meiri árið 2000 þegar staðurinn var valinn. Þrátt fyrir þennan annmarka er fróðlegt að bera saman mældan styrk í Hafnarfirði við niðurstöður mosamælinga í Evrópu. Af 24 löndum sem þátt tóku í mosarannsóknunum árin 2010/2011 mældust hærrí blýgildi aðeins í Búlgaríu, Slóveníu, Póllandi og Rúmeníu. Hæstu gildi fyrir blý á hinum Norðurlöndunum; Færeyjum, Finnlandi, Svíþjóð og Noregi, sem þátt tóku í rannsókninni árið 2010, voru talsvert lægri eða á bilinu 2,1-20,8 mg/kg (Harmens o.fl. 2013).

Niðurstöðurnar sýna hins vegar að dreifing efnanna virðist fremur takmörkuð á rannsóknarsvæðinu og styrkurinn lækkar mjög bratt með aukinni fjarlægð frá uppsprettunni. Þetta á einkum við um blý og sink. Austast á íbúðasvæðinu á Völlunum er styrkur blýs u.þ.b. einn þriðji af því sem hann er austast á iðnaðarsvæðinu (9. mynd). Hvað varðar sink er styrkurinn u.þ.b. helmingi lægri austast í íbúðabyggðinni (11. mynd).

Þótt ekki sé hægt að draga miklar ályktanir um breytingar á styrk efna frá 2010 til 2013 út frá þeim sýnum sem tekin voru á sömu stöðum bæði árin (94A og 95A) er athyglisvert að kadmín, blý og sink eru einu efnin sem virðast ekki breytast að ráði á þessum tíma (2.-12. mynd). Ef þetta er rétt hefur ekki dregið úr losun þeirra á svæðinu síðustu árin. Öll önnur efni hafa lækkað í styrk frá 2010 til 2013 á þessum tveimur sýnatökustöðum, sum mjög mikið.

Króm, kopar, kvikasilfur, járn og vanadín

Á rannsóknarsvæðinu hafa efnin króm, kopar, kvikasilfur, járn og vanadín nokkuð svipað útbreiðslumynstur (13. mynd). Styrkur þeirra er hæstur á svæði sem nær frá sjó austan við álverið á ská til suðsuðausturs upp í hraunin (4.-5. og 10. mynd). Af þessum efnum hafa járn og vanadín mjög líka útbreiðslu og mikil samsvörun er einnig í útbreiðslu króms og kopars. Samkvæmt reiknuðum mengunarstuðlum telst mengun af völdum þessara efna þarna vera *nokkur* (kopar) og jafnvel *veruleg* (króm). Fyrri rannsóknir hér á landi hafa sýnt að styrkur allra þessara efna nema kvikasilfurs tengjast áfoki og er styrkur þeirra að jafnaði hærri innan gosbeltisins en utan þess (Rühling o.fl. 1992, Rühling og Steinnes 1998, Sigurður H. Magnússon 2013). Þetta á sérstaklega við um járn en styrk þess í mosa má jafnvel nota til að meta áfok (Sigurður H. Magnússon 2013). Líklegt er að jarðrask á svæðinu, svo sem vega- og gatnagerð og umferð á malarvegum, geti hækkað styrk þessara efna í mosa.

Útbreiðslumynstur allra efnanna fjögurra á rannsóknarsvæðinu gefur hins vegar tilefni til að álykta að uppspretta þeirra sé ekki eingöngu úr áfoki eða jarðraski en megi að nokkru leyti rekja til iðnaðarstarfsemi á Völlunum (1. áfanga). Þetta á einkum við um króm og kopar. Þótt áfok sé víða mikið var styrkur kopars árið 2010 t.d. hvergi hærri á landinu en í sýnunum tveimur sem tekin voru suðaustan við iðnaðarsvæðið (94A og 95A) og styrkur króms í þessum sýnum var með því allra hæsta á landinu. Ekki er hægt að útiloka að starfsemi álversins hafi einhver áhrif til hækunar því að niðurstöður frá Grundartanga og Reyðarfirði gefa vísbendingu um að eitthvað berist frá starfsemi verksmiðjanna þar (Sigurður H. Magnússon 2013).

Mælingar á styrk þessara efna haustið 2013 sýna nokkurn mun á íbúðasvæðinu á Völlunum og iðnaðarsvæðinu í Hellnahrauni, einkum hvað varðar króm og kopar en styrkur efnanna er um tvöfalt hærri á iðnaðarsvæðinu en austast í íbúðabyggðinni. Þessi munur er miklu minni fyrir járn og kemur ekki fram fyrir vanadín sem styrkir þá skoðun að nokkuð af krómi og kopar berist frá iðnaðarstarfsemi í Hellnahrauni.

7 ÁLYKTANIR OG LOKAORÐ

Ljóst er að margir þættir geta haft áhrif á styrk þungmálma í mosa á rannsóknarsvæðinu í suðurjaðri Hafnarfjarðar. Þar er veruleg umferð bíla, vega- og gatnagerð hefur verið mikil og byggingaframkvæmdir umfangsmiklar á síðustu árum. Á svæðinu hefur verið rekið álver frá árinu 1970 auk þess sem margs konar öðrum iðnaði hefur þar verið komið á fót eftir 1985. Svæðið er í jaðri gosbeltisins en áfok þaðan getur haft talsverð áhrif á styrk sumra efna í mosa.

Á rannsóknarsvæðinu eru greinilega tvær meginuppsprettur þungmálma. Annars vegar er álverið í Straumsvík sem losar arsen og nikkell auk brennisteins. Hin meginuppsprettan er iðnaðarsvæðið í Hellnahrauni (1. áfangi) en þar er uppspretta nokkurra málma, einkum þó sinks og blýs. Dreifing þeirra er þó frekar staðbundin og að mestu bundin við iðnaðarsvæðið sjálft. Hún nær þó í nokkrum mæli út fyrir það, m.a. inn í íbúðabyggðina á Völlunum. Vegna nálægðar íbúðabyggðar við iðnaðarsvæðið er ástæða til að fylgjast vel með styrk þungmálma á svæðinu.

Miðað við niðurstöður mælinga á styrk þungmálma á rannsóknarsvæðinu og almennar upplýsingar um eiginleika og áhrif þeirra málma sem mælast í einna hæstum styrk í mosa virðist blý vera það efni sem einkum þarf að huga að (9. mynd) (2. viðauki) en blý getur haft áhrif á menn jafnvel í tiltölulega lágum styrk (Meyer o.fl. 2008). Í þessu sambandi er rétt að minna á þrjú atriði sem talin eru mikilvæg til að fyrirbyggja eiturverkun af völdum blýs en það er a) að finna uppsprettur efnisins, b) koma í veg fyrir eða hafa stjórn á losun þess og c) að vakta umhverfisáhættu og vahrif af þess völdum (Meyer o.fl. 2008).

8 ÞAKKIR

Verkefnið var unnið fyrir Hafnarfjarðarbæ og í samráði við starfsmenn þar og Heilbrigðiseftirlit Hafnarfjarðar- og Kópavogssvæðis. Mattias Lidqvist hjá IVL Svenska Miljöinstitutet í Gautaborg í Svíþjóð sá um efnagreiningar.

Að gerð þessarar skýrslu hafa auk höfundar komið Hans H. Hansen sem teiknaði kort og Borgþór Magnússon og Ásdís Birna Stefánsdóttir sem lásu yfir handrit og færðu margt til betri vegar. Arngrímur Thorlacius veitti góð ráð við lýsingu á aðferðum við efnagreiningar. Öllum eru færðar bestu þakkir.

9 HEIMILDIR

- Bellinger, D.C. 2005. Teratogen update: lead and pregnancy. Birth defects research. Part A. *Clinical and molecular teratology* 73: 409-420.
- 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: 61-71.
- Berglund, A.M., P.K. Ingvarsson, H. Danielsson og N.E. Nyholm 2010. Lead exposure and biological effects in pied flycatchers (*Ficedula hypoleuca*) before and after the closure of a lead mine in northern Sweden. *Environmental Pollution* 158: 1368-1375.
- Birgitta María Vilbergsdóttir, Elín Ólafsdóttir og Karl Einar Óskarsson 2009. *Reykjanesbrautin fyrr og nú*. Lokaverkefni í ökukennaranámi til B-réttinda, Háskóla Íslands, Reykjavík.
- Branvall, M., R. Bindler, O. Emteryd og I. Renberg 2001. Four thousand years of atmospheric lead pollution in northern Europe: a summary from Swedish lake sediments. *Journal of Paleolimnology* 25: 421-435.
- Cempel, M. og G. Nickel 2006. Nickel: a review of its sources and environmental toxicology. *Polish Journal of Environmental Studies* 15: 375-382.
- Cheng, H., and Y. Hu 2010. Lead (Pb) isotopic fingerprinting and its applications in lead pollution studies in China: a review. *Environmental Pollution* 158: 1134-1146.
- Cullen, W.R. og K.J. Reimer 1989. Arsenic speciation in the environment. *Chemical Reviews* 89: 713-764.
- Danielsson, H. og G.P. Karlsson 2011. *Metaller i mossa 2010*. Gautaborg, Svíþjóð: IVL, Svenska Miljöinstitutet AB. <http://www.ivl.se/download/18.50a499dd132037d524e80007844/B1994.pdf> [skoðað 21.2.2014].
- 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. *Science of the Total Environment* 300: 115-127.
- Flóra Íslands. *Tildurmosi*. Flóra Íslands. <http://www.floraislands.is/MOSAR/hylocspl.html> [skoðað 21.2.2014]
- Gonçalves, E.P.R., H.M.V.M. Soares, R.A.R. Boaventura, A.A.S.C. Machado og J.C.G. Esteves 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: 143-156.

- Guðrún Þóra Magnúsdóttir og Ívar Örn Indriðason, ritstj. 2011. *Sjálfbæriskýrsla ISAL 2012*. Hafnarfjörður: Rio Tinto Alcan á Íslandi. http://www.riotintoalcan.com/documents/Rio_Tinto_Alcan_Sjalfbaerniskyrsla_2012_FINAL.pdf [skoðað 21.2.2014]
- Harmens, H., D. Norris and the participants of the moss survey 2008. *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.
- Harmens, H., D. Norris, G. Mills and the participants of the moss survey 2013. *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., G. Mills, F. Hayes, P. Williams, L. De Temmerman and the participants of ICP Vegetation 2005. *Air pollution and vegetation*. ICP Vegetation Annual Report 2004/2005. Bangor: ICP Vegetation Coordination Centre, Centre for Ecology and Hydrology.
- Hulskotte, J.H., H.A. van der Gon, A.J. Visschedijk og M. Schaap 2007. Brake wear from vehicles as an important source of diffuse copper pollution. *Water Science and Technology* 56: 223-231.
- ICP Vegetation Coordination Centre 2010. *Heavy Metals in European Mosses: 2010 Survey. Monitoring manual*. Bangor: ICP Vegetation Coordination Centre. http://icpvegetation.ceh.ac.uk/manuals/documents/uneceheavymetalsmossmanual2010popsadaptedfinal_220510_.pdf [skoðað 22.2.2014]
- International Chromium Development Association 2007. Health Safety and Environment Guidelines for Chromium. Revision 4. París: International Chromium Development Association.
- Johansson, C., M. Norman og L. Burman 2009. Road traffic emission factors for heavy metals. *Atmospheric Environment* 43: 4681-4688.
- Klaminder, J., R. Bindler, O. Emteryd, P. Appleby og H. Grip 2006. Estimating the mean residence time of lead in the organic horizon of boreal forest soils using 210-lead, stable lead and a soil chronosequence. *Biogeochemistry* 78: 31-49.
- Landsnet 2007. *Frumrannsóknir á gróðurskemmdum við háspennumöstur á Suðvesturlandi*. Unnið af Rannsóknarstofu UmhverfisTækni hjá Línuhönnun. Reykjavík: Landsnet.
- Leonard, A 1991. Arsenic. Í Merian, E., ritstj. *Metals and Their Compounds in the Environments: Occurrence, Analysis, and Biological Relevance*. 2. útg., bls. 751-773. Weinheim: VCH.
- Matschullat, J., R. Ottenstein og C. Reimann. 2000. Geochemical background – can we calculate it? *Environmental Geology* 39: 990-1000.
- mbl.is 2013. *Taka niðurstöður skýrslunnar alvarlega*. http://www.mbl.is/frettir/innlent/2013/10/18/taka_nidurstodur_skyrslunnar_alvarlega [skoðað 21.2.2014]
- Meyer, P., M. Brown og H. Falk 2008. Global approach to reducing lead exposure and poisoning. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research* 659: 166-175.
- Needleman, H. 2004. Lead poisoning. *Annual review of medicine* 55: 209-222.
- 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.

- Pokrovski, G.S., I.V. Zakirov, J. Roux, D. Testemale, J.-L. Hazemann, A.Y. Bychkov og G.V. Golikova 2002. Experimental study of arsenic speciation in vapor phase to 500°C: implications for As transport and fractionation in low-density crustal fluids and volcanic gases. *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 66: 3453-3480.
- Reimann, C., J. Matschullat, M. Birke og R. Salminen 2009. Arsenic distribution in the environment: the effects of scale. *Applied Geochemistry* 24: 1147-1167.
- Rio Tinto Alcan. *Upphafid*. <http://www.riotintoalcan.is/?pageid=27> [skoðað 20.2.2014]
- RÚV 2013. *Hafnfirðingar grípa til mengunarvarna*. <http://www.ruv.is/frett/hafnfirðingar-gripa-til-mengunarvarna> [skoðað 21.2.2014]
- Rühling, Å., B. Brumelis, N. Goltsova, K. Kvietkus, 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.
- Rühling, Å. og E. Steinnes 1998. Atmospheric heavy metal deposition in Europe 1995-1996. *NORD* 1998:15.
- SAS Institute Inc. 2010. *Using JMP 9*. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Signorelli, S. 1997. Arsenic in volcanic gases. *Environmental Geology* 32: 239-244.
- Sigurður H. Magnússon 2002. Þungmálmar í mosa í nágrenni álversins í Straumsvík árið 2000. Náttúrufræðistofnun Íslands, NÍ-02010. Reykjavík: Náttúrufræðistofnun Íslands.
- Sigurður H. Magnússon og Björn Thomas 2007. *Heavy metals and sulphur in mosses around the aluminium smelter in Straumsvík in 2005*. Náttúrufræðistofnun Íslands, NÍ-07003. Reykjavík: Náttúrufræðistofnun Íslands.
- Sigurður H. Magnússon 2013. Þungmálmar og brennisteinn í mosa á Íslandi 1990-2010: Áhrif iðjuvera. Náttúrufræðistofnun Íslands, NÍ-13003. Garðabær: Náttúrufræðistofnun Íslands.
- Steinnes E., T. Berg, T.E. Sjøbakk og M. Vadset 2001. *Nedfall av tungmetaller rundt utvalgte norske industrier. Studier ved analyse av mose*. Statlig program for forurensningsovervåking. Rapport 831. Oslo: Statens forurensningstilsyn.
- Steinnes, E., T. Berg, H.T. Uggerud og K.A. Pfaffhuber 2011. *Atmosfærisk nedfall av tungmetaller i Norge. Landsomfattende undersøkelse i 2010*. Trondheim: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. <http://www.miljodirektoratet.no/old/klif/publikasjoner/2859/ta2859.pdf> [skoðað 21.2.2014]
- Suchara, I., M. Florek, B. Godzik, B. Mankovská, G. Rabnecz, J. Sucharová, S. Tuba og P. Kapusta 2007. *Mapping of main sources of pollutants and their transport in the Visegrad space. Part II: fifty three elements*. Expert group on bio-monitoring the atmospheric deposition loads in the Visegrad countries. Pruhonice: KLEMO Zvolen.
- Tyrovola, K. og N.P. Nikolaidis 2009. Arsenic mobility and stabilization in topsoils. *Water research* 43: 1589-1596.
- UNECE, United Nations Economic Commission for Europe. <http://www.unece.org/env/lrtap/workinggroups/wge/welcome.html> [skoðað 21.2.2014]
- Wikipedia – The Free Encyclopedia. *Arsenic*. <http://en.wikipedia.org/wiki/Arsenic> [skoðað 21.2.2014]
- Wikipedia – Frjálsa alfræðiritið. *Arsen*. <http://is.wikipedia.org/wiki/Arsen> [skoðað 21.2.2014]

10 VIÐAUKAR

1. viðauki. Staðsetning og helstu einkenni á sýnatökustöðum á rannsóknarsvæðinu við Hafnarfjörð.

Sýnatökustaður	Lengd	Breidd	Gróður- og landgerð	Ríkjandi háplöntutegundir	Athugasemdir
89A	-22.04952	64.04426	Graslendi	Hálíngresi, ilmreyr, blávingull og krossmaðra	Við Þýskubúð. Mosi nokkuð skemmdur 2010
90A	-22.06167	64.04291	Graslendislautir	Hálíngresi, blávingull, lógresi, ilmreyr og krossmaðra	Mosi nokkuð skemmdur 2010
91A	-22.07667	64.04177	Grasgefinn krækilyngsmói	Krækilyng, túnvingull, blávingull og lógresi	Mosi nokkuð skemmdur 2010
92A	-22.03952	64.03789	Graslendi	Hálíngresi, blávingull, krossmaðra og gulmaðra	Við eyðibýlið Þorbjarnarstaði. Mosi mikið skemmdur 2010
93A	-22.04696	64.03350	Graslendislautir með krækilyngi	Hálíngresi, krækilyng, blávingull og bugðupuntur	Mosi nokkuð skemmdur 2010
94A	-22.00786	64.04342	Krækilyngs-beitilyngslautir	Krækilyng, beitilyng, sortulyng og bugðupuntur	Mjög lítið af tildurmosa, safnað á um 50x70 m svæði
95A	-21.99829	64.04030	Beitilyngs-krækilyngslautir	Beitilyng, krækilyng, sortulyng, birki og bugðupuntur	Allmikið af tildurmosa
96A	-22.04945	64.02813	Grasgefnar krækilyngs-beitilyngslautir	Krækilyng, beitilyng, bugðupuntur, hálíngresi og bláberjalýng	
97A	-22.00908	64.05042	Grasgefnar krækilyngs-beitilyngslautir	Krækilyng, beitilyng, blávingull, bugðupuntur	Mosi nokkuð skemmdur 2010
98A	-21.99816	64.05399	Rýrar graslendislautir með krækilyngi	Hálíngresi, krossmaðra, krækilyng og þursaskegg	Mosi nokkuð skemmdur 2010
99A	-21.98386	64.03375	Lyngmói með birki	Beitilyng, birki, krækilyng og sortulyng	Lítið af tildurmosa
H1	-22.00948	64.03175	Grasgefnar krækilyngs-beitilyngslautir	Bugðupuntur, krækilyng, beitilyng og gulmaðra	Talsvert af tildurmosa, einkum safnað í lautum
H2	-21.98824	64.04377	Beitilyngs-krækilyngslautir	Beitilyng, krækilyng, bugðupuntur og sortulyng	Aðallega safnað í lautum
H3	-21.98725	64.05034	Beitilyngs-krækilyngslautir	Beitilyng, krækilyng, bugðupuntur og sortulyng	Aðallega safnað í lautum
H4	-21.97203	64.05039	Grasgefinn krækilyngs-beitilyngsmói	Krækilyng, túnvingull, beitilyng, blávingull og hálíngresi	Safnað undir hraunbrík á um 70 m kafla
H5	-21.97053	64.04357	Beitilyngs-krækilyngslautir	Beitilyng, krækilyng, sortulyng og sauðamergur	Lítið af tildurmosa, safnað í lautum á um 70x30 m svæði

2. viðauki. Þungmálmar og áhrif þeirra

Af þeim efnum sem vöktuð hafa verið með mælingum á mosa á rannsóknarsvæðinu í Hafnarfirði eru það einkum sink og blý sem mælast þar í háum styrk. Önnur efni sem finnast á svæðinu í nokkrum mæli eru nikkell, kopar, króm og arsen. Margir þungmálmar eru nauðsynlegir lífverum í lágum styrk en verða eittraðir fari styrkur þeirra yfir ákveðin mörk. Hér verður gefið stutt yfirlit yfir helstu uppsprettur þessara sex efna og áhrif þeirra á lífverur.

Arsen

Arsen finnst í mörgum steindum og er efnið venjulega tengt brennisteini og málmum (Wikipedia – The Free Encyclopedia). Arsen er eittraður málmungur sem er til í þremur fjölgervingsformum; gulur, svartur og grár (Wikipedia – Frjálsa alfræðiritið). Uppsprettur arsens sem rekja má til umsvifa manna eru m.a. námavinnsla, málmbræðsla, ýmis varnarefni í landbúnaði og kolavinnsla (Cullen og Reimer 1989, Reimann o.fl. 2009). Arsentríoxíð (As_2O_3) er notað við framleiðslu á keramíki, gleri, í raftæki, litarefni, efni til að hindra vöxt ásæta, í snyrtivörur, flugelda og koparmálmblöndur (Danielsson og Karlsson 2011 sjá Leonard 1991, Reimann o.fl. 2009). Náttúrlegar uppsprettur arsens eru m.a. eldgos og jarðhitasvæði (Signorelli 1997, Pokrovski o.fl. 2002, Tyrovola og Nikolaidis 2009). Af uppsprettum arsens hér á landi má nefna eldvirkni, jarðhitasvæði og álver (Sigurður H. Magnússon 2013).

Arsen hindrar starfsemi mikilvægra ensíma og er miðlungi eittrað fyrir plöntur, en mjög eittrað og krabbameinsvaldandi fyrir spendýr (Harmens o.fl. 2008). Eiturverkun arsens er háð því á hvaða formi efnið er. Ólífrænt arsen er almennt talið eittraðra en lífrænt, og þriggilt arsen (III) talið eittraðast (Harmens o.fl. 2008).

Króm

Króm er málmur sem talsvert mikið er af í jarðskorpunni. Króm finnst í mismunandi gerðum, algengast er tví-, þrí- og sexgilt króm. Króm er notað við framleiðslu á málmblöndum, í krómhúðun, til framleiðslu ryðvarnarefna, til sútunar leðurs og til að gagnverja timbur gegn fúa (International Chromium Development Association 2007). Af mannavöldum losnar króm einkum út í andrúmsloft við brennslu jarðefnaeldsneytis, námuvinnslu og við vinnslu á krómríku málmgrýti, frá málm- og efnaíðnaði og sútunarstöðvum (International Chromium Development Association 2007, Suchara o.fl. 2007). Í andrúmslofti binst króm aðallega við agnir og fellur síðan til jarðar með úrkomu eða sem þurr ákoma (e. dry deposition).

Hér á landi er styrkur króms í mosa hæstur á gosbeltinu og endurspeglar miklu frekar áfok en að um annars konar mengun sé að ræða (Sigurður H. Magnússon 2013).

Krómmálmur og króm-III efnasambönd eru yfirleitt ekki talin heilsuspillandi, en króm-VI er eittraðra fyrir lífverur. Þótt króm sé stundum losað sem króm-VI, afoxast það auðveldlega í króm-III, að minnsta kosti við náttúrlegar aðstæður í jarðvegi. Króm-VI getur valdið krabbameini í fólki og einnig valdið ofnæmi hjá mönnum (Harmens o.fl. 2008).

Kopar

Kopar er mjúkur málmur með góða raf- og varmaleiðni. Málmbræðsla og brennsla jarðefnaeldsneytis hafa jafnan verið stærstu uppsprettur kopars út í andrúmsloft af mannavöldum. Kopar er m.a. notaður í koparplötur, rafleiðslur og málmblöndur. Kopar er einnig notaður sem litarefni í gler, í rafhúðun, málningu, í sveppavarnarefni o.fl. (Suchara o.fl. 2007).

Á undanförunum árum hefur losun kopars frá umferð á vegum sífellt aukist en kopar losnar frá

bremsubúnaði bíla í allmiklum mæli (Hulskotte o.fl. 2007, Johansson o.fl. 2009). Í andrúmslofti binst kopar við agnir sem síðan falla til jarðar ýmist með úrkomu eða sem þurr ákoma (e. dry deposition) (Danielsson og Karlsson 2011).

Hér á landi sýna rannsóknir á efnum í mosa að styrkur kopars er einna hæstur á gosbeltinu og á hann sennilega uppruna í áfoki (Sigurður H. Magnússon 2013).

Kopar er í mörgum málmpróteinum (e. metalloenzymes) og mikilvægt snefilefni í öllum lífverum. Við hærri styrk veldur kopar oxunarsundrun og verður eittraður fyrir háplöntur og mjög eittraður þörungum og sveppum. Kopar er líka mjög eittraður fyrir hryggleysingja, en aðeins miðlungi eittraður fyrir flest spendýr (Harmens o.fl. 2008).

Nikkel

Nikkel er tiltölulega algengur málmur í jarðskorpunni (Cempel og Nikel 2006). Hann er einkum notaður til húðunar málma því að hann hefur hátt þol gegn tæringu (Danielsson og Karlsson 2011). Nikkel er einnig notað í nikkel-kadmíum rafhlöður og í málmblöndur (Suchara o.fl. 2007). Helstu uppsprettur nikkels eru olíuiðnaður, járn- og stáliðnaður - fyrst og fremst við framleiðslu á ryðfríu stáli en nikkel losnar einnig við bruna jarðefnaeldsneytis (Cempel og Nikel 2006). Af uppsprettum nikkels hér á landi má nefna áfok og álver (Sigurður H. Magnússon 2013). Flest nikkelefnasambönd í andrúmslofti eru bundin við agnir og falla til jarðar bæði með úrkomu og sem þurr ákoma (e. dry deposition) (Danielsson og Karlsson 2011).

Nikkel er nauðsynlegt snefilefni fyrir margar lífverur, svo sem örverur og plöntur. Í háum styrk er nikkel eittrað flestum plöntum og sveppum. Það er miðlungi eittrað fyrir spendýr og getur valdið ofnæmisviðbrögðum í mönnum. Efnasambönd nikkels, og líklega einnig málmurinn sjálfur, geta valdið krabbameini í mönnum (Harmens o.fl. 2008).

Sink

Sink kemur ekki fyrir í hreinu formi í náttúrunni en finnst bundið í mörgum steindum (Suchara o.fl. 2007). Sink er notað sem tæringarvörn (galvanisering og rafhúðun), til framleiðslu á látúni, bronsi og í aðrar málmblöndur. Það er einnig notað til framleiðslu á gúmmíi, hjólbörðum, snyrtivörum, í litarefni og varnarefni (e. pesticide). Sink berst í andrúmsloft m.a. frá sinkbræðslum, efnaverksmiðjum, kolaverum og sorpbrennslustöðvum (Suchara o.fl. 2007). Sink berst einnig frá farartækjum við slit á hjólbörðum og bremsubúnaði (Johansson o.fl. 2009). Í andrúmslofti binst sink við agnir og fellur til jarðar með úrkomu og sem þurr ákoma (e. dry deposition) (Danielsson og Karlsson 2011).

Hér á landi eru ekki merkjanlegar miklar uppsprettur sinks en styrkur þess er þó nokkru hærri innan gosbeltisins en utan þess, sem gefur til kynna uppruna í áfoki (Sigurður H. Magnússon 2013). Hins vegar er vitað um staðbundin áhrif vegna galvaniseringar, t.d. frá háspennulínunum (Landsnet 2007).

Sink er nauðsynlegt snefilefni öllum lífverum en það er efnisþáttur í próteinum. Sink er nauðsynlegt til viðhalds frumuhimnum (e. biomembranes) (Suchara o.fl. 2007). Í háum styrk er það miðlungi eittrað fyrir plöntur, en aðeins örlítið eittrað fyrir spendýr. Of mikil upptaka af sinki getur aukið á skort annarra málma eins og kopars, járn og magnesíums (Harmens o.fl. 2008).

Bly

Bly er málmur sem menn hafa losað í allmiklum mæli út í umhverfi sitt í meira en 2000 ár (Branvall o.fl. 2001, Cheng og Hu 2010). Á síðari tímum hefur bly m.a. verið notað í litarefni í

málningu, í plast, kristal, blýkapla, rafeindatæki, blýrafgeyma og skotfæri (Suchara o.fl. 2007, Meyer o.fl. 2008, Danielsson og Karlsson 2011).

Uppsprettur á borð við námavinnslu, bræðslu á blýi og notkun lífrænna efnasambanda í eldsneyti hafa allar aukið styrk blýs í umhverfi okkar (Danielsson og Karlsson 2011). Blý endist lengi í jarðvegi (Klaminder o.fl. 2006) og því getur það haft áhrif á umhverfið áratugum eftir að dregið hefur úr losun þess (Berglund o.fl. 2010). Uppsprettur á blýi hér á landi eru einkum tengdar þéttbýli (Sigurður H. Magnússon 2013).

Blý í andrúmslofti er bundið ögnum og berst til vistkerfa með úrkomu eða sem þurr ákoma (e. dry deposition). Blý getur borist um langan veg í andrúmslofti og það getur haft áhrif á styrk þess fjarri upprunastað (Danielsson og Karlsson 2011, Sigurður H. Magnússon 2013).

Blý er ekki nauðsynlegt snefilefni, hvorki fyrir plöntur né dýr (Suchara o.fl. 2007). Í leysanlegu jónformi er það eittrað flestum lífverum, en í náttúrlegu umhverfi er það yfirleitt vel bundið í efsta lífræna lagi jarðvegs (humus). Þess vegna er upptaka um rætur plantna tiltölulega lítil en ákoma beint úr andrúmslofti getur aukið styrk blýs í plöntum, þar á meðal í ræktun (Harmens o.fl. 2005). Áhrif blýs stafa af því að það getur komið í stað annarra líffræðilega mikilvægra málma eins og kalsíums, járn og sink í mörgum ensímstýrðum efnahvörfum, sem leiðir til þess að ensím virka ekki sem skyldi (Harmens o.fl. 2008). Við uppsöfnun virkar blý sem eitur í spendýrum. Afgerandi áhrif þess í mönnum er að taugakerfi barna þroskast ekki eðlilega (Needleman 2004, Meyer o.fl. 2008). Eituráhrif blýs eru þau sömu hvernig sem efnið berst inn í líkamann sem venjulega er um öndunar- eða meltingarveg. Blý binst við rauð blóðkorn og berst með þeim til mjúkra vefja líkamans en hafnar síðan að stórum hluta í beinum og getur verið þar í áratugi (Meyer o.fl. 2008).

Jafnvel í þeim löndum þar sem menn hafa verið á varðbergi gagnvart mengun af völdum blýs má sums staðar finna mikið af blýi í jarðvegi, ryki og málningu sem mun um langan tíma valda ákveðnu álagi. Í ljósi þess að blý geymist í beinum í langan tíma getur það haft neikvæð áhrif á heilsu fullorðinna löngu eftir að efnið kemst inn í líkamann (Meyer o.fl. 2008). Á meðgöngu getur blý losnað úr beinum og virkað svipað og ytri blýuppspretta á fóstur (Bellinger 2005).