

Áhrif Holuhraunsgossins á umhverfi og heilsu

Bjarni Diðrik Sigurðsson og Gerður Stefánsdóttir (ritstj.)



Áhrif Holuhraunsgossins á umhverfi og heilsu

Bjarni Diðrik Sigurðsson og Gerður Stefánsdóttir (ritstj.)

Desember 2017
Landbúnaðarháskóli Íslands
Veðurstofa Íslands

Forsíðumynd: Morten Riishus, 29.10.2014

Efnisyfirlit

Hluti I: Almenn umfjöllun

- 1. kafli.** Áhrif Holuhraungossins á umhverfi og heilsu: Yfirlit og almenn umfjöllun ritstjóra.
Gerður Stefánsdóttir & Bjarni Diðrik Sigurðsson 5
- 2. kafli.** Átaksverkefni í rannsóknum á áhrifum eldgossins í Holuhrauni 2014 til 2015 á umhverfið: Rætur samstarfs, þróun verkefnisins og stefna til framtíðar.
Auður Lilja Arnþórsdóttir & Ágúst Gunnar Gylfason 10

Hluti II: Eldgosið sjálft

- 3. kafli.** Gosið í Holuhrauni 2014–2015. Magn gosefna, dreifing mengunar og mikilvægi tímasetningar og staðsetningar eldgosa með tilliti til umhverfisáhrifa.
Sigurður R. 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, Eydis S. Eiríksdóttir, Sigurður Jakobsson, Guðmundur H. Guðfinnsson, Sæmundur A. Halldórsson, Haraldur Gunnarsson, Baptiste Haddadi, Ingibjörg Jónsdóttir, Þorvaldur Þórðarson, Morten Riishuus, Þórdís Högnadóttir, Tobias Dürig, Gro B. M. Pedersen, Ármann Höskuldsson & Magnús T. Gudmundsson 15

Hluti III: Áhrif á snjó, vatn og vatnalíf

- 4. kafli.** Áhrif eldgossins í Holuhrauni á efnasamsetningu í úrkomu, dreifingu og möguleg áhrifasvæði.
Gerður Stefánsdóttir, Nicole Keller, Árni Sigurðsson, Elín Björk Jónasdóttir, Melissa Pfeffer, Sara Barsotti, Þorsteinn Jóhannesson & Andri Stefánsson 30
- 5. kafli.** Pollution from the 2014/2015 Bárðarbunga eruption monitored by snow cores from Vatnajökull glacier, Iceland.
Iwona Galeczka, Eydis Salome Eiríksdóttir, Finnur Pálsson, Rósa Ólafsdóttir, Elín Björk Jónasdóttir & Sigurður R. Gíslason 41
- 6. kafli.** The chemistry of rivers and snow affected by the 2014/2015 Bárðarbunga eruption, Iceland.
Iwona Galeczka, Gunnar Sigurdsson, Eydis Salome Eiríksdóttir, Eric H. Oelkers & Sigurður R. Gíslason 46
- 7. kafli.** Áhrif eldgossins í Bárðarbungu 2014–2015 á efnasamsetningu og framburð Fellsár í Fljótsdal.
Eydis Salome Eiríksdóttir, Iwona M. Galeczka & Sigurður Reynir Gíslason 57

8. kafli. Mælingar á efnasamsetningu straumvatns í níu ám á Fljótsdals- héraði fyrir og eftir Holuhraunsgosið.	
Bjarni Diðrik Sigurðsson, Helena M. Stefánsdóttir, Lárus Heiðarsson & Edda S. Oddsdóttir	65

9. kafli. Áhrif Holuhraunsgossins á vatnalíf á Norðaustur- og Austurlandi.	
Jón S. Ólafsson, Guðni Guðbergsson, Ingi Rúnar Jónsson, Eydís Salome Eiríksdóttir, Jónína H. Ólafsdóttir & Ragnhildur Þ. Magnúsdóttir	73

Hluti IV: Áhrif á gróður og jarðveg

10. kafli. Áhrif Holuhraunsgossins á gróður á Fljótsdalshéraði.	
Edda Sigurdís Oddsdóttir, Ásrún Elmarsdóttir, Járngerður Grétarsdóttir & Bjarni Diðrik Sigurðsson	87

11. kafli. Mælingar á sýrustigi jarðvegs í mólendi og skógum á Fljótsdalshéraði fyrir og eftir Holuhraunsgosið.	
Bjarni Diðrik Sigurðsson, Gunnhildur E. Gunnarsdóttir, Ásrún Elmarsdóttir, Borgþór Magnússon & Edda S. Oddsdóttir	92

12. kafli. Áhrif eldgossins í Holuhrauni á túngróður og jarðveg túna.	
Guðni Þorvaldsson & Borgar Páll Bragason	96

13. kafli. Gosið í Holuhrauni. Endurmælingar Landgræðslu ríkisins á gróðursýnum úr fjórum vöktunarreitum.	
Jóhann Þórsson & Ágústa Helgadóttir	104

Hluti V: Áhrif á heilsu dýra og manna

14. kafli. Áhrif eldgossins í Holuhrauni 2014/2015 á heilsufar manna.	
Hanne Krage Carlsen, Thor Aspelund, Haraldur Briem, Þórarinn Gíslason, Þorsteinn Jóhannsson, Unnur Valdimarsdóttir & Þórólfur Guðnason	107

15. kafli. Áhrif eldgosa á dýr: Leiðbeiningar um forvarnir.	
Auður Lilja Arnþórsdóttir	110

Hluti I:

Almenn umfjöllun

1.

kafli

Áhrif Holuhraungossins á umhverfi og heilsu: Yfirlit og almenn umfjöllun ritstjóra

Gerður Stefánsdóttir ¹, Bjarni Diðrik Sigurðsson ²

¹Veðurstofa Íslands, ²Landbúnaðarháskóli Íslands

Inngangur

Þann 27. apríl 2016 var haldið málþing um umhverfisáhrif eldgossins í Holuhrauni 2014 – 2015. Málþingið var haldið í húsnæði Landbúnaðarháskóla Íslands á Keldnaholti í Reykjavík að undirlagi Almannavarnardeildar ríkislögreglustjóra. Þar kynntu sérfræðingar frá ýmsum fagstofnunum helstu niðurstöður vöktunar- og rannsóknaverkefna sem vörðuðu möguleg áhrif eldgossins í Holuhrauni á umhverfi og heilsu. Sérfræðingum frá Almannavarnadeild ríkislögreglustjóra, atvinnuvega- og nýsköpunarráðuneytis, Embætti landlæknis, Geislavörnum ríkisins, Háskóla Íslands, Heilbrigðiseftirliti Austurlands, Heilbrigðiseftirliti Norðurlands eystra, Heilbrigðiseftirliti Suðurlands, Íslenskum orkurannsóknnum, Landbúnaðarháskóla Íslands, Landgræðslu ríkisins, Matvælastofnun, Náttúrufræðistofnun Íslands, Rannsóknamiðstöð landbúnaðarins, Skógræktinni, Umhverfisstofnun, Veðurstofu Íslands og Veiðimálastofnun var boðið til málþingsins, en allir þessir aðilar höfðu komið að rannsóknnum og vöktun á áhrifum gossins með einum eða öðrum hætti.

Eftir málþingið taldi hópurinn mikilvægt að taka saman á einum stað þau einstöku gögn og niðurstöður sem þarna voru kynntar um atburðina í Holuhrauni og áhrif þeirra á umhverfi og heilsu. Útkoman er þetta hefti. Þó að sérfræðingar birti rannsóknir sínar í sínum sérhæfðum miðlum, þá verður oft erfitt og tímafrekt að ná heildaryfirsýn yfir niðurstöður jafn margra og ólíkra aðila og komu að vöktun og rannsóknnum á áhrifum Holuhraungossins. Samantekt sem þessi gerir því fræðasamfélaginu, stjórnvöldum og almenningi vonandi kleift að ná betri yfirsýn yfir það margslungna álag sem getur skapast af völdum loftmengunar og eldgosa. Einnig er von okkar að hún muni styrkja bæði samstarf og hraða samhæfðum viðbrögðum vöktunar- og rannsóknaraðila við slíkum atburðum í framtíðinni. Fjallað er nánar um rætur slíks samstarfs, þróun vöktunar- og rannsóknaverkefna og stefnu í þessum málum til framtíðar í 2. kafla þessa heftis.

Í þessu hefti er gerð grein fyrir megin niðurstöðum úr mörgum þeim vöktunar- og umhverfisrannsóknnum þar sem reynt var að meta áhrif eldgossins í Holuhrauni á umhverfi og heilsu. Niðurstöðurnar sýna að í mörgum tilfellum hafði aukinn styrkur eldfjallagasa frá Holuhraungosinu mælanleg áhrif á umhverfisaðstæður þrátt fyrir að atburðurinn hafi átt sér stað á hálendi Íslands, að vetri til og fjarri mannabústöðum. Sumar af þeim mælingum sem hér er fjallað um voru gerðar á meðan á gosinu stóð, en aðrar, t.d. á straumvatni, gróðri og jarðvegi, fóru fram síðar á árinu 2015, nokkru eftir skilgreind goslok sem voru þann 29. febrúar 2015.

Almenn umfjöllun

Gosatburðurinn og vöktunarteymi

Atburðirnir sem leiddu til eldgossins í Holuhrauni hófust með jarðskjálftahrinu í Bárðarbungu um miðjan ágúst 2014. Jarðskjálftar, greinilegt kvikuinnstreymi undir jöklinum og öskjusig fylgdi í kjölfarið. Bárðarbunga er afar stór og öflug megineldstöð og að hluta til hulin jökli. Í ljósi þessa höfðu menn áhyggjur af framvindu gossins, mögulegri flóðavá af völdum þess sem og mögulegri öskumyndun og afleiðingum hennar. Fáir höfðu hins vegar leitt hugann að vandamálum vegna mikillar losunar eldfjallagass við slíkt eldgos.

Hraungosið sem hófst í Holuhrauni þann 31. ágúst 2014, og varði í sex mánuði, er með stærri hraungosum hérlandis á sögulegum tíma (85 km^2 , $1,36 \text{ km}^3$; sjá nánar umfjöllun um gosið í 3. kafla þessa heftis). Afar heppilegt var að gossprungan myndaðist utan jökulbreiðunnar en með því minnkuðu mikið líkur á vatnavá og öskumyndun, þó að áframhaldandi þróun gossins væri enn óljós. Fljótlega varð ljóst að verulega hár styrkur eldfjallagastegunda streymdi frá eldstöðinni. Í kjölfarið jukust áhyggjur af mögulegum áhrifum slíkrar mengunar og þeim beinu og óbeinu áhrifum sem gosmóðan gæti haft á umhverfi og heilsu manna og dýra. Umhverfisálag af völdum loftborinnar mengunar vegna eldgosa er því miður ekki vel þekkt, m.a. álag gosmóðu á umhverfið, hvar hættumörk liggja, hversu víðtæk áhrifin eru eða langtíma afleiðingar þess.

Stjórnvöld, sérfræðistofnanir og fagaðilar brugðust skjótt við varðandi mælingar og vöktun á álags- og áhættupáttum, eins og nánar verður fjallað um hér á eftir og í 2. kafla þessa heftis.

Vöktunarteymi

Tvö vöktunarteymi voru sett á laggirnar af stjórnvöldum. Várteymi, sem var leitt af Umhverfis- og auðlindaráðuneytinu, undir stjórn Almannavarnardeildar ríkislögreglustjóra, og flúorteymi sem var sett var á laggirnar til þess að meta möguleg áhrif flúormengunar sérstaklega. Eftir málþing um vöktun efnamengunar vegna eldgossins í Holuhrauni, þann 4. febrúar 2015, var flúorteymið stækkað og hlutverk þess víkkað út og nefndist eftir það efnamengunarteymi. Markmið þess var að fá sem besta yfirsýn yfir áhrif efnamengunar frá gosinu á náttúru landsins, bæði á hálendi og láglendi, lífríki í ám og vötnum, búfénað, ræktarland og uppskeru sem og heilsu manna. Teymið var leitt af Atvinnu- og nýsköpunarráðuneytinu undir stjórn Matvælastofnunar (Mast). Nánar er fjallað um tilurð þess í 2. kafla þessa heftis. Teymið vann í samstarfi við fjölda fag- og fræðastofnana, eins og lýst var hér að ofan.

Viðbrögð og vöktun vegna gossins í Holuhrauni var í raun einstök og má þakka það áhugasömum og viljugum einstaklingum um allt land sem og um allan heim. Vísindaleg þekking og innviðir voru nýttir sem best og með framsæknum hætti. Alþjóða vísindasamfélagið sannaði þarna gildi sitt og styrk. Þátttakendur og samstarfsaðilar í alþjóðlegum samstarfsverkefnum stóðu þétt við bakið á íslenskum kollegum sínum, lánuðu tæki inn á auðnir landsins um miðjan vetur, tóku þátt í mæliferðum, sóttu styrki í sínum löndum til mælinganna og aðstoðuðu við úrvinnslu gagna. Ýmsar mælingar fóru þannig mun fyrr í gang en ella og skiluðu betri gögnum en áður hefur verið. Sem dæmi má nefna þá skipti þátttaka íslenskra fagaðila í Evrópuverkefninu FUTUREVOLC sköpum um vöktun þessa atburðar, með þátttakendum frá 26 fagstofnunum víða að úr heiminum. Reynsla af sambærilegri vöktun var ekki mikil hérlandis og þurftu menn að vinna og móta vinnulagið umtalsvert, bæði hvað varðaði áætlanir og viðmið, eftir því sem mælingar og upplýsingar komu í hús.

Eldri heimildir

Eldri heimildir um mikil áhrif eldfjallagass á umhverfi og samfélag hérlandis eru m.a. Skaftáreldar, eldsumbrotin í Lakagígum, sem stóðu yfir frá júní 1783 til febrúar 1784. Áætlað hefur verið að um 122 Mt af brennisteinsdíoxíði (SO_2) hafi borist út í umhverfið í þeim atgangi (Thordarson & Self 2003). Gasútstreymið frá gígnum lá yfir norðurhveli jarðar og dró úr inngeislun sólar. Áhrifin voru ekki bara á Íslandi heldur hafði gosmóðan áhrif um allt norðurhvel jarðar og hafði til lengri tíma áhrif á loftslag og hitastig í þessum heimshluta. Talið er að um 175 Mt H_2SO_4 hafi fallið úr gosmökk-inum með úrkomu og valdið umtalsverðu álagi. Úrkoman var það súr að hún olli sviða í augum og brenndi skinn manna og dýra. Móðuharðindin og hörmungarnar sem fylgdu í kjölfarið ollu bæði mannfalli, farsóttum og búsifjum. Talið er að um 60% af búsmala Íslendinga og um 20% Íslendinga sjálfr hafi dáið, beint eða óbeint vegna umhverfisáhrifanna (Thordarson & Self 2003).

Í 12. kafla benda Guðni og Borgar á í grein í Þjóðólfi (1862) um umhverfisálag af völdum goss í Holuhrauni árið 1862. Á gostímanum var ríkjandi vindur stöðugur að útnorðan (NV-átt) og varð eldgossins því einungis vart í Skaftafellssýslu. Gosið var að sumri til og sölnuðu grös á svæðinu á meðan álagið varði, en gróður viðist hafa tekið hratt við sér að gosi loknu. Nokkur dæmi eru um að flúormengun frá eldgosum hafi valdið búsifjum í gegnum tíðina og er líklegt fingerð aska sem dreifist langt sú sem beri mestan styrk flúors (Helena Marta Stefánsdóttir 2016).

Eldri heimildir sýna þannig að umhverfisáhrif eldgosa sem þessara geta haft umtalsverð áhrif á umhverfi og heilbrigði. Nauðsynlegt er að þekkja áhrifamátt þeirra þannig að sem best viðbrögð verði við slíkum aðstæðum í framtíðinni.

Eldfjallagas og upplýsingaflæði

Eldgosið í Holuhrauni 2013 var mjög ríkt af eldgosaloftegundum. Brennisteinsdíoxíð (SO_2) er það eldfjallagas sem mælist í mestum styrk í gosmekkinum, en eins og kemur fram í grein Sigurðar R. Gíslasonar og félaga í 3. kafla, þá var áætlað að allt að 11,8 Mt af SO_2 hefðu borist út í umhverfið í Holuhraungosinu. Samkvæmt nýjustu útreikningum gasmælihópsins hefur það magn nú verið minnkað niður í 9,6 Mt (Pfeffer o.fl. 2018). Mestur styrkur SO_2 var um 2170 kg/s í upphafi gossins. Auk brennisteins og vatnsgufu eru eldfjallagastegundirnar koldíoxíð (CO_2), vetnisklórið (HCl) og vetnisflúor (HF) í háum styrk í atburði sem þessum.

Gosið var í eðli sínu sambærilegt að gerð og eldgosið í Laka, með háum styrk eldfjallagass en lítilli ösku. Eldfjallagastegundir bárust um allt land og mældist styrkur hár víða um land á gostímanum. Viðtækari loftmengunar af völdum eldfjallagass hafði ekki orðið vart síðan í Skaftáreldum (sjá 2. kafla). Sem dæmi má nefna mældist styrkur SO_2 fór upp í 5100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, á Höfn í Hornafirði aðfaranótt 21. október 2015. Heilbrigðisreglugerð miðar við 350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ meðalstyrk SO_2 í 60 mínútur að hámarki (Heilbrigðisreglugerð 251/2002). Eins og sést á 2. mynd í grein Sigurðar R. Gíslasonar o.fl. í 3. kafla fór styrkur SO_2 í andrúmslofti í fjölda skipta yfir þessi þessi viðmið á sjálfvirkum gasmælum á meðan á gosinu stóð, en slíkt hafði ekki gerst áður á sjálfvirkum mælum í rekstri. SO_2 barst langar vegalengdir í neðsta hluta lofthjúpsins (Smith o.fl. 2015) og m.a. mældist umtalsverð hækkun á loftgæðastöð í Austurríki sem er í 2750 km fjarlægð frá eldstöðinni. Daglegt útstreymi brennisteinsdíoxíðs frá gosstöðvunum var að lágmarki þrisvar sinnum hærra en samanlögð losun af mannavöldum í Evrópu, eða 99±49 kílótonn. Til dæmis fór styrkur SO_2 á Írlandi nokkrum sinnum yfir heilsufarsmörk WMO og vel yfir venjulegan bakgrunnsstyrk í Austurrísku Ölpunum.

Almenningur var upplýstur um stöðu mála eins og kostur var á meðan á gosinu stóð. Ráðleggingar voru settar upp á vefsíðum Almannavarna ríkisins, Landlæknisembættisins og Umhverfisstofnunar. Upplýsingar um styrk í andrúmslofti var hægt að nálgast á vef Umhverfisstofnunar og spálíkön um styrk og dreifingu mengunar voru birt á vefsíðu Veðurstofunnar. Gasdreifingarlíkanið CalPuf var notað til að spá fyrir um dreifingu brennisteinsdíoxíðs miðað við vindátt og vindstyrk.

Eldgosið lækkaði sýrustig úrkomu um allt land sem og aukin styrkur álagsefna, s.s. brennisteins og flúors (sjá 4. kafla). Beinar mælingar á pH í úrkomu sýndu að talsverður breytileiki virðist vera á álagi vegna lækkað sýrustigs milli staða, en reiknað sýrustig gefur vísbendingar um að temprun sýrustigsins hafi verið mjög svæðisbundin og hafi það haft veruleg áhrif á álagið á hverjum stað. Áhuga-vert er að afar litla úrkomu virðist þurfa til þess að hreinsa allan flúor úr úrkomunni og því er líklegt að lítil úrkoma geti valdið umtalsverðu álagi, einkum á svæðum þar sem temprun er lítil. Efnavöktun í andrúmslofti að Írafossi í Grafningi sýndi umtalsvert aukinn styrk brennisteinssambanda í svifryki og var styrkur SO_2 í andrúmslofti um 87 faldur miðað við viðmiðunarár. Aukning á styrk SO_4 í svifryki og úrkomu var ekki næstum því eins mikil, eða einungis um 6 föld. Þetta bendir til þess að skilyrði til umbreytingar á brennisteini yfir í brennisteinssýru hafi verið í lágmarki. Við betri umbreytingarskilyrði, s.s. meira sólarljós og samfallandi mengun við úrkomuátt, hefði álagið geta orðið mun meira en raunin varð (sjá nánar í 3. kafla).

Uppsöfnun bæði brennisteins og málmsambanda var mikil í snjó (sjá 5. kafla). Veruleg lækkun varð í sýrustigi í snjósýnum frá Vatnajökli, og voru áhrifin meiri eftir því sem söfnunarstaður var nær upptakasvæðunum gossins. Grein Iwonu og félaga í 5. kafla bendir einnig á aukningu í ýmsum málmsamböndum. Mikilvægt er því að horfa til slíkrar mengunar við vöktun á álagi vegna gosatburða. Áhugavert er að vöktun á rafleiðni í Jökulsá á Fjöllum gaf ekki til kynna þann aukna styrk álagsefna sem mældist í ánni (sjá 6. kafla). Þar er skýrt dæmi um það hversu vel umhverfið getur temprað álag að minnsta kosti meðan álagið er undir ákveðnu þröskuldsgildi.

Mælingar í minni ám og lækjum á Austurlandi sýndu hins vegar að gosið hafði greinileg áhrif á sýrustig og efnasamsetningu árvatns (sjá 7., 8. og 9. kafla). Skýr merki voru um súra ákomu í snjó á Hallormsstaðahálsi skömmu eftir goslok og sýrustig í niu dragám og lækjum á Fljótdalshéraði mældist einnig marktækt lægra miðað við sama árstíma 2015 (sjá nánar í 8. kafla). Svo virðist sem áhrifin hafi verið milduð nokkuð af sterkum þýðukafla sem varð snemma vors, áður en hinar eiginlegu vorleysingar hófust, og síðan bættist í ómengið snjóalög eftir það. Einnig hjálpaði hið einstaklega kalda vor á Austurlandi árið 2015 sennilega til við að draga losun súrrar ákomu á langinn vegna hægrar snjóbráðunar; sem sást á því að sýrustig lækja og áa á Austurlandi varð smátt og smátt súrara eftir því sem leið lengra fram á sumarið (sjá 7. og 8. kafla). Efnaálág virðist því almennt ekki umtalsvert í ám á svæðinu fyrstu mánuðina eftir að gosið lauk, þó að það mætti sjá aukningu á áli í minni dragám á Héraði (sjá 8. kafla) sem var í samræmi við það sem mælingar í snjó höfðu sýnt (sjá 5. og 6. kafla). Ál getur þó einnig losnað beint frá jarðvegi vegna sýrustigstemprunar ef súr ákoma berst ofan í hann, sem var tilgátan sem sett var fram í 8. kafla. Á fyrstu stigum súrnunar er það fremur losun á áli, en sýrustig straumvatns, sem er áhyggjuefni fyrir ferskvatnsfiska (sjá 9. kafla).

Áhrif gossins á trjágróður á Austurlandi (sjá 10. kafla) eða á háplöntur á hálendinu (sjá 14. kafla) voru ekki mikil eða langvinn. Einnig virtust mælingar á heyi bænda ekki víkja umtalsvert frá þeirri efnasamsetningu sem vænta mátti í meðalári, en þar vantar þó sambærileg viðmiðunargögn (sjá 12. kafla). Vöktun á mosum um allt land gáfu þó vísbindingar um aukið álag veturinn 2015 (Sigurður H. Magnússon, Náttúrufræðistofnun Íslands, óbirt gögn). Ekki var með afgerandi hætti hægt að rekja áhrif gossins á skepnur (sjá 15. kafla) og fyrstu niðurstöður rannsókna á áhrifum á heilsu almennings og viðbragðsaðila bentu einnig til að brennisteinsdíoxíð í háum styrk hafi getað valdið ertingu í öndunarvegi fólks, en áhrifin hafi gengið hratt til baka þegar dró úr álaginu (sjá 14. kafla).

Sýrustig mældist marktækt lægra í útjörð og á skógræktarsvæðum á Fljótdalshéraði haustið 2015 miðað við samanburðarár (sjá 11. kafla). Slíkrar marktækrar súrnunar varð hinsvegar ekki vart í jarðvegssýnum úr ræktuðum túnum víðsvegar að á landinu (sjá 12. kafla), sem reyndar passar ágætlega við það sem sýnt var fram á í 11. kafla; að áhrifin á sýrustig jarðvegs útjarðar á Austurlandi urðu fyrst áberandi þar sem sýrustigið var tiltölulega hátt (>6 ; þ.e. á jarðveg með lítið súruinnihald). Áhrif á jarðveg eru því ekki að fullu ljós en virðast ekki hafa verið umtalsverð.

Bent er á í 11. kafla að súrnun í jarðvegi af völdum gossins hafi verið innan þolmarka lífvera, að hluta til vegna hárrar jónarýmdar íslensks eldfjallajarðvegs og annarra temprunareiginleika umhverfisins. Þetta sást líka í úrkomumælingunum í 4. kafla þar sem reiknað sýrustig var mun lægra en mælt sýrustig sýnanna. Þetta sást enn fremur í 6. kafla í Jökulsá á fjöllum þar sem rafleiðni merki ekki efnabreytingar, líklega vegna temprunareiginleika árinna. Áhugavert og mikilvægt er að þekkja temprunareiginleika umhverfisins og hvar þolmörk temprunarinnar eru miðað við mismunandi viðtaka. Þekkt er að eldri berggrunnur hefur mun minni jónarýmd og þannig minni getu til þess að tempra álag eins og súrnunarálág.

Staða þekkingar

Ljóst er að áhrif eldgossins í Holuhrauni á eðlis- og efnafræðilega eiginleika umhverfisins hafa verið talsverð og líklega meiri en margan grunaði. Parna er þó um margslungið ferli er að ræða, álagið var misjafnt eftir hvaða umhverfispáttur var skoðaður, aðstæðum hverju sinni og eðli og eiginleikum umhverfisins á hverjum stað. Þó svo að flestar vistfræðilegu mælinganna hafi verið framkvæmdar í maí til júlí 2015, þó nokkru eftir goslok sem voru 29. febrúar 2015, þá mældust ýmis uppsöfnuð áhrif af gosinu í umhverfinu.

Staðsetning gossins var afar heppileg, utan jökla og fjarri byggð. Bæði staðsetning og tímasetning gossins hefur þannig án vafa lágmarkað neikvæð áhrif eldfjallagassins. Gosmökkur sem berst frá miðju lands til sjávar er að jafnaði ekki samfara úrkomuátt, en loftraki hvatar ummyndun í brennisteinssýru í andrúmsloftinu. Einnig er ummyndunarferli brennisteinsdíoxíðs yfir í sulfat að jafnaði í lágmarki á veturna. Súrnun úrkomu og áfall á jörð var því mun minni en búast mætti við við aðrar aðstæður.

Því miður er álag vegna eldgosa á umhverfi, dýr og almenning enn afar lítt þekkt. Dreifing ösku og eldfjallagasa er ekki heldur vel þekkt, né heldur hvaða efna- og umbreytingaferlar hafa þar mest áhrif á. Þar má m.a. nefna hvaða efnaferlar skipta sköpum um styrk og dreifingu mengunar eða ösku, áhrif þeirra á efnasamsetningu í úrkomu, styrk efna á yfirborði jarðar og í jarðvegi. Enn fremur er brýnt að rannsaka frekar hvaða áhrif aukinn styrkur efna hefur á flóru og fínu þessa lands, hvar þröskuldsgildi

umhverfisins liggja, sem og hver eru eðlileg viðmiðunargildi þannig að unnt sé að meta áhættu á heilbrigði almennings og búpenings. Samhengi allra þessara þátta er margslungið og breytilegt. Margar áleitnar og mikilvægar spurningar komu til dæmis upp í starfi hópsins sem stendur að þessu hefti, eins og til dæmis: Hvernig skal meta hvaða svæði teljast undir álagi hverju sinni? Er um skammtíma eða langtíma áhrif að ræða? Hvaða ráðleggingar getum við veitt almenningi?

Árangur og framtíðarsýn

Með þeim rannsóknum sem hér eru birtar hefur náðst inn aukin þekking og reynsla um hvernig skuli staðið að vöktun á áhrifum stórra atburða, eins og eldgoss, á umhverfi og heilsu. Með þeim fæst einnig grunnur að viðmiðunargildum um slík áhrif sem munu nýtast til framtíðar.

Eðli og styrkur mengunarefna, veðurfræðilegar aðstæður, s.s. vindáttir og úrkomuáttir, skipta miklu máli við mat á dreifingu mengunar á landinu. Jafnframt hafa svæðisbundnar aðstæður, s.s. landslag, eiginleikar og gerðir jarðvegs og gróðurlenda, mikil áhrif á áhrifamætti mengunarinnar til lengri og skemmri tíma. Þessa þætti þarf að skoða í samhengi og í samvinnu ýmissa fagaðila til þess að fá heildarmynd af mögulegum áhrifum og áhrifamætti eldgosa. Inn í þessa mynd blandast einnig nýting áhrifasvæða og þar með áhætta fyrir menn og skepnur.

Til þess að geta spáð fyrir um dreifingu, skilgreint álagssvæði og gefið mat á hættu er mikilvægt að vinna að auknum rannsóknum á fjölbreytilegum áhrifum eldgosaatburða og auka getu okkar til þess að skilja og meta hættur og hættusvæði vegna atburða sem þessara og hvaða þætti er nauðsynlegt að vakta. Í sumum tilfellum er vandkvæðum bundið að túlka niðurstöður með afgerandi hætti vegna þess að bakgrunns- og viðmiðunarmælingar vantar. Tryggja þarf bakgrunnsþekkingu þannig að hægt sé að túlka mæligögn með viðunandi hætti. Ekki er síður mikilvægt að skýra verklag og hlutverk mismunandi stofnana og viðbragðsábyrgð, þannig að öllum þáttum sé sinnt hratt og vel miðað við aðstæður hverju sinni og að mögulegt sé með faglegum hætti að afmarka verkefni og hlutverk fagaðila strax við upphaf atburða.

Tryggja þarf fjármagn til sameiginlegrar vöktunar stofnana vegna óvæntra atburða sem þessa. Ekki er síður mikilvægt að unnið verði að samhæfðri vöktunaráætlun milli fagstofnana og ráðuneyta. Með því móti aukast líkur á að markviss vöktun fari í gang fljótt og örugglega hverju sinni og verði í samræmi við eðli viðkomandi atburðar. Afar mikilvægt er að markvisst sé staðið að slíkum ákvörðunum strax í upphafi atburða, en styrkur efna er að jafnaði langhæstur í upphafi gosatburða.

Einnig þarf að tryggja að fjármagn þannig að hægt sé að fylgja rannsóknum slíkra átaksverkefna eftir. Að gagnaöflun lokinni er umtalsverð vinna eftir til þess að meta og túlka niðurstöður og ekki síst við að draga lærdóm af niðurstöðum mismunandi fagaðila saman. Þetta síðastnefnda er eitthvað sem hópurinn sem stendur að þessu hefti hefur haft að leiðarljósi.

Að lokum vilja ritstjórar þessa heftis þakka ríkisstjórn Íslands fyrir að styrkja þetta átaksverkefni með sérstakri fjárveitingu veturinn 2015, Atvinnu- og nýsköpunarráðuneytinu og Matvælastofnun fyrir að leiða starf hópsins, svo og öllum þeim sem hafa lagt til efni og tíma til gerðar þess.

Heimildir

- Helena M. Stefánsdóttir (2016). Rannsóknir á flúor í náttúru Íslands: samantekt rannsókna. *Rit LbhÍ* 66: 25 bls.
- Pfeffer, A.M. B., Bergsson, S. Barsotti, G. Stefánsdóttir, B. Galle, A. Arellano, V. Conde, A. Donovan, E. Ilyinskaya, M. Burton, A. Aiuppa, R.C.W. Whitty, A. Simmons, Th. Arason, E.B. Jónasdóttir, N.S. Keller, R. Yeo, H. Arngrímsson, T. Jóhannsson, M.K. Butwin, R.A., Askew, S. Dumont, S. von Löwis, Th. Ingvarsson. A. La Spina, H. Thomas, F. Prata, F. Grassa, G. Giudice, A. Stefánsson, R. Marzano, M. Montipoli & L. Mereu. 2018. Ground-based measurements of the 2014-2015 Holuhraun volcanic cloud. *Geosciences* (í birtingu).
- Schmidt, A. o.fl. (2015), Satellite detection, long-range transport, and air quality impacts of volcanic sulfur dioxide from the 2014–2015 flood lava eruption at Bárðarbunga (Iceland), *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120: 9739–9757, doi:10.1002/2015JD023638
- Thordarson, T. & S. Self, 2003. Atmospheric and environmental effects of the 1783–1784 Laki eruption: a review and reassessment. *Journal of Geophysical Research* 108: 4011.
- Þjóðólfur (1862). Eldgosið norðan undir Vatnajökli 14, 127-129.

2.

kafli

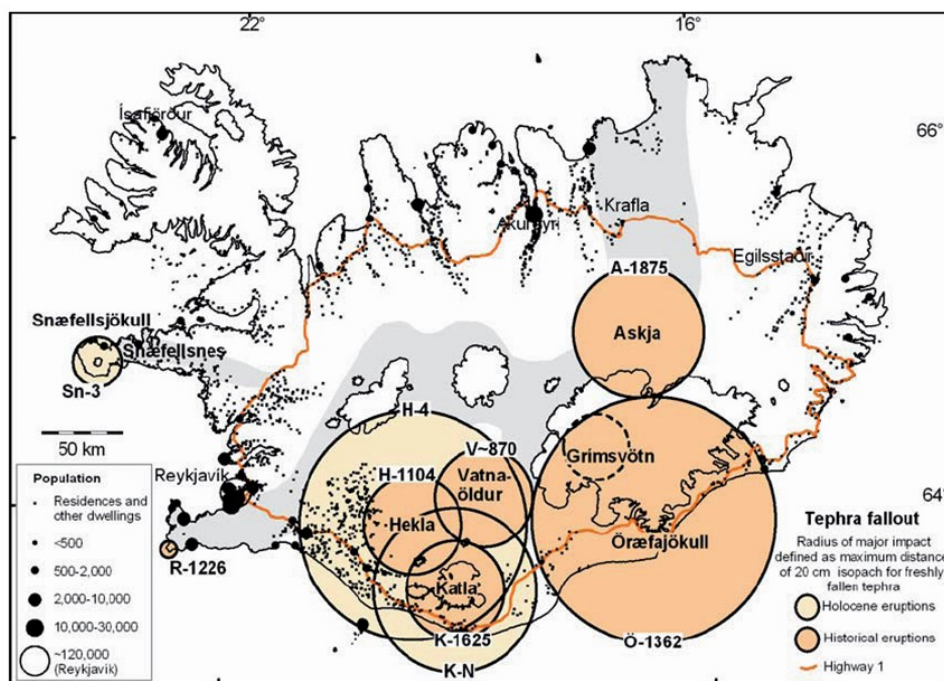
Átaksverkefni í rannsóknum á áhrifum eldgossins í Holuhrauni 2014 til 2015 á umhverfið: Rætur samstarfs, þróun verkefnisins og stefna til framtíðar

Auður Lilja Arnþórsdóttir¹ & Ágúst Gunnar Gylfason²

¹ Matvælastofnun, ² Almannafræðingur ríkislögreglustjóra

Inngangur

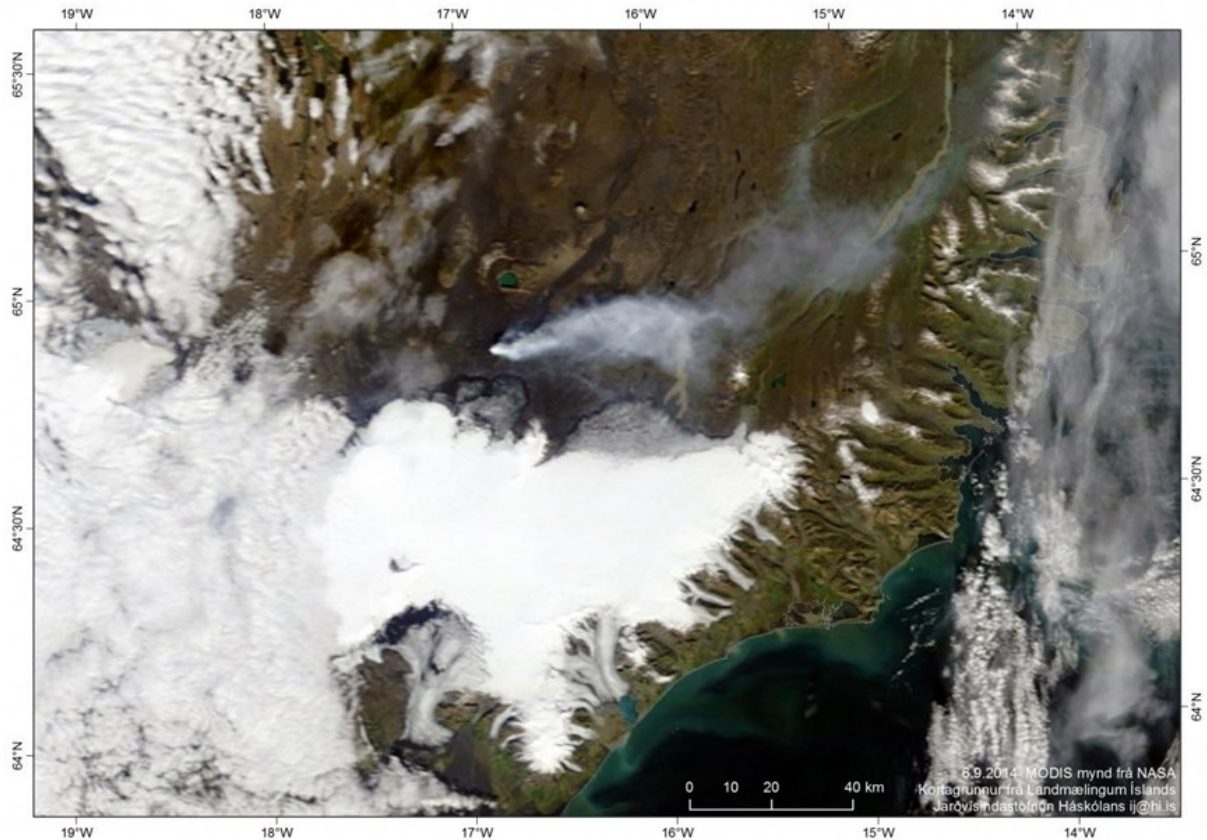
Í þeim eldgosum sem urðu á Íslandi á áratugunum næst á undan eldgosinu í Holuhrauni var heilsu, byggð og efnahag manna helst talin stafa hættu af öskufalli, hraunrennsli og jökulhlaupum. Dæmi um þetta eru nærtæk, hraunrennsli eyddi byggð á Heimaey í eldgosinu 1973; jökulhlaup sópuðu burt vegum og raflínunum í Gjálpargosi 1996; öskufall olli rafmagnsleysi í Heklugosi árið 1970 og gaddi í sauðfé í Heklugosi 1947 og 1980. Aðrar hættur sem eru þekktar í eldgosum hér á landi eru eðjuflóð niður brattar hlíðar eldfjalla eins og Heklu, eldingar í og undir gosmekki og mengun af eldfjallagasi.



1. mynd. Svæði þar sem gjóskufall hefur orðið 20 cm eða meira í miklum sprengigosum eru sýnd með hringjum utanum eldstöðvarnar (Magnús Tumi Guðmundsson o.fl. 2008)

Í mörgum Heklugosum, í eldgosinu á Heimaey 1973 og í eldgosinu í Eyjafjallajökli 2010 varð vart staðbundinnar gasmengunar sem einkum var bundin við lægðir í landinu og kom helst fram í kyrru veðri. Víðtækrar loftmengunar af völdum eldfjallagass hafði ekki orðið vart síðan í Skáftáreldum 1783 til 1784.

Á 2. mynd má sjá hvernig gasmökkurinn/gosmökkurinn berst til austurs frá gosstöðvunum í Holuhrauni þann 6. september 2014. Mökkurinn liggur austuryfir Háslón en sveigir þar til norðausturs en fylgir síðan fjöllum austan Fljótsdalshéraðs til norð-norðausturs út á sjó.



2. mynd. MODIS gervitunglamynd frá NASA frá 6. september 2014 sem sýnir gosmökk frá gígnum í Holuhrauni. Mökkurinn liggur til austurs frá gígnum yfir Háslón en sveigir svo til norðausturs og út á haf um austanvert Fljótsdalshérað (MODIS-NASA 2014)

Haustið 2012 hófst evrópskt rannsóknarverkefni á sviði eldfjallafræði, FUTUREVOLC, það var hluti af 7. rannsóknaráætlun Evrópusambandsins (FP7). Þetta verkefni var sprottið af reynslu manna af eldgosinu í Eyjafjallajökli árið 2010 og var meginmarkmið þess að bæta mæli- og vöktunaraðferðir á eldgosum og eldvirkum svæðum, auka þekkingu á ferlum sem tengjast eldgosum og bæta miðlun upplýsinga um þessi efni til almannavarnayfirvalda. Vonast var eftir að eldgos yrði á Íslandi á verkefnistímanum og var stefnt að prófun margvíslegra nýrra mælitækja í slíkum viðburði.

Þegar eldgosið í Holuhrauni hófst var vísindasamfélagið vel búið undir að fylgjast með eldgosi með hraunrennsli og öskufalli og að einhverju leyti að mæla gasútstreymi í grennd við gosstöðvar. Þegar á hólminn var komið var eðli eldgossins annað en sést hafði í langan tíma. Í fyrsta lagi var það með lengri eldgosum sem orðið hafa á Íslandi á sögulegum tíma og öðru lagi voru gosefnin fyrst og fremst hraun og eldfjallagas. Við eldgosið losnaði meira af eldfjallagösum en gerst hafði í eldgosum í um 250 ár eða í Skáftáreldum þar sem talið er að milli 400 og 500 milljónir tonna af gastegundum hafi losnað og þar af hafi 120 milljónir tonna af brennisteinsdíoxíði (SO_2) sloppið út í andrúmsloftið (Ari Trausti Guðmundsson 2001, Magnús Tumi Guðmundsson o.fl. 2008). Í eldgosinu 2014-2015 er talið að um 7—11,8 milljónir tonna af SO_2 hafi losnað út í andrúmsloftið (Sigurður R. Gíslason o.fl. 2015, Grocke o.fl. 2017).

Í FUTUREVOLC verkefninu var sjónum beint að eldvirkninni sem slíkri en ekki að áhrifum eldgosa á umhverfið.

Samvinna við skipulag vöktunar umhverfispáttá

Með tölvupósti til Matvælastofnunar, 22. ágúst 2014, fól atvinnuvega- og nýsköpunarráðuneytið stofnuninni að hafa forgöngu um að kalla saman og leiða hóp sérfræðinga til að halda utan um öll atriði sem gætu skipt máli til að koma í veg fyrir, eins og framast væri unnt, að tjón hlytist af völdum hugsanlegrar flúormengunar frá öskugosi, vegna eldsumbrota á Bárðarbungusvæðinu. Hlutverk hópsins væri m.a. að skipuleggja og samræma sýnatökur vegna flúors í jarðvegi, gróðri, vatni og skepnum, og koma niðurstöðum á framfæri. Tekið var fram að ekki væri gert ráð fyrir sérstöku fjármagni vegna viðbragða við náttúruhamförunum, en ef hópurinn teldi þörf á sérstöku fjármagni til að standa straum af sýnatökum og rannsóknum þyrfti hann að gera grein fyrir því sérstaklega.

Sigrún Bjarnadóttir, sérgreinadýralæknir nautgripa- og sauðfjár hjá Matvælastofnun, var formaður hópsins í upphafi og í honum voru fulltrúar frá Landbúnaðarháskóla Íslands, Jarðvísindastofnun Háskóla Íslands, Ráðgjafarmiðstöð Landbúnaðarins, Heilbrigðiseftirliti Norðurlands eystra og Tilraunastöð Háskóla Íslands í meinafræði að Keldum. Meðlimir hópsins höfðu samskipti með tölvupósti og skipulögðu m.a. sýnatökur og rannsóknir á grassýnum. Seint í nóvember 2014 tók Auður Lilja Arnþórsdóttir, sóttvarnadýralæknir hjá Matvælastofnun að sér að leiða hópinn vegna fæðingarorlofs Sigrúnar. Stuttu síðar var ákveðið að stækka hópinn og inn í hann komu fulltrúar frá Veðurstofu Íslands, Almannavarnardeild Ríkislögreglustjóra, Embætti Landlæknis, Heilbrigðiseftirliti Austurlands, Heilbrigðiseftirliti Suðurlands, Landgræðslu ríkisins, Skógrækt ríkisins, Náttúrufræðistofnun Íslands, Veiðimálastofnun og Umhverfisstofnun.

Í byrjun desember lagði vísindaráð Almannavarnadeildar Ríkislögreglustjóra til að haldið yrði málþing um vöktun mengunar vegna eldgossins í Holuhrauni. Málþingið var haldið 4. febrúar 2015. Markmið þess var að fá yfirlit yfir hvaða stofnanir væru að sinna vöktun á umhverfispáttum sem geta breyst vegna eldgossins, og hvaða afleiðingar þær breytingar geti haft til lengri og skemmri tíma.

Í kjölfar málþingsins var efnamengunarhópurinn kallaður saman til fundar 10. febrúar. Fulltrúar allra stofnanna mættu og lögðu fram upplýsingar um hvað hver stofnun gerir og getur lagt af mörkum varðandi vöktun og rannsóknir á áhrifum efnamengunar frá eldgosinu. Þetta var síðan tekið saman í heildstæða sýnatöku- og kostnaðaráætlun, sem miðaði að því að fá sem besta yfirsýn yfir áhrif efnamengunarinnar á náttúruna, bæði á hálendi og láglandi, og þar með óbein áhrif á búfé, villt dýr, lífríki í ám og vötnum, ræktun á grasi, korni og matjurtum o.s.frv. Kostnaðaráætlunin hljóðaði upp á 29,3 milljónir og sendi hópurinn frá sér umsókn 25. febrúar um fjármögnun á þessum verkefnum. Hún var samþykkt á ríkisstjórnarfundum þann 16. apríl.

Unnið var að sýnatökum og rannsóknum næstu mánuði, greinaskrifum og skýrslugerð. Þann 27. apríl 2016, var svo haldið málþing um niðurstöður rannsókna.

Lærdómur og framtíðarsýn

Þegar eldgosið í Holuhrauni hófst var vísindamönnum og starfsmönnum almannavarna enn í fersku minni til hvaða aðgerða hafði verið gripið til að vakta áhrif eldgossins í Eyjafjallajökli á umhverfið. Holuhraungosið olli nokkuð öðrum áhrifum á umhverfið en næstu eldgos þar á undan. Nokkurn tíma tók að átta sig á hvaða þætti þyrfti að vakta í umhverfinu og nokkurn tíma tók einnig að fá yfirsýn yfir hvaða þætti mismunandi stofnanir vöktuðu og hvers konar rannsóknum þyrfti að bæta við til að fylla út í myndina. Samvinna allra þeirra stofnana og vísindamanna sem þátt tóku í verkefninu var með ágætum og eiga allir hlutaðeigandi þakkir skildar fyrir sitt framlag.

Næsta skref til að bæta viðbragð í næsta eldgosi sem yfir dynur er að sett verði saman stutt viðbragðsáætlun. Þar yrði tekið saman á hvaða mælingum, vöktun og rannsóknum hver stofnun ber ábyrgð og hver tímaramminn er fyrir mismunandi rannsóknir. Í slíkri áætlun þarf einnig að tilgreina hverjar samskiptaleiðir milli stofnana eru og hverjir bera ábyrgð á að virkja áætlunina.

Heimildir

Ari Trausti Guðmundsson 2001. *Íslenskar eldstöðvar*. Vaka-Helgafell, Reykjavík.

Grocke, S., T. Thordarson, E. Bonny, R. Wright, A. Hoskuldsson & I. Jónsdóttir. 2017. A validation of empirically derived SO₂ emissions from the 2014-2015 eruption on Dyngjúsandur, North Iceland. Í: Vorráðstefna Jarðfræðafélags Íslands, Ágrip erinda.

Sigurður Reynir Gíslason, Stefánsdóttir G., Pfeffer M.A., Barsotti S., Jóhannsson Th., Galeczka I., Bali E., Sigmarsson O., Stefánsson A., Keller N.S., Sigurdsson Á., Bergsson B., Galle B., Jacobo V.C., Arellano S., Aiuppa A., Jónasdóttir E.B., Eiríksdóttir E.S., Jakobsson S., Guðfinnsson G.H., Halldórsson S.A., Gunnarsson H., Haddadi B., Jónsdóttir I., Thordarson Th., Riishuus M., Högnadóttir Th., Dürig T., Pedersen G.B.M., Höskuldsson Á. & M.T. Guðmundsson. 2015. Environmental pressure from the 2014–15 eruption of Bárðarbunga volcano, Iceland. *Geochemical Perspectives Letters* 1: 84–93.

Magnús Tumi Guðmundsson, Guðrún Larsen, Ármann Höskuldsson & Ágúst Gunnar Gylfason. 2008. Volcanic hazards in Iceland. *Jökull* 58: 251-268.

NASA-MODIS 2014. Gervitunglamynd frá NASA, 6. september 2014, myndvinnsla Ingibjörg Jónsdóttir. <http://jardvis.hi.is/sites/jardvis.hi.is/files/myndir/Bardarbunga/gosmokkur20140906.jpg>.

Hluti II: Eldgosið sjálf

3.

kafli

Gosið í Holuhrauni 2014–2015. Magn gosefna, dreifing mengunar og mikilvægi tímasetningar og staðsetningar eldgosa með tilliti til umhverfisáhrifa

Sigurður R. Gíslason¹, Gerður Stefánsdóttir², Melissa A. Pfeffer², Sara Barsotti², Þorsteinn Jóhannsson³, Iwona M. Galeczka¹, Eniko Bali¹, Olgeir Sigmarsson^{1,4}, Andri Stefánsson¹, Nicole S. Keller¹, Árni Sigurdsson², Baldur H. Bergsson^{2,5}, Bo Galle⁶, Valdimir C. Jacobo⁶, Santiago Arellano⁶, Alessandro Aiuppa⁵, Elín B. Jónasdóttir², Eydís S. Eiríksdóttir¹, Sigurður Jakobsson¹, Guðmundur H. Guðfinnsson¹, Sæmundur A. Halldórsson¹, Haraldur Gunnarsson¹, Babbiste Haddadi⁴, Ingibjörg Jónsdóttir¹, Þorvaldur Þórðarson¹, Morten Riishuus¹, Þórdís Högnadóttir¹, Tobias Dürig¹, Gro B. M. Pedersen¹, Ármann Höskuldsson¹ & Magnús T. Guðmundsson¹

¹ Jarðvísindastofnun Háskólans. ² Veðurstofa Íslands. ³ Umhverfisstofnun. ⁴ Laboratoire Magmas et Volcans, CNRS – Université Clermont Auvergne, Frakklandi. ⁵ Università di Palermo, Italy. ⁶ Chalmers University of Technology, Department of Earth and Space Sciences, Gothenburg, Sweden

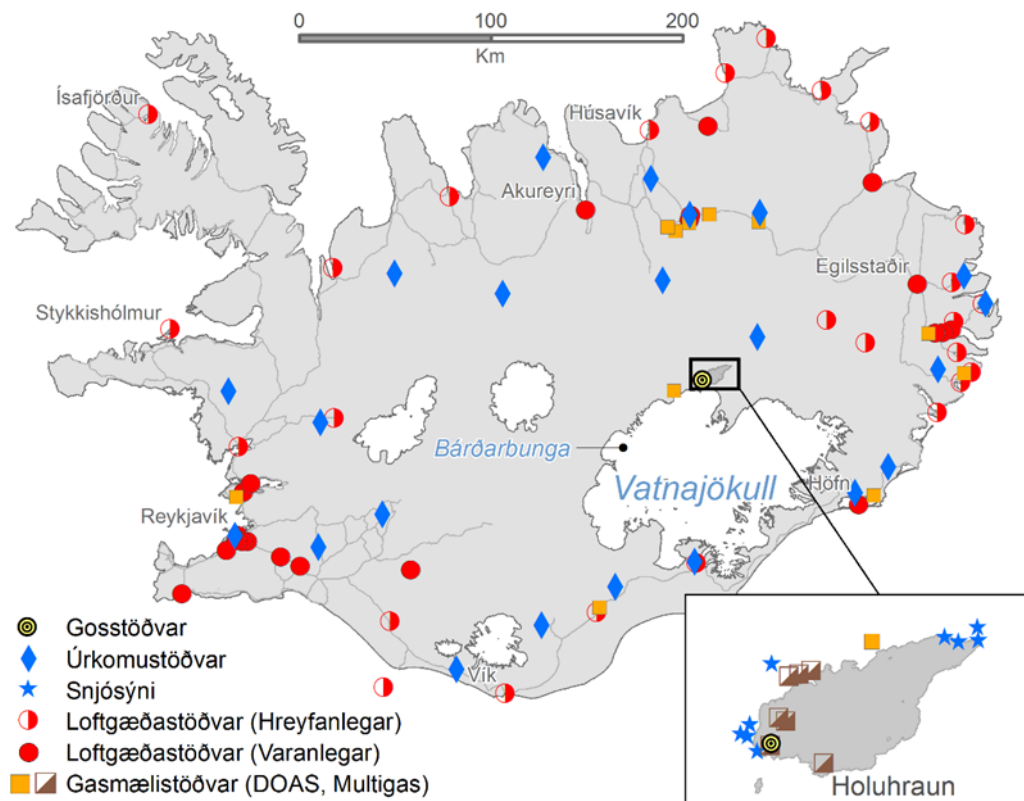
Inngangur

Ísland er eitt af virkustu eldfjallasvæðum á Jörðinni, með yfir 30 virkar eldstöðvar sem gjósa um 20 sinnum á öld og framleiða að meðaltali um fimm rúmkílómetra (km³) af kviku á þeim tíma (Þorvaldur Þórðarson & Ármann Höskuldsson 2008). Þessi eldgos geta haft töluverð áhrif á hið mannlega og náttúrlega umhverfi. Mörg eldfjallanna eru hulin jökli, og gos þeirra geta því valdið gjóskumyndun og jökulhlaupum. Vegna staðsetningar Íslands og viðvarandi vinda hefur gjóska og gas áhrif á andrúmsloft og flugumferð í vestanverðri Evrópu (European Commission 2010). Gjóska og jökulhlaup geta einnig mengað, en jafnframt bætt, vatn á jörðinni (Frognér o.fl. 2001, Gíslason o.fl. 2002, Flaathen & Gíslason 2007, Galeczka o.fl. 2014). Þessi grein er þýðing annarrar sem birtist á ensku í tímariti Evrópsku jarðefnafræðisamtakanna, *Geochemical Perspective Letters*, í júlí 2015 (Gíslason o.fl. 2015) að viðbætti 7. mynd auk nokkurra heimilda.

Skaftáreldar 1783–84 stóðu í átta mánuði og gosefni sem upp komu voru um tíu sinnum meiri en í gosinu 2014–15. Umhverfisáhrif Skaftárelða voru stórkostleg. Um 60% af búsmala Íslendinga og 20% Íslendinga dó beint eða óbeint vegna umhverfisáhrifanna (Thordarson & Self 2003). Meðal-mánaðarleg losun brennisteinstvíoxíðs (SO₂), á þeim átta mánuðum sem Skaftáreldar vörðu, var meiri en meðal-mánaðarleg losun af mannavöldum þegar hún var í hámarki 1970–1980 (133 Mt/ár) og tvöföld sameiginleg losun

Bandaríkjanna, Canada og Vestur- og Mið-Evrópu á áttunda áratug síðustu aldar (76 Mt/ár; Smith o.fl. 2011). Þessi manngerða losun SO₂ leiddi til brennisteinssýrumyndunar (H₂SO₄), sem sýrði úrkomu og leysti ál úr bergi og jarðvegi, sem leiddi til hröfnunar vistkerfa (Gensemer & Playle 1999). Losun SO₂ af mannavöldum til andrúmslofts hefur farið minnkandi frá 1970–1980 vegna reglugerða sem stemma stigu við losuninni. Hún var komin niður í 14,7 (Mt/ár) frá Bandaríkjanna, Canada og Vestur og Mið-Evrópu árið 2011 (Klimont o.fl. 2013). Þessi minnkun hefur leitt til bata vistkerfa í þessum löndum. Enn fremur hefur árlegt pH gildi úrkomu fjarri helstu iðnaðarsvæðum Norður-Ameríku og Evrópu, eins og til dæmis á Íslandi, hækkað frá þessum tíma og útgildum pH mælinga fækkað þau ár sem ekki hefur gosið (Sigurðsson & Thorlacius 2014). Eins lækkaði miðgildi styrks leysts SO₄ í straumvötnum á Íslandi um 40% á tímabilinu 1970 til 2004 (Gíslason & Torssander 2006).

Gosið 2014–15 veitti tækifæri til þess að rannsaka umhverfisáhrif frá hlutfallslega stóru flæðigosi, því stærsta á Íslandi í rúm 230 ár. Beinar mælingar á gasútstreymi með nútímataækni og áætlun þess með bergfræðimælingum, ásamt rúmmálsmati gosefna og líkanagerð gerir mögulegt að bera þetta gos saman við fyrri gos eins og Skaftárelda. Þannig er hægt að sannreyna bergfræðilegt mat á gasútstreymi fyrri gosa. Í þessari grein, gerum við grein fyrir heildarmagni gosefna, flæði- og streymishraða þeirra, dreifingu mengunar og mikilvægi tímasetningar og staðsetningar eldgosa með tilliti til umhverfisáhrifa.



1. mynd. Staðsetning vöktunarstöðva á Íslandi. Gosstöðvarnar eru sýndar með margföldum svörtum og gulum hring, úrkomustöðvar með bláum tígum, söfnunarstaðir snjósýna við jaðar Holuhrauns með bláum stjörnum á útdregnu myndinni, hreyfanlegar loftmælistöðvar með hálf-fylltum rauðum hringjum, varanlegar loftmælistöðvar með rauðum doppum, DOAS gasmælistöðvar með gulum feringum og MultiGas mælistöðvar við breytilegan hraunjaðarinn með brúnum hálf-fylltum feringum. Stöðvar sem getið er í texta eru sýndar á 4. mynd.

Aðferðir

Aðferðum er lýst nákvæmlega í rafrænu viðhengi sem er í opnum aðgangi að grein Sigurðar Reynis Gíslasonar o.fl. (2015) í *Geochemical Perspective Letters*.

Niðurstöður

Hér verður gerð grein fyrir niðurstöðum mælinga á hrauninu, eldfjallagasi og loks umhverfisáhrifum.

Hraunið

Gosið var flæðigos með allnokkurri kvikustrókvirkni fyrstu vikunnar. Hraunið rann 17 km til norð-austurs á fyrstu 15 dögum (1. mynd). Flatarmál hraunsins stækkað hratt en þegar kom fram í desember og janúar þykknaði hraunið á meðan flatarmál þess óx lítið. Við lok gossins 27. febrúar 2015 var flatarmál hraunsins orðið $84,1 \pm 0,6 \text{ km}^2$ og rúmmál þess $1,6 \pm 0,3 \text{ km}^3$. Flatarmálið varð svipað flatarmáli Þingvallavatns. Heildarmassi hraunsins, miðað við 2600 kg/m^3 eðlisþyngd þess var $(4,2 \pm 0,8) \cdot 10^{12} \text{ kg}$. Meðalflæði kvikunnar 181 daga gossins var $100 \text{ m}^3/\text{s}$, svipað rennsli Sogsins þar sem það rennur úr Þingvallavatni, og kvikuframleiðnin var $2,7 \cdot 10^5 \text{ kg/s}$ (1. tafla). Flæðið fyrstu vikunnar var tvisvar til þrisvar sinnum meira en meðalflæðið allan góstímann, en flæðið var aðeins 50–80 m^3/s í desember og janúar og minkaði það þar til yfir lauk.

Hraunið er ólívín-þóleiít að samsetningu og var hún stöðug allan góstímann. Dílar, þ.e. steindir sem eru töluvert stærri en steindir í grunnmassa hraunsins og myndast á leið kvikunnar til yfirborðs jarðar, eru sjaldgæfir, plagióklas algengastur síðan klínópýroxen, þá ólívín og að lokum járnkís (pýrít, FeS_2). Plagióklas, klínópýroxen og ólívín eru aðalfasarnir í grunnmassa hraunsins, en járnríkar brennisteinskúlur í grunnmassa fundust einnig og endurspegla háan styrk og metnun brennisteins í kvikunni sem upp kom í gosinu. Gjóskan sem myndaðist fyrsta mánuðinn innihélt auk fyrrgreindra steinda basaltgler. Styrkur vatns (H_2O) í kvikuinnlyksum í dílum var allt að 0,5% (þungaprósenta), en styrkur koltvíoxíðs (CO_2) náði mest 900 ppm (milljónustu hlutum). Í grunnmassaglerinu var styrkur vatns 0,1% og ekkert mældist af koltvíoxíði (CO_2). Þessar gastegundir höfðu streymt úr kvikunni til andrúmslofts áður en grunnmassinn storknaði. Hreinar koltvíoxíð blöðrur í kvikuinnlyksum dílanna benda til að ólívín-þóleiít kvikan hafi verið CO_2 mettuð þegar kvikusýnið, sem hafði þá þegar tapað allnokkru CO_2 , lokaðist inni í dílunum djúpt í jörðu. Líklegt er að CO_2 afgösun hafi byrjað við 3 kbar þrýsting sem jafngildir um 10 km dýpi í jarðskorpunni. Þessi afgösun CO_2 úr kvikunni á leið hennar til yfirborðs, hófst fyrr og dýpra en vatns (H_2O) og brennisteinstvíoxíðs (SO_2).

Bergfræðilegt mat á útstreymi gastegunda

Heildarmagn gosefna, meðalflæði hrauns og meðalútstreymi gastegunda til andrúmslofts, eru sýnd í 1. töflu. Með því að mæla mismun á styrk rokgjarnra efna í kvikuinnlyksum í dílum og í afgösuðu gleri grunnmassans með tilliti til kvikuframleiðninnar var losun (afgösun) H_2O , CO_2 og HCl (saltsýru) úr kvikunni áætluð með bergfræðilegum aðferðum. Losun SO_2 var áætluð með mælingum á styrk járn í glerjaðri Holuhraunsgjósku og vel þekktum venslum járn og brennisteinslosunar í brennisteinsmettuðum flæðibasaltgosum (Blake o.fl. 2010), auk hraunmassans. Heildarlosun vatns (H_2O) í gosinu var $16,8 \pm 3,6 \text{ Mt}$, brennisteinstvíoxíðs (SO_2) $10,7 \pm 3,0 \text{ Mt}$, koltvíoxíðs (CO_2) $6,33 \pm 1,7 \text{ Mt}$ og saltsýru (HCl) 0,1 Mt. Ekki tókst að mæla flúrsýrulosunina (HF) með bergfræðimælingum þar sem lítil afgösun flúors átti sér stað í gosinu sjálfu. Gasið sem steig upp af hrauninu við kólnun var mæld af Stefánsyni o.fl. (2017) beint úr lofti sem dregið var í gegnum sérhæfðar síur, og er sú mæling, 0,02* Mt, höfð með í 1. töflu (HF^*) undir heildarmagni mælt með DOAS, MulitGas og síum. Övissa mælinga er gefin neðanmáls í 1. töflu.

Heildarrúmmál kviku var $1,6 \pm 0,3 \text{ km}^3$, eðlisþyngd hennar 2600 kg/m^3 og heildarmassi kviku sem kom upp á 181 dögum var því $(4,2 \pm 0,8) \cdot 10^{12} \text{ kg}$. Meðalrennsli (flæði) kviku á góstímanum, 181 dögum, var $100 \text{ m}^3/\text{s}$ með samsvarandi $2,7 \cdot 10^{15} \text{ kg/s}$ massaflæði. Rennsli fyrstu vikunnar var tvisvar til þrisvar sinnum meira (2,5) en meðalrennsli allan góstímann, en það var 50 til 80 m^3/s í desember

1. tafla. Heildamagn kviku og gastegunda, flæði hrauns og útstreymi gastegunda á gostímanum. Magn og streymi gastegunda er metið með bergfræðilegum mælingum og mælt með DOAS, MultiGas og síu tækni eins og skýrt er í neðanmálstexta.

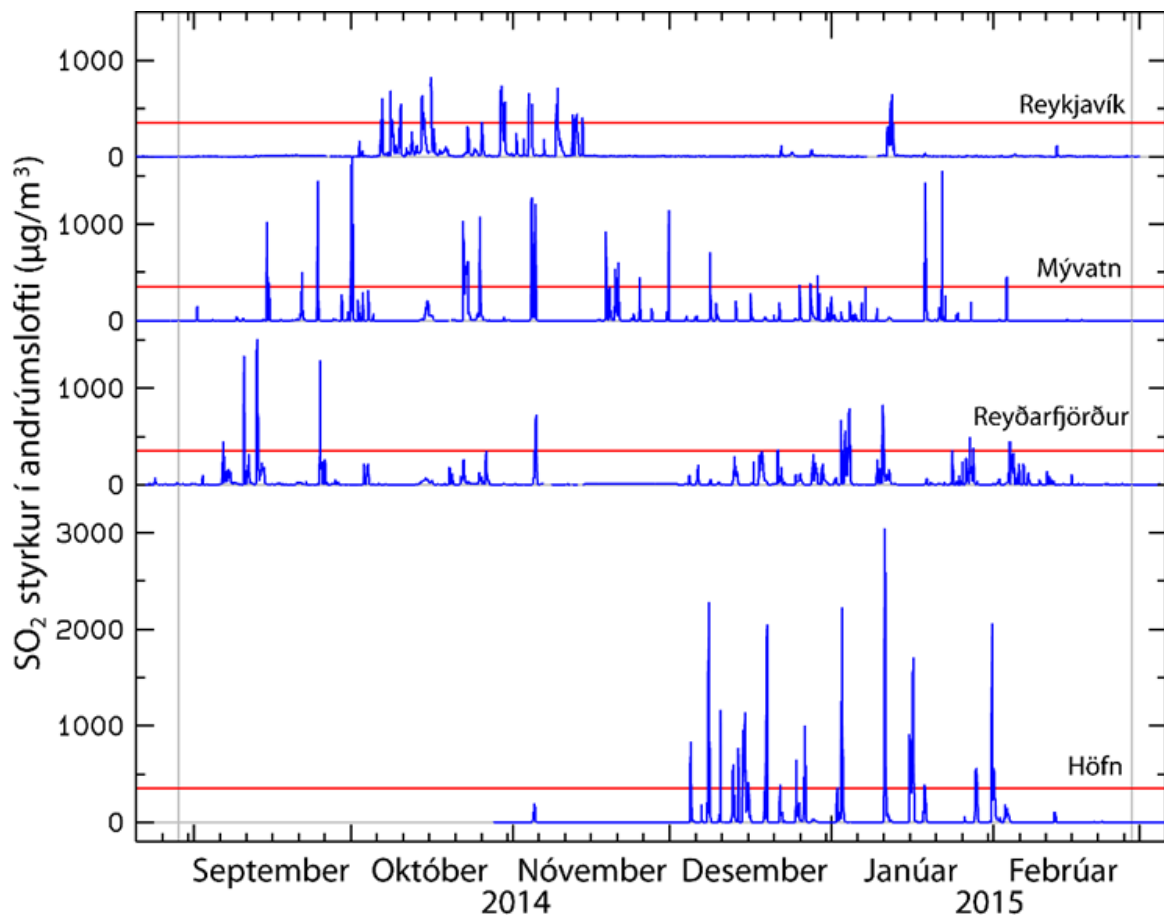
	Total			Average			First weeks (2.5 times average)			December-January		
	Magma Mt	Petrologic Mt	DOAS MultiGAS Mt	Magma kg s ⁻¹	Petrologic kg s ⁻¹	DOAS MultiGAS kg s ⁻¹	Magma kg s ⁻¹	Petrologic kg s ⁻¹	DOAS MultiGAS kg s ⁻¹	Magma kg s ⁻¹	Petrologic kg s ⁻¹	DOAS MultiGAS kg s ⁻¹
Magma	4200			2.69E+5			6.71E+5			1.75E+5		
H ₂ O		16.8	284		1070	1.81E+4		2690	5.21E+4		698	1.15E+4
SO ₂		10.7	11.8		684	754		1710	1380		445	546
CO ₂		6.33	5.60		405	358		1010	1500		263	187
HCl		0.10			6.4			16.0			4.2	
HF		BD			BD							

og janúar (0,65 sinnum meðalrennslið) en það minnkaði síðan smátt og smátt til loka gossins 27. febrúar 2015. Óvissan í rennsli var 20%, bergfræðileg áætlun á streymi gastegunda var; H₂O 22%, SO₂ 28%, CO₂ 26%, HCl~100% og HF var fyrir neðan næmi bergfræðiaðferðarinnar (BD). Óvissan í DOAS mælingum á streymi SO₂ var 38%, og heildaróvissa í streymi H₂O og CO₂ mælt með DOAS og MultiGas var 65% og 69%. Heildarstreymi HF 0,02* Mt mælt af Stefánssyni o. fl. (2017) beint úr lofti sem dregið var í gegnum sérhæfðar síur.

Beinar mælingar á útstreymi gastegunda

Útstreymi brennisteinstvíoxíðs (SO₂) var mælt í gosmekkinum frá byrjun gossins með svokölluðum DOAS ljósgleypnimælingum (Differential Optical Absorption Spectroscopy). Samhliða SO₂-mælingunum voru hlutföll gastegunda, CO₂/SO₂, H₂S/SO₂, H₂/SO₂ og H₂O/SO₂, mæld á jörðu niðri með svokölluðum „MultiGAS“ mæli. Tíu þversnið af gosmekkinum voru mæld með DOAS-mælinum á tímabilinu 21. september til 4. febrúar og sýna þau minnkun SO₂ útstreymisins frá 1400 kg/s til 100 kg/s. Línuleg bestun þessara mæligilda gefa 11,8±4,1 Mt heildarlosun SO₂ úr kvikunni á meðan gosið varði og breytileika í útstreymi SO₂ fyrri og seinni hluta gossins eins og sjá má í 1. töflu. Hlutföll CO₂/SO₂ og H₂O/SO₂ í gosmekkinum lækkuðu meðan á gosinu stóð, mökkurinn varð hlutfallslega SO₂ ríkari. Með því að tefla saman DOAS- og MultiGAS-mælingum má áætla heildarstreymi H₂O og CO₂ og mismun fyrri og seinni hluta gossins eins og sjá má í 1. töflu. Heildarstreymi CO₂ var 5,6±3,6 Mt og 284± 93 Mt af H₂O. Vatnsgufan (H₂O) var ekki eingöngu ættuð úr kviku, heldur að stórum hluta aðkomuvatn sem eimaðist upp við eldstöðvarnar. Þannig er mismunur bergfræðimælinganna á losun vatnsgufu annars vegar og MultiGAS og DOAS mælinganna hins vegar (1. tafla) útskýrður. Að öðru leyti ber mælingum á útstreymi gastegundanna SO₂ og CO₂ með DOAS og MultiGAS mælingum og bergfræðimælingum ágætlega saman. Enn fremur má geta þess að samræmi er á milli SO₂ útstreymis í 1. töflu og mats byggðu á mælingum á kvi-kuinnlyksun í kristöllum sem og gervitunglamælingum á SO₂ útstreymi á gostímanum (Gauthier o.fl. 2016).

Ljóst var af þessum niðurstöðum að mest hætta stafaði af SO₂ í andrúmslofti, vegna þess magns (~12 Mt) sem losnaði, beinna eituráhrifa og möguleika á oxun SO₂ í brennisteinssýru (H₂SO₄) sem er sterk sýra. Heildarlosun SO₂ úr Holuhraungosinu til andrúmslofts var svipuð og samanlögð árleg meðallosun allra eldfjalla Jörðinni (Andres & Kasgnoc 1998) og meiri en árleg losun Evrópu-búa árið 2011 (Klimont, Smith & Cofala 2013). Losun CO₂ úr Holuhrauni var 5–6 Mt eða aðeins um 0,2% af losun Evrópusambandsins 2014 (Global Carbon Project 2017), og tæplega tvisvar sinnum meiri en losun Íslendinga árið 2014 (Hellsing o.fl. 2016).



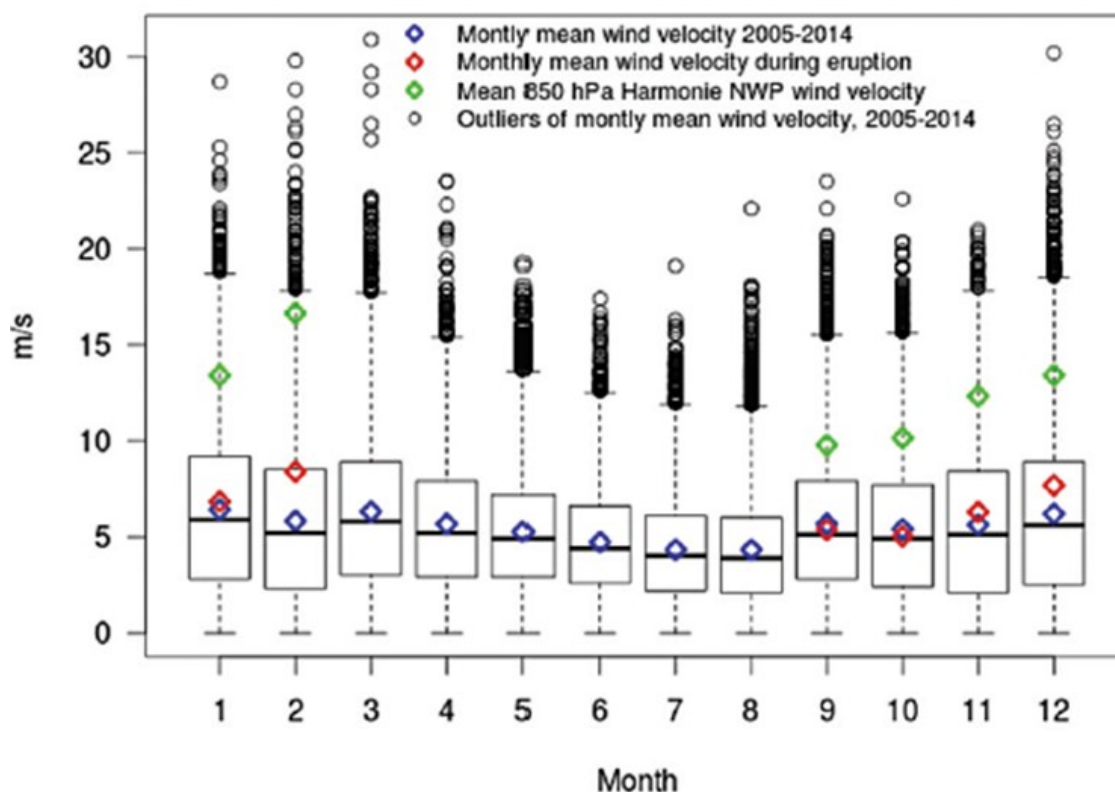
2. mynd. Klukkustundarmeðaltalsstyrkur SO_2 gass ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) í andrúmslofti á fjórum loftmælistöðvum á Íslandi. Staðsetning stöðvanna er sýnd á 4. mynd. Heilsuverndarmörk ($350 \mu\text{g}/\text{m}^3$) eru sýnd með rauðri lárétttri línu og upphaf og endir gossins með gráum lóðréttum línunum. Vöktun hóst ekki fyrr en 28. október 2014 á Höfn í Hornafirði.

Loftgæði á Íslandi á góðstímanum

Við upphaf Holuhraungossins voru 11 loftmælistöðvar sem mældu 10 og 60 mínútna meðalstyrk SO_2 í lofti yfir Íslandi. Heilbrigðisreglugerð miðar við $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$ meðalstyrk SO_2 í 60 mínútur að hámarki (Heilbrigðisreglugerð 2002). Sjö þessara stöðva sendu niðurstöður viðstöðulaust til höfuðborgarinnar og voru þær birtar á heimsíðu Umhverfisstofnunar (<http://loftgaedi.is>).

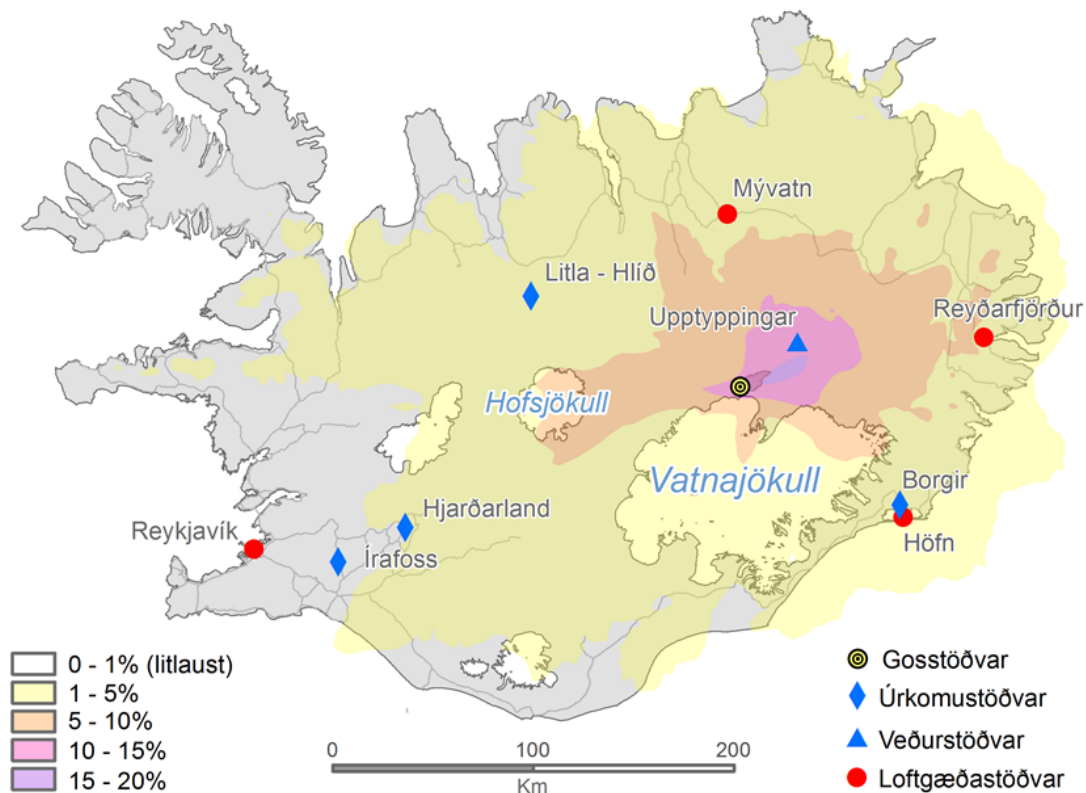
Í lok janúar 2015 voru þessar föstu stöðvar orðnar 21 að tölu eins og sjá má á 1. mynd. Fjöldi hreyfanlegra stöðva, þar sem notast var við handmæla, að mestu í vörslu lögreglumanna, er einnig sýnd með hálfylltum rauðum hringjum á 1. mynd. Dæmi um klukkustundarmeðalstyrk SO_2 á fjórum föstum vöktunarstöðvum yfir góðstímann eru sýnd á 2. mynd. Stöðvarnar eru í Reykjavík, á Mývatni, á Reyðarfirði og á Höfn. Staðsetning þessara stöðva miðað við gosstöðvarnar er sýnd á 1. og 4. mynd. Stöðvarnar í Reykjavík, á Reyðarfirði og við Mývatn höfðu verið starfræktar fyrir gosið, en fyrsta loftmælistöðin á Íslandi hóf starfsemi sína í Straumsvík, sunnan Hafnafjarðar 1968 og mældi sólarhringsmeðaltöl. Fyrsta loftmælistöðin sem sendi klukkustundarmeðalgildi var tekin í notkun 1991. Rekstur föstu stöðvarinnar á Höfn hófst 28. október 2014. Fyrir þann tíma var notast við handmæla á Höfn. Fyrir gosið 2014–15 hafði klukkustundarmeðalstyrkur SO_2 í lofti aldrei farið yfir heilbrigðismörk ($350 \mu\text{g}/\text{m}^3$) á þeim loftgæðastöðvum sem verið höfði í rekstri.

Á 2. mynd má sjá dæmi um SO₂ topp, fyrir gos, sem rekja mátti til álbræðslunnar á Reyðarfirði og er hann töluvert undir viðmiðunarmörkum. Upphaf og lok gossins er sýnt með gráum lóðréttum línunum á 2. mynd. Á meðan á gosinu stóð fóru bæði mældur og áætlaður styrkur SO₂ langt yfir viðmiðunarmörk eins og sjá má á 2. og 4. mynd. Miklu hærri augnabliksstyrkur SO₂ mældist á mörgum hreyfanlegu stöðvunum, til dæmis 21.000 mg/m³ á Höfn áður en fasta stöðin var sett upp, en hún mældi hæstan klukkutímameðalstyrk 3.050 µg/m³ 11. janúar 2015 (2. mynd).



3. mynd. Dreifing vindhraða eins og hann mældist 10,5 m frá jörðu við Upptýppinga tímabilið 2005–2014. Dreifing mælinga innan hvers mánaðar er sýnd með miðgildi (median), neðri og efri mörkum 25% og 75% mælinga, lágmarki og hámarki mælinga og útgildi vindstyrks innan hvers mánaðar eru sýnd með svörtum hringjum. Bláu tíglarnir sýna reiknað meðaltal vindhraða hvers mánaðar á tímabilinu 2001–2014, en rauðu tíglarnir reiknað meðaltal vindhraðamælinga hvers mánaðar frá 1. september 2014 til 27. febrúar 2015. Grænu tíglarnir tákna áætlaðan meðalvindhraða (m/s) í um 1200–1500 m.h.y.s. (Harmonie 850 hPa Numerical Weather Prediction (NWP)) á meðan gaus í Holuhrauni, en eldstöðvarnar eru í um 740 m.h.y.s.

Vindstyrkur og stefna réðu mestu um dreifingu kvikugastegunda á Íslandi á gostímanum. Veðurstofa Íslands hefur rekið sjálfvirka veðurstöð við Upptýppinga um árabil, en stöðin er um 38 km norðaustur af gosstöðvunum (65°03.639' N, 16°12.624' V; 4. mynd). Stöðin er í 563 m h.y.s. Vindstyrkur var mældur fyrir og á meðan gangur var í gosinu. Þessi mynd sýnir klárlega að meðaltal vindstyrks í 10,5 metra hæð frá jörðu er herra á veturna en sumrin og að aftakaveður eru mun algengari á veturna en sumrin. Ennfremur að áætlaður vindstyrkur í um 650–850 m hæð yfir eldstöðvunum og nær samfelld frá upphafi goss í september til gosloka 27. febrúar.



4. mynd. Dreifing SO_2 gass 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. Staðsetningar vöktunarstöðva sem getið er í texta eru sýndar á myndinni.

Veðurstofa Íslands notaði loftgæðalíkanið „CALPUFF“ til að spá fyrir um loftgæði með tilliti til styrks SO_2 í lofti. Þetta er dregið saman yfir allan gostímann, 181 daga, á 4. mynd, sem tíðni klukkustundarmeðalgilda sem fara yfir $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$ heilsuverndarmörkin. Til dæmis merkir 10% tíðni, að styrkur SO_2 hafi farið samtals 18 sólarhringa eða 432 klukkustundir yfir heilsuverndarmörk. Líkanið sýnir að yfir stærstum hluta Íslands hafi styrkur SO_2 í andrúmslofti verið yfir heilsuverndarmörkum í meira en 43 klukkustundir (1% gostímans) og stór svæði miðhálandisins og hálandisins norðausturlands 9 til 18 sólarhringa þ.e. meira en 5–10% gostímans. Niðurstöðum líkansins ber ágætlega saman við samfelldar mælingar á loftmælistöðvunum. Á meðan á gosinu stóð fór klukkutímameðalstyrkur SO_2 í loftmælistöðinni við Mývatn yfir viðmiðunarmörk 2,0 % tímans, 1,4% á Reyðarfirði og í Reykjavík og 4,2% gostímans á Höfn. Síðast mældist SO_2 , sem rekja má til gossins, á föstum mælistöðvum, við Mývatn 18. febrúar 2015. Þessi mæling sést ekki á 2. mynd vegna smæðar miðað við fyrri toppa.

Loftgæði í Evrópu á meðan á gosin stóð

Útstreymi gass frá Holuhrauni olli tvisvar sinnum verulegri hækkun á styrk SO_2 í lofti á Írlandi og Bretlandseyjum í september 2014 þegar mestur gangur var í gosinu (Schmidt o.fl. 2015 og 1. tafla og 2. tafla). Dæmi um hæstu mældu klukkustundarmeðalgildi ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) eru frá 6. september 2014 á Írlandi og há gildi mældust einnig 22. september í Hollandi, Belgíu og Austurríki (sjá 2. töflu). Styrkurinn á Írlandi fór vel yfir íslensku heilsuverndarmörkin ($350 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Þann 22. september mældist hár styrkur ($235 \mu\text{g}/\text{m}^3$) í Masenberg-stöðinni í Austurríki. Þessi stöð er bakgrunnsstöð í 2754 m.h.y.s, langt frá staðbundnum SO_2 uppsprettum, og heyrir til algerra undantekninga ef styrkur þar mælist yfir $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Þennan dag mældis óvenjuhár SO_2 styrkur í lofti á flestum af þeim 30 loftmælistöðvum sem voru í rekstri í Austurríki.

2. tafla. Klukkustundarmeðalstyrkur SO_2 ($\mu g/m^3$) í lofti í Evrópu á fyrstu vikum Holuhraungossins.

Land	Loftmælistöð	Breidd	Lengd	Hæð yfir sjávarmáli	Dagsetning	Fjarlægð frá gosstöðvum	Hæsta klukkustundargildi SO_2
Írland ¹	Ennis	52,84	-9,00	16 m	06.09.2014	1407 km	498 $\mu g/m^3$
Írland ¹	Portlaoise	53,04	-7,29	98 m	06.09.2014	1420 km	343 $\mu g/m^3$
Holland ²	Philippine	51,29	3,75	5 m	22.09.2014	1905 km	82 $\mu g/m^3$
Belgía ³	Ghent region	51,15	3,81	12 m	22.09.2014	1931 km	87 $\mu g/m^3$
Bretland ⁴	Wicken Fen	52,30	0,29	3 m	22.09.2014	1701 km	96 $\mu g/m^3$
Austurríki ⁵	Masenbergl	47,35	15,89	1210 m	22.09.2014	2754 km	235 $\mu g/m^3$

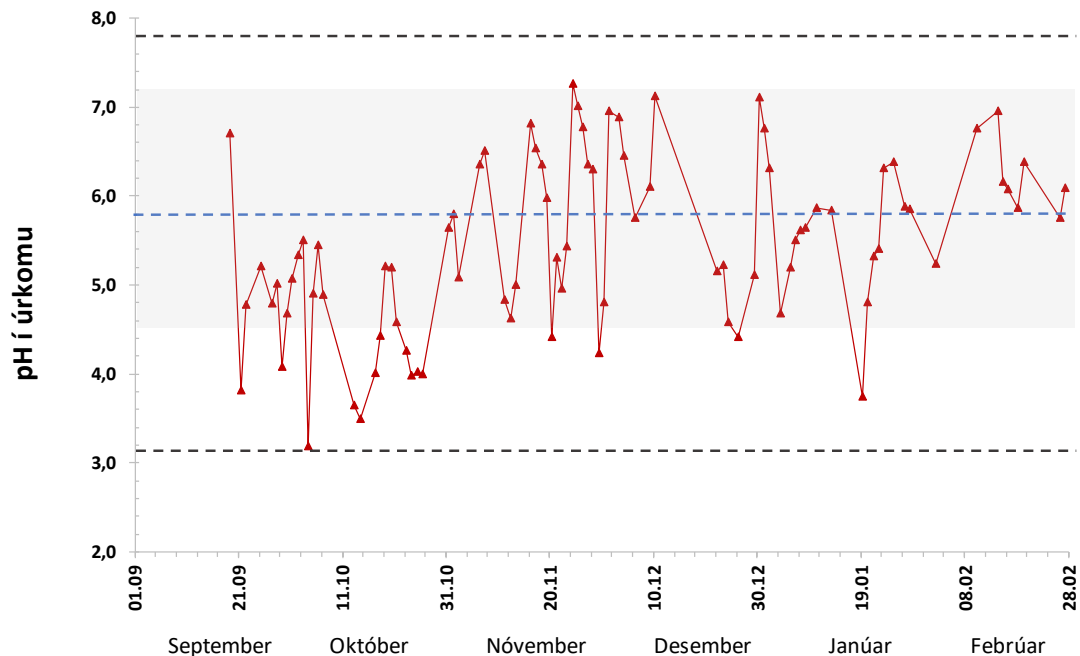
¹Gögn frá „The Irish Environmental Protection Agency“. ²Gögn frá „The National Institute for Public Health and The Environment“. ³Gögn frá „The Belgian Interregional Environment Agency“. ⁴Gögn frá „The Department for Environment Food & Rural Affairs“. ⁵Gögn frá „The Environment Agency Austria“

Mengun í úrkomu á Íslandi

Meðan á gosinu stóð var 648 sýnum af úrkomu safnað á 21 af veðurathugunarstöðvum Veðurstofu Íslands (1.mynd). Þessum sýnum hefur verið lýst og túlkuð af Andra Stefánssyni o.fl. (2017). Flest sýnu sýnin ($pH < 5,5$) voru frá sunnanverðu landinu, og það súrasta, með pH niður í 3,2, frá veðurathugunarstöðinni að Borgum í Hornafirði (1., 4. og 5. mynd). Á 5. mynd má sjá hvernig pH gildi úrkomu (rauðir þríhyrningar) að Borgum breytist frá því um 3 vikum eftir að gos hófst í Holuhrauni og allt til gosloka 27. febrúar. Úrkoma að Borgum virðist vera súrust fyrri hluta góstímans þegar mestur gangur var í gosinu. Gráu brotalínurnar á myndinni tákna spönn pH gildis allra úrkomusýna sem safnað var á góstímanum. Gildi pH í hreinni rigningu, mettaðri af koltvioxíði andrúmslofts (CO_2 395 ppmv) og rétt fyrir ofan frostmark (0,1 °C), er 5,54. Reiknað meðaltal pH í úrkomu á Írafossi í Grímsnesi (4. mynd), sem er langtíma loft- og úrkomuvöktunarstöð Veðurstofu Íslands, var 5,80 við ~22 °C yfir „eldgosalaus tímabilið 2005–2009“ og er sýnt með bláu brotalína á 5. mynd, en gráskyggði flöturinn táknar spönn pH í úrkomusýnum (4,5–7,2 frá Írafossi yfir sama tímabil. Uppgufun og efnaskipti vatns og ryks, sem er að mestu leyti glerjuð basaltgíóska, hækkar pH gildi úrkomu (Gíslason & Eugster 1987). Reiknað meðaltal pH í úrkomu á Írafossi á góstímanum 2014–15 var 5,4 (4,0–6,6) þar sem 25% sýna voru með pH fyrir neðan 5,0. Þetta eru töluvert lægri gildi en yfir goslausu tímabilið 2005–2009.

Mörg pH gildin á góstímanum voru há, líklega vegna efnaskipta vatns og ryks í úrkomusöfnunum og í sýnaflöskum áður en sýnin bárust til rannsóknastofu þar sem mælingar voru framkvæmdar eins og lýst hefur verið af Gíslason o.fl. (2015) og Stefánssyni o.fl. (2017). Á meðan gosið var í gangi var meðaltals styrkur súlfats (SO_4) í úrkomu á Írafossi 426 μM og spönnin 1,8–12.300 μM . Meðaltal flúors (F) í sömu sýnum var 17,7 μM og spönnin <0,2–444. Þessi meðaltalsgildi eru 39 og 68 sinnum hærri en meðaltöl fyrri ára. Súlfat myndast við klofnun brennisteinssýru (H_2SO_4) en hún getur myndast við oxun brennisteinstvioxíðs (SO_2) í þurru lofti eða eftir leysingu og oxun í úrkomu. Hæstur styrkur súlfats og flúors mældist í úrkomu á veðurathugunarstöðunum í Litlu-Hlíð og Hjarðarlandi (gögn ekki sýnd).

Gildi pH í nýföllnum snjó sem safnað var á meðan gosinu stóð við jaðar Holuhrauns (1. mynd) og síðar bræddur í rannsóknastofu var frá 3,34 til 4,85 við 0,1°C. Sumum þessara sýna var safnað undir gosmekkinum. Eins og áður sagði er pH hreinnar rigningar, mettaðri af koltvioxíði andrúmslofts (CO_2 395 ppmv) og rétt fyrir ofan frostmark (0,1 °C), 5,54. Öll snjósýnin voru sýrð af brennisteinssýru (H_2SO_4), saltsýru (HCl) og flúrsýru (HF) eins og sjá má á 6. mynd, pH gildin voru lægri en 5,54. Allar vatnslausnir eru í svokölluðu hleðslujafnvægi, það eru jafn margar mínus hleðslur anjóna og plús hleðslur katjóna. Um það bil helmingur mínus hlöðnu anjónanna í snjóbráðinu,



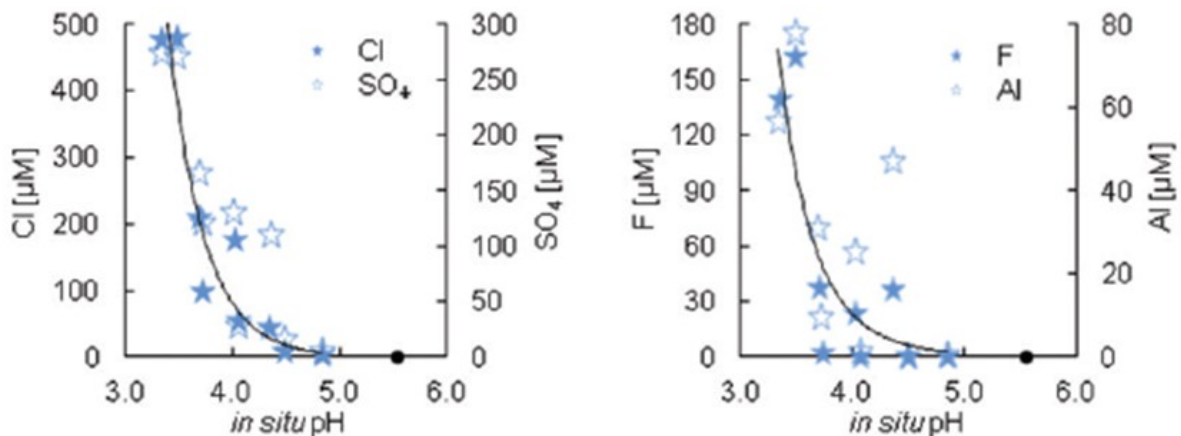
5. mynd. Gildi pH í úrkomu að Borgum í Hornafirði (4. mynd) á gostíma Holuhrauns 2014–15 er sýnt með rauðum þríhyrningum. Reiknað meðaltal pH í úrkomu á Írafossi í Grímsnesi (4. mynd), sem er langtíma loft- og úrkomuvöktunarstöð Veðurstofu Íslands, var 5,80 við ~ 22 °C yfir „eldgosalaus tímabilið 2005–2009“ og er sýnt með bláu brotalinunni en gráskyggði flöturinn tákar pH spönn þessara eldri úrkomusýna (4,5–7,2 frá Írafossi). Gráu brotalinurnar á myndinni sýna há- og lágmarksgildi pH í öllum úrkomusýnum sem safnað var á gostímanum.

SO_4^{2-} , Cl^- og F^- var „jafnaður“ af H^+ katjóninni en afgangurinn af málum eins og Al^{3+} , Fe^{3+} , Fe^{2+} , Na^+ , Ca^{2+} og Mg^{2+} . Hámarkshluti sjávarúða í þessum sýnum jafngildir lægsta styrk Cl í þessum sýnum, 5,15 μM og miðað við mólhlutföll SO_4/Cl og F/Cl í sjó (0,0512 og 0,000125; Bruland & Lohan 2003), var hámarks sjávarættaður hluti brennisteins og flúors 0,28 μM SO_4 og 0,0007 μM F. Hluti sjávarættaðs klórs, brennisteins og flúors var því hverfandi lítill að frátöldum Cl í minnst sýrðu sýnunum. Þessum sýnum er lýst nákvæmlega í Galeczka o.fl. (2016). Styrkur F, Al, Fe, Mn, Cd, Cu, og Pb var hærri í snjóbráðinni en leyfilegur hámarksstyrkur í evrópsku neysluvatni (European Community 1998).

Umbræður

Gosið á eldstöðvakerfi Bárðarbungu norðan Vatnajökuls 2014–2015 var hið mesta á Íslandi frá því í Skaftáreldum 1783–84. Um 1,6 km³ af kviku kom upp á sex mánuðum og myndaði hraun, sem er svipað að flatarmáli (84 km²) og Þingvallavatn, og tæplega 12 Mt af SO_2 gasi losnuðu úr læðingi, en um það bil tífalt meira af gosefnum kom upp á átta mánuðum í Skaftáreldum.

Hraunrennsli var mest í upphafi Holuhraungossins og minnkaði stöðugt allt til enda þess (1. tafla). Gasmengun dreifðist um mest allt Ísland á gostímanum (4. mynd) og stundum alla leið til Evrópu (2. tafla og Schmidt o.fl. 2015). Þrátt fyrir að norðanvert landið hafi oftar orðið fyrir SO_2 mengun en það sunnanverða, var úrkomu oftast súr á Suðurlandi. Þetta gæti stafað af því að þegar gosmökkurinn barst norður, þá fór hann í átt að minni birtu og raka, en þegar hann barst suður í höf þá mætti honum meiri raki og birta. Í þurru veðri er oxun brennisteinstvíoxíðs (SO_2) hraðari í birtu en myrkri, og hún er hraðari í raka en þurrki (Lelieveld 1993, Schmidt o.fl. 2010). Þegar mengunin barst svo aftur til landsins „með næstu lögð“, hafði brennisteinstvíoxíð gasið (SO_2) náð að oxast í brennisteinssýru (H_2SO_4) sem sýrði úrkomuna (Gíslason o.fl. 2015; Stefánsson o.fl. 2017).

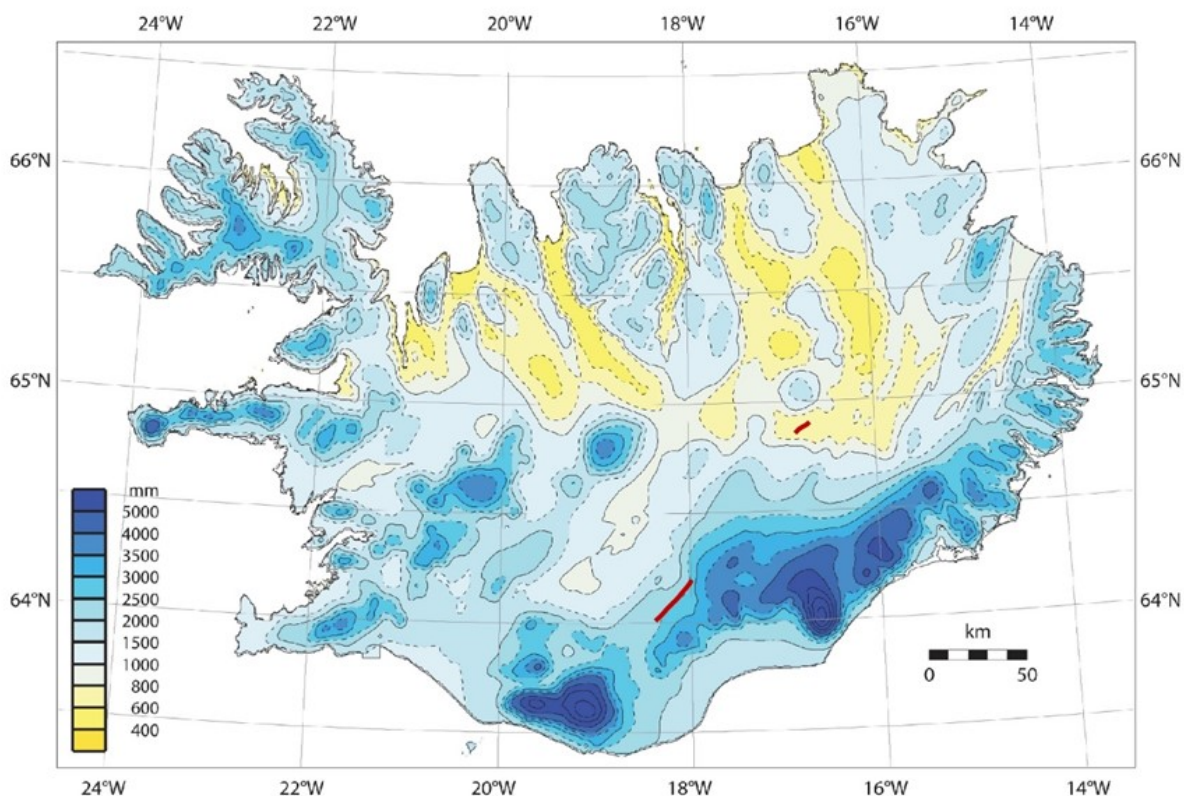


6. mynd. Styrkur Cl^- , SO_4^{2-} , F^- og Al^{3+} í snjó, sem safnað var við jaðar Holuhrauns (1. mynd), sem fall af pH við $0,1^\circ\text{C}$ (in situ). Svarti punkturinn á x-ásnum sýnir pH hreins vatns sem er mettað af koltvíoxíði andrúmslofts (395 ppmv) við sama hitastig.

Ísland er ein virkasta ryk uppspretta Jarðarinnar og berast 30–40 Mt/ár frá Íslandi til andrúmslofts (Arnalds o.fl. 2014). Efnaskipti ryks og úrkomu geta temprað og hækkað pH úrkomunnar (Gíslason & Eugster 1987), en Flæðurnar norðan Vatnajökuls, sem umlykja Holuhraun, eru stærsta ryk uppspretta landsins og mestur hluti hins fínkornóttar ryks er basaltgler sem berst aðallega til norðurs (Arnalds o.fl. 2014).

Styrkur málmsalta og sýra í öllum snjósýnum við eldstöðvarnar var svipaður. Málmarnir eru leysanlegir við lágt pH og geta bæði skaðað eða auðgað vatn, allt eftir því hver styrkur málma er og hvaða málmur á í hlut. Til dæmis var hæsti styrkur áls (Al) í snjó á 6. mynd um fimm sinnum hærri en sá styrkur sem minkar lífslíkur laxaseiða um 50% (Gensemer & Playle, 1999). Tíður og kröftugur lægðagangur yfir Ísland á gostímanum olli sterkum vindi (3. mynd) sem dreifði gosmekkinum og bar hann hratt út af landinu, reif upp ryk af Flæðunum, olli tímabundin þýðu á láglandi og kom þar með í veg fyrir að mengun safnaðist lengi fyrir í snjó, heldur skolaðist hún jafnóðum út í vatnakerfin. Hins vegar safnaðist mengun fyrir í snjó stærstan hluta gostímans í mikilli hæð á Vatnajökli og hæstu tindum Austanlands (Galeczka o.fl. 2017). Fyrsta snjóbráð á vori getur verið með mun meiri styrk sýru og málma en meðalefnasamsetning snævarins sem er að bráðna, og getur mengun borist hratt í ár og læki án efnaskipta við frosinn jarðveg (Johannessen & Hendriksen 1978, Sigurður Reynir Gíslason 1990). Þessi seinborna mengun var vöktuð samfelld í dragánni Fellsá á Austurlandi, frá páskum 2015 til loka ágúst 2015 eins og lýst er í Eiríksdóttur o.fl. (2017) seinna í þessu riti.

Bergfræðilegt mat á afgösum SO_2 og CO_2 úr kvikunni í Holuhraunsgosinu ber ágætlega saman við beinar mælingar á losun þessara gastegunda í gosinu. Þetta styrkir áætluð umhverfisáhrifa fyrri sögulegra gosa eins og t.d. Skaftáreldagossins 1783–84, þar sem losun gastegunda hefur verið metin með svipuðum aðferðum (t.d. Thordarson & Self 2003). Miðað við þessar rannsóknir, var losun gastegunda um tíu sinnum minni í Holuhraunsgosinu 2014–15 sem hófst 31. ágúst og stóð í sex mánuði en í Skaftáreldum 1783–84 sem hófust 8. júní og stóð í átta mánuði. Meðalvindhraði er mun meiri á veturna en á sumrin (3. mynd) þannig að gosmökkurinn dreifðist og barst mun hraðar út af landinum en í Skaftáreldum. Skaftáreldar hófust þegar sólargangur er hvað lengstur á Íslandi, en daginn var farið að stytta við upphaf Holuhraunsgossins. Vegna takmarkaðs ljóss og dvalartíma, náði minni hluti SO_2 gastegundarinnar að oxast yfir í brennisteinssýru en í Skaftáreldum. Holuhraunsgosið kom upp hraðar út af landinu en í Skaftáreldum. Skaftáreldar hófust þegar sólargangur er hvað lengstur á Íslandi, en daginn var farið að stytta við upphaf Holuhraunsgossins. Vegna takmarkaðs ljóss og dvalartíma, náði minni hluti SO_2 gastegundarinnar að oxast yfir í brennisteinssýru en í Skaftáreldum. Holuhraunsgosið kom upp á einum þurrasta stað Íslands (7. mynd) en Skaftáreldar voru hins vegar á miklu úrkomusvæði. Vegna tímasetningarinnar og staðsetningarinnar er því líklegt að hlutfallslega meira hafi oxast af brennisteinshvíoxíð gasinu (SO_2) í brennisteinssýru (H_2SO_4) í Skaftáreldum. Það má leiða líkur að því að stór flæðigos sem verða um miðjan vetur á „háum breiddargráðum“, þar sem mikill munur er á veðurhæð og birtu milli veturs og sumars, valdi fyrst og fremst SO_2 mengun en sambærilegt gos um mitt sumar ylli bæði SO_2 og brennisteinssýrumengun.



7. mynd. Staðsetning eldstöðva Skaftárelda 1783–84 og Holuhraungossins 2014–15 á korti Veðurstofu Íslands af ársúrkomunni á Íslandi frá 1971–2000 (Veðurstofa Íslands 2017).

Ályktanir

Staðsetning og tímasetning gossins í Holuhrauni lágmarkaði áhrif þess á menn og náttúru. Það var staðsett: 1) langt frá byggð, 2) rétt norðan Vatnajökuls þannig að hvorki varð öskugos né jökulhlaup, 3) í „regnvari“ norðan Vatnajökuls, þannig að oxun SO_2 í brennisteinssýru var takmörkuð og 4) í helsen ryk uppsprettu landsins, en rykið getur hlutleyst þá sýru sem myndast í gosinu. Gosið varð þegar: 5) vöxtur gróðurs var í lámarki, 6) fararsnið var á grasbítum til láglendis, 7) sólargangur var stuttur og ljós því takmarkað til oxunar SO_2 í þurru lofti, 8) vindhraði var mikill sem dreifði gosmekki og ryki og bar mökkinn hratt burt frá landinu.

Vegna alls þessa, mætti ætla að umhverfisáhrif frá Holuhrauni væru minni en vænta mætti vegna þess hve gosið var stór og útstreymi gastegunda mikil. Flestir þessir þætti sem taldir eru hér upp um staðsetningu og tímasetningu voru öndverðir í Skaftáreldum 1783–84, og mögnuðu því upp umhverfisáhrif þess goss sem leiddi til Móðuharðindanna.

Þakkir

Þessar rannsóknir voru fjármagnaðar af sérstakri fjárveitingu íslenska ríkisins sem stjórnað var af Almannavörnum Ríkislögreglustjóra, þeim rannsóknarstofnunum sem höfundar starfa á, auk eftirfarandi styrkja: „EC FP7 Framework programme The Futurevolc project“, „The Swedish Research Council FORMAS“ og „The French Centre of Excellence “Clervolc”“. Við þökkum „The Environmental Protection Agency“ á Írlandi, „The National Institute for Public Health and The Environment“ í Hollandi, „The Belgian Interregional Environment Agency“, „The Department for Environment Food & Rural Affairs“ á Bretlandseyjum, og „The Environment Agency of Austria“ fyrir upplýsingar um loftgæði í þessum löndum á góðmánu. Bestu þakkar til Svövu B. Þorlaksdóttur, Guðmundu M. Sigurðardóttur, Vilhjálms Kjartanssonar, Þorgils Ingvarssonar, Bergs H. Bergssonar, Rósu Ólafsdóttur, Söndru Ó. Snæbjörnsdóttur, Sveinbjörns Steinþórssonar, Þorsteins

Jónssonar, and Nahum Clements fyrir margvíslegar mælingar og aðstoð. Bogi B. Björnsson gekk frá myndum, Rebecca Neely las yfir enskan texta upprunalegu greinarinnar, Anja Schmidt, Evgenia Ilyinskaya og Pierre Delmelle ritrýndu upprunalegu greinina og Liane G. Benning ritstýrði henni. Geochemical Perspective Letters veitti leyfi til þýða greinina og að birta myndir og töflur lítillaga breyttar.

Heimildir

- Andres, R. J. & A. D. Kasgnoc. 1998. A time-averaged inventory of subaerial volcanic sulphur emission. *Journal of Geophysical Research* 103: 25.251–25.261.
- Arnalds, O., H.P. Olafsson & P. Dagsson-Waldhauserova. 2014. Quantification of iron-rich volcanogenic dust emissions and deposition over ocean from Icelandic dust sources. *Biogeosciences Discussion* 11: 5941–5967.
- Blake S., S. Self, K. Sharma, K. & S. Sephton. 2010. Sulfur release from the Columbia River Basalt and other flood lava eruptions constrained by a model of sulfide saturation. *Earth and Planetary Science Letters* 299: 328–338.
- Bruland K.W. & M.C. Lohan 2003. Control of trace metals in seawater. I: *The Oceans and Marine Chemistry* (ritstj.: H.D. Holland & K.K. Turekian), Elsevier–Pergamon, Oxford, 23–47.
- European Commission 2010. *Volcano crisis report*, online report, 30 June. European Commission, Brussels. http://ec.europa.eu/transport/ash_cloud_crisis_en.htm.
- European Community 1998. Council directive 98/83. *Official Journal of the European Communities*.
- Eiríksdóttir, E.S., I. Galezka & S.R. Gíslason. 2017. Áhrif eldgossins í Bárðarbungu 2014–2015 á efnasamsetningu og framburð Fellsár í Fljótsdal. *Rit LbhÍ* 83: 57–64
- Flaathen, T.K. & Sigurður R. Gíslason. 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.
- Frogner P., S.R. Gíslason & N. Oskarsson N. 2001. Fertilizing potential of volcanic ash in ocean surface water. *Geology* 29: 487–490.
- Galezka I.M., E.H. Oelkers & S.R. Gíslason. 2014. The chemistry and element fluxes of the July 2011 Múlaflá and Kaldakvísl glacial floods, Iceland. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 273: 41–57.
- Galezka, IM, G. Sigurdsson, E.S Eiríksdóttir, E.H Oelkers & S.R Gíslason. 2016. The chemical composition of rivers and snow affected by the 2014/2015 Bárðarbunga eruption, Iceland. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 316: 101–119.
- Galezka I., E.S. Eiríksdóttir, E.H. Oelkers, F. Pálsson, R. Olafsdóttir, E. B. Jonasdóttir, L. Benning, S. Lutz, Á. E. Sveinbjörnsdóttir, A. Stefánsson, J. Gunnarsson Robin & S.R. Gíslason. 2017. Pollution from 2014/15 Bárðarbunga eruption monitored by snow cores from Vatnajökull glacier, Iceland. *Rit LbhÍ* 83: 41–45.
- Gensemer, R.W. & R.C. Playle. 1999. The bioavailability and toxicity of aluminium in aquatic environments. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 29: 315–450.
- Gíslason S.R. 1990. Chemistry of precipitation on the Vatnajökull glacier and the chemical fractionation caused by the partial melting of snow. *Jökull* 40: 97–117.
- Gíslason S.R. & H.P. Eugster. 1987. Meteoric water–basalt interactions: I. A laboratory study. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 51: 2827–2840.
- Gensemer, R.W. & R.C. Playle. 1999. The bioavailability and toxicity of aluminium in aquatic environments. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 29: 315–450.
- Gíslason S.R. 1990. Chemistry of precipitation on the Vatnajökull glacier and the chemical fractionation caused by the partial melting of snow. *Jökull* 40: 97–117.
- Gíslason S.R. & H.P. Eugster. 1987. Meteoric water–basalt interactions: I. A laboratory study. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 51: 2827–2840.
- Gíslason, S.R. & P. Torssander 2006. The response of Icelandic river sulfate concentration and isotope composition, to the decline in global atmospheric SO₂ emission to the North Atlantic region. *Environmental Science and Technology* 40: 680–686.

Gíslason S. R., Á. Snorrason, H.K. Kristmannsdóttir, Á.E. Sveinbjörnsdóttir, P. Torsander, J. Ólafsson, S. Castet & B. Durpé. 2002. Effects of volcanic eruptions on the CO₂ content of the atmosphere and the oceans: the 1996 eruption and flood within the Vatnajökull Glacier, Iceland. *Chemical Geology* 190: 181–205.

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. Aiupp, 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: 84–93 | doi: 10.7185/84 geochemlet.1509.

Global Carbon Project. 2016. *Carbon budget and trends 2016*. [www.globalcarbonproject.org/carbonbudget] published on 14 November 2016.

Gudmundsson M.T., K. Jónsdóttir, A. Hooper, E. P. Holohan, S. A. Halldórsson, B. G. Ófeigsson, S. Cesca, K. S. Vogfjörð, F. Sigmundsson, T. Högnadóttir, P. Einarsson, O. Sigmarsson, A. H. Jarosch, K. Jónasson, E. Magnússon, S. Hreinsdóttir, M. Bagnardi, M. M. Parks, V. Hjörleifsdóttir, F. Pálsson, T. R. Walter, M. P. J. Schöpfer, S. Heimann, H. I. Reynolds, S. Dumont, E. Bali, G. H. Gudfinnsson, T. Dahm, M. J. Roberts, M. Hensch, J. M. C. Belart, K. Spaans, S. Jakobsson, G. B. Gudmundsson, H. M. Fridriksdóttir, V. Drouin, I. T. Dürig, I. G. Aðalgeirsdóttir, M. S. Riishuus, G. B. M. Pedersen, T. Boeckel, B. Oddsson M. A. Pfeffer, S. Barsotti, B. Bergsson, A. Donovan, M. R. Burton & A. Aiuppa, 2016. *Science* 353: aaf8988 (2016). DOI: 10.1126/science.aaf8988.

Gauthier P.J., O. Sigmarsson, M. Gouhier, B. Haddadi & 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*, DOI: 371 10.1002/2015JB012111

Hellsing V.Ú.L., A.S. Ragnardóttir, K. Jónsson, K. Andrésson, Þ. Jóhannsson, J. Guðmundsson, A. Snorrason & J. Þórsson. 2016. *National Inventory Report, Emissions of Greenhouse Gases in Iceland from 1990 to 2014*. The Environment Agency of Iceland. [https://www.ust.is/library/Skrar/Einstaklingar/Loftgaedi/Iceland%20NIR%202016_Version%205\(20160415\).pdf](https://www.ust.is/library/Skrar/Einstaklingar/Loftgaedi/Iceland%20NIR%202016_Version%205(20160415).pdf).

Heilbrigðisreglugerð 2002. 251/2002. 2002. <http://www.reglugerd.is/interpro/dkm/WebGuard.nsf/key2/251-2002>.

Johannessen, M. & A. Hendriksen. 1978. Chemistry of snow meltwater: changes in concentration during melting. *Water Resources Research* 14: 615–619.

Klimont Z., S.J. Smith & J. Cofala. 2013. The last decade of global anthropogenic sulfur dioxide: 2000–2011 emissions. *Environmental Research Letters* 8: 014003.

Lelieveld, J. 1993. Multi-phase processes in the atmospheric sulphur cycle. Í: *Interactions of C, N, P and S Biogeochemical Cycles and Global Change* (ritstj.: R. Wollast, F. Mackenzie & L. Chou, L.), Springer–Verlag, Berlin–Heidelberg, 305–331.

Schmidt, A., K.S. Carslaw, G.W. Mann, M. Wilson, T.J. Breider, S.J. Pickering & Th. Thordarson. 2010. The impact of the 1783–1784 AD Laki eruption on global aerosol formation processes and cloud condensation nuclei. *Atmospheric Chemistry and Physics* 10: 6025–6041.

Schmidt A., S. Leadbetter, N. Theys, E. Carboni C.S. Witham, J.A. Stevenson, C.E. Birch, T. Thordarson, S. Turnock, S. Barsotti, L. Delaney, W. Feng, R.C. Grainger, M.C. Hort, Á. Höskuldsson, I. Ialongo, E. Ilyinskaya, T. Jóhannsson, P. Kenny T.A. Mather, N.A.D. Richards, & J. Shepherd. 2015. Satellite detection, long-range transport, and air quality impacts of volcanic sulfur dioxide from the 2014–2015 flood lava eruption at Bárðarbunga (Iceland). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(18): 9739–9757.

Sigmundsson F., A. Hooper, S. Hreinsdóttir, K.S. Vogfjörð, B.G. Ófeigsson, E.R. Heimisson, S. Dumont, M. Parks, K. Spaans, G.B. Gudmundsson, V. Drouin, T. Arnadóttir, K. Jónsdóttir, M.T. Gudmundsson, M.T., T. Högnadóttir, T., H.M. Fridriksdóttir, H.M., M. Hensch, M., P. Einarsson, P., E. Magnusson, S. Samsonov, B. Brandsdóttir R.S. White T. Agustsdóttir, T. Greenfield, R.G. Green, A.R. Hjartardóttir R. Pedersen, R.A. Bennett, H. Geirsson, P.C. La Femina, H. Björnsson, F. Pálsson, E. Sturkell, C.J. Bean, M. Mollhoff, A.K. Braiden, & E.P.S. Eibl. 2015. Segmented lateral dyke growth in a rifting event at Bárðarbunga volcanic system, Iceland. *Nature* 517: 191–195.

Sigurðsson, Árni & Jóhanna M. Thorlacius. 2014. Niðurstöður efnagreininga á daglegum loft og úrkomusýnum frá Írafossi 2008–2011. *Icelandic Meteorological Office Technical Report ÁSig/JMTh/2014–01*, 18 p.

Smith, S.J., J. Van Aardenne, Z. Klimont, R.J. Andres, A. Volke & S. Delgado Arias. 2011. Anthropogenic sulfur dioxide emissions: 1850–2005. *Atmospheric Chemistry and Physics* 11: 1101–1116.

Stefánsson, A., G. Stefánsson, N.S. Keller, S. Barsotti, Á. Sigurdsson, S. B. Þorláksdóttir, M. A. Pfeffer, E.S. Eiríksdóttir, E.B. Jónasdóttir, S. von Löwis & S.R. Gíslason. 2017. Major impact of volcanic gases on the chemical composition of precipitation in Iceland during the 2014–15 Holuhraun eruption. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122: doi: 10.1002/2015JD024093.

Thordarson, T. & S. Self, 2003. Atmospheric and environmental effects of the 1783–1784 Laki eruption: a review and reassessment. *Journal of Geophysical Research* 108: NO. D1, 4011.

Thordarson, Th. & A. Höskuldsson. 2008. Postglacial volcanism in Iceland. *Jökull* 58: 197–228.

Veðurstofa Íslands. 2017. Meðalúrkoma ársins 1971–2000, http://www.vedur.is/vedur/vedurfar/kort/medalurkoma_a/

Hluti III:

Áhrif á snjó, vatn og vatnalíf

4.

kafli

Áhrif eldgossins í Holuhrauni á efnasamsetningu í úrkomu, dreifingu og möguleg áhrifasvæði

Gerður Stefánsdóttir¹, Nicole Keller^{2,3}, Árni Sigurðsson¹, Elín Björk Jónasdóttir¹,
Melissa Pfeffer¹, Sara Barsotti¹, Þorsteinn Jóhannesson³, Andri Stefánsson²

¹ Veðurstofa Íslands, ² Háskóli Íslands, ³ Umhverfisstofnun

Inngangur

Við þekkjum vel hversu miklu ferskara og tærara loftið er eftir hressilega úrkomu. Ástæðan er einföld. Úrkoman hreinsar loftið, skolar út agnir í andrúmsloftinu, efnahvörf verða á milli lofttegunda og vatnsagna í andrúmsloftinu og því lækkar styrkur efna- í andrúmsloftinu. Úrkoma er mikilvæg burðarleið efna frá andrúmslofti og til jarðar. Algeng áhrif þessara efna á úrkomu eru m.a. lækkan á sýrustigi og aukinn efnastyrkur (Andri Stefánsson o.fl. 2017). Vel kunn súrnun vatna og hnignun vistkerfa í framhaldinu er skýrt dæmi um hversu umfangsmikil og víðtæk mengun í andrúmslofti og efnafræðilegar breytingar hafa á umhverfið, eiginleika vistkerfa og fjölbreytileika (Likens o.fl. 1979, Øyvind o.fl. 2013).

Í upphafi eldgossins í Holuhrauni (september 2014 – febrúar 2015) varð fljótlega ljóst að styrkur eldfjallaloftegunda væri hár í útstreymi frá gosstöðvunum (Sigurður R. Gíslason o.fl. 2015). Fljótlega var ákveðið að safna úrkomusýnum um allt land og mæla sýrustig, leiðni og efnastyrk í úrkomu til þess að meta mögulegt umhverfisálag af völdum gossins. Verkefnið var samstarfsverkefni Veðurstofunnar og Háskóla Íslands. Úrkomu var safnað á 21 stöð allt í kringum landið yfir allt góðmabildið (1. mynd; sjá einnig 1. mynd í undanfarandi kafla (Sigurður R. Gíslason o.fl. 2015).

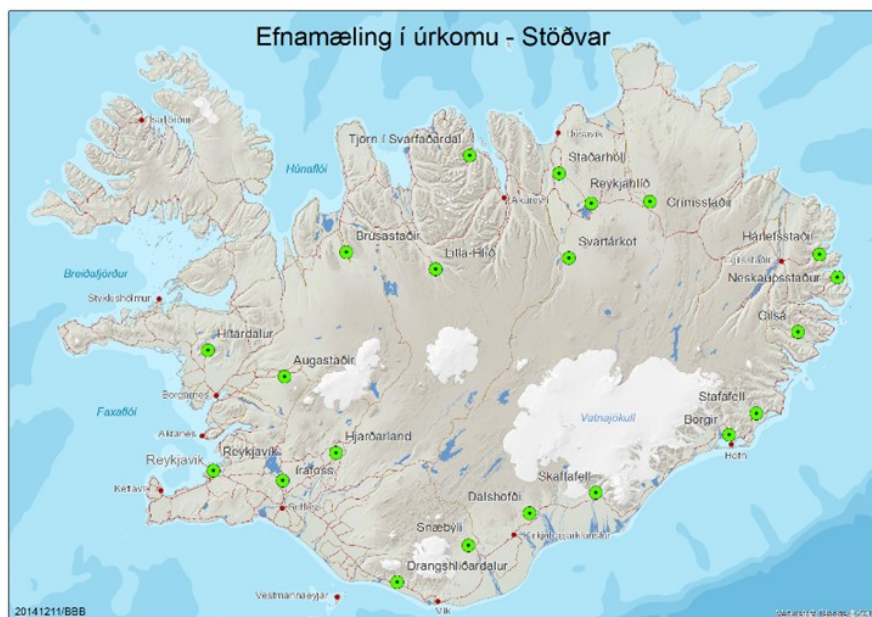
Langtímavöktun Veðurstofunnar á efnastyrk í úrkomu og andrúmslofti á Írafossi gerir mögulegt að skilgreina bakgrunnsgildi í úrkomunni og þannig leggja mat á viðmiðunar ástand við náttúrulegar aðstæður í umhverfinu (Árni Sigurðsson & Gerður Stefánsdóttir 2016 og tilvísanir þar í). Því miður er styrkur flúors ekki mældur í sýnum frá Írafossi.

Úrvinnsla gagna er enn á frumstig og er úrvinnsla eingöngu byggð á mældum sýnum, ekki var allri úrkomu safnað á hverjum stað og því er í sumum tilfellum um vanmat á ákomu að ræða. Einnig á eftir að fara enn betur yfir gæði einstakra gagna og framreikna með fullnægjandi hætti. Greiningin gefur þó góða mynd af því aukna efnaálagi sem hlaut af eldgosinu í Holuhrauni. Í samantektinni er reynt að skoða þá þætti sem skipta mestu máli við mat á umhverfisálagi vegna Holuhraungossins og hverju þarf að huga í framtíðinni til að lágmarka áhrif af sambærilegum eldgosum á umhverfi okkar, menn og búfénað.

Aðferðir

Sýnum var safnað á 21 stöð allt í kringum landið (1. mynd). Afar misjafnt er hversu mörg sýni voru tekin á tímabilinu á hverjum stað. Á flestum stöðvunum var söfnun hafin í kringum 20. september en nokkrar komu inn á síðari stigum. Í sumum tilfellum eru einungis fá sýni á bak við einstaka mælistöð en sýnasöfnunin reiðir sig á velvilja sem og möguleika fólks til að sinna þessu á hverjum stað. Niðurstöðurnar endurspeglar þannig ekki alltaf allt tímabilið á hverri stöð, fá sýni eru þó oft afar mikilvæg og góð vísending um ástand og mögulegt álag á þeim stað.

Úrkomusýnum var að jafnaði safnað í hefðbundna úrkomumæla og / eða í plastbakka (37 x 26 cm). Reynt var að auka notkun plastbakka við sýnatöku til þess að auka rúmmál sýnis hverju sinni. Sýrustig var að jafnaði mælt við komu sýnanna á Veðurstofu Íslands en jarðvísindadeild Háskóla Íslands annaðist efnagreiningu sýna. Sýni frá Írafossi voru þó sem fyrr efnagreind á Nýsköpunarmiðstöð Íslands. Sýrustig var mælt í alls 780 sýnum, styrkur brennisteins og flúors í um 740 og 660 sýnum. Aðferðarfræði er nánar lýst í grein Sigurðar R. Gíslasonar o.fl. (2015) í *Geochemical Perspective Letters*, sem er í opnum aðgangi.



1. mynd. Staðsetning úrkomusöfnunarstöðva vegna vöktunar á eldgosinu í Holuhrauni.

Írafoss

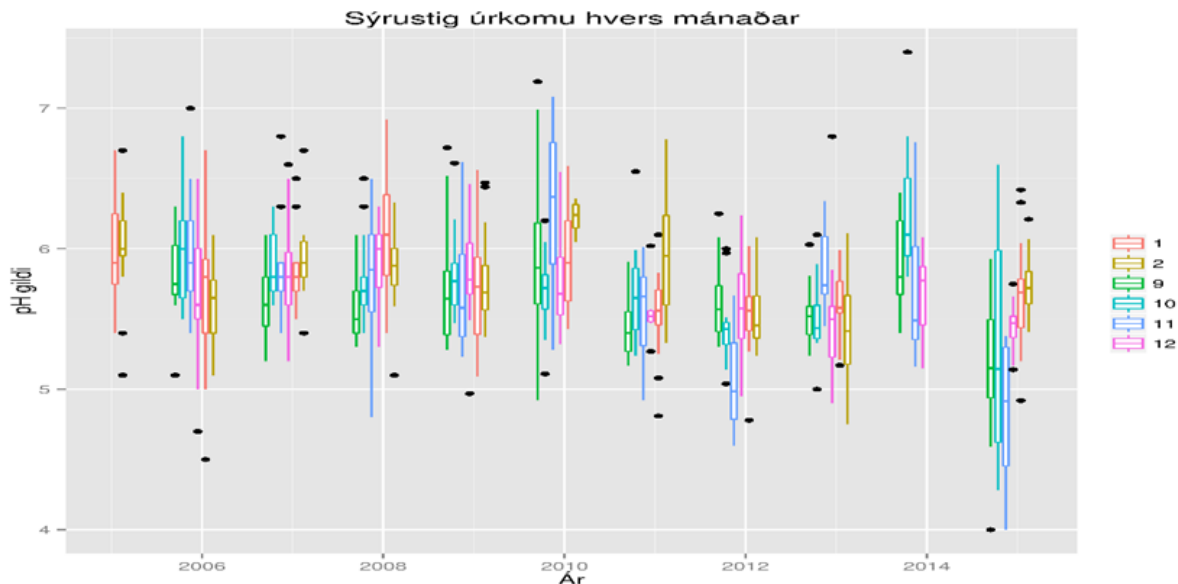
Ýmis alþjóðleg vöktunarverkefni vegna langt að borinnar mengunar og dreifingu hennar hafa verið rekin á Íslandi til lengri tíma, LRTAP, AMAP og OSPAR verkefni (Tørseth o.fl. 2012, Davíð Egilsson 2017). Slíkar langtíma vöktunarraðir eru mikilvægar til þess að meta grunngildi efna í andrúmslofti og gera okkur kleift að meta áhrif ýmissa atburða á ástand og ákomu, s.s. vegna eldsumbrotanna í Holuhrauni. Vöktun á áhrifum brennisteins hefur verið rekin á Íslandi frá árinu 1972, þar af á Írafossi frá árinu 2000. Mældur er daglegur styrkur brennisteins í úrkomu og andrúmslofti, styrkur ýmissa annarra efnasambanda sem og leiðni og pH í úrkomusýnum (Árni Sigurðsson & Gerður Stefánsdóttir 2015).

Niðurstöður

Sýrustig Írafossi

Til þess að nota sem eðlilegust viðmiðunargildi við mat á áhrifum Holuhraungossins voru notaðar mæliniðurstöður sömu mánaða árin 2005-2009 til samanburðar (2. mynd). Sýrustig var talsvert lægra frá 2010-2013 en árunum þar á undan (Árni Sigurðsson & Jóhanna Thorlacius 2014). Þrír gosatburðir áttu sér stað á vordögum 2010-2011, það er tveir atburðir í Eyjafjallajökli 2010 og Grímsvatnagosið 2011. Lækkunin 2010 og 2011 sést vel þó að myndin sýni einungis viðmiðunarmánuðina september-janúar, og því nokkuð líðið frá áðurnefndum gosatburðum. Líklegt er að þetta séu áhrif þessara gosatburða en talsvert var um uppþýrlun ösku í langan tíma eftir gosatburðina.

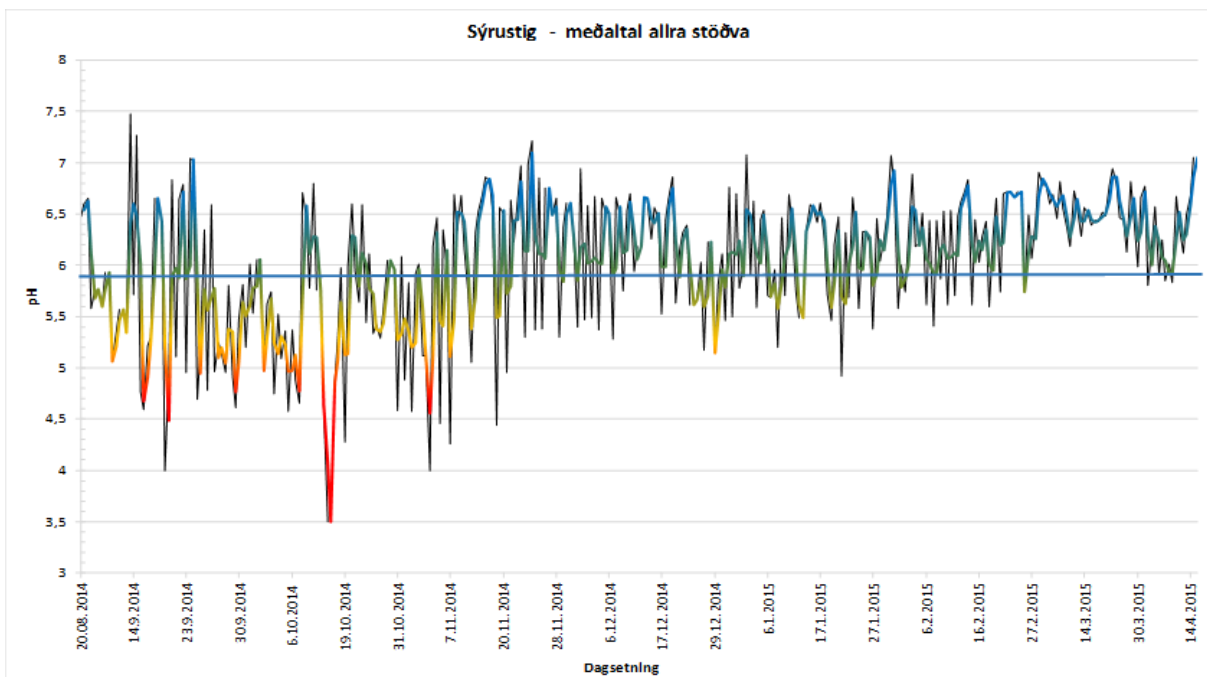
Á meðan á eldgosinu í Holuhrauni stóð, mældist sýrustig úrkomu umtalsvert lægra á Írafossi en í sambærilegum mánuðum viðmiðunaráranna og áhrifin enn meiri en árin 2010 og 2011 (2. mynd). Sýrustig viðmiðunartímabilsins var að meðaltali 5,8 (4,5-7,2). Sýrustig lægra en 5 mældist aðeins í 2% sýnanna. Á góðstímanum var sýrustig að Írafossi að meðaltali 5,3 (4,0-6,6). Sýrustig lægra en 5 mælist þá í mun fleiri sýnum, eða um 30% sýnanna. Lægstu gildin eru á fyrstu mánuðum atburðarins en meðaltalið var lægst í nóvember 2015, pH 4,83 sem er heilu gild lægra en sýrustig viðmiðunartímabilsins. Septembarmánuður fylgdi fast á eftir með pH 5,09.



2. mynd. Sýrustig úrkomusýna frá Írafossi í september-febrúar árin 2005-2015. Sýnt er meðaltal, frávík og útgildi sambærilegra mánaða og gosið í Holuhrauni varði. Litir tákna mánuði og er raðað upp frá september til febrúar í samræmi við góstímabilið. Mæligögn vantar fyrir janúar-febrúar 2013.

Sýrustig allra úrkomustöðva

Eldgosið í Holuhrauni lækkaði sýrustig í úrkomusýnum um allt land, einkum á fyrstu mánuðum eldgossins (3. mynd). Á síðustu stigum gossins sáust enn einstaka tilvik sem gáfu mjög lágt sýrustig. Talsverður breytileiki var á mældu sýrustigi milli stöðva. Sýrustigið var að jafnaði lægst að Borgum í Nesjum, Austur-Skaftafellssýslu, og þar mældist lægsta sýrustig í Holuhraungosinu, pH = 3.18, þann 4. október 2014 (sjá 5. mynd í undanfarandi kafla; Sigurður R. Gíslason o.fl. 2015). Írafoss fylgdi fast á eftir Borgum. Talsverður munur var milli daga á hverri stöð eins og sjá má af mælingunum að Borgum sbr. 5. mynd í undanfarandi kafla.



3. mynd. Daglegt meðaltal mælds sýrustigs frá öllum úrkomustöðvum frá september 2014 – mars 2015. Litakóðuð lína sýnir hlaupandi meðaltal (2 dagar). Heil blá lína sýnir meðal sýrustig að Írafossi á viðmiðunarárrunum, 2005-2009.

Athyglivert er að talsverður munur gat verið á sýrustig milli staða innan sama veðursvæðis á sama tíma. Dæmi um slíkt var að finna í sýnum frá Hítardal og Augastöðum. Í Hítardal mældist pH að jafnaði mun lægra en á Augastöðum, styrkur flúors og brennisteins var einnig ólíkur milli þessara stöðva. Tvö dæmi eru áhugaverð til frekari skoðunar (1. tafla): a) Þann 5. október var úrkomumagn áþekkt á báðum stöðvum en úrkomun mun súrari í Hítardal, í Hítardal var pH 4.47 en á Augastöðum var pH 6.27. Flúorstyrkur í sýnunum var svipaður á báðum stöðvum en styrkur brennisteins var um helmingi hærri í Hítardal en á Augastöðum. b) Þann 30. september var sýrustig einnig mun lægra í Hítardal (4,58) en á Augastöðum (6,72) en þá var styrk brennisteins öfugt farið. Í því tilfelli var um tífoldur munur á úrkomumagni.

1. tafla Samanburður á mæligildum í úrkomusýnum Augastöðum og Hítardal á Vesturlandi dagana 30. september og 5. október 2014.

Stöð	Dagsetning	Mælt pH	F ppm	Cl ppm	SO ₄ -S ppm
Augastaðir	30.09.2014	6.72	0,04	4,71	3,65
Augastaðir	05.10.2014	6,27	0,06	5,09	1,47
Hítardalur	30.09.2014	4,58	0,04	3,97	2,01
Hítardalur	05.10.2014	4,47	0,04	2,4	2,91

Ríkjandi veðurfar dagana fyrir úrkomu hefur verið nefnt sem möguleg skýring á ólíkum niðurstöðum, Brennisteinsdíoxíð (SO₂) er þyngra en loft og getur því safnast fyrir í dölum og lægðum í hægviðri og þar sem skjól myndast og á þeim stöðum gæti verið aukinn styrkur efna í úrkomu sem fellur í kjölfarið. Dagana fyrir 5. október var fremur hægur vindur á svæðinu, austlægur og /eða norðlægur. Veðurfarskilyrði gætu þannig hafa stuðlað að uppsöfnun á gasi í Hítardal áður en úrkoma féll þann 5. október. Dagana fyrir 30. september var hægur vindur með breytilegri átt þann 27. - 29. september, en vindur eykst nokkuð að SA að kvöldi 29. september og því eru veðurfarskilyrðin nokkuð önnur þann 30. september.

Sýrustig allra stöðva í mars, eftir að gosi lauk þann 28. febrúar 2015, var að meðaltali talsvert hærri en meðaltal viðmiðunaráranna á Írafossi. Sýrustig allra stöðva mælist þá að meðaltali 6,5 og liggur á bilinu 5,6 – 7,3. Sýrustig lægra en 5 mælist ekki í neinu sýni.

2. tafla Meðaltal mælds pH og reiknaðs pH (SO₄) miðað við gosmánuð númeraður frá byrjun til loka gossins (sep – feb).

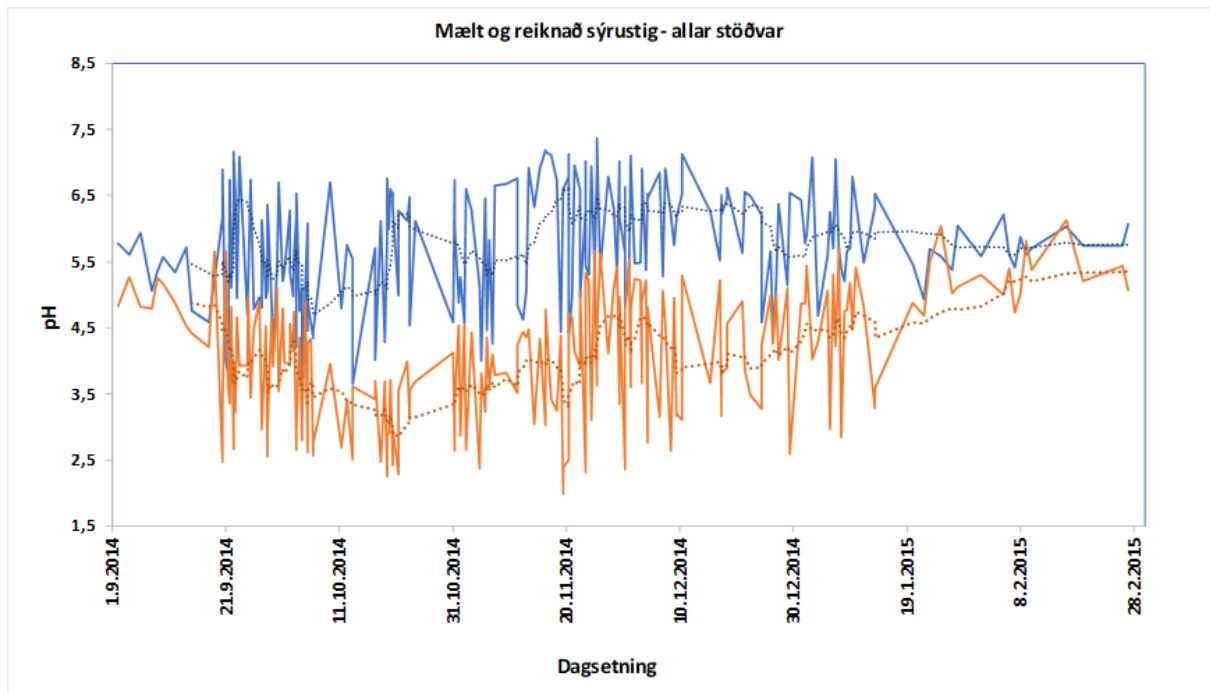
Gosmánuður	Reiknað pH	Mælt pH
1 - september	4,1	5,6
2 - október	3,4	5,5
3 - nóvember	4,0	6,0
4 - janúar	4,2	6,2
5 - febrúar	4,7	5,8
6 - mars	5,3	5,8
Meðaltal	4,3	5,8

Reiknað sýrustig

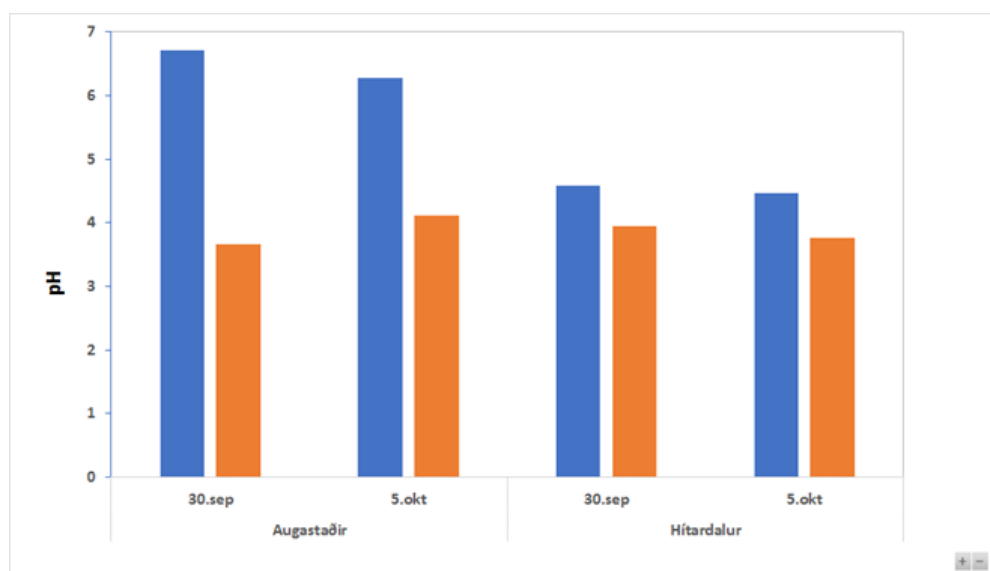
Áhrif eldgosa á sýrustig úrkomu er einkum vegna aukins styrks SO₂, CO₂ og NO (Glasow o.fl. 2009). Áhrif ýmissa efna í umhverfinu geta haft temprandi áhrif á úrkomusýnin og þannig jafnað út sýrustigsáhrif gosmóðunnar, má nefna ýmis uppfoksefni í nær- og fjærumhverfi s.s. ryk og jarðvegs-

efni (Sigurður R. Gíslason & Eugster 1987, Ólafur Arnalds o.fl. 2014). Af þessum efnum var brennisteinninn í lang hæstum styrk í gosmekkinum (Sigurður R. Gíslason o.fl. 2015). Sýnt hefur verið fram á að uppruni aukins styrks brennisteins í úrkomusýnunum var frá eldgosinu í Holuhrauni (Andri Stefánsson o.fl. 2017).

Til þess að meta bein áhrif gossins á sýrustig úrkomu, án mögulegra temprandi áhrifa frá umhverfinu, var sýrustig reiknað út frá styrk brennisteins. Reiknað sýrustig úrkomusýna reyndist umtalsvert lægra en mælt sýrustig (4. mynd) og var meðaltalið yfir allt góstímabilið 1,5 stigum lægra en mælt sýrustig (2. tafla). Mestur munur var í október 2014 eða 2,1 stig. Reiknað sýrustig í úrkomusýnum var á bilinu 2,0 – 6,1 og voru 78% sýnanna með reiknað pH undir 5, 38% með pH undir 4 og 17% með pH undir 3 (4. mynd).



4. mynd. Mælt sýrustig (blátt) og reiknað sýrustig (appelsínugult) allra stöðva á góstímanum. Punktalínurnar sýna hlaupandi meðaltal (9 daga).



5. mynd. Samanburður á mældu (blátt) og reiknuðu (appelsínugult) pH á Augastöðum og í Hítardal 30. september og 5. október 2014.

Lægsta reiknaða pH var að Hjarðarlandi í Biskupstungum ($\text{pH} = 2,0$). Flestar stöðvar sýna á einhverjum tímapunkti pH þrír eða lægra, eina undantekningin var á Írafossi þar sem lægsta reiknaða pH gildi var 3.7. Það var ekki fjarri lægsta melda gildinu að Írafossi sem var 3,9. Ef skoðaður var munur milli stöðva skera Írafoss og Borgir sig úr hvað varðar lítinn mun milli reiknaðs og mælds pH (gögn ekki sýnd).

Eins og fram hefur komið var verulegur munur á mældu pH í úrkomu í Hítardal og á Augastöðum. Reiknað sýrustig reyndist hinsvegar áþekkt á báðum stöðvum (5. mynd). Í útreikningum var leiðrétt fyrir seltu út frá styrk natríums (Na) í sýninu.

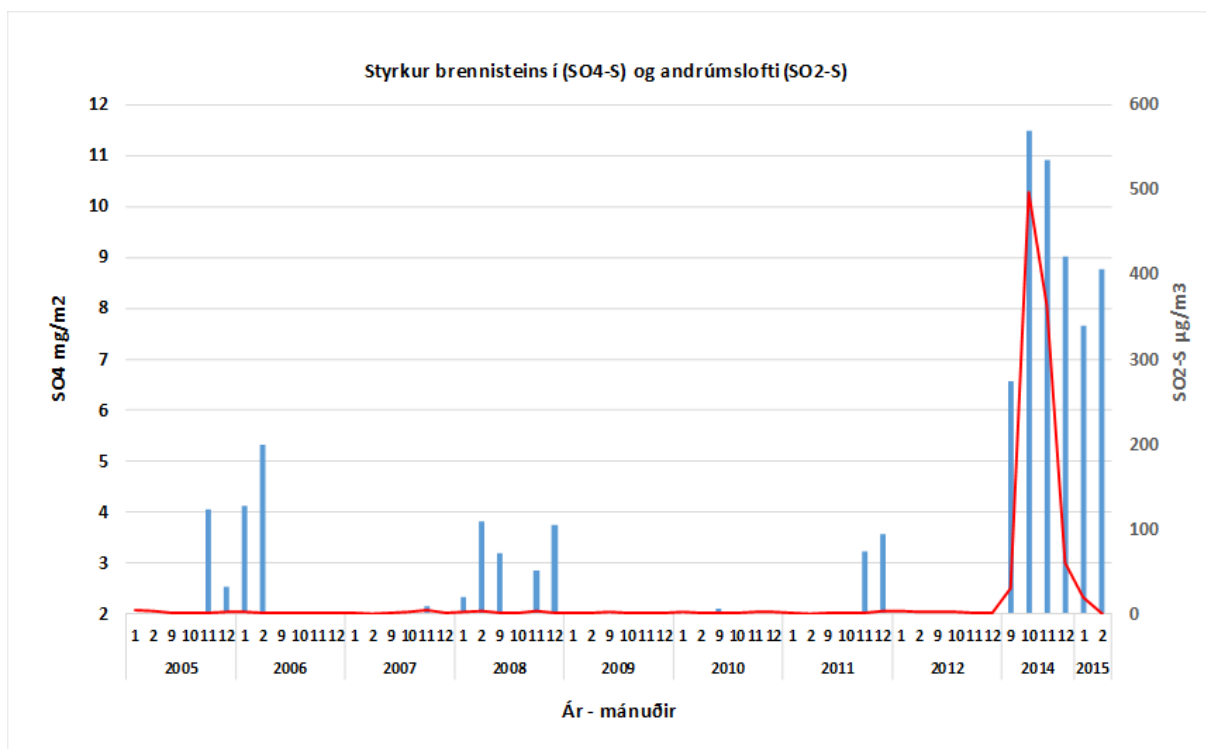
Efnaákoma - brennisteinn og flúor

Írafoss

Á Írafossi mældist styrkur brennisteins í sýnum talsvert meiri á Holuhraunstímabilinu en á árunum þar á undan, bæði styrkur SO_4 í úrkomu sem og styrkur SO_4 og SO_2 í andrúmslofti (6. mynd). Styrkurinn var nokkuð hár yfir allt góstímabilið en þó hæstur í október og nóvember. Gögnin hafa verið leiðrétt fyrir áhrifum sjávarýringar. Ekki var búið að greina gögn frá 2013 þegar úrvinnsla gagna átti sér stað.

Styrkur brennisteins í úrkomusýnum ($\text{SO}_4\text{-S}$) var að meðaltal um 4,9 sinnum hærri á góstímanum í Holuhrauni en styrkur brennisteins var að jafnaði á viðmiðunarárunum. Mestur var munurinn í október, eða um 13 sinnum hærri. Ákoma brennisteins í október 2014 var um 120 mg/m^2 , eða tvisvar sinnum meiri en meðaltal viðmiðunaráranna. Úrkoma á Írafossi var í lægri kantinum í október eða um 10 mm í október samanborið við um 19 mm viðmiðunaráranna. Þrátt fyrir mun hærri styrk í úrkomu var heildar ákoma á góstímanum sambærileg við viðmiðunarárin, eða um 497 mg/m^2 borið saman við 492 mg/m^2 , en veturinn 2015-2016 var úrkoma einungis um 60% af úrkomu viðmiðunaráranna. Samkvæmt veðurfarsyfirliti Veðurstofu Íslands var úrkoma í meðallagi í flestum landshlutum en einna lægst á vesturlandi (Veðurstofa Íslands, 2017).

Styrkur brennisteins á formi brennisteinsdíoxíðs ($\text{SO}_2\text{-S}$) í andrúmslofti hækkaði verulega á góstímabilinu. Uppsafnaður styrkur í daglegum loftskýnum var að jafnaði um $4,4 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ í september til febrúar



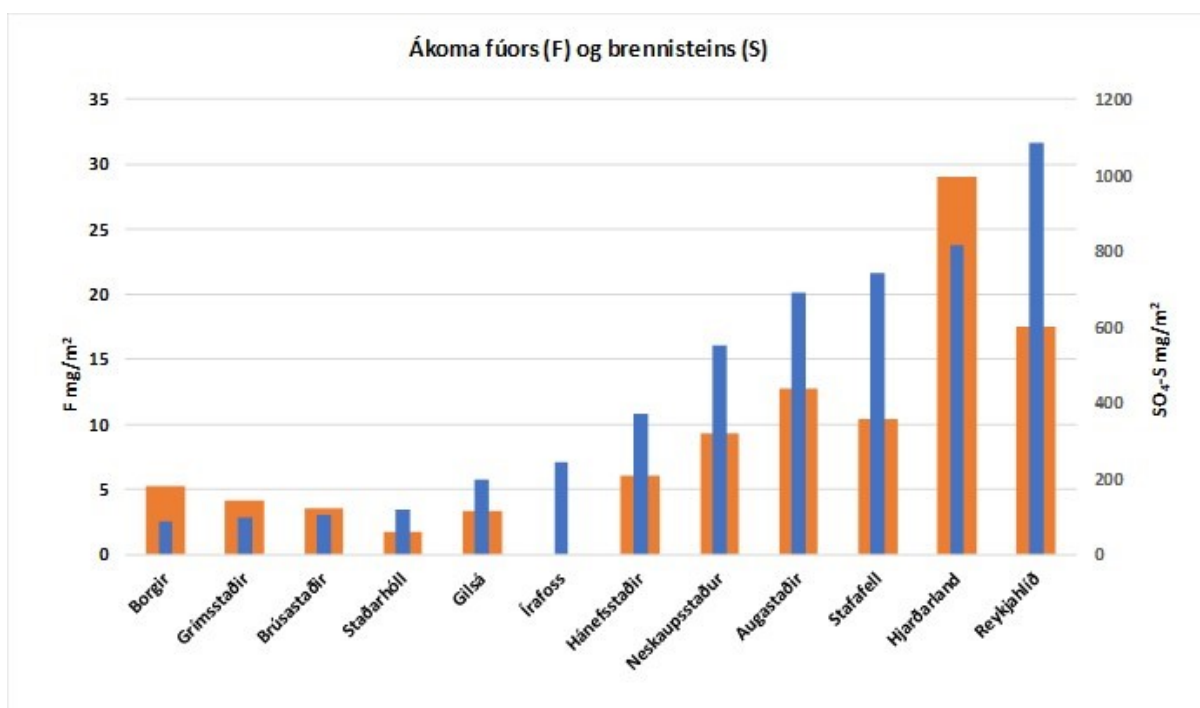
6. mynd. Samanlagður mánaðarlegur styrkur brennisteins sem súlfat ($\text{SO}_4\text{-S}$) í úrkomusýnum og brennisteins sem brennisteinsdíoxíð ($\text{SO}_2\text{-S}$) í sýnum úr andrúmslofti að Írafossi, september - febrúar 2004-2015. Mæligögn vantar fyrir 2013.

á viðmiðunartímabilinu en á gostímanum var styrkurinn um 87 falt hærri, eða $388 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Mestur munur var í október en þá var styrkurinn um 314 sinnum hærri ($502 \mu\text{g}/\text{m}^3$ vs $1,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Styrkur brennisteins sem súlfat ($\text{SO}_4\text{-S}$) í síunum var rúmlega þrefalt hærri en venjulega, fer úr $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ í $78 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Allar stöðvar

Fyrirliggjandi niðurstöður sýndu að efnastyrkur jókst um allt land á meðan að eldgosið varði. Samanlögð ákoma brennisteins og flúors á þeim stöðvum þar sem sýnatökur gengu hvað best var hæst í Reykjahlíð, NA við gosstöðvarnar, og á Hjarðarlandi, SV við gosstöðvarnar (7. mynd). Stafafell, Augastaðir og Neskaupsstaður fylgdu fast á eftir. Enn á eftir að reikna út styrk í sýnum sem vantar og gætu þær niðurstöður breytt myndinni þar sem enn líklega er um nokkuð vanmat að ræða. Hinsvegar var meðalstyrkur brennisteins í sýnunum einnig hæstur á þessum stöðvum sem styrkir stoðir undir að þær endurspegli háan styrk brennisteins í úrkomu á þessum stöðvum. Gögnin voru leiðrétt fyrir brennisteinsákomu vegna sjávarýringar.

Samkvæmt þessum frumunnu gögnum var ákoma brennisteins í Reykjahlíð um 4,5 föld ákoman að Írafossi. Að Hjarðarlandi var ákoman 3.4 föld en Írafoss og Hjarðarland eru báðar í SV frá gosstöðvunum (1. mynd).



7. mynd. Samanlögð ákoma brennisteins (blátt) og flúors (appelsínugult) á mælistöðvum víðsvegar um landið á meðan á gosinu í Holuhrauni stóð.

Dreifingarmynstur háð úrkomumagni

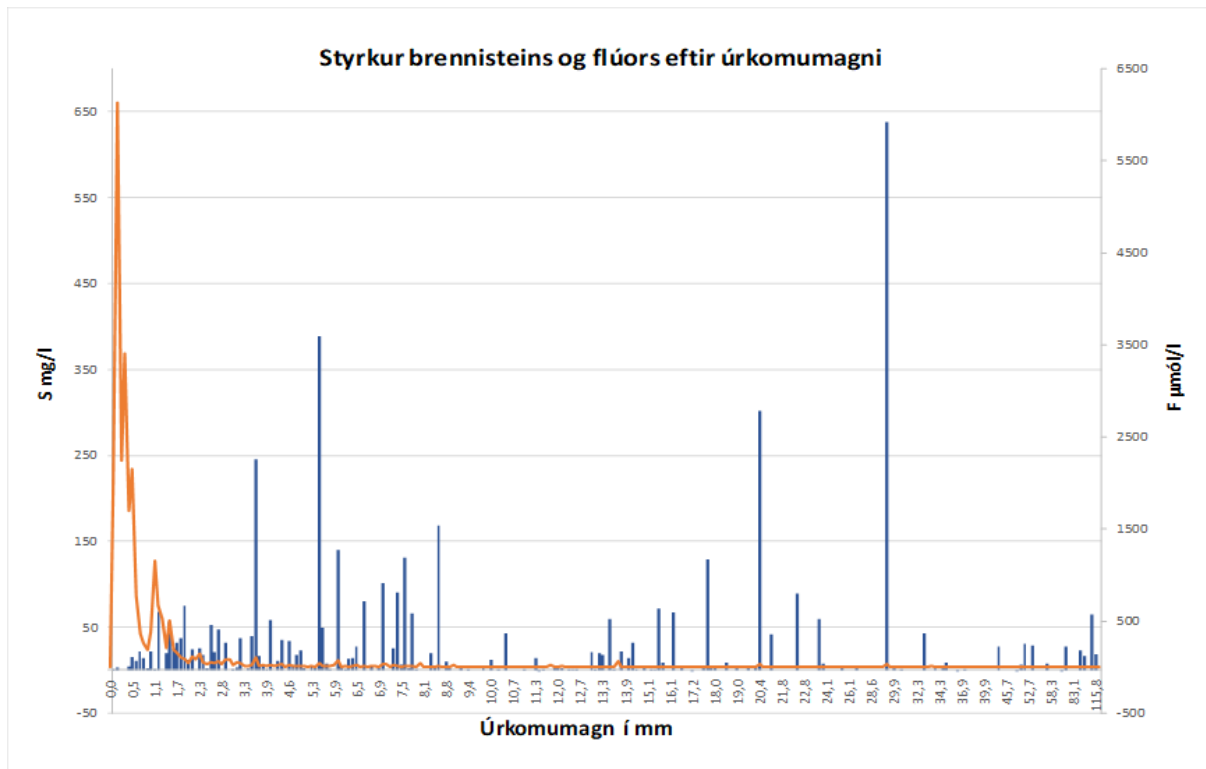
Þegar tengslin milli úrkomumagns og efnastyrks í úrkomu voru skoðuð kom í ljós að styrkur flúors var áberandi hæstur í lítilli úrkomu (8. mynd). Gögnin sýndu að frekar litla úrkomu þurfti til þess að hreinsa flúor úr andrúmsloftinu.

Brennisteinn sýndi ekki algerlega sambærilegt mynstur (8. mynd). Þar virtust ekki vera eins skýr tengsl milli úrkomu- og ákomu þó að jafnaði félli stærsti hlutinn út með fyrstu mm mátti sjá talsverðan breytileika.

Umræður

Sýrustig

Lágt sýrustig getur hliðrað efnajafnvægi og aukið losun eða bindingu ýmissa efnasambanda sem haft geta afdrifarík áhrif á umhverfi m.a. heilbrigði dýra og framvindu vistkerfa (Schindler 1988).



8. mynd. Meðalstyrkur flúors (appelsínugult) og brennisteins (blátt) í úrkomu eftir úrkomumagni.

Eldgosið í Holuhrauni lækkaði mælt sýrustig í úrkomu umtalsvert um allt land, einkum fyrstu mánuði gossins (3. mynd). Sýrustig mældist að jafnaði lægst að Borgum í Nesjum og mældist þar m.a. lægsta gildi á landsvísu, $\text{pH} = 3.18$ (5. mynd í undanfarandi kafla, Sigurður R. Gíslason o.fl. 2015). Írafoss, langtíma vöktunarstöð brennisteinsákomu, fylgdi þar fast á eftir. Mikilvægt er að hafa í huga að pH er veldisskali og þannig er hvert sýrustig umtalsverð breyting.

Reiknað sýrustig úrkomu var að jafnaði 1.5 stigum lægra en mælt gildi yfir gostímabilið í heild (4. mynd). Írafoss og Borgir skera sig úr hvað varðar lítinn mun milli reiknaðs og mælds pH . Borgir og Írafoss virðast svara breytingum á álagi nokkuð vel. Benda þessar mælingar til þess að Írafoss sé hagstæð vöktunarstöð, ekki bara til langtímavöktunar heldur einnig atburðavöktunar sem þessarar.

Í flestum tilvikum var mælt sýrustig mun lægra í Hítardal en á Augastöðum (5. mynd) þó svo að þessar stöðvar séu innan sama veðursvæðis. Samkvæmt þessu virðist sem aðstæður á hverjum stað skipti talsverðu máli þegar áætla á álag á hverjum stað fyrir sig. Margvíslegir þættir í umhverfinu geta haft áhrif á sýrustig úrkomu sem fellur á hverjum stað. Nefnt hefur verið að við lýgnar aðstæður geti orðið uppsöfnun á eldfjallagasi inn til dala áður en og þannig verði aukinn styrkur í úrkomu sem fellur í gegnum loftmassann eftir slík skilyrði. Einnig gæti ryk og ýmis uppfoksefni í nær- og fjær-umhverfi geti temprað raunverulegt sýrustig úrkomunnar (Sigurður R. Gíslason & Eugster, 1987, Ólafur Arnalds o.fl. 2014). Slíkt geti verið mismunandi eftir aðstæðum á hverjum stað s.s. landslagi, vindafari og gróðurfari en einnig árstíma. Stöðin í Hítardal er umkringd fjöllum og dalurinn með suður- norður legu. Augastaðir liggja opnari fyrir og má leiða líkur að því að áfok geti borist af stærra landsvæði á þeirri stöð en í Hítardal. Reiknað pH reyndist mjög sambærilegt milli þessara stöðva sem bendir til þess að temprunarþættir í umhverfinu hafi haft umtalsverð áhrif en mismunur í styrk brennisteins bendir til þess að aðrir þættir, s.s. uppsöfnun skipti einnig máli.

Einu langtíma viðmiðunargögnin sem til eru koma frá vöktunarstöðinni að Írafossi. Mælingar á síðustu mánuðum eldgossins benda til þess að meðalsýrustig úrkomu sé almennt nokkuð hærra en viðmiðunargildin frá Írafossi sýna, en meðalsýrustig yfir allt landið í mars var 6,5, þegar gosinu var í raun lokið (3. mynd). Líklegt er því að breytileiki á sýrustigi úrkomu sé talsverður á landsvísu. Þannig geta áhrif eldgossins á sýrustig verið vanmetin á þeim svæðum þar sem sýrustig er að jafnaði hærra en á Írafossi. Æskilegt væri að þekkja betur svæðisbundinn breytileika og áhrif á hverjum stað. Þetta eru þröskuldsgildi sem mikilvægt er að þekkja og skilja.

Efnaákoma

Hár styrkur brennisteins í andrúmslofti skilaði sér einungis í litlu magni sem súlfat (SO_4) í úrkomu sýnum. Ummýndun á brennisteinsdíoxíði (SO_2) úr andrúmslofti yfir í súlfat var hlutfallsega lítil eins og sjá má af styrk SO_2 og SO_4 í loftsíum að Írafossi sem og styrk SO_4 í úrkomu. Styrkur SO_2 í andrúmslofti að Írafossi er um 87 faldur viðmiðunarstyrkur á meðan styrkur SO_4 í úrkomu var aðeins um 4,5 faldur. Leiða má líkur að því að styrkur súlfats í úrkomu hefði verið mun hærri og pH lægra ef gosið hefði að sumri til þegar aðstæður í andrúmslofti auka líkur á umbreytingu/ oxun brennisteinsdíoxíðs s.s. raki í lofti, úrkomu og orka frá sólu (Sigurður R. Gíslason o.fl. 2015, 2017).

Ákoma með úrkomu á Írafossi var mun minni en vænta mátti miðað við hinn aukna styrk efnanna í andrúmsloftinu. Ef allt góstimabilið er skoðað er samanlögð ákoma rétt rúmlega meðalákoma viðmiðunaráranna og mest um tvöföld í október. Ákoma er m.a. háð tíðni og magni úrkomu og að Írafossi var úrkoma óvanalega lítil á þessu tímabili, eða um 60% af úrkomu viðmiðunaráranna.

Afar mikilvægt er að hafa í huga að samkvæmt úrkomusýnum er mesta ákoma flúors í lítilli úrkomu, þetta sést einnig í gögnum um brennisteinininn þó samhengi þar á milli sé ekki eins skýrt. Í lítilli úrkomu er efnastyrkur úrkomunnar hærri og rakinn/droparnir setjast meira á yfirborð gróðurs og jarðvegs. Þá má segja að uppleystu efnin í úrkomunni nái þannig meiri vinnslutíma á gróðurhulinni og eru jafnframt aðgengilegri dýrum. Þegar úrkoma er meiri, þynnist styrkurinn út, efnin skolast af gróðurhulunni og niður í jarðveginn. Hvar þau mörk liggja sem valda álagi á gróður og umbreytingu efna í jarðvegi er væntanlega háð afar fjölbreyttum þáttum í umhverfinu, eðli, eiginleikum og aðstæðum á hverjum stað. Þetta eru þó þröskuldgildi sem mikilvægt er að þekkja og skilja.

Þurraákoma

Gróður getur virkað sem einskonar sía eða söfnunarbúnaður, einkum þegar vindur fylgir úrkomu og gróðurinn er hávaxinn og þéttur (Gundersen o.fl. 2006). Sama gildir væntanlega um þéttan gróður eins og mosa, lyng eða þéttan grassvörð miðað við ógrónar auðnir. Gróður gæti einnig safnað í sig talsvert af efnum úr andrúmslofti á meðan þurrt er. Ef gróðurhulan siar umtalsvert af menguðum ögnum úr andrúmsloftinu sem leysast svo upp við rakamettun eða litla úrkomu getur styrkur efnanna orðið ansi hár. Ekki síst ef hár styrkur er einnig í úrkomunni sem lendir á gróðurhulu eða jörð. Leiða má líkur að því að efnaáhrif á umhverfi og vistkerfi geti orðið umtalsverðar við slíkar aðstæður. Gróður er afar mis þolin gagnvart lágu sýrustigi (Chapin o.fl. 2002) og við slík skilyrði geta ýmis önnur efni losnað út í umhverfið með afrennslisvatni en þekkt er að ál getur haft veruleg áhrif á líf-skilyrði fiska við snögga súrnun (Warning o.fl. 1997, Bjarni D. Sigurðsson o.fl. 2017). Við slíkar aðstæður má vænta þess að áhrif séu einnig hvað mest á búpening sem er á beit á svæðinu, einkum með tilliti flúors.

Almennt

Rannsóknir þessar hafa sýnt með skýrum hætti að álag á umhverfið veltur ekki bara á efnasamsetningu gosmökksins, heldur er um flókið samband vindáttar, vindhraða, hversu líklegt er að loftmassi með háum styrk eldfjallagass mæti úrkomubakka sem berst að landi, úrkomumagnni sem og landslagi og aðstæðum á hverjum stað. Hversu auðveldlega sýrustig úrkomunnar er jafnað út af öðrum efnum í loftmassanum hefur einnig afgerandi áhrif. Megin niðurstaðan er sú er að vænta má að álag vegna lágs sýrustigs sé að jafnaði líklegra á skjólsælum stöðum þar sem eldfjallagös geta safnast upp við ákveðin veðurskilyrði og þar sem að minni líkur eru á að uppfoksefni tempri sýrustig úrkomunnar.

Mikilvægt er að þekkja betur þá ferla sem hafa áhrif á sýrustig og efnasamsetningu í úrkomu hverju sinni og ríkjandi ferla við mismunandi aðstæður. Vinna þyrfti að samanburðargreiningu á fyrirbyggjandi gögnum s.s. greiningu aðstæðna með veðurgögn, dreifingarlíkön og landfræðilegar aðstæður að leiðarljósi. Með frekari úrvinnslu gagnanna ætti að vera mögulegt að skilja aðstæður betur, álag og áhrifamætti og setja fram leiðbeinandi viðmiðunarmörk.

Ljóst er að staðsetning og tímasetning gossins inn á miðhálandi um miðjan vetur voru afar heppilegar. Á þeim tíma ríkjandi að jafnaði sterkir vindar, birtustig er lágt, gróður er í lágmarki og menn og bústofn að mestu á láglendi (Sigurður Reynir Gíslason o.fl. 2017, Schmidt o.fl. 2015). Líklegt er að umhverfisáhrifin hefðu verið mun meiri ef gosið hefði yfir sumartímann þegar ljósið hvatar ýmis efnahvörf í úrkomu og andrúmslofti (Sigurður Reynir Gíslason o.fl. 2017). Fremur snjólétt var framan af vetri (Veðurstofa Íslands 2017) og því meiri líkur en ella á að ryk og uppfoksefni hafi temprandi áhrif á sýrustig. Sú staðreynd að úrkoma var aldrei í vindátt frá eldstöðvunum varð einnig til þess að minnka verulega mögulegt svæðisbundið umhverfisálag.

Þakkir

Sérstakar þakkir fær fólk sem annaðist úrkomusöfnun víða um land. Án þeirra góðfúslegu og ósérhlífnu aðkomu hefði ekki verið mögulegt að framkvæma þessa rannsókn. Bogi B. Björnsson og Halldór Björnsson fyrir aðstoð við vinnslu gagna. Rannsóknir voru fjármagnaðar af sérstakri fjárveitingu íslenska ríkisins vegna eldgossins í Holuhrauni í umsjón Almannavarna Ríkislögreglustjóra auk þeirra fag- og rannsóknarstofnana sem höfundar starfa.

Heimildir

Andri Stefánsson, Gerður Stefánsdóttir, Nicole S. Keller, Sara Barsotti, Árni Sigurdsson, Svava Björk Thorláksdóttir, Melissa Anne Pfeffer, Eydís S. Eiríksdóttir, Elín Björk Jónasdóttir, Sibylle von Löwis & Sigurður 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, 1971–1982. doi:10.1002/2015JD024093/abstract.

Árni Sigurðsson & Gerður Stefánsdóttir. 2015. *Efnagreiningar á daglegum úrkomusýnum frá Írafossi vegna eldgoss í Holuhrauni*, Greinargerð. Reykjavík: Veðurstofa Íslands.

Árni Sigurðsson & Jóhanna Margrét Thorlacius. 2014. *Niðurstöður efnagreininga á daglegum loft- og úrkomusýnum frá Írafossi 2008–2011*. Greinargerð. Reykjavík: Veðurstofa Íslands.

Bjarni Diðrik Sigurðsson, Helena M. Stefánsdóttir, Lárus Heiðarsson & Edda S. Oddsdóttir. 2017. Mælingar á efnasamsetningu straumvatns í níu ám á Fljótsdalshéraði fyrir og eftir Holuhraunsgosið. *Rit LbhÍ* 83:65–72.

Chapin, F. S., Matson, P. A. & Mooney, H. A. 2002. *Principles of terrestrial ecosystem ecology*. Springer, New York, Berlin, London.

Davíð Egilsson. 2017. *Undrið litla. Stokkhólmssamningurinn og baráttan gegn POP's*. Reykjavík. Davíð Egilsson. ISBN 978-9935-24-172-6

Glasow R., Bobrowski, N. & Kern, C. 2009. The effects of volcanic eruptions on atmospheric chemistry. *Chem. Geol.*, 263, pp. 131–142. doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.08.020

Gundersen, P., Schmidt, I. K. & Raulund-Rasmussen, K. 2006. Leaching of nitrate from temperate forests - effects of air pollution and forest management. *Environmental Reviews* 14: 1–57.

Likens, G. E., Wright, R. F., Galloway, J. N., & Butler, T. J. 1979. Acid rain. *Scientific American*, 241(4), 43–51.

Ólafur Arnalds., H.P. Olafsson & P. Dagsson-Waldhauserova. 2014. Quantification of iron-rich volcanogenic dust emissions and deposition over ocean from Icelandic dust sources. *Biogeosciences Discussion* 11: 5941–5967.

Sigurður R. Gíslason, Gerður Stefánsdóttir, Melissa A. Pfeffer, Sara Barsotti, Þorsteinn Jóhannsson, Ivonna 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: 84–93. doi: 10.7185/84 geochemlet.1509.

Sigurður R. Gíslason & H.P. Eugster. 1987. Meteoric water–basalt interactions: I. A laboratory study. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 51: 2827–2840.

Schmidt A., S. Leadbetter, N. Theys, E. Carboni C.S. Witham, J.A. Stevenson, C.E. Birch, T. Thordarson, S. Turnock, S. Barsotti, L. Delaney, W. Feng, R.C. Grainger, M.C. Hort, Á. Höskuldsson, I. Ialongo, E. Ilyinskaya, T. Jóhannsson, P. Kenny T.A. Mather, N.A.D. Richards, & J. Shepherd. 2015. Satellite detection, long-range transport, and air quality impacts of volcanic sulfur dioxide from the 2014–2015 flood lava eruption at Bárðarbunga (Iceland). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(18): 9739–9757.

Schindler D. W., 1988, Effects of Acid Rain on Freshwater Ecosystems. *Science. New Series* 239(4836):149–157

Tørseth K., W. Aas, K. Breivik, A. M. Fjæraa, M. Fiebig, A. G. Hjellbrekke, C. Lund Myhre, S. Solberg, and K. E. Yttri. 2012. Introduction to the European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) and observed atmospheric composition change during 1972–2009. *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 5447–5481, doi:10.5194/acp-12-5447-2012

Veðurstofa Íslands. 2017. Tíðafarsýfrilit 2014. <http://www.vedur.is/vedur/vedurfar/manadayfirlit/2014>.

Øyvind A. Garmo, Brit Lisa Skjelkvåle, Heleen A. de Wit, Luca Colombo, Chris Curtis, Jens Fölster, Andreas Hoffmann, Jakub Hruška, Tore Høgåsen, Dean S. Jeffries, W. Bill Keller, Pavel Krám, Vladimir Majer, Don T. Monteith, Andrew M. Paterson, Michela Rogora, Dorota Rzychon, Sandra Steingruber, John L. Stoddard, Jussi Vuorenmaa & Adam Worsztynowicz. 2014. Trends in Surface Water Chemistry in Acidified Areas in Europe and North America from 1990 to 2008. *Water Air Soil Pollut* 225: 1880. doi:10.1007/s11270-014-1880-6

Waring, C.P., J.A. Brown, J.E. Collins & P. Prunet. 1996. Plasma prolactin, cortisol, and thyroid responses of the Brown Trout (*Salmo trutta*) exposed to lethal and sublethal aluminium in acidic soft waters. *General and Comparative Endocrinology* 102: 377–385

5.

kafli

Pollution from the 2014/2015 Bárðarbunga eruption monitored by snow cores from Vatnajökull glacier, Iceland

Iwona Galeczka^{1*}, Eydís Salome Eiríksdóttir², Finnur Pálsson³, Rósa Ólafsdóttir³, Elín Björk Jónasdóttir⁴ & Sigurður R. Gíslason³

¹*Íslenskar Orkurannsóknir*, ²*Hafrannsóknastofnun*, ³*Institute of Earth Sciences, University of Iceland*, ⁴*Icelandic Meteorological Office*

Introducton

In this study we report the chemical composition of the so called bulk snow samples which represent average chemical composition of the snow accumulated during the 2014/15 Bárðarbunga volcanic eruption on the Vatnajökull glacier and the highlands NE of the glacier. The Vatnajökull glacier is a source of water for many of the largest glacier rivers in Iceland. Those rivers transport dissolved and suspended material to the oceans affecting the elemental budget of the costal water (Eiríksdóttir et al. 2015). The snow on Vatnajökull glacier is far away from manmade aerosols source (Gíslason 1990), thus changes in chemical constituents within the snow are primarily due to volcanic addition to sea spray and global pollution sources. We also investigate spatial and temporal evolution of the snow chemical composition which reflects fluctuations in the eruption effusion and emission rates, wind direction and distance from the source. Quantifying the magnitude of the contaminants accumulation in the snow and understanding the impact of subsequent incremental snowmelt will help to forecast possible environmental pressure from polluted snow and snowmelt.

Methods

Snow samples

The map of the sampling sites is presented in Fig. 1. To avoid any possible contamination of the sampled snow, several precautions were taken. The snow corer was modified by replacing aluminium head, screws and fittings by titanium Grade 2 alloy to avoid contamination of the snow with metals associated with the sampling tools. Snow was sampled into low density acid and deionized water washed polyethylene heavy-walled 30-liter bags. One bulk sample weighted up to 14 kg and consisted of one to several drill cores depending on the depth of the snow cover. The so called detailed cores (increments) were collected in addition to the bulk core at two sampling sites (D05 and M03 in Fig. 1), and divided into 21 (D05) and 44 (M03) increments by cutting it with clean plastic knife. Length and weight of each increment was measured in the field.

In the laboratory snow cores were melted at 60 °C for 20–40 minutes depending on the volume of snow. As soon as the snow was melted, it was processed as regular water sample. Meltwater was filtrated through 0.2 µm Millipore cellulose acetate membranes using a peristaltic pump, pre-cleaned silicone tubing, and a 140 mm Sartorius® polytetrafluoro-

propylene filter holder. The pH in filtrated samples was measured several hours after its melting at room temperature using Oakton pH electrode. The dissolved inorganic carbon (DIC), F, Cl, SO₄, NO₃ were quantified using IC-2000 Dionex, ion chromatograph. Cations and trace metals, were measured using the Spectro Cirrus Vision inductive coupled plasma, optical emission spectrometer (ICP-OES) and by inductive coupled plasma sector field mass spectrometer ICP-SFMS. Dissolved organic carbon (DOC) was measured at Umeå Marine Sciences Centre, Sweden. Samples for dissolved PO₄, NO₃, NO₂, and NH₄ were collected in high-density polypropylene vials and kept frozen until their colorometrical determination using an Alpkem AutoAnalyser. Fluxes of water and solutes were calculated from core weights, cross sectional areas and lengths and solutes concentration.

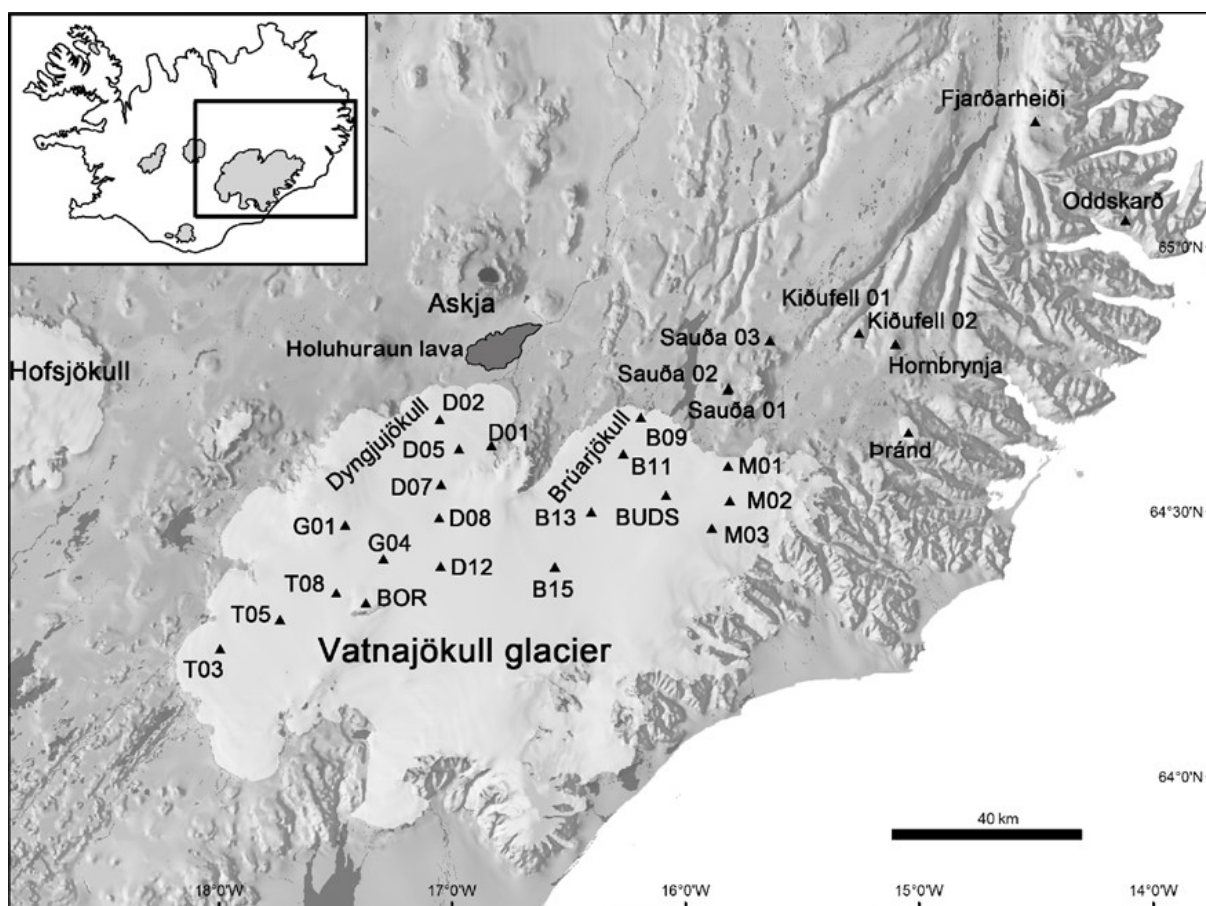


Figure 1. Location of the sampling spots on Vatnajökull glacier and in the highlands NE of the glacier. The Holuhraun lava represents the extent of the lava after the 2014/15 Bárðarbunga eruption. Þránd is the snow sample located on the Þrándarjökull glacier.

Result and discussion

Chemical composition of the snow cover

In general, snow collected on the Vatnajökull glacier and highlands north east of the glacier was more acidic and polluted than snow collected at Langjökull glacier in 1997-2006 (Gislason et al. 2000). The average measured pH at ambient temperature equalled to 5.08, 4.67, and 5.13 for the bulk samples, D05, and M03 increments, respectively. Relatively low pH of the bulk samples was measured in cores D with the lowest pH of 4.41 in D02 core, which is located closest to the eruption site (Fig. 1). The ratio of major ions in the snow versus chlorine and comparison with seawater ratio, confirms that many of the constituents such as SO₄ exceeded concentrations which would account for marine origin only, confirming volcanic and perhaps anthropogenic effect on the snow chemistry.

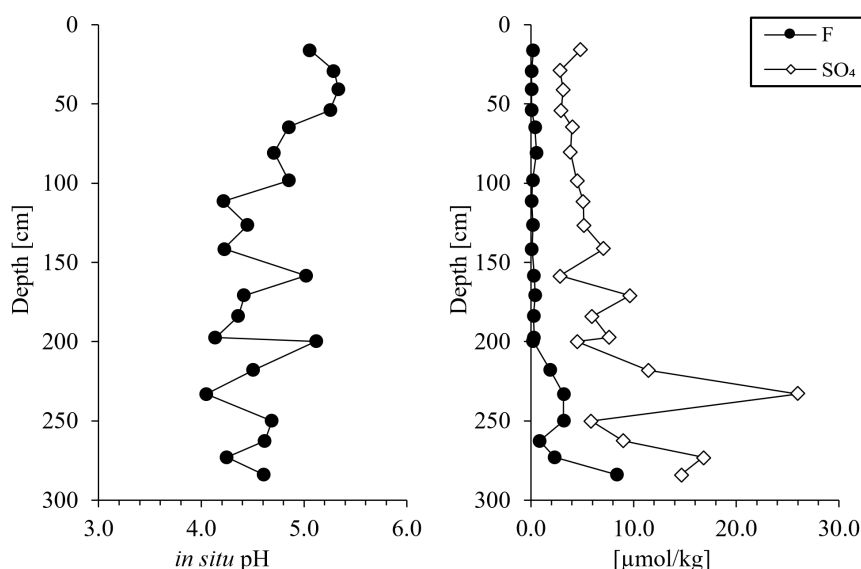


Figure 2. An example of the chemical composition evolution with depth based on analysis of the D05 increments.

The most acidic snow samples were found in cores collected at the Dyngjufjökull (D01, D02, D05, D07), with the lowest pH in D01 and D02. Those cores are the closest to eruption site indicating that volcanic activity affected mostly areas located the closest to the eruption vent. Predictions of the atmospheric SO_2 distribution around Iceland during the eruption period with the CALPUFF air quality model (Gislason et al. 2015, Gislason et al. 2017 this issue) show that 9-18 days of the eruption days in this area had higher than $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$ concentrations of SO_2 . Most of the time the highest concentrations were close to and north-east of the eruption site. This is in contrast with what has been seen in the rain water affected by the eruption, where the lowest measured pH was relatively far away from the pollution source (about 100 km SE of the eruption site; Gislason et al., 2015, Stefánsson et al. 2017). This relation was explained by the time light and humidity, and therefore distance, needed for the SO_2 to oxidize and produce sulphuric acid lowering considerably the rain pH (Gislason et al. 2015, Stefánsson et al., 2016). The Bárðarbunga eruption, 31 August 2014 to 27 February 2015, lasted mostly through the winter in the northern hemisphere when high energy UV radiation is at a minimum, minimizing this dry air oxidizing agent (e.g. Flaathen & Gislason 2007, Gislason et al. 2015).

The highest concentrations of volcanic components such as SO_4 , F and H^+ were measured in D01 core. The strong correlation between SO_4 , F, and Cl concentrations and *in situ* pH confirms that aerosols originating from the volcanic SO_2 , HCl, and HF acidified and contaminated the snow. There was insignificant amount of sediments in snow, therefore, dissolution of basaltic sediments containing low Cl, F, and S concentrations (e.g. Óskarsson 1981) would not account for high concentrations of those constituents in snow samples. In addition, the SiO_2 concentration is very low in the bulk samples and in the increments confirming that there was insignificant contribution of basaltic particles dissolution to the chemical composition of the snowmelt. Clearer correlation between pH and concentration of halogens was observed for D05 comparing to M03 increments. This is mainly due to proximity of D05 sampling location to the eruption vent and greater effect of sea-spray close to M0 sites. Although M0 cores are further away from the eruption they have also been affected by the volcanic activity as indicated by increased SO_4 concentration compared to Cl.

The pH of the 2014-15 snow decreases with depth. This decrease in pH and subsequent increase in volcanic components with depth reflects changes in effusion and emission rates throughout the volcanic eruption. The highest concentration of SO_4 has been observed in the lowest pH D05 increment. Furthermore, concentrations of most other constituents, including trace metals and rare earth elements (REE), increase with depth in snow collected from the D05 core. Concentrations of most of the constituents in the lower part of the snow core (below 200 cm depth) exceed concentrations measured earlier in Langjökull snow. This snow precipitated during the first months of the eruption. In September and October, the effusion and emission rates were the highest (Gislason et al. 2015, 2017).

Protons balanced about half of the negatively charged anions in D05 bulk core and 70% in the most polluted D05 increment. Also, this increment had the highest contribution of SO_4 into charge balance. The contribution of other than seaspray cations such as Al and Fe increases in samples the most affected by the volcanic gases and/or aerosols.

Most of the trace metals and REE concentrations are the highest in D0 cores, most often with the highest values for D01 or D02. The Al, Fe, Cu, Pb, Se, Ti, Ag, Pd, Re, Te, Tl, Y, and all REE shows positive correlation with the sum of SO_4 , Cl, and F with ($R^2 > 0.5$) suggesting that these elements were degassed at depth and transported in the gas phase as chlorides, fluorides and/or sulphate salts/aerosols (e.g. Moune et al. 2006; Gauthier et al. 2016). Also most of the metal concentrations increased with decreasing pH confirming their addition due to volcanic acidic gases.

No snow samples apart from some of the increments did surpass the European drinking water standards (European Community 1998). The D05 increments from the bottom of the core exceeded the limits for Al. Snow collected in vicinity of the eruption site during the 2014/15 Bárðarbunga eruption was acidic, with pH ranging from 3.34 to 4.85 and with F, Al, Fe, Mn, Cd, Cu, and Pb concentrations surpassing drinking water standards (EC 1998).

Possible hazards

The major hazard resulting from acidification of the snow is the mobility of protons and metals. Metal mobility increases with decreasing pH and therefore acidic snowmelt will increase dissolution of embedded sediments and the bedrock provoking further release of toxic metals and keeping them undersaturated with respect to secondary minerals. Partial melting of snow and preferential release of pollution in into the first melt, can result in factor of 5 concentration increase in the initial melt (Johnnessen and Henriksen 1978, Gislason 1990). Taking as an example the lowest pH of the bulk sample equalling to 4.41, the partial melting would decrease the pH to about 3.7. Similar, the initial melt from the average pH of all bulk samples, 5.09 could be as low as 4.4. This decrease of pH would increase the solubility of the solid $\text{Al}(\text{OH})_3$ three times.

Summary

The snow cores represent the precipitation that fell shortly after the beginning of the eruption on 31st August 2014 until few weeks after the end of the eruption on 27th February 2015. The 28 bulk core samples represent the mass weighted average concentration of the precipitation that fell during this time on the Vatnajökull glacier and the mountains northeast of the eruption sites. The incremental core samples recorded variation in snow composition with time. The main conclusions drawn from this study are:

- Magma-derived acids acidified all but three of the 28 bulk precipitation samples that fell during the eruption. The *in situ* pH of the 28 samples ranged from 4.41 to 5.67 at 0.1 °C. The pH of pure water saturated with the CO_2 of the atmosphere (395 ppmv) at 0.1 °C is 5.54.

- There was a strong correlation between sea-spray corrected SO_4 , Cl and F concentration and pH.

- The concentration of volcanic derived contamination was the highest close to the eruption site, suggesting that oxidation of SO_2 was the main source of the sulphuric acid in these samples. In addition HCl and HF gases were distributed in similar manner as predicted by the Icelandic Meteorological Office for the SO_2 gas (Gislason et al. 2015, 2017).

- The concentration of volcanic derived contamination was the highest at depth in the incremental cores. The deepest samples represent the precipitation that fell early on during the eruption, September-October, when effusion and emission rates were highest (Gislason et al. 2015, 2017).

- All the trace metals concentrations in the bulk samples did not exceed the European Commission drinking water standards. The Al concentration, however, did exceed World Health Organisation drinking water standard of 3.7 $\mu\text{mol/kg}$ in two of the D05 increments.

- Partial melting of the average bulk snow sample that had *in situ* pH of 5.09 could lead to initial meltwater of pH 4.4.

Acknowledgements

This study was funded by Ríkislögreglustjórn Almennavarnadeild (The National Commissioner of the Icelandic Police), Jarðvísindastofnun Háskólans (Institute of Earth Sciences University of Iceland) and Veðurstofa Íslands (IMO) and Rannsóknamiðstöð Íslands – (The Icelandic Centre for Research RANNÍS) (Grant # 163531-051). The authors would like to thank to all of those who helped to organize the field trip. Special thanks are for Þorsteinn Jónsson and Hlynur Skagfjörð Pálsson, without them snow collection would be impossible. We also thank all the colleagues and co-workers from Institute of Earth Sciences and IMO for fruitful discussions during this time of the Bárðarbunga unrest.

References

- Eiríksdóttir, E.S., Sigurdsson, Á., Gislason, S.R. & Torssander, P. 2014a. Chemical Composition of Precipitation and River Water in Southern Iceland: Effects of Eyjafjallajökull Volcanic Eruptions and Geothermal Power Plants. *Procedia Earth and Planetary Science* 10: 358-364.
- Eiríksdóttir & E.S., Sigurdsson, Á. 2014b. *Efnasamsetning úrkomu á Mjóanesi við Þingvallavatn 2008-2012*. Jarðvísindastofnun Háskólans og Veðurstofa Íslands. Report RH-01-2014.
- Eiríksdóttir, E.S., Gislason, S.R. & Oelkers, E.H. 2015. Direct evidence of the feedback between climate and nutrient, major, and trace element transport to the oceans. *Geochim. Cosmochim. Acta* 166, 249–266.
- EC. 1998. Council directive 98/83/EC. Official Journal of the European Communities.
- Flaathen, T.K. & Gislason, S.R. 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.
- Galeczka, I., Sigurdsson, G., Eiríksdóttir, E.S., Oelkers, E.H. & Gislason, S.R. 2016. The chemical composition of rivers and snow affected by the 2014/2015 Bárðarbunga eruption, Iceland. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 316, 101–119.
- Gauthier, P.J., Sigmarsson, O., Gouhier, M., Haddadi, B. & Moune, S. 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.
- Gislason, S.R. 1990. Chemistry of precipitation on the Vatnajökull glacier and the chemical fractionation caused by the partial melting of snow. *Jökull* 40, 97-117.
- Gislason, S.R., Stefánsdóttir, M.B., Eiríksdóttir, E.S., 2000. ARCTIS, Regional Investigation of Arctic Snow Chemistry: Results from the Icelandic Expeditions, 1997–1999. Raunvísindastofnun, RH-05-2000.
- Gislason, S.R., Stefánsdóttir, G., Pfeffer, M.A., Barsotti, S., Jóhannsson, T., Galeczka, I., Bali, E., Sigmarsson, O., Stefánsson, A., Keller, N.S., Sigurdsson, Á., Bergsson, B., Galle, B., Jacobo, V.C., Arellano, S., Aiuppa, A., Jónasdóttir, E.B., Eiríksdóttir, E.S., Jakobsson, S., Guðfinnsson, G.H., Halldórsson, S.A., Gunnarsson, H., Haddadi, B., Hjónsdóttir, I., Thordarson, T., Riishuus, M., Högnadóttir, T., Dürig, T., Pedersen, G.B.M., Höskuldsson, Á. & Gudmundsson, M.T., 2015. Environmental pressure from the 2014–15 eruption of Bárðarbunga volcano, Iceland. *Geochemical Perspectives Letters* 1: 84-93.
- Gislason, S.R., Stefánsdóttir, G., Pfeffer, M.A., Barsotti, S., Jóhannsson, T., Galeczka, I., Bali, E., Sigmarsson, O., Stefánsson, A., Keller, N.S., Sigurdsson, Á., Bergsson, B., Galle, B., Jacobo, V.C., Arellano, S., Aiuppa, A., Jónasdóttir, E.B., Eiríksdóttir, E.S., Jakobsson, S., Guðfinnsson, G.H., Halldórsson, S.A., Gunnarsson, H., Haddadi, B., Hjónsdóttir, I., Thordarson, T., Riishuus, M., Högnadóttir, T., Dürig, T., Pedersen, G.B.M., Höskuldsson, Á. and Gudmundsson, M.T., 2017. Bárðarbungugosið 2014–2015. Magn gasefna, dreifing mengunar og mikilvægi tímasetningar og staðsetningar eldgosa með tilliti til umhverfisáhrifa. This issue.
- Johannessen, M. & Henriksen, A. 1978. Chemistry of snow meltwater: changes in concentration during melting. *Water Resources Research* 14: 615-619.
- Moune, S., Gauthier, P.-J., Gislason, S.R. and Sigmarsson, O. 2006. Trace element degassing and enrichment in the eruptive plume of the 2000 eruption of Hekla volcano, Iceland. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70: 461-479.
- Óskarsson, N. 1981. The chemistry of Icelandic lava incrustations at the latest stage of degassing. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 22: 97-121.
- Stefánsson, A., Stefánsdóttir, G., Keller, N.S., Barsotti, S., Sigurdsson, Á., Þorlákssdóttir, S.B., Pfeffer, M.A., Eiríksdóttir, E.S., Jónasdóttir, E.B., Löwis, S. & Gislason, S.R. 2017. Major impact of volcanic gases on the chemical composition of precipitation in Iceland during the 2014-15 Bárðarbunga eruption. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, In press.

The chemistry of rivers and snow affected by the 2014/2015 Bárðarbunga eruption, Iceland

Iwona Galeczka^{1*}, Gunnar Sigurdsson², Eydís Salome Eiríksdóttir³,
Eric H. Oelkers^{4,5} & Sigurður R. Gíslason⁴.

¹Íslenskar Orkurannsóknir, ²Veðurstofa Íslands, ³Hafrannsóknastofnun, ⁴Jarðvísindastofnun Háskólans, ⁵CNRS URM 5563, GET, France; Earth Sciences, University College London, UK

Introduction

In this study we investigate the effect of the 2014/15 Bárðarbunga eruption on the chemical composition of the Jökulsá á Fjöllum river to complement the real time conductivity measurements performed by the Icelandic Meteorological Office (IMO). We report the river monitoring results and relate them to the seismic activity within the Bárðarbunga volcanic system (Gíslason et al. 2015, Sigmundsson et al. 2015). We investigate whether the river chemistry can be used as an indicator of impending or ongoing volcanic activity. Since the Bárðarbunga eruption lasted throughout the winter, and therefore it affected the snow accumulated in vicinity of the eruption site, we assess possible contamination of surface waters caused by melting of volcanically polluted snow and predict its environmental consequences. Finally, we estimate the effect of newly formed lava on weathering rates within the catchment. The results and additional data related to this study is presented in details in Galeczka et al. (2016).

Methods

Water and snow samples

River water samples were collected from the Jökulsá á Fjöllum from August 16, 2014 to November 14, 2014 at incremental distances from its source, starting at the lava front, through the Upptyppingar and Grímsstaðir water monitoring stations (Fig. 1a). Conductivity and water temperature in the Jökulsá á Fjöllum were measured continuously by the IMO at Upptyppingar and Grímsstaðir (IMO 2016). These parameters were also obtained *in situ* during the sampling. In most cases, spot samples collected at Upptyppingar and at the lava front were taken into low-density 1L bottles and within several hours these samples were filtered through 0.2 µm Millipore cellulose acetate membranes into distinct bottles and/or vials as described in details in Galeczka et al. (2016).

Samples of fresh snow were collected in vicinity of the Bárðarbunga eruption site and lava field (Fig. 1b). Snow was sampled into acid and deionized water washed low-density polyethylene heavy-walled 30liter bags. At each sampling site, 2–10 kg of snow was collected into the bags manually with hands covered with cleaned plastic bags to avoid snow contamination. Sampling bags were then packed into insulated boxes to ensure that the snow did not melt during their transport to the laboratory. In addition, some of these snow samples partially melted during their transport to the laboratory. These samples will serve as an example of the melted snow chemical composition affected by tephra interaction.

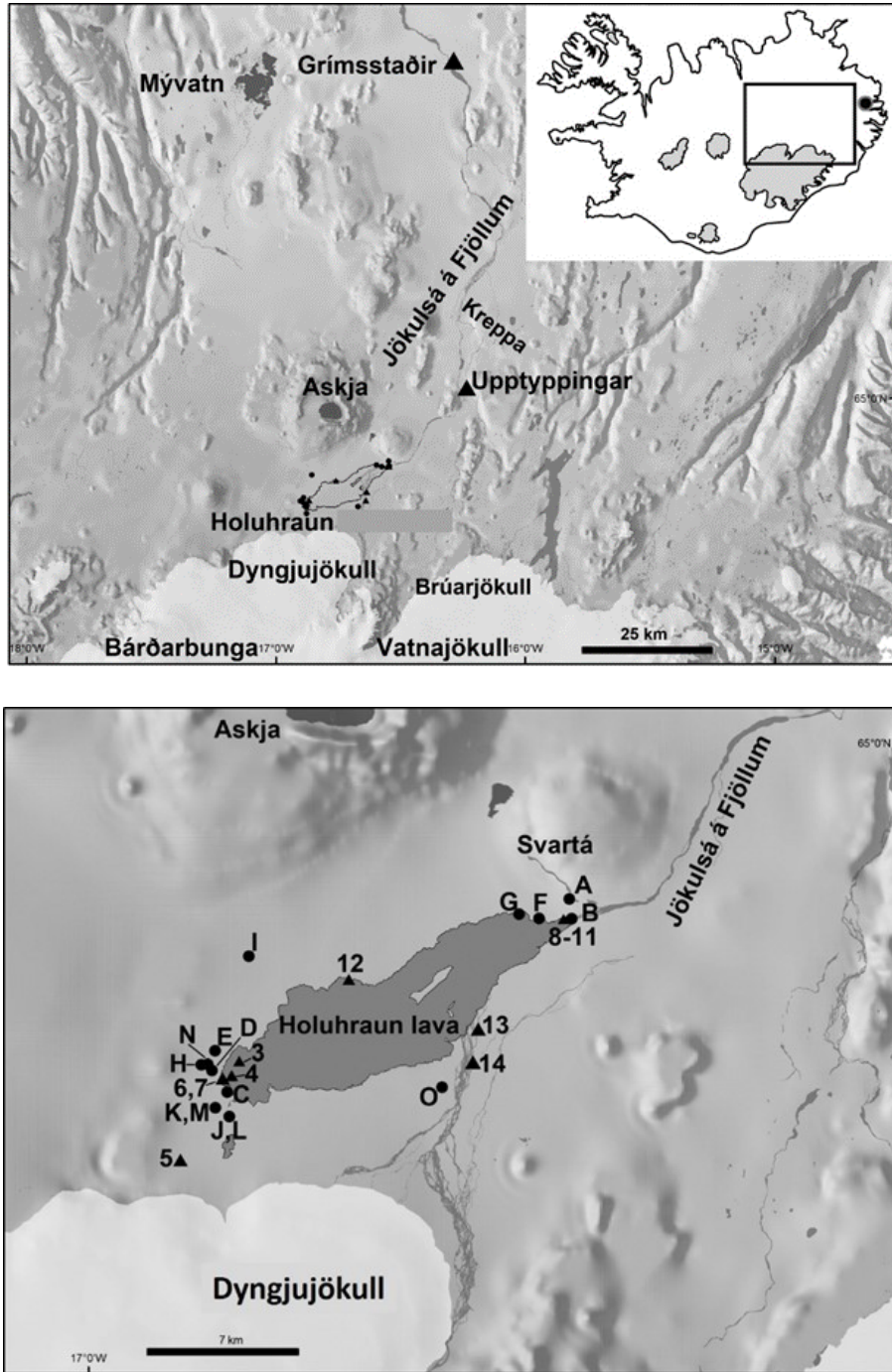


Figure 1. Sampling locations. The Holuhraun lava flow produced during the 2014/15 Bárðarbunga eruption is indicated in (a) and (b). It extends towards NE of Dyngjujökull glacier and its surface indicates the lava distribution on November 14, 2014, when the last sampling during this study was performed. The triangles in (b) indicate water and the circles snow sampling locations. Black dot on the Icelandic map in (a) shows the location of the Fjarðará river. Modified from Galeczka et al. (2016).

Two osmotic samplers were deployed in the Jökulsá á Fjöllum close to the Grímsstaðir and Upptyppingar monitoring stations (Fig. 1a) for continuous average daily monitoring of the river chemical composition. These osmotic samplers were custom built by the Sensors Development Group at the University of Southampton and Quayside Precision Engineering, Southampton; these are similar to those used previously by Gkritzalis–Papadopoulos et al. (2012a, 2012b), Jannasch et al. (2004), and Jones et al. (2015). These osmotic samplers are described in detail by Jones et al. (2015).

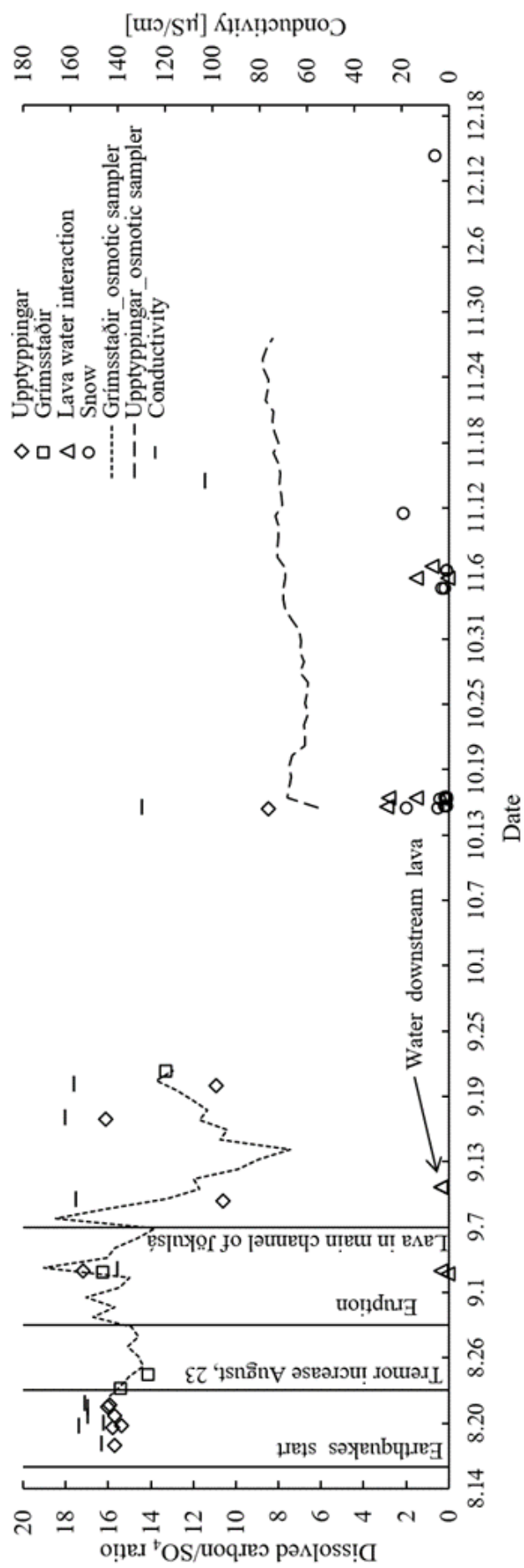


Figure 2. The DIC/SO₄ ratio in the Jökulsá á Fjöllum sampled at Upptyppingar, Grimsstaðir, the lava front (upstream and downstream from the lava) and in snow samples taken in vicinity of eruption site. The samples were collected at various stages of the Bárðarbunga unrest as indicated by the vertical lines. Modified from Galeczka et al. (2016)

Result and discussion

Water chemical composition

In general, the conductivity and dissolved inorganic carbon (DIC) of water samples collected at the progressing lava front were relatively low compared to the Jökulsá á Fjöllum waters at the Upptýppingar and Grímsstaðir monitoring stations. In addition these waters contain considerable dissolved SO_4 , Cl , and F , indicating substantial dissolution of magmatic gases during water–lava–gas interaction. The addition of the volcanic SO_2 into the waters and snow and the ensuing oxidation of SO_2 to SO_4 is indicated by the DIC/ SO_4 ratio. Fig. 2 presents the DIC/ SO_4 ratio in all collected water and snow samples at different stages of the Bárðarbunga unrest. The highest ratio (85) was measured in water collected near the eruption site, upstream from the lava (it is not presented in Fig. 2 for better visualization). This water originally contained high carbon alkalinity due to water–rock interaction during subglacial chemical weathering. As soon as the lava interacted with this water, the DIC/ SO_4 ratio decreased substantially. This observation suggests that volcanic gases such as SO_2 dissolve in water, partly oxidises, dissociate, and titrate out the dissolved carbon alkalinity. After the water reacted with the new lava, the total dissolved SO_4^{2-} , SO_3^{2-} , Cl^- , and F^- accounted for 80 % of the total anion budget. The rise in water temperature at the hot lava front increases basalt dissolution rates enhancing element release (e.g. Gislason and Oelkers 2003) which was confirmed by increased concentrations of the major cation. The presence of the aqueous SO_3^{2-} species confirms directly the interaction of volcanic SO_2 gas with the water (Lelieveld 1993, Mehta 2010). The water used to quench the molten lava, was enriched in dissolved SO_4 and F compared to the background sample, whereas there was almost no increase in Cl . This indicates that the direct water–lava interaction delivered mainly F and SO_4 into the water. The lack of an increase in Cl might be attributable to its earlier degassing at the eruption vent (e.g. Gislason et al. 2015). Other water samples collected from the ponds close to the lava front were also enriched in SO_4 and F . In addition, dissolved SO_4 and F in these waters were concentrated comparing to the Jökulsá á Fjöllum river water at Upptýppingar during the eruption monitoring period, indicating that SO_4 and F were sourced from lava–water interaction and subsequently diluted downstream.

Alkalinity development

The alkalinity of Icelandic glacial rivers results from water–suspended particle interaction and water–bedrock interaction (Gislason et al. 2009, Oskarsdóttir et al. 2011). In addition, the alkalinity in rivers within the Icelandic volcanic rift zone originates from the fast dissolution rates of young rocks and magma degassing into groundwater aquifers (Gislason et al. 1996, Oskarsdóttir et al. 2011). Before the eruption at Holuhraun lava field, at the early stage of Bárðarbunga activity, the DIC and alkalinity concentrations were higher than previously measured at the Upptýppingar station, and at the upper range of values obtained at the Grímsstaðir station. The continuous daily average concentrations evolution at Grímsstaðir station during the osmotic sampler deployment in Jökulsá á Fjöllum is shown in Fig. 3.

During the eruption, the conductivity measured in the Jökulsá á Fjöllum at both stations did not show a clear volcanic activity signal, however changes in DIC and SO_4 concentrations suggested a considerable effect of volcanic activity on water compositions (see Fig. 2). The DIC/ SO_4 ratio was relatively high at the beginning of the Bárðarbunga activity until the lava reached the main channel of the Jökulsá á Fjöllum on September 7, 2014, when this ratio decreased indicating the dissolution of acidic gases into this river water (Fig. 2). Similarly, a low DIC/ SO_4 ratio was observed in the water collected at the lava front as described in previous section. This indicates that the effects of lava–water interaction were observed in the river channel. Although the Jökulsá á Fjöllum at the Upptýppingar and Grímsstaðir stations is characterized by a relatively high alkalinity, the addition of volcanic acids was sufficiently strong to affect the sampled water chemical composition. In addition, although the conductivity during the whole monitoring period was unaffected, the conductivity does not fully reflect the processes occurring during the volcanic unrest. Increased water–rock interaction caused by intensified tectonic (seismic) activity might explain the increase in measured alkalinity and DIC concentrations at the initial stage of the Bárðarbunga unrest, before the lava flowed into the main channel of the Jökulsá. Furthermore, petrology observations suggest that the rising basaltic magma was CO_2 saturated and partially degassed before, and deeper than, the onset of H_2O and SO_2 degassing (Gislason et al. 2015). Tectonic activity could enhance water rock interaction by opening up new flow paths and thus exposing new mineral surfaces to reactive

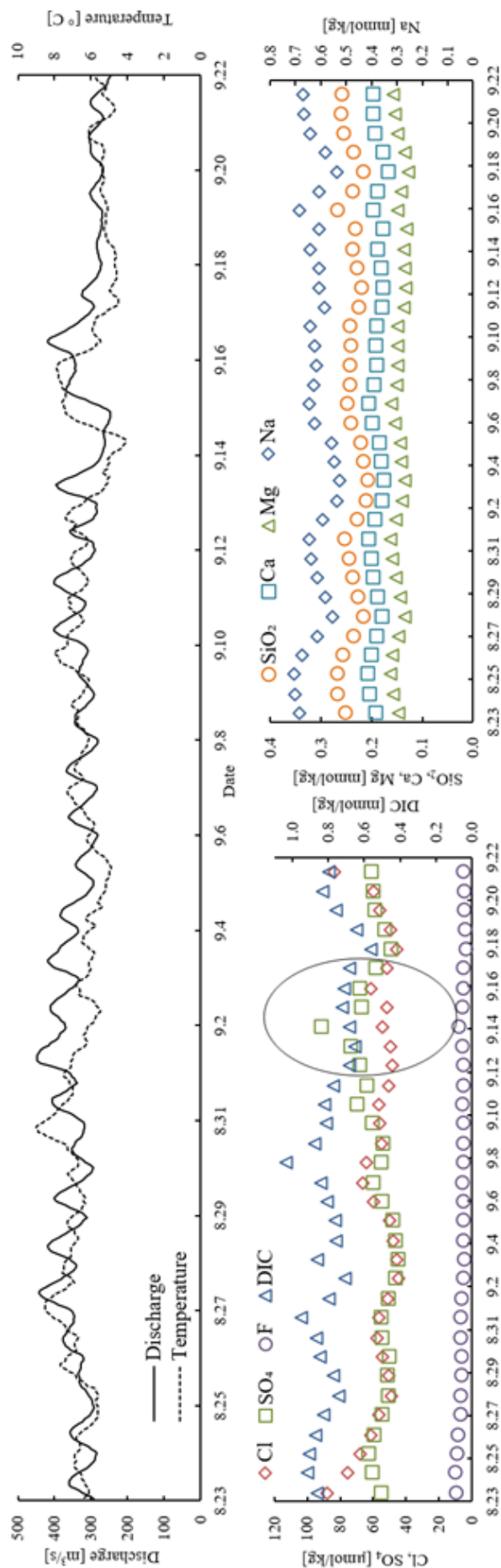


Figure 3. Discharge, water temperature, and element concentrations in waters collected by the osmotic sampler at the Grimsstaðir. Hot lava–water interaction caused the increase in dissolved SO_4 concentration while decreasing DIC, as indicated by the ellipse.

acidic fluids. In addition tectonic activity might have enhanced the magmatic CO₂ input into the groundwater recharging Jökulsá á Fjöllum resulting in increased DIC concentration. DIC/SO₄ ratio changed, indicating that the conductivity does not fully reflect the processes occurring during the volcanic unrest. Increased water–rock interaction caused by intensified tectonic (seismic) activity might explain the increase in measured alkalinity and DIC concentrations at the initial stage of the Bárðarbunga unrest, before the lava flowed into the main channel of the Jökulsá. Furthermore, petrology observations suggest that the rising basaltic magma was CO₂ saturated and partially degassed before, and deeper than, the onset of H₂O and SO₂ degassing (Gislason et al. 2015). Tectonic activity could enhance water–rock interaction by opening up new flow paths and thus exposing new mineral surfaces to reactive acidic fluids. In addition tectonic activity might have enhanced the magmatic CO₂ input into the groundwater recharging Jökulsá á Fjöllum resulting in increased DIC concentration.

The concentrations of SO₄ and F in the Jökulsá á Fjöllum at Upptyppingar throughout the early stage of the Bárðarbunga unrest, before the eruption at the Holuhraun lava field, were higher than background concentrations, but they were close to the upper range of values measured at Grímsstaðir. Before the onset of the Bárðarbunga eruption, at 11:20 GMT on August 23, 2014, a seismic tremor indicated that an eruption beneath Dyngjujökull glacier occurred (IMO 2016). During this period, two or three cauldrons formed SE of the Bárðarbunga caldera associated with a possible subglacial eruption. The estimated volume of the cauldrons was up to 20x10⁶ m³ (Reynolds et al. 2015). The chemical compositions of the water collected by the osmotic sampler during August and September at Grímsstaðir and spot samples collected at Upptyppingar and Grímsstaðir showed no major discharge or conductivity increase on August 23 or shortly thereafter. In addition, the anion concentrations of the continuous samples collected at Grímsstaðir were within the range measured during the entire initial stage of the Bárðarbunga unrest. This suggests that apart from Holuhraun lava–water interaction, there were no additional subglacial eruptions affecting Jökulsá chemical concentrations, during this period. If such eruptions however occurred, the chemical signal in sampled waters was not affected by these events.

The background conductivity in the Jökulsá á Fjöllum waters, measured during 1998–2001 at Grímsstaðir, decreased with increasing discharge as commonly seen in Icelandic glacial rivers (Eiríksdóttir et al. 2013a, b). This pattern was observed at Upptyppingar before lava flowed into the main channel of the Jökulsá. However, during the eruption, when lava flowed into the Jökulsá channel, conductivity increased with discharge reflecting the inflow of more concentrated waters into the river. Enhanced water–rock interaction due to higher temperature and the addition of volcanic gases likely drives the increased element concentrations in the water. The weight and heat of newly formed lava might have increased the outflow from the Holuhraun springs, as these factors could increase subsurface water pressure. Increased concentrations of a number of elements including DIC and boron (B) with increasing discharge confirm enhanced rock dissolution. Increased dissolved F concentration might also have enhanced suspended matter and bed rock dissolution and lead to the elevated carbonate alkalinity measured during the early stage of Bárðarbunga activity (Harouiya & Oelkers 2004, Wolff–Boenisch et al. 2004).

Snow samples

Melted snow samples collected near the eruption vents were characterized by a strong inverse dependence of SO₄, Cl, and F concentrations on pH, indicating that volcanic salts such as those originating from volcanic gases, such as SO₂, HCl and HF, acidified the snow (Fig. 4). According to Graedel and Franey (1975), because of its relatively large surface area, snow can scavenge more pollution from air than rain droplets. In the melted snow samples having the lowest pH of 3.3 and 3.5, the SO₄ and Cl dominated the charge balance. These concentrations and concentrations of metals Al, Na, and Fe are much higher than the average concentrations of these constituents measured in the unpolluted Langjökull snow. Given the presence of tephra in the snow samples, dissolved halogen and metal concentrations might have partly originated from dissolution of salts formed on this tephra (e.g. Bagnato et al. 2013, Olsson et al. 2013). Most of metals exhibit a positive linear correlation with anions suggesting that these elements were degassed at depth and transported in the gas phase as chlorides, fluorides and/or sulphate salts/aerosols (e.g. Moune et al. 2006). Note that the Cl, F, and S concentrations in bulk basalts are low (e.g. Óskarsson et al. 1981) and therefore dissolution of basaltic tephra would not account for their high concentrations in those snow samples. The protons balanced about half of the negatively charged anions in most polluted samples; the rest was balanced by water soluble salt and/or aerosols' metals such as Al (mainly as sulphates), Fe, Na, Ca, and Mg (as

chlorides). The Cl enrichment in snow compared to the water at the lava front and the overall gas flux may be related to its early degassing at the volcanic vents. Note also that the solubility of HCl is higher than that of SO₂ at the pH of the snowmelt waters, which could also lower S/Cl ratios.

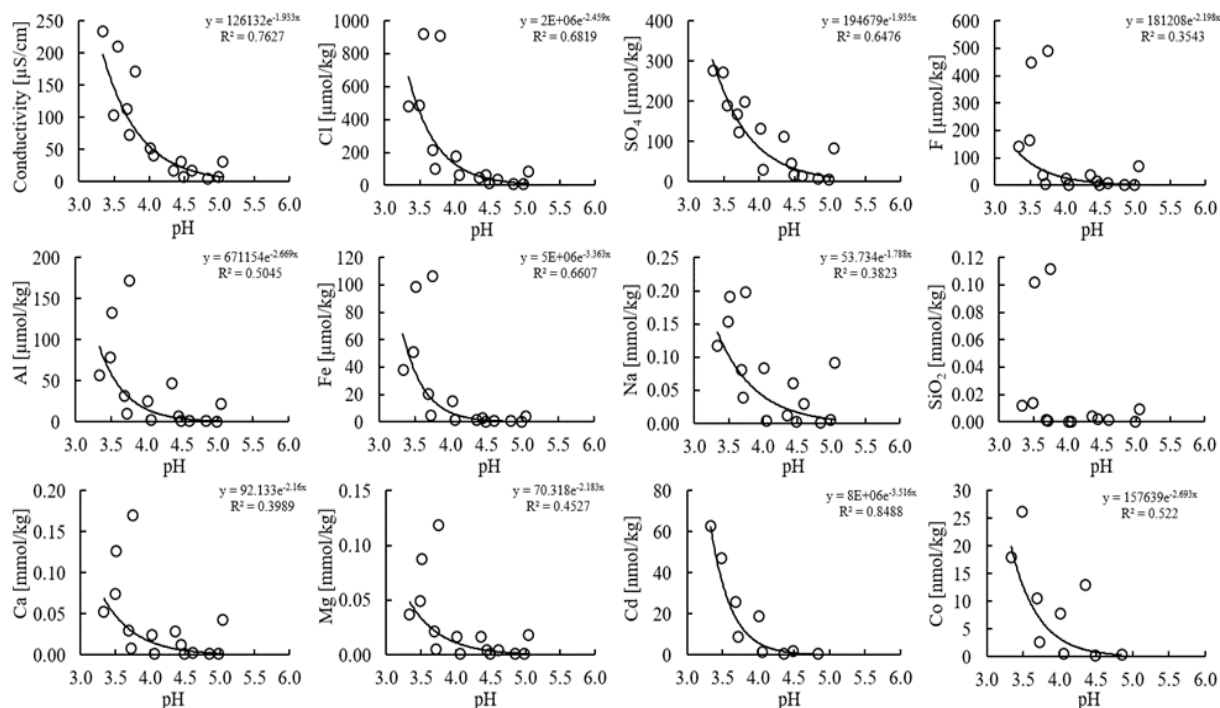


Figure 4. The dependence of the chemical composition of snow samples on pH which was calculated to the temperature of snow melting at 0.1 °C. Calculations were performed with the PHREEQC computer code (Parkhurst and Appelo 1999). Modified from Galeczka et al. (2016).

The concentrations of F, Al, Fe, Mn, and Cd in some melted snow samples collected near the Holuhraun eruption site exceeded the European Commission drinking water standards (European Communities 2008). In addition, Cu and Pb were higher than standards established by the Icelandic directive for surface waters, defining limits to protect sensitive biota, Category III (IcD 1999). The melting of polluted snow during the spring might, therefore, adversely affect surface water chemical compositions, vegetation, and aquatic biota (e.g. Flaathen & Gislason 2007). In addition to the high toxic element concentrations in the polluted snow, enhanced dissolution of bedrock and/or suspended material caused by acidic snowmelt might further increase these concentrations. The dissolved F sourced from volcanic gases will also enhance basalt dissolution rates (Wolff-Boenisch et al. 2004). In acid solutions at pH of 5.5, fluoride becomes phyto-available through aqueous complexation as soluble aluminium-fluoride compounds (Stevens et al. 1997). The polluted snow contained considerable concentrations of different Al species, which contributed up to 15% of the dissolved ion budget.

Mixing of snowmelt with surface waters

Geochemical calculations using PHREEQC computer code (Parkhurst & Appelo 1999) were performed to assess the potential river water contamination risk associated with the melting of polluted snow. The risk associated with mixing polluted snow with surface waters depends on the chemical composition of the surface waters. For example, rivers having low alkalinity (low buffering capacity) such as those draining old bedrocks in East Iceland (e.g. Eiríksdóttir et al. 2013 a, b, Louvat et al. 2008) will be more sensitive to pH changes upon mixing with acidic snowmelt waters. Rivers with high buffering capacities, such as those draining Icelandic rift zones, will be less affected by the interaction with acidic snowmelt waters. For a worst-case scenario, initial melted snow element concentrations were assumed to be five times higher than the average melted snow composition measured in this study (see Johannessen & Henriksen 1978). This snow was mixed in model calculations with different proportions of 1) low alkalinity Fjarðará river water, and 2) high alkalinity Jökulsá á Fjöllum river water (e.g. Eiríksdóttir et al. 2013a, Gislason et al. 2009, Kristmannsdóttir

et al. 1999). Results of these calculations, indicate that after diluting the snow with Fjarðará river water by a factor of 35, the melt water pH was predicted to rise from an initial 3.5 to 6.6, and it became slightly supersaturated with amorphous $\text{Al}(\text{OH})_3$. Precipitation of aluminium hydroxides will lower the dissolved Al concentrations and potential scavenge some toxic metals. After diluting snowmelt with Upptyppingar river waters by a factor of 4, the pH rose to 6.9 and amorphous $\text{Al}(\text{OH})_3$ was predicted to precipitate. This modelling confirms that low alkalinity surface waters such as numerous salmon rivers in East Iceland will be more affected by polluted snowmelt than those with high alkalinity and therefore dedicated monitoring should be considered to protect these fish habitats during volcanic activity.

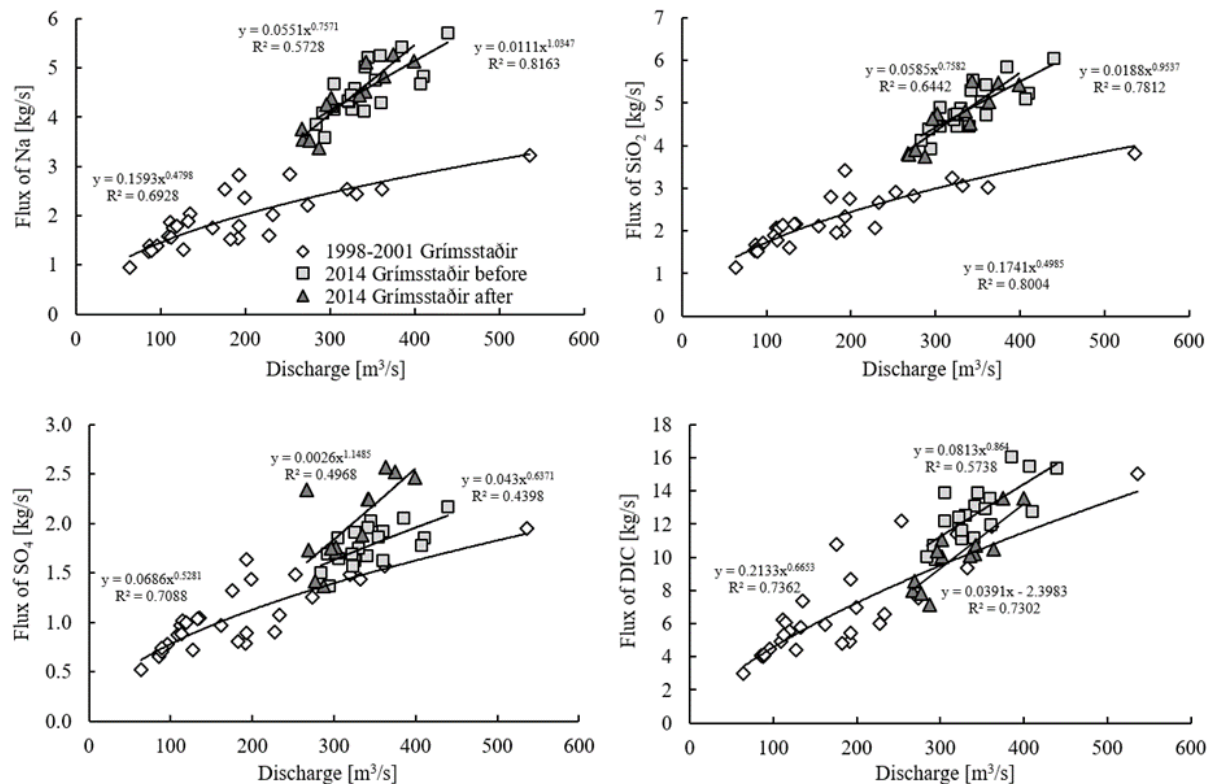


Figure 5. The dissolved fluxes of selected elements calculated at the Grímsstaðir monitoring station during the 1998–2001 (diamonds) and during the 2014 – before (squares) and after (triangles) lava flowed into the Jökulsá á Fjöllum channel. Modified from Galeczka et al. (2016).

Conclusions

This study quantified the effect of volcanic activity and arrival of fresh lava during the 2014–15 Bárðarbunga eruption on the local surface water chemistry and rock reactivity. Based on obtained data, the following conclusions were drawn:

The dissolution of volcanic gases increased the SO_4 , F, Cl concentrations of surface waters by up to two orders of magnitude during lava–gas–water interaction decreasing the dissolved carbonate alkalinity.

These chemical changes and the presence of fresh lava increased the annual average chemical denudation rate, calculated based on Na flux, within Jökulsá á Fjöllum catchment by a factor of two compared to the background flux.

Snow was concentrated in acidic volcanic constituents during the eruption. The eventual melting of this snow will release these constituents in dissolved form to the local rivers increasing the risk of possible acidification of the surface aquifers after spring melt.

Combination of volcanic gas addition and enhanced rock weathering will affect Icelandic river waters differently depending on their alkalinity; direct runoff rivers with low alkalinity will be more affected by eruption products than high alkalinity spring and glacier fed rivers due to their lower pH buffering capacity.

Despite the significant chemical changes observed in the local rivers during and after the eruption, and in contrast to the chemical signals observed prior to subglacial floods, there was no substantial chemical composition signal in the local river water indicating the existence of the subglacial eruption prior to the Bárðarbunga eruption.

Acknowledgements

This study was funded by Ríkislögreglustjórinn Almannavarnadeild – The National Commissioner of the Icelandic Police, Jarðvísindastofnun Háskólans – Institute of Earth Sciences University of Iceland and Veðurstofa Íslands – IMO and Rannsóknamiðstöð Íslands – The Icelandic Centre for Research RANNÍS (Grant # 163531-051). The authors would like to thank to all of those who helped collecting the water and snow samples: Morgan Thomas Jones, Sverre Planke, Dougal Jerram, John Millett, Helgi Alfredsson, Þorsteinn Jónsson, Nicole Keller, Sveinbjörn Steinþórsson, Ingibjörg Jónsdóttir, Catherine Gallagher, Thor Thordarson, Ármann Höskuldsson, Jón Ottó Gunnarsson, Morten Riishuus, Ólafur Freyr Gíslason, Hermann Arngrímsson, Njáll Fannar Reynisson, Svava Björk Þorlákssdóttir, Daði Þorbjörnsson, Lukasz Kowolik. We are grateful to Rósa Ólafsdóttir for her maps design. We also thank all colleagues and coworkers from Institute of Earth Sciences and IMO for fruitful discussions during this time of the Bárðarbunga unrest.

References

- Bagnato, E., Aiuppa, A., Bertagnini, A., Bonadonna, C., Cioni, R., Pistolesi, M., Pedone, M. & Höskuldsson, A. 2013. Scavenging of sulphur, halogens and trace metals by volcanic ash: The 2010 Eyjafjallajökull eruption. *Geochim. Cosmochim. Acta* 103: 138–160.
- Eiríksdóttir, E.S., Gíslason, S.R., Snorrason, Á., Harðardóttir, J., Þorlákssdóttir, S.B. & Sveinbjörnsdóttir, Á.E. 2013a. Efnasamsetning, rennsli og aurburður straumvatna á Austurlandi X. *Gagnagrunnur Jarðvísindastofnunar og Veðurstofnunar*. Report RH-13-2013.
- Eiríksdóttir, E.S., Gíslason, S.R., Harðardóttir, J. & Þorlákssdóttir, S.B. 2013b. Efnasamsetning, rennsli og aurburður straumvatna á Suðurlandi XVI. *Gagnagrunnur Jarðvísindastofnunar og Veðurstofnunar*. Report RH-14-2013.
- European Communities 1998. Council directive 98/83 Official Journal of the European Communities.
- Flaathen, T.K. & Gíslason, S.R. 2007. The effect of volcanic eruptions on the chemistry of surface waters: The 1991 and 2000 eruptions of Mt. Hekla, Iceland. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 164: 293–316.
- Flaathen, T.K., Gíslason, S.R. & Oelkers, E.H. 2010. The effect of aqueous sulphate on basaltic glass dissolution rates. *Chem. Geol.* 277, 345–354.
- Galeczka, I., Wolff-Boenisch, D., Oelkers, E.H. & Gíslason, S.R. 2014b. An experimental study of basaltic glass–H₂O–CO₂ interaction at 22 and 50 °C: Implications for subsurface storage of CO₂. *Geochim. Cosmochim. Acta* 126: 123–145.
- Galeczka, I., Sigurdsson, G., Eiríksdóttir, E.S., Oelkers, E. & Gíslason, S.R. 2016. The chemical composition of rivers and snow affected by the 2014/2015 Bárðarbunga eruption, Iceland. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 316: 101–119.
- Gíslason, S.R., Arnorsson, S. & Armannsson, H. 1996. Chemical weathering of basalt in Southwest Iceland; effects of runoff, age of rocks and vegetative/glacial cover. *Am. J. Sci.* 296: 837–907.
- Gíslason, S.R. & Oelkers, E.H. 2003. Mechanism, rates, and consequences of basaltic glass dissolution: II. An experimental study of the dissolution rates of basaltic glass as a function of pH and temperature. *Geochim. Cosmochim. Acta* 67: 3817–3832.
- Gíslason, S.R., Oelkers, E.H., Eiríksdóttir, E.S., Kardjilov, M.I., Gísladóttir, G., Sigfusson, B., Snorrason, A., Elefsen, S., Harðardóttir, J., Torssander, P. & Oskarsson, N. 2009. Direct evidence of the feedback between climate and weathering. *Earth Planet. Sci. Lett.* 277: 213–222.

- Gislason, S.R., Stefánsdóttir, G., Pfeffer, M.A., Barsotti, S., Jóhannsson, T., Galeczka, I., Bali, E., Sigmarsson, O., Stefánsson, A., Keller, N.S., Sigurdsson, A., Bergsson, B., Galle, B., Jacobo, V.C., Arellano, S., Aiuppa, A., Jónasdóttir, E.B., Aeiríksdóttir, E.S., Jakobsson, S., Guðfinnsson, G.H., Halldórsson, S.A., Gunnarsson, H., Haddadi, B., Hjónsdóttir, I., Thordarson, T., Riishuus, M., Högnadóttir, T., Dürig, T., Pedersen, G.B.M., Höskuldsson, Á. & Gudmundsson, M.T. 2015. Environmental pressure from the 2014–15 eruption of Bárðarbunga volcano, Iceland. *Geochem. Perspect. Lett.* 1: 84–93.
- Gkritzalis–Papadopoulos, A., Palmer, M.R. & Mowlem, M.C. 2012a. Adaptation of an osmotically pumped continuous in situ water sampler for application in riverine environments. *Environ. Sci. Technol.* 46: 7293–7300.
- Gkritzalis–Papadopoulos, A., Palmer, M.R. & Mowlem, M.C. 2012b. Combined use of spot samples and continuous integrated sampling in a study of storm runoff from a lowland catchment in the south of England. *Hydrol. Processes* 26: 297–307.
- Graedel, T.E. & Franey J.P. 1975. Field measurements of submicron aerosol washout by snow. *Geophys. Res. Lett.* 2: 325–328.
- Harouiya, N. & Oelkers, E.H. 2004. An experimental study of the effect of aqueous fluoride on quartz and alkali–feldspar dissolution rates. *Chem. Geol.* 205: 155–167.
- IcD 1999. *Reglugerð: um varnir gegn mengun vatns*. Icelandic Directive, Reykjavík. <http://www.reglugerd.is/interpro/dkm/Webguard.nsf/lookByNumer/7961999?OpenDocument>
- IMO 2016. Icelandic Meteorological Office. www.vedur.is
- Jannasch, H.W., Wheat, C.G., Plant, J.N., Kastner, M. & Stakes, D.S. 2004. Continuous chemical monitoring with osmotically pumped water samplers: OsmoSampler design and applications. *Limnol. Oceanograph. Methods* 2: 102–113.
- Johannessen, M. & Henriksen, A. 1978. Chemistry of snow meltwater: changes in concentration during melting. *Water Resources Res.* 14: 615–619.
- Jones, M., Hembury, D., Palmer, M., Tonge, B., Darling, W.G. & Loughlin, S. 2011. The weathering and element fluxes from active volcanoes to the oceans: a Montserrat case study. *Bull. Volcanol.* 73: 207–222.
- Jones, M.T., Galeczka, I.M., Gkritzalis–Papadopoulos, A., Palmer, M.R., Mowlem, M.C., Vogfjörð, K., Jónsson, O. & Gislason, S.R. 2015. Monitoring of jökulhlaups and element fluxes in proglacial Icelandic rivers using osmotic samplers. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 291: 112–124.
- Kristmannsdóttir, H., Björnsson, A., Pálsson, S. & Sveinbjörnsdóttir, Á.E. 1999. The impact of the 1996 subglacial volcanic eruption in Vatnajökull on the river Jökulsá á Fjöllum, North Iceland. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 92: 359–372.
- Lelieveld, J. 1993. Multi–phase processes in the atmospheric sulphur cycle. In: Wolast, R., Mackenzie, F.T., Chou, L. (Eds). *Interactions of C, N, P and S Biochemical Cycles and Global Change*, Springer–Verlag, Berlin–Heidelberg, 305–331.
- Louvat, P., Gislason, S.R. & Allègre, C.J. 2008. Chemical and mechanical erosion rates in Iceland as deduced from river dissolved and solid material. *Am. J. Sci.* 308: 679–726.
- Mehta, P. 2010. Science behind Acid Rain: Analysis of its impacts and advantages on life and heritage structures. *South Asian J. Tourism Heritage* 3: 123–132.
- Moune, S., Gauthier, P.–J., Gislason, S.R. & Sigmarsson, O. 2006. Trace element degassing and enrichment in the eruptive plume of the 2000 eruption of Hekla volcano, Iceland. *Geochim. Cosmochim. Acta* 70: 461–479.
- Navarre–Sitchler, A. & Brantley, S. 2007. Basalt weathering across scales. *Earth Planetary Sci. Lett.* 261: 321–334.
- Oelkers, E.H. & Gislason, S.R. 2001. The mechanism, rates and consequences of basaltic glass dissolution: I. An experimental study of the dissolution rates of basaltic glass as a function of aqueous Al, Si and oxalic acid concentration at 25°C and pH = 3 and 11. *Geochim. Cosmochim. Acta* 65: 3671–3681.
- Olsson, J., Stipp, S.L.S., Dalby, K.N. & Gislason, S.R. 2013. Rapid release of metal salts and nutrients from the 2011 Grímsvötn, Iceland volcanic ash. *Geochim. Cosmochim. Acta* 123: 134–149.
- Oskarsdóttir, S.M., Gislason, S.R., Snorrason, A., Halldorsdóttir, S.G. & Gisladóttir, G., 2011. Spatial distribution of dissolved constituents in Icelandic river waters. *J. Hydrol.* 397: 175–190.
- Óskarsson, N. 1981. The chemistry of Icelandic lava incrustations at the latest stage of degassing. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 22: 97–121.

Parkhurst, D.L. & Appelo, C.A.J. 1999. User's guide to PHREEQC (Version 2) – a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations: U.S. In: *Geological Survey Water-Resources Investigations Report* 99-4259, 312.

Reynolds, H.I., Gudmundsson, M.T. & Högnadóttir, T. 2015. *Subglacial melting associated with activity at Bárðarbunga volcano, Iceland, explored using numerical reservoir simulations*. European Geosciences Union, General Assembly 2015, Volume 17, Page 10753, Vienna, Austria, April 12–17.

Sigmundsson, F., Hooper, A., Hreinsdóttir, S., Vogfjörð, K.S., Ofeigsson, B.G., Heimisson, E.R., Dumont, S., Parks, M., Spaans, K., Gudmundsson, G.B., Drouin, V., Arnadóttir, T., Jonsdóttir, K., Gudmundsson, M.T., Högnadóttir, T., Fridriksdóttir, H.M., Hensch, M., Einarsson, P., Magnusson, E., Samsonov, S., Brandsdóttir, B., White, R.S., Agustsdóttir, T., Greenfield, T., Green, R.G., Hjartardóttir, A.R., Pedersen, R., Bennett, R.A., Geirsson, H., La Femina, P.C., Björnsson, H., Pálsson, F., Sturkell, E., Bean, C.J., Mollhoff, M., Braiden, A.K. & Eibl, E.P.S. 2015. Segmented lateral dyke growth in a rifting event at Bar[eth]arbunga volcanic system, Iceland. *Nature* 517: 191–195.

Stevens, D.P., McLaughlin, M.J. & Alston, A.M. 1997. Phytotoxicity of the Aluminium–fluoride complexes and their uptake from solution culture by *Avena sativa* and *Lycopersicon esculentum*. *Plant Soil* 192: 81–93.

White, A.F. & Brantley, S.L. 2003. The effect of time on the weathering of silicate minerals: why do weathering rates differ in the laboratory and field? *Chem. Geol.* 202: 479–506.

Wolff-Boenisch, D., Gislason, S.R. & Oelkers, E.H. 2004. The effect of fluoride on the dissolution rates of natural glasses at pH 4 and 25°C. *Geochim. Cosmochim. Acta* 68: 4571–4582.

7.

kafli

Áhrif eldgossins í Bárðarbungu 2014–2015 á efna- samsetningu og framburð Fellsár í Fljótsdal

Eydís Salome Eiríksdóttir^{1,2}, Iwona M. Gałeczka^{1,3} & Sigurður Reynir Gíslason¹.

¹Jarðvísindastofnun Háskólans, ²Hafrannsóknastofnun, ³Íslenskar orkurannsóknir

Inngangur

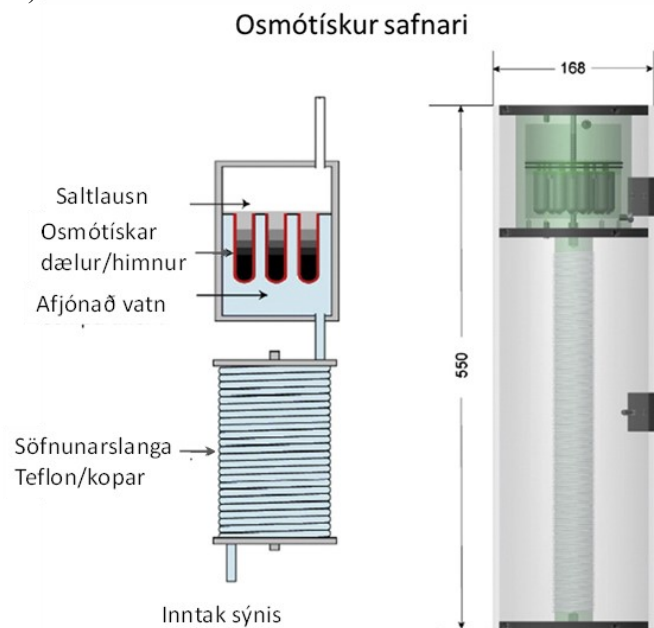
Eldsumbrotin í Bárðarbungu 2014–2015 stóðu yfir í um sex mánuði og voru hin mestu á Íslandi í yfir 200 ár. Um 1,6 km³ af hrauni mynduðust í umbrotunum og gasstreymi var mikið. Í heildina losnuði um 11 milljón tonn af SO₂, 6 milljón tonn af CO₂, 100 þúsund tonn af HCl (Sigurður Reynir Gíslason o.fl. 2015) og 50 þúsund tonn af HF (Andri Stefánsson o.fl. 2017) til andrúmsloftsins. Þessar gastegundir mynda sýrur í snertingu við raka andrúmsloftsins og geta haft áhrif á yfirborðsvatn og lífríki þess. Loftraki hvarfast við gös og agnir í andrúmsloftinu áður en hann fellur sem úrkoma. Úrkoman ber með sér þau efni leysts hafa upp í úrkomunni (Gałeczka o.fl. 2016, Andri Stefánsson o.fl. 2017). Snjór sem safnast fyrir á vatnasviði inniheldur þau efni sem úrkoman hefur hvarfast við í lofthjúpunum og fyrsta bráðnun þess snævar getur valdið púlsum af uppleystum efnum í ám og vötum, sem mörg hver geta haft neikvæð áhrif á lífríki vatnanna (Johannessen & Henriksen 1978, Sigurður Reynir Gíslason 1991).

Þessi rannsókn miðaði að því að meta áhrif eldsumbrotanna á dragá á áhrifasvæði þeirra og varð Fellsá við Sturluflöt í Fljótsdal fyrir valinu. Mikið er til af gögnum um leyst efni í Fellsá frá árunum 1998 til 2013 (Eydís Salome Eiríksdóttir o.fl. 2013, 2014, 2015, 2017), stór hluti vatnsviðs árinna var innan þess svæðis þar sem styrkur SO₂ í andrúmslofti fór yfir heilsuverndarmörk 5–10% góstmans og áin er viðkvæmari fyrir sýringu en t.d. lind-árinna innan gosbeltisins (Sigurður Reynir Gíslason o.fl. 2015). Einnig er rennsli Fellsár vakt að samfelld af Veðurstofu Íslands sem gefur möguleika á að meta efnaframburð árinna (Veðurstofa Íslands 2015). Síðast en ekki síst var komin reynsla af rekstri svokallaðra osmósu-safnara í lok árs 2015, sem gerði kleift að safna sýnum samfelld úr ánni (Jones o.fl. 2015, Gałeczka o.fl. 2016) og þannig hremma skammvinna púlsa af leystum efnum sem stafa af fyrstu bráðnun mengaðs snævar. Veður var umhleypingasamt veturinn 2014 til 2015 og vorið 2015 var kalt á Austurlandi. Leysingar á vatnasviði Fellsár hófust ekki fyrir alvöru fyrr en um miðjan júní, eða mánuði seinna en að meðaltali á árunum 1998 til 2013.

Aðferðir

Samfelld vatnssýnataka fór fram á tímabilinu apríl til ágúst 2015 og var sjálfvirkur osmótískur sýnasafnari (Jones o.fl. 2015) notaður til vöktunarinnar. Niðurstöður mælinganna frá 2015 voru bornar saman við eldri gögn úr Fellsá til að meta hugsanleg áhrif af völdum eldgossins á vatnsfallið. Osmótíski safnarinn var hannaður og framleiddur af Sensors Development Group við Háskólann í Southampton og Quayside precision Engineering í Southampton. Samskonar safnarar hafa verið notaðir við rannsóknir á efnasamsetningu ferskvatns og sjávar (Jannasch et al. 2004; Gkritzalis-Papadopoulos o.fl. 2012, Jones o.fl., 2015, Gałeczka o.fl. 2016).

Sýnasafnarinn er með osmótískri dælu sem sýgur stanslaust sýni inn í fíngerða slöngu á meðan slangan er í vatninu (1. mynd). Ef slangan fer upp úr vatninu sýgur dælan loft inn í slönguna. Osmótískir kraftar sjá um dælinguna og ekki er því þörf á rafmagni við söfnunina. Á hverjum degi safnast um 0,8 ml af vatni inn í sýnaslönguna í það sem nemur 1 m af slöngu. Safnarinn var festur á járnstöng sem boltaður var í klettavegginn og þess gætt að safnarinn væri á nægilega miklu dýpi til að ekki frysi í honum (2. mynd).



1. mynd. Skýringarmynd af osmótískum safnara sem notaður var við rannsóknina. Mynd breytt frá Jones og félögum (2015).



2. mynd. Unnið að uppsetningu osmótíska safnarans í Fellsá við Sturluflöt í Fljótsdal. Safnarannum var komið fyrir undir göngubrúnni þar sem dýpi er nægilega mikið til þess að safnarinn fari ekki á þurrt (mynd : Iwona Monika Galeczka).

Safnarinn var settur niður í hyl undir göngubru í Fellsá í þrígang á tímabilinu apríl til ágúst og látinn safna í 1 til 1,5 mánuð í senn. Fyrsta söfnunin stóð frá 4. apríl til 24. maí, næsta frá 24. maí til 5. júlí og sú síðasta frá 5. júlí til 8. ágúst. Viðmiðunarsýnum var safnað þegar osmósu-safnarinn var settur niður og tekinn upp. Viðmiðunarsýni sýna styrkinn á því augnabliki sem sýnunum var safnað en ekki meðaltalsstyrk dagsins líkt og sýnin sem safnað var með osmósu-safnaranum. Styrkur leystra efna í viðmiðunarsýnum og meðaltalsstyrkur sýnis frá sama degi úr osmósu-safnaranum eru svipaðir ef rennsli er stöðugt yfir daginn. Við úrvinnslu á sýnum var leitast við að hafa sem mesta upplausn á sýnunum þannig að þau gæfu sem mestar upplýsingar. Því var söfnunarslöngunni skipt upp í meterslanga búta sem hver um sig innihélt vatnssýni yfir einn dag. Það voru um 0,8 ml af vatni í hverju sýni sem nýttust til greininga á pH og aðalefnum og allmörgum snefilefnum. Hverju sýni var komið fyrir í litlum sýnaglösum sem höfðu verið þvegin með afjönuðu vatni og þurrkuð.

Mæling á pH var gerð með Orion míkro pH nema frá Thermo Scientific sem er hannaður til að mæla allt að 0,5 µl sýni. Hlutsýni var tekið úr hverju sýni með pípettu og pH mælt. Eftir það var sýnið þynnt með afjönuðu vatni þannig að það varð um 13 ml og þynnt sýnið var síðað í gegn um 0,2 µm einnota 20 mm Cellulose Acetate síu. Að því loknu voru leyst efni mæld í þynntu, síuðu sýninu. Anjónirnar Cl, F, SO₄ voru mældar í 0,5 ml af sýninu með anjónaskilju Jarðvísindastofnunar (ICS2000) og restin notuð til greininga aðal-katjóna og nokkurra málma með ICP-AES á Jarðvísindastofnun (3. mynd). Sýnin voru meðhöndluð strax og komið var með þau í hús og pH mælt sama dag og sýnin voru tekin úr slöngunum. Lögð var áhersla á að efnagreina öll sýnin innan viku frá því að þau komu í hús.

Veðurstofa Íslands er með samfellda vöktun rennslis í Fellsá við Sturluflöt (Veðurstofa Íslands, 2015) sem gefur kost á að meta áhrif rennslis á mælda þætti og reikna framburð leystra efna. Það er mikilvægt þar sem rennsli hefur mikil áhrif á styrk leystra efna. Framburður einstakra efna (mól/dag) var reiknaður með því að margfalda styrk hvers sýnis (mól/m³) með dagsmeðalrennsli árinna (m³/dag). Niðurstöður fyrra rannsóknartímabils eru mikilvægar til samanburðar en þar sem sýnasöfnunin var dreifðari var framburður yfir það tímabil reiknað með því að nota dagsmeðalrennsli árinna og samband rennslis og styrks leystra efna þegar sýnum var safnað á tímabilinu 2008–2013 (4. mynd; Eydis Salome Eiríksdóttir o.fl. 2017).

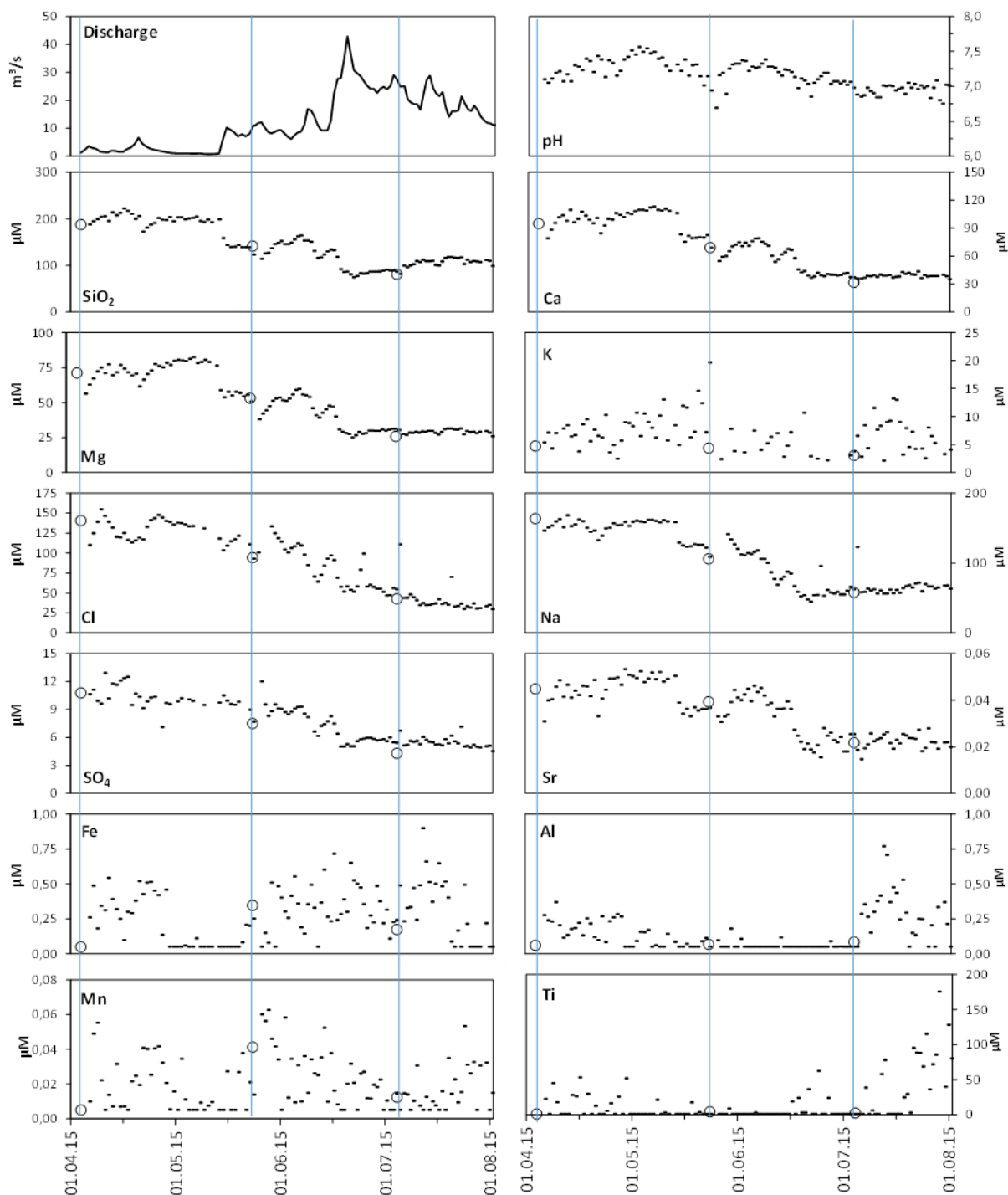
Niðurstöður og umræður

Styrkur leystra efna og pH

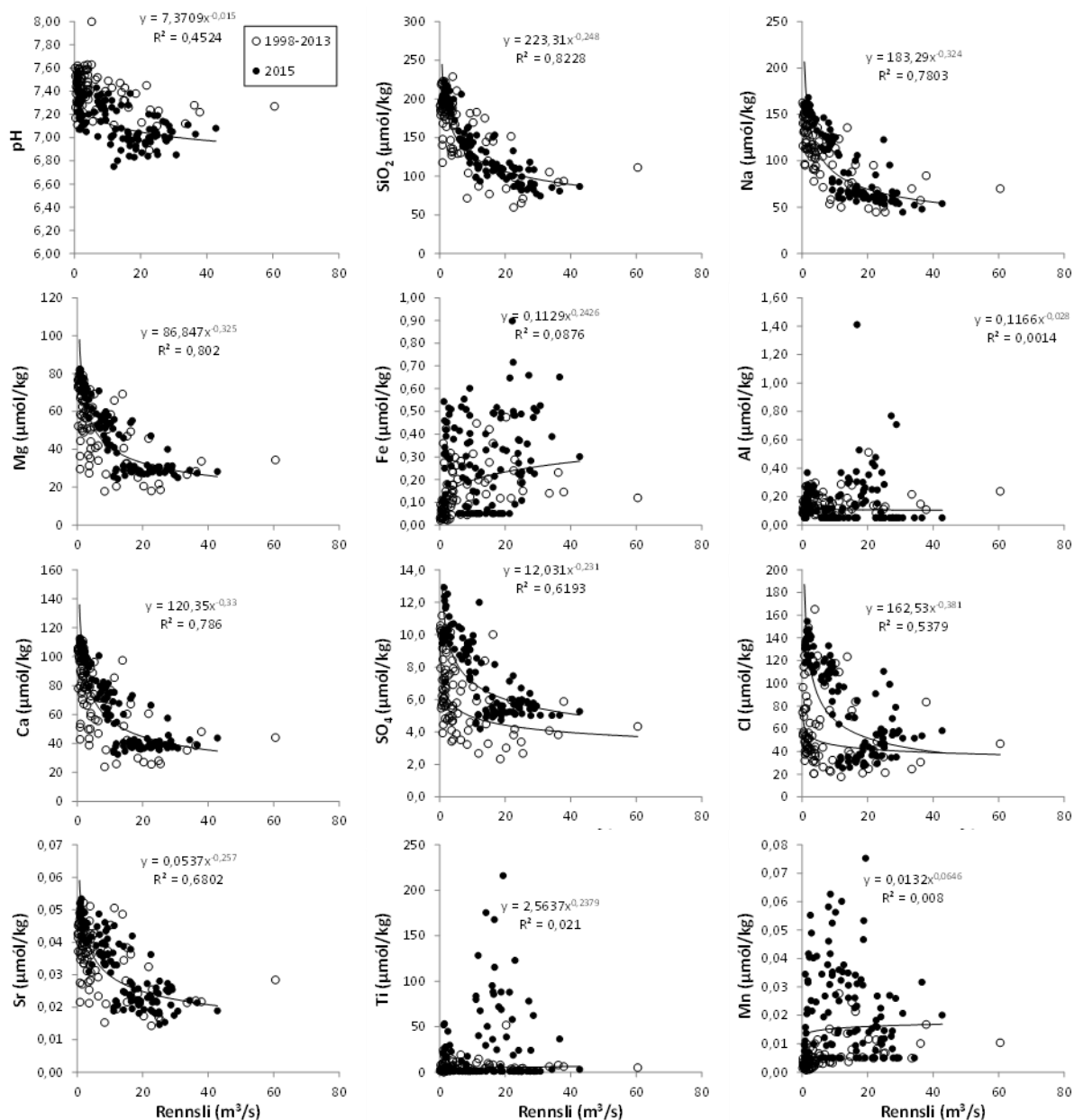
Niðurstöður mælinganna er að finna á 3. og 5. mynd. 3. mynd sýnir niðurstöðurnar í tímaröð og 4. mynd sýnir áhrif rennslis á styrk leystra efna.

Fellsá er dragá og rennsli hennar er því að mestu stjórnað af úrkomumagni sem fellur á vatnasvið hennar, sem regn eða snjór. Rennsli árinna er mest í vorleysingum og snemmsumars, á meðan snjór er enn að bráðna á vatnasviðinu. Niðurstöður mælinganna frá 2015 leiddu í ljós að vatn á vatnasviði Fellsár var súrara sumarið 2015 en á tímabilinu 1998 til 2013 (4. og 5. mynd). Ekki var þó um neina verulega sýringu að ræða. Meðaltal pH á árunum 1998 til 2015 var 7,41 (σ=0,16) en 7,1 (σ=0,19) vor og sumar 2015. Gildi pH ómengaðrar úrkomu á Íslandi er 5,4 á því augnabliki sem hún fellur til jarðar (Sigurður Reynir Gíslason 1991). Þar sem pH er lógaritmískur kvarði er þó breyting H⁺ jónarinnar í Fellsá þó meiri en pH kvarðinn gefur til kynna (5. mynd).

Þar sem pH er lógaritmískur kvarði er þó breyting H⁺ jónarinnar í Fellsá þó meiri en pH kvarðinn gefur til kynna (5. mynd). Meðastyrkur H⁺ var 0,046 µmól/l 1998-2013 en 0,074 µmól/l í sýnum frá 2015 sem er hækkun um 61% miðað við viðmiðunarárin. Gildi pH Fellsár vor og sumar 2015 fór lægst í 6,69 og hæst í 7,54. Styrkur Cl og SO₄ var einnig hærri en í viðmiðunarári sem útskýrir pH lækkunina (5. mynd). Ekki var hægt að nota styrk F úr osmósusafnaranum þar sem flúormengun var í slöngunum. Styrkur annarra aðalefna var sambærilegur við eldri sýni og styrkur mældra snefilefna 2015 var oftast svipaður og í eldri sýnum.



3. mynd. Rennsli, pH og styrkur leystra efna í Fellsá við Sturluflöt vor og sumar 2015, í kjölfar eldsumbrotanna norðan Vatnajökuls 2014–2015. Opnu hringirnir tákna mældan styrk í viðmiðunarsýnum sem safnað var þegar verið var að setja niður safnara. Linurnar endurspegla tíma þegar safnari var settur niður og hvaða sýni voru efnagreind á sama tíma.



4. mynd. Samband rennsli og styrks leystra efna í Fellsá við Sturhúflöt. Opnu hringirnir tákna sýni sem safnað var á árunum 1998 – 2013 en svörtu punktarnir tákna sýni sem safnað var vor og sumar 2015 eftir eldsumbrotin í Bárðarbungu. Föllin voru notuð ásamt dagsmeðalrennsli til að reikna framburð Fellsár á leystum efnum.

Lífríkið er viðkvæmt fyrir styrk margra málma og má nefna ál (Al) sérstaklega í því sambandi. Leysni Al er mjög pH háð og eykst með fráviki frá hlutlausu pH (pH = 7). Mikið er af Al í berggrunnum og pH breyting vatns (hvort sem vatnið verður súrara eða basíkara) getur valdið mikilli aukningu á álstyrk vegna efnaskipta við berggrunninn sem getur orðið það mikil að það fer að hafa neikvæð áhrif á lífríkið (t.d. Gensemer & Playle 1999). Styrkur Al er sýndur á tímalínu á 3. mynd. Styrkur Al í Fellsá var alltaf lágur og fór aldrei yfir 0,8 µmól/l sumarið 2015. Til samanburðar var meðalstyrkur Al 0,2 µmól/l í Fellsá á árunum 1998 til 2013 og frá 0,2 til 8,7 µmól/l efst í Elliðaám árið 1998 (Sigurður Reynir Gíslason o.fl. 1998). Styrkur Al var hinsvegar hár í snjó sem féll nær eldstöðinni, allt að 70 µmól/l, og voru þá Al efnasambönd 15% af heildarstyrk uppleysta efna (Galezca o.fl. 2016). Álstyrkurinn var hins vegar mun hærri í snjó sem féll úr gosmekki Heklu 1991 og 2000 en hann fór hæst í 6.000 µmól/l. Hæsti styrkur Al í sýnum sem safnað úr Rangá við Galtalæk í tengslum við Heklugosið 2000 var 56 µmól/l (Flaathen & Gíslason 2009).

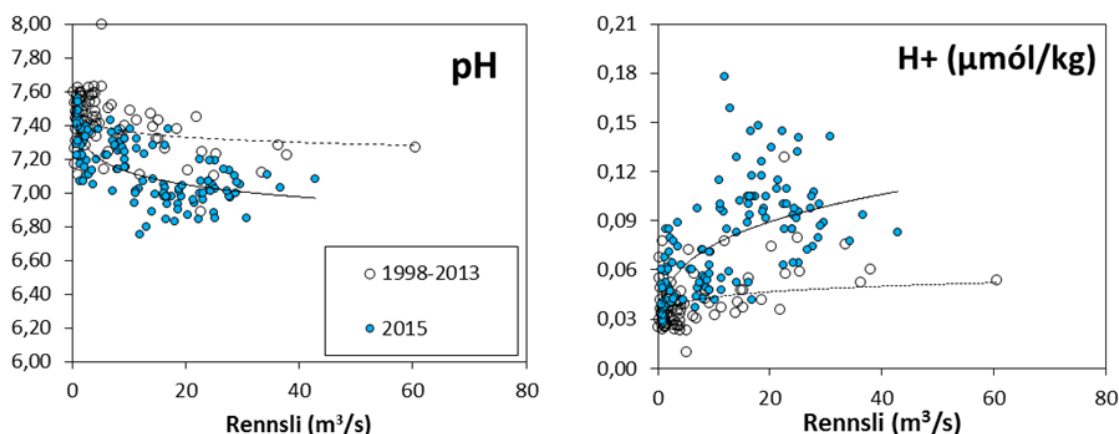
Framburður leystra efna

Vorið 2015 var kalt á Austurlandi og leysingar á vatnasviði Fellsár hófust ekki fyrir alvöru fyrr en um miðjan júní, eða mánuði seinna en að meðaltali á árunum 1998 til 2013. Það olli því að rennslí Fellsár vegna vorleysinga óx ekki fyrr en um miðjan júní (3. mynd).

Framburður efna með vatnsföllum stjórnast af rennslí árinna og styrk efna í vatninu. Margfeldi rennslis (m^3/dag) og styrks leystra efna ($\text{mól}/\text{m}^3$ eða g/m^3) gefur framburð efna ($\text{mól}/\text{dag}$ eða g/dag). Framburður Fellsár á leystum efnum sem mæld voru á rannsóknartímabilinu 2015 var svipaður og í meðaltalsári nema framburður H^+ og súlfats (SO_4^{2-}) sem var tvöfalt hærri og framburður Cl^- sem var 40% hærri en í meðalári (6. og 7. mynd).

Samband rennslis og framburðar flestra leystra efna í Fellsá við Sturluflöt í Fljótsdal var sambærilegt og á viðmiðunarárunum, fyrir utan framburð H^+ , Cl og SO_4 (7. mynd). Styrkur H^+ , Cl og SO_4 var hærri í Fellsá 2015 en í viðmiðunarári (4. mynd) sem veldur því að rennslisaukning veldur auknum framburði þessara efna miðað við framburð áruna 1998–2013.

Framburður H^+ og SO_4 frá 2015 var alltaf hærri en á árunum 1998–2013 en framburður Cl var suma daga sambærilegur og í viðmiðunarári en aðra ekki. Það bendir því til þess að Cl í Fellsá sé af tvenns konar uppruna. Annarsvegar falla gögnin frá 2015 að gögnunum frá 1998–2013 en hins vegar er framburður Cl suma daga 2015 mun rennslisháðari en á árunum 1998–2013. Það má leiða líkur að því að sá hluti gagnanna frá 2015 sem fellur að eldri gögnunum sé sjávarættað Cl en það sem fellur ofan við eldri gögnin sé eldfjallaættað. Andri Stefánsson o.fl. (2017) hafa sýnt fram á að mikið af efnum sem féll með úrkomu átti rætur sínar að rekja til kvikugasa sem leystust upp í úrkomunni.



5. mynd. Samband rennslis og styrks H^+ jóna (pH) í Fellsá vor og sumar 2015 sýnir að árvatnið var súrara en í viðmiðunarárunum 1998 til 2015. Mikið af sýrandi gastegundum kemur upp í eldgosum og var gasmagn í Holuhraungosinu óvenju mikið (Sigurður Reynir Gíslason o.fl. 2015, Andri Stefánsson o.fl. 2017).

Ályktanir

Eldsumbrotin norðan Vatnajökuls 2014–2015 voru hin mestu á Íslandi í yfir 200 ár. Um $1,6 \text{ km}^3$ af hrauni mynduðust í umbrotunum og gasstreymi var mikið. Í heildina losnuði um 11 milljón tonn af SO_2 , 6 milljón tonn af CO_2 og 100 þúsund tonn af HCl til andrúmslofsins (Sigurður Reynir Gíslason o.fl. 2015). Þetta mikla útstreymi gastegunda hafði mikil áhrif á efnasamsetningu úrkomu á Íslandi (Galeczka o.fl. 2016, Andri Stefánsson o.fl. 2017) en þrátt fyrir það hafði eldgosið fremur lítil áhrif á styrk og framburð leystra efna í Fellsá vorið og sumarið 2015, þó svo að Fellsá sé tilölulega nálægt eldstöðvunum.

Veðurfar hefur líklega haft mikið að segja þar sem veður var umhleypingasamt veturinn 2014 til 2015. Snjór sem féll fyrst um veturinn, á meðan krafturinn var mestur í gosinu og styrkur kvikugasa í andrúmsloftinu mestur (Sigurður Reynir Gíslason o.fl. 2015), hefur líklegast verið mengaðastur en mikið af honum hafði tekið upp þegar vorleysingar hófust. Stærsti hluti snævarins

sem var á vatnasviðinu þegar vorleysingar hófust hafði hlutbráðnað nokkrum sinnum yfir veturinn. Hlutbráðin hefur valdið útskolun jóna úr snjónum (Sigurður Reynir Gíslason 1991) sem hefur annað hvort sigið í jarðveginn eða skolast af vatnasviðinu. Styrkur leysta efna í þeim snjó sem eftir sat á vatnasviðinu þegar vorleysingar hófust var því minni en ef öll ákoma vetrarins hefði haldist óbráðin til vors.

Öll efni sem mæld voru í sýnum úr Fellsá vor og sumar 2015 voru undir stöðlum um heilbrigði yfirborðsvatns skv. reglugerð 796/1999 og styrkur áls var alltaf undir þeim styrk sem talinn er vera hættulegur laxaseiðum (Gensemer & Playle 1999).

Klór og súlfat í úrkomu á Íslandi eru yfirleitt sjávarættuð en að auki er súlfat ættað frá jarðhitasvæðum og vegna manngerðra þátta. Aukin ákoma þessara efna á áhrifasvæði eldsumbrotanna, vegna kvikuafgösunar, jók styrk þeirra í leysingavatninu á vatnasviði Fellsár. Hlutfallsleg aukning klórs var minni en súlfats þar sem styrkur klórs er 10–30 sinnum hærri en styrkur súlfats í Fellsá.

Klór-aukningin í Fellsá 2015, miðað við að Cl sé á formi HCl, stendur undir tvöfalt meiri H⁺ ákomu en súlfat-aukningin á sama tíma, ef gert er ráð fyrir að súlfatið sé á formi H₂SO₄. Þetta er þrátt fyrir að mólhlutfall SO₂/Cl í gosmekkinum hafi verið um 60 (massahlutfallið var um 100) (Sigurður Reynir Gíslason o.fl. 2015). Þessar mælingar á ákomuaukningu á vatnasviði Fellsár benda til þess að oxun SO₂ yfir í SO₄ sé fremur hægt ferli við þær aðstæður sem ríktu á meðan gosinu stóð.

Þakkir

Rannsóknin var styrkt af Almannavarnadeild Ríkislögreglustjóra, Landsvirkjun og Jarðvísindastofnun Háskólans. Við viljum sérstaklega þakka Hákonni Aðalsteinssyni fyrir að sýna verkefninu áhuga. Lukasz Kowolik fær okkar bestu þakkir fyrir óeigingjarnt starf og mikla hjálp við uppsetningu osmósu-safnarans og vitjunarferðir í safnarann sumarið 2015. Samstarfsfólk á Raunvísindastofnun Háskólans fær þakkir fyrir gott samstarf í tengslum við rannsóknina, sérstakar þakkir fá Morgan T. Jones, Þorsteinn Jónsson og Sveinbjörn Steinþórsson.

Heimildir:

Andri Stefánsson, Gerður Stefánsdóttir, Nicole S. Keller, Sara Barsotti, Árni Sigurdsson, Svava Björk Þorlákssdóttir, Melissa Anne Pfeffer, Eydis S. Eiríksdóttir, Elín Björk Jónasdóttir, Sibylle von Löwis & Sigurður R. Gíslason. 2017. Major impact of volcanic gases on the chemical composition of precipitation in Iceland during the 2014–15 Holuhraun eruption. *J. Geophys. Res. Atmos.* 122, doi: 10.1002/2015JD024093

Eydis Salome Eiríksdóttir, Eric H. Oelkers & Sigurdur Reynir Gíslason. 2013 Does temperature or runoff control the feedback between chemical denudation and climate? Insights from NE Iceland. *Geochim. Cosmochim. Acta* 107: 65–81.

Eydis Salome Eiríksdóttir, Sigurður Reynir Gíslason, Árni Snorrason, Jörunn Harðardóttir, Svava Björk Þorlákssdóttir, Arný E. Sveinbjörnsdóttir & Rebecca A. Neely. 2014. Efnasamsetning, rennsli og aurburður straumvatna á Austurlandi XI. Gagnagrunnur Jarðvísindastofnunar og Veðurstofunnar. Skýrsla, RH-05-2014, 126 bls.

Eydis Salome Eiríksdóttir, Eric H. Oelkers & Sigurdur Reynir Gíslason. 2015. Direct evidence of the feedback between climate and nutrient, major, and trace element transport to the oceans. *Geochim. Cosmochim. Acta* 166: 249–266.

Eydis Salome Eiríksdóttir, Eric H. Oelkers, Jörunn Harðardóttir & Sigurdur Reynir Gíslason. 2017. The impact of damming on riverine fluxes to the ocean: A case study from Eastern Iceland. *Water Research* 113: 124–138.

Flaathen T.K. & Gíslason S.R. 2007. The effect of volcanic eruptions on the chemistry of surface waters: The 1991 and 2000 eruptions of Mt. Hekla, Iceland. *J. Volc. Geoth. Res.* 164: 293–316.

Galeczka I, Gunnar Sigurdsson, Eydis Salome Eiríksdóttir, Eric H. Oelkers & Sigurdur R. Gíslason. 2016. The chemical composition of rivers and snow affected by the 2014/2015 Bárðarbunga eruption, Iceland. *J. Volc. Geoth. Res.* 316: 101–119.

Gensemer R.W. & Playle R.C. 1999. The Bioavailability and Toxicity of Aluminum in Aquatic Environments. Í: Logan, T.J. (ritst.), *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 29: 315–450.

Gkritzalis-Papadopoulos A., Palmer M.R. & Mowlem M.C., 2012. Adaptation of an osmotically pumped continuous in situ water sampler for application in riverine environments. *Environ. Sci. Technol.* 46: 7293–7300.

Jannasch, H.W., Wheat, C.G., Plant, J.N., Kastner, M. & Stakes, D.S. 2004. Continuous chemical monitoring with osmotically pumped water samplers: Osmo Sampler design and applications. *Limnol. Oceanogr. Methods* 2: 102–113.

Johannessen, M. & Henriksen, A. 1978. Chemistry of snow meltwater: changes in concentration during melting. *Water Resour. Res.* 14: 615–619.

Jones M., Galeczka I., Gkritzalis-Papadopoulos A., Palmer M. R., Mowlem M. C., Vogfjörð K., Jónsson Þ. & Gíslason S. R. 2015. Monitoring of jökulhlaups and element fluxes in proglacial Icelandic rivers using osmotic samplers. *J. Volc. Geotherm. Res.* 291: 112–124.

Sigríður Magnea Óskarsdóttir, Sigurður Reynir Gíslason, Árni Snorrason, Stefánía Guðrún Halldórsdóttir & Guðrún Gísladóttir. 2011. Spatial distribution of dissolved constituents in Icelandic river waters. *Journal of Hydrology* 397: 175–190.

Sigurður Reynir Gíslason. 1991. Chemistry of precipitation on the Vatnajökull glacier and the chemical fractionation caused by the partial melting of snow. *Jökull* 40: 97–117.

Sigurður Reynir Gíslason, Björn Þór Guðmundsson & Eydís Salome Eiríksdóttir. 1998. Efnasamsetning Elliðaanna 1997 - 1998. Raunvísindastofnun Háskólans, RH-19-98, 100 bls.

Sigurður Reynir Gíslason, Stefánsdóttir G., Pfeffer M.A, Barsotti S., Jóhannsson Th., Galeczka I., Bali E., Sigmarsson O, Stefánsson A., Keller N.S., Sigurdsson Á., Bergsson B., Galle B., Jacobo V.C., Arellano S., Aiuppa A., Jónasdóttir E.B., Eiríksdóttir E.S., Jakobsson S., Guðfinnsson G.H., Halldórsson S.A., Gunnarsson H., Haddadi B., Jónsdóttir I., Thordarson Th., Riishuus M., Högnadóttir Th., Dürig T., Pedersen G.B.M., Höskuldsson Á. & M.T. Gudmundsson. 2015. Environmental pressure from the 2014–15 eruption of Bárðarbunga volcano, Iceland. *Geochemical Perspectives Letters* 1: 84–93.

Veðurstofa Íslands. 2015. Gagnabanki Veðurstofu Íslands, afgreiðsla nr. 2015-10-22/01

8.

kafli

Mælingar á efnasamsetningu straumvatns í níu ám á Fljótsdalshéraði fyrir og eftir Holuhraungosið

Bjarni Diðrik Sigurðsson¹, Helena M. Stefánsdóttir¹, Lárus Heiðarsson² & Edda S. Oddsdóttir³

¹Landbúnaðarháskóli Íslands; ²Skógræktin; ³Rannsóknastöð skógræktar, Mógilsá

Inngangur

Holuhraungosið sem stóð í sex mánuði haustið og veturinn 2014 til 2015 losaði mikið magn af brennisteinsoxíði (SO_2) upp í andrúmsloftið (Sigurður Reynir Gíslason o.fl. 2015), sem óttast var að myndi geta hvarfast yfir í brennisteinssýru yfir landinu og falla niður sem súr úrkoma. Það er vel þekkt að þar sem mikið SO_2 losnar frá iðnaði að slík súr úrkoma getur haft neikvæð áhrif á lífríki í land- og vatnavistkerfum (Menza & Seipb 2004).

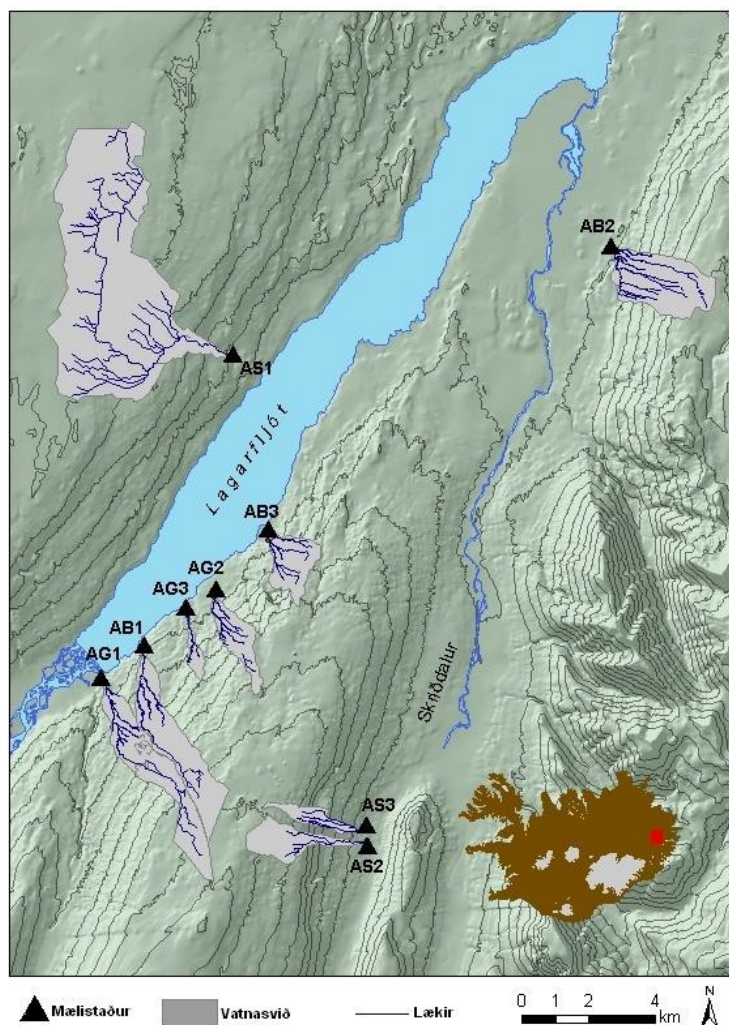
Þegar atvinnuvega- og nýsköpunarráðuneytið óskaði eftir tillögum að rannsóknaverkefnum til að meta áhrif Holuhraungossins haustið 2014, þá varð það strax ljóst að mjög gagnlegt væri ef hægt væri að bera niðurstöður mælinga saman við eldri mælingar á umhverfisþáttum frá því áður en gosið hófst. Við bjuggum að því að eiga niðurstöður vatnsfagnagreininga úr níu dragám á Fljótsdalshéraði, sem voru bornar saman með endurteknum mælingum yfir eitt ár 2007-2008 í verkefninu Skógvatn til að rannsaka áhrif mismunandi gróðursfars á efnafræði og lífríki straumvatnsvistkerfa (Helena Marta Stefánsdóttir o.fl. 2008, Bjarni Diðrik Sigurðsson o.fl. 2010).

Þessi rannsókn miðaði að því að meta áhrif eldsumbrotanna á efnainnihald í snjó á Hallormsstaðahálsi sem og efnasamsetningu í níu dragám vorið 2015 og bera niðurstöðurnar saman við eldri mælingar frá sömu ám veturinn og vorið 2008.

Aðferðir

Rannsóknin var gerð á níu afmörkuðum vatnasviðum smærri áa austur á Fljótsdalshéraði (1. mynd). Berggrunnur svæðisins er að mestu blágrýti sem er talið hafa myndast fyrir meira en 9 milljón árum. Þar sem hann er mjög þéttur gætir mikilla dragaáhrifa í ám á svæðinu og eru þar talsverðar rennslissveiflur milli árstíða. Jarðvegsgerðin á rannsóknasvæðunum er að mestu brúnjörð og meðal árshiti 1960–1990 var 3,4 °C og ársúrkoma að meðaltali 738 mm. Þrjú vatnasvið voru upphaflega valin á rýru skóglausu landi (AS1-AS3; Hrafnsgerðisá, Fjallá og Nýlendlækur í Geitdal; 1. mynd), þrjú vaxin birkiskógi (AB1-AB3; Klifá, Kaldá og Ormsstaðalækur) og þrjú runnu um barrskóga (AG1-AG3; Buðlungavallaá, Kerlingará og Jökullækur). Nánari lýsingu aðstæðum í ánum og á vatnasviðunum er að finna í Helena Marta Stefánsdóttir (2010), Medelyte (2010), Helena Marta Stefánsdóttir o.fl. (2007; 2009) og Bjarni Diðrik Sigurðsson (2010).

Vatnshiti, sýrustig og rafleiðni lækjanna var mæld reglulega frá hausti 2007 til hausts 2008 með kvörðuðum sondu-mæli (YSI 600XLM Multi probe Sonde, Yellow Springs Instruments inc., USA). Samtímis voru einnig tekin vatnssýni úr lækjunum til efnagreininga. Þau voru sett í sýruþvegnar og skolaðar plastflöskur sem voru geymdar í frysti þar til efnagreiningar fóru fram. Allar efnagreiningar 2007-2008 voru gerðar hjá Efnagreiningum Keldnaholti – Efnagreiningadeild Nýsköpunarmiðstöðvar Íslands með ICP-OES efnagreiningartæki. Í þessari grein voru niðurstöður sýnatöku frá 15. febrúar og 19. maí, 2008, notaðar til samanburðar við efnainnihald veturinn og vorið 2015.



1. mynd. Staðsetning dragáa á Fljótshádalshéraði sem runnu um skóglaus vatnasvið vaxin mó-lendisgróðri (AS#), um vatnasvið sem vaxin voru birkiskógum og kjarri neðan við 400 m h.y.s. (AB#) og vatnsvið sem vaxin voru gróðursettum barrskógum neðan um 200 m h.y.s. (AG#). Gul stjarna sýnir hvar grafið var niður í snjóskafli á aðrennslissvæði ána þann 1. apríl 2015.

Vorið 2015 hófust vatnssýnatökur á sömu níu stöðunum þann 1. apríl og fóru síðan fram fjórum sinnum til 18. júní 2015. Hælar voru reknir niður á sitt hvorum bakka ána og málband strengt yfir (2. mynd). Breidd og dýpi áar var skráð á sex föstum stöðvum yfir farveginn mælt til að hægt væri að meta vatnsmagn þeirra á tímapunkti mælinga. Vatnssýni voru tekin á sama hátt og geymd í samskonar sýruþvegnum og skoluðum plastflöskum eins og árið 2008, en vatnsefnagreiningarnar fóru fram hjá Efnagreiningu ehf., Hvanneyri, með ICP-MS efnagreiningartæki, sem hefur næmari greiningamörk en eldra tækið hjá Efnagreiningum Keldnaholti. Árið 2015 var vatnshiti mældur með handmæli við sýnatökuna og sýrustig og rafleiðni mæld innan 2 daga í ófrosnu vatni í rannsóknastofu á Keldnaholti með leiðnimæli og sýrustigsmæli.



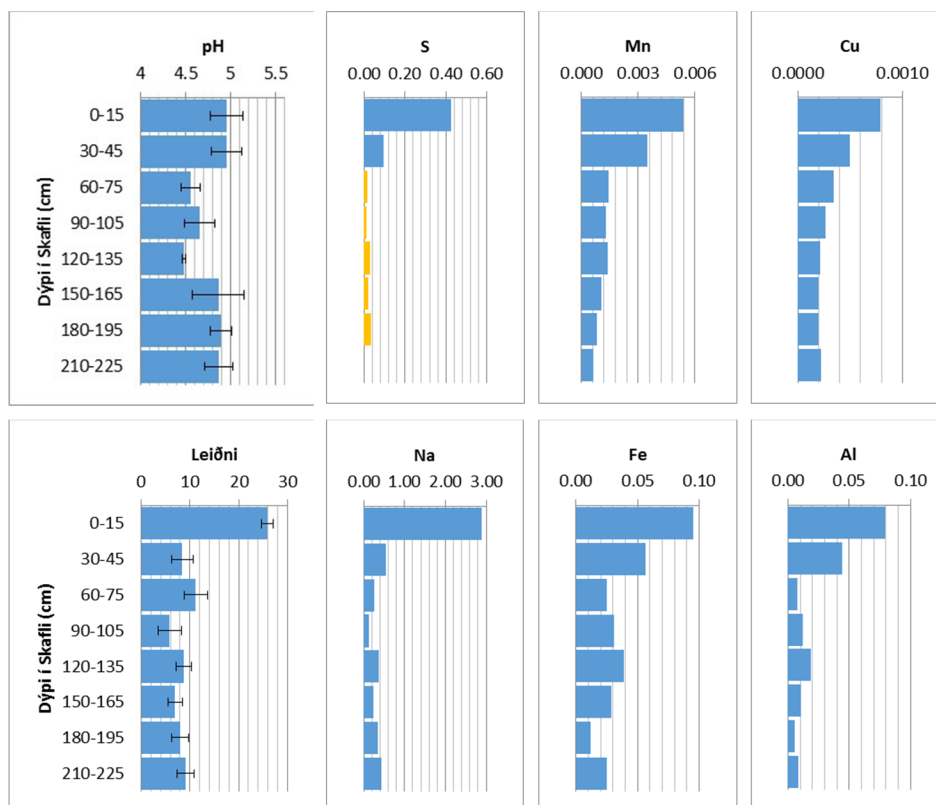
2. mynd. Lárus Heiðarsson tekur vatnssýni úr Hrafnsgærðisá (AS1) þann 1. apríl 2015. Þetta var vatnsmesta áin í rannsókn okkar og með stærsta vatnasviðið.

Efnaþæðingar í snjó efst á vatnasviðum á Hallormsstaðarhálsi fóru fram 1. apríl 2015 (1. mynd) þannig að grafið var með plastskóflu um 2,5 m djúp hola, þaðan sem snjósýni úr þremur veggjum hennar voru tekin og sett í sýrupvegnar og skolaðar plastfötur með loki. Eftir að snjórinn hafði bráðnað í fötunum voru vatnssýnin geymd frosin í samskonar plastflöskum og vatnssýnin sem tekin voru, þangað til að efnagreiningar fóru fram hjá Efnagreiningu ehf. á Hvanneyri.

Niðurstöður og umræður

Efnainnihald í snjó á Hallormsstaðarhálsi 1. apríl 2015

Greinileg „súr“ lög komu fram á 60 til 135 cm dýpi í snjóskafla á Hallormsstaðarhálsi þann 1. apríl (3. mynd), og almennt var sýrustig snævarins lægra en búast má við samanborið við mælingar á sýrustigi snævar á Vatnajökli 1988 (Sigurður Reynir Gíslason 1991) og ársúrkomu í umhverfissvöktunarstöðinni á Litla-Skarði í Borgarfirði 1997-2004 (Albert S. Sigurðsson o.fl. 2005). Þetta benti því eindregið til að SO₂ hefði náð að mynda einhverja brennisteinssýru á meðan á Holuhraungosinu stóð og berast til jarðar sem súr úrkoma. Magn brennisteins eða annarra mældra efna fylgdi ekki sýrustigi. Hlýtt hafði verið í veðri áður en sýnin voru tekin, og greinilegt var að snjóskaflar voru byrjaðir að bráðna ofan frá. Það útskýrir væntanlega aukinn styrk í 0-15 cm laginu, af öllum efnunum sem mæld voru, vegna uppsöfnunar (3. mynd). Við þær aðstæður er ekki hægt að útiloka að vatnsleysanleg efni hafi þegar borist með leysingavatni í gegnum skaflinn og ofan í jarðveg. Hár styrkur natríum í yfirborðslagi snævarins getur bent til að uppruni efna í snjó á Hallormsstaðarhálsi hafi einnig að hluta verið frá særoki sem barst yfir landið í vetrarstormum.



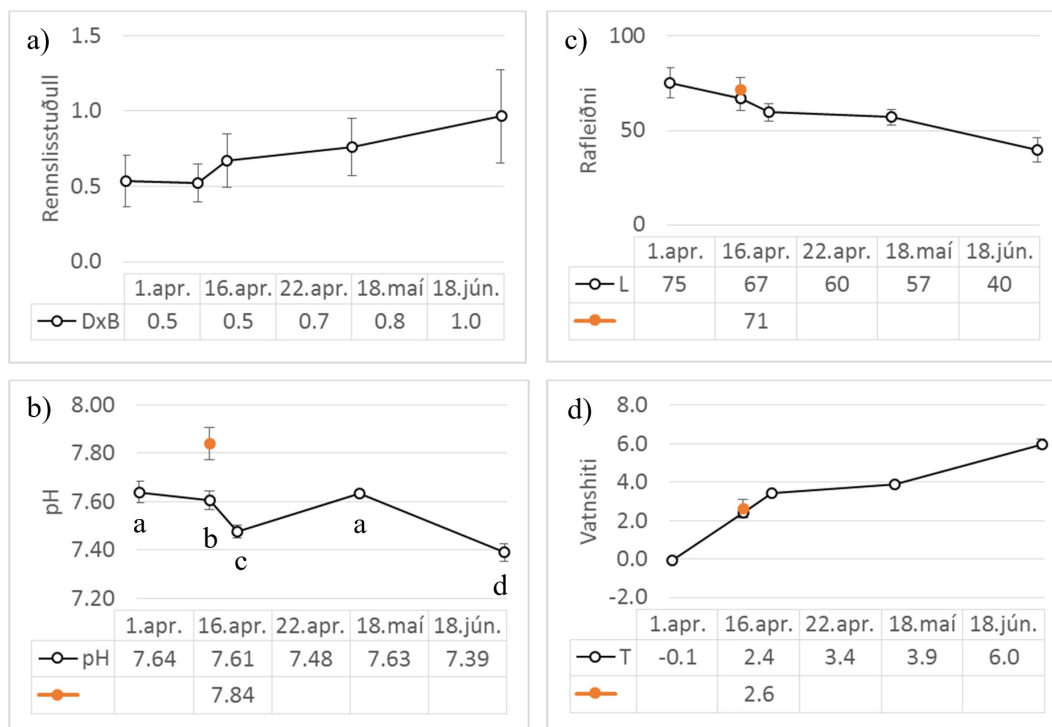
3. mynd. Meðal sýrustig (pH) og b) rafleiðni ($\mu\text{S L}^{-1}$) í mismunandi dýpi í snjóskafli á Hallormsstaðarhálsi ($\pm\text{SE}$, $n=3$) þann 1. apríl 2015. Einnig er sýndur styrkur brennisteins (S), mangans (Mn), kopars (Cu), natríums (Na), járns (Fe) og áls (Al) í snjónum (mg L^{-1}). Bláar súlur á efna greiningum tákna að gildin voru yfir öruggum greiningarmörkum, en gular eru undir þeim.

Efnainnihald í árvatni 2008 og 2015

Þar sem tímasetning vorleysinga getur haft talsverð áhrif á efnainnihald árvatns og þess að það voraði sértaklega seint árið 2015, var ákveðið að bera fremur saman efnainnihald við sambærilegan meðal vatnshita 2008 og 2015, en við ákveðnar dagsetningar (4d. mynd). Þá kom í ljós að rafleiðni í árvatni var ekki marktækt frábrugðin milli 2008 og 2015 (4c. mynd), en sýrustig í árvatni var hámarktækt lægra upp á um 0,2 pH stig ($p < 0,001$; parað t-próf) vorið 2015 (4b. mynd). Það kom vel heim og saman við lækkað sýrustig í snjósköflum á Hallormsstaðarhálsi (3. mynd). Sýrustig ánnar sýndi einnig marktæka lækkun með auknum leysingum (hærri rennslisstuðli; 4a mynd) í apríl og júní 2015. Það hafði hinsvegar snjóað talsvert í fjöll í seinni hluta apríl, sem sennilega útskýrir að sýrustig hækkaði tímabundið í maí 2015 (4b. mynd), þrátt fyrir að rennslisstuðullinn héldist svipaður og við sýnatökuna í apríl (4a. mynd). Þessar niðurstöður á sýrustigi árvatns ríma vel við mælingar Eyðísar S. Eiríksdóttur o.fl. (2017) á breytingum á sýrustigi Fellsár á milli 1998-2013 og 2015 í þessu riti, sem einnig fann væga súrnun upp á 0,3 á pH skala vorið og sumarið 2015 miðað við fyrri ár.

Fyrirfram var búist við því að súran bærst fyrst og fremst fram í upphafi vorleysinga, en slíkir „súrir toppar“ eru m.a. þekktir frá Skandinavíu þar sem mengun veldur súru regni (snjókomu) og slíkir vor-toppur hafa valdið miklum skaða í vistkerfum áa og vatna þar (Bolin et al. 1971). Þetta var ástæða þess að við hættum sýnatöku um miðjan júní 2015. Mælingar Eyðísar o.fl. (2017) í Fellsá sýna hinsvegar að súrnunin hélt áfram fram eftir sumri og mestu „vorleysingarnar“ á Fljótsdalshéraði urðu ekki fyrr en um og eftir miðjan júní og stóðu fram eftir júlí 2015. Það er hugsanlegt að hið einstaklega kalda vor, með mikilli snjókomu í fjöll, og það að Holuhraungosinu lauk snemma vetrar 2015, hafi hjálpað til að jafna losun sýrunnar úr snjó vorið og sumarið 2015, þannig að enginn eiginlegur toppur sást í sýrustigi.

Eydís o.fl. (2017) sýna rennsli Fellsár veturinn og vorið 2015. Þegar rennslissveiflur í henni eru bornar saman við hinn einfalda „rennslisstuðul“ (árbreidd sinnum mesta dýpi), sem við reiknuðum út fyrir hinar níu ár sem við mældum (4a. mynd), þá kom í ljós að mjög gott samræmi var þar á milli. Best hefði þó verið að mæla eiginlegt rennsli samhliða vatnssýnatökunni til að geta áætlað heildar efnamagn sem barst fram á hverjum tíma, en til þess skorti okkur búnað.

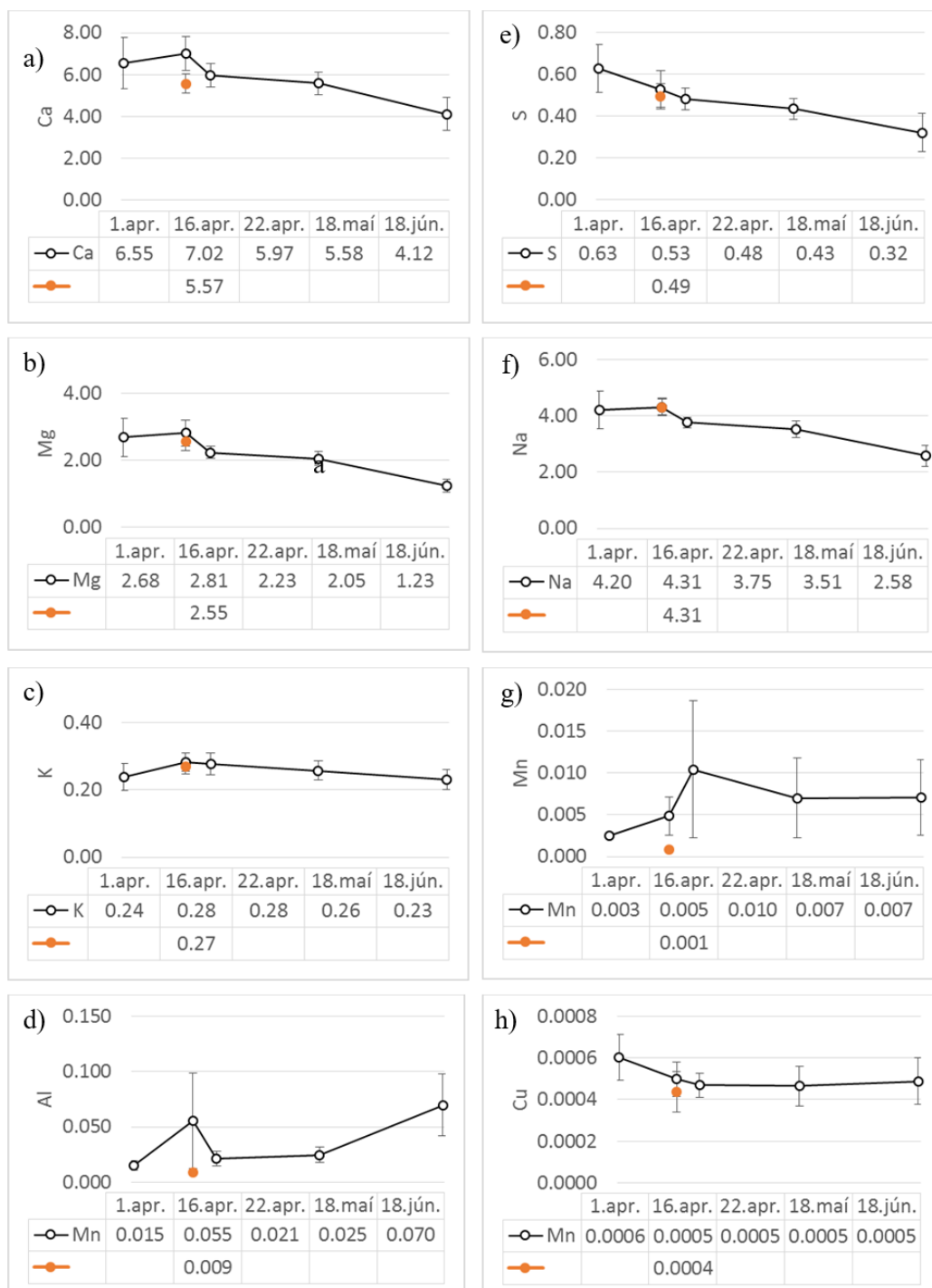


4. mynd. a) Meðal rennslisstuðull (mesta dýpi $\times$ breidd áar, m^2 , árið 2015; b) sýrustig (pH) í árvatni; c) rafleiðni í árvatni ($\mu S L^{-1}$); d) vatnshiti ($^{\circ}C$) í níu ám á Fljótisdalshéraði tímabilið 1. apríl til 18. júní 2015 (svartir hringir) og meðaltal fyrir 15. febrúar og 19. maí 2008 (appelsínugulur hringur). Lóðréttar slár tákna staðalskekkju meðaltalsins (SE) og mismunandi bókstafur á mynd b tákna marktækan mun ($p < 0,05$) milli tímapunkta 2015.

Ef vorleysingar eru hægar, þannig að leysingavatn rennur ekki beint út í læki og ár á yfirborði, heldur komist í samband við jarðveginn, þá er sambandið milli efnainnihalds í árvatni dragaáa blanda af því sem var í snjónum og því sem gerist í jarðveginum. Þegar að sýrustig lækkar í jarðvegi þá binst H^+ jónin gjarnan við samkorn (e. colloids) jarðvegsins, og ýtir um leið út öðrum katjónum út í jarðvegslausnina sem eru ekki eins fast bundnar (oftast $Ca > Mg > K$; t.d. Havlin o.fl. 2014). Niðurstöður okkar virtust passa vel við að þetta hafi í raun gerst á vatnasviðunum, en styrkur Ca hækkaði hlutfallslega meira í árvatninu en styrkur Mg og K milli 2008 og 2015 (5a. mynd, vs. 5b og 5c), en tvö síðast töldu efnin sýndu ekki neina áberandi hækkun milli 2008 og 2015.

Ef magn síru verður umfram það sem jarðvegur getur jafnað með jónarýmd sinni (að skipta út katjónum) getur sýrustig jarðvegs lækkað og þar með getur leysanleiki ýmissa efna í jarðvegi breyst. Þá geta fastar bundin efni, svo sem ál, farið að losna út í jarðvegslausnina, og þar með út í læki og ár (Likens o.fl. 1996). Þetta er m.a. það sem hefur gerst þar sem mikil langvarandi iðnaðarmengun af SO_2 hefur haft neikvæð áhrif á gróður- og dýralíf (Bolin 1971, Likens o.fl. 1996). Þ.e. neikvæðu áhrifin, svo sem skógardauði, hafa oft orðið í gengum áleitrin, þó oft sé erfitt að finna allt orsakasambengið fyrir fyrir slíkum neikvæðum áhrifum (Menza & Seipb 2004). Styrkur áls í árvatni árið 2008 var innan við örugg greiningarmörk fyrir ICP tækin sem notuð voru árið 2008 (Nýsköpunarmiðstöð, pers. uppl.), sem gerir samanburð óvissan við hvað gerðist eftir Holuhraungosið. Styrkur Al var hinsvegar vel mælanlegur árið 2015 og sveiflaðist á milli $15-70 \mu g Al L^{-1}$ (5d. mynd). Þetta er nokkuð hár styrkur, en ætti þó að hafa verið skaðlaus fyrir fiska við það háa (basíska) sýrustig sem var í árvatninu á sama tíma (pH 7,4-7,6; 5b. mynd). Ef vatnið hefði súrnað niður fyrir pH 5,5 þá hefði þessi styrkur Al hinsvegar orðið mjög alvarlegur, þar sem um $50 \mu g Al L^{-1}$ styrkur veldur dauða í urriða á innan við 48 klst ef vatn er 5,0 á pH skala (Waring o.fl. 1996).

Styrkur Al í árvatni vorið 2015 var talsvert hærri í okkar rannsókn en Eydís S. Eiríksdóttir o.fl. (2017) mældu í Fellsá á sama tíma. Þetta getur hugsanlega stafað af þeim stærðar- og hæðarmuni sem er á vatnsviðum ána sem rannsakaðar voru. Í okkar rannsókn, þar sem árnar voru minni og vatna-sviðin lágu mun lægra, gæti hlutfallslega meira af leysingavatninu hafa síast í gegnum þroskaðan jarðveg áður en það rann út í árnar og vegna þess að álið losnar væntanlega einkum vegna súrnunar jarðvegsins verða áhrifin meiri við þær aðstæður.



5. mynd. Meðal styrkur uppleysts a) kalsíums (Ca), b) magnesíums (Mg), c) kali (K), d) áls (Al), e) brennisteins (S), f) natríums (Na), g) mangans (Mn) og h) kopars (Cu) í mg L⁻¹ í níu ám á Fljótsdalshéraði tímabilið 1. apríl til 18. júní 2015 (svartir hringir) og meðaltal fyrir 15. febrúar og 19. maí 2008 (appelsínugulur hringur). Lóðréttar slár tákna staðalskekku meðaltalsins (SE). Styrkur Al, Mn og Cu var neðan örugggra greiningarmarka 2008, en ekki 2015.

Ályktanir

Skýr merki um súra ákomu fundust í snjóskafli á Hallormsstaðahálsi og sýrustig í vatni níu minni dragaá á Fljótsdalshéraði mældist einnig marktækt lægra vorið 2015 en veturinn og vorið 2008.

Fleiri merki sem sennilega má rekja til Holuhraungossins og áhrif á jarðveg mældust í efnainnihaldi árvatnsins vorið 2015, en efnainnihald varð þó ekki fyrir miklum áhrifum. Niðurstöðurnar ríma nokkuð vel við mælingar Eyðisar S. Eiríksdóttur o.fl. (2017) á breytingum á efnainnihaldi Fellsár, en hún er bæði vatnsmeiri og hefur víðáttumeira aðrenslissvæði en árnar sem mældar voru í þessari rannsókn.

Hærri styrkur Al í árvatni í okkar rannsókn miðað við mælingar í Fellsá á sama tíma gæti stafað af meiri jarðvegsáhrifum á minni og lægri (hlutfallslega grónari) vatnasviðum sem við rannsökuðum. Ef súrnunin hefði orðið meiri í árvatni hefði mældur styrkur Al getað valið búsifjum á silungastofnum svæðisins.

Þakkir

Atvinnuvega- og nýsköpunarráðuneytið fær þakkir fyrir að fjármagna sýnatöku og mælingar á vatns-sýnum frá rannsóknasvæðum SkógVatns á Fljótsdalshéraði 2015.

Heimildir

Albert S. Sigurðsson, Sigurður H. Magnússon, Jóhanna M. Thorlacius, Hreinn Hjartarson, Páll Jónsson, Bjarni D. Sigurðsson, Borgþór Magnússon & Hlynur Óskarsson. (2005). *Integrated monitoring at Litla-Skard, Iceland. Pjoject overview 1996-2004*. Reykjavik: Umhverfis-stofnun.

Bjarni Diðrik Sigurðsson. 2010. Áhrif gróðurs á vatnasviðum á efnasamsetningu straumvatns og aðra eðlis-þætti: fyrstu niðurstöður SkógVatns. *Rit Fræðapings landbúnaðarins* 7: 176-181.

Bolin, B. 1971. Air pollution across national boundaries. The impact on the environment of sulfur in air and precipitation. Sweden's case study for the United Nations conference on the human environment. Stockholm, Royal Ministry of Foreign Affairs and Royal Ministry of Agriculture.

Havlin, J.L., S.L. Tisdale, W.L. Nelson & J.D. Beaton. 2014. *Soil Fertility and Fertilizers*, 8th Edition, Pearson,

Medelyte, G. (2010) Influences of forests on invertebrate communities in Icelandic streams. (M.S. ritgerð), Líf-og umhverfisvísindadeild, Háskóli Íslands, Reykjavík.

Menza, F.C. & H.M. Seipb. 2004. Acid rain in Europe and the United States: an update. *Environmental Science & Policy* 7: 253–265.

Helena Marta Stefánsdóttir. 2010. Transport and decomposition of allochthonous litter in Icelandic headwater streams: Effects of forest cover. (M.S. ritgerð), Umhverfiseild, Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.

Helena Marta Stefánsdóttir, Bjarni Diðrik Sigurðsson, Brynhildur Bjarnadóttir, Edda S. Oddsdóttir og Jón S. Ólafsson. 2010. Áhrif gróðurs á vatnasviðum á magn lífræns efnis sem berst út í lækir *Rit Fræðapings landbúnaðarins* 7: 182-191.

Helena Marta Stefánsdóttir, Karólína Einarsdóttir, Berglind Orradóttir, Brynhildur Bjarnadóttir, Edda S. Oddsdóttir, Franklín Georgsson, Freysteinn Sigurðsson, Gintare Medelyte, Gísli Már Gíslason, Guðmundur Halldórsson, Hlynur Óskarsson, Hreinn Óskarsson, Jón S. Ólafsson, Julia Broska, Nikolai Friberg, Sigurður Guðjónsson & Bjarni Diðrik Sigurðsson. 2008. SkógVatn - Kynning á rannsóknarverkefni um áhrif skógræktar og landgræðslu á vatnavistkerfi. *Rit Fræðapings landbúnaðarins* 5: 515-519.

Likens, G.E., C.T. Driscoll & D.C. Buso. 1996. Long-term effects of acid rain: response and recovery of a forest ecosystem. *Science* 272: 244-246.

Eyðis Salome Eiríksdóttir, Iwona M. Gałeczka og Sigurður Reynir Gíslason. 2017. Áhrif eldgossins í Bárðarbungu 2014–2015 á efnasamsetningu og framburð Fellsár í Fljótsdal. *Rit LbhÍ* 83: 57-64.

Sigurður Reynir Gíslason. 1991. Chemistry of precipitation on the Vatnajökull glacier and the chemical fractionation caused by the partial melting of snow. *Jökull* 40: 97-117.

Sigurður Reynir Gíslason, Stefánsdóttir G., Pfeffer M.A, Barsotti S., Jóhannsson Th., Galeczka I., Bali E., Sigmarsson O, Stefánsson A., Keller N.S., Sigurdsson Á., Bergsson B., Galle B., Jacobo V.C., Arellano S., Aiuppa A., Jónasdóttir E.B., Eiríksdóttir E.S., Jakobsson S., Guðfinnsson G.H., Halldórsson S.A., Gunnarsson H., Haddadi B., Jónsdóttir I., Thordarson Th., Riishuus M., Högnadóttir Th., Dürig T., Pedersen G.B.M., Höskuldsson Á. & M.T. Gudmundsson, 2015. Environmental pressure from the 2014–15 eruption of Bárðarbunga volcano, Iceland. *Geochemical Perspectives Letters* 1: 84–93.

Waring, C.P., J.A. Brown, J.E. Collins & P. Prunet. 1996. Plasma prolactin, cortisol, and thyroid responses of the Brown Trout (*Salmo trutta*) exposed to lethal and sublethal aluminium in acidic soft waters. *General and Comparative Endocrinology* 102: 377–385

9.

kafli

Áhrif Holuhraungossins á vatnalíf á Norðaustur- og Austurlandi

Jón S. Ólafsson¹, Guðni Guðbergsson¹, Ingi Rúnar Jónsson¹, Eydís Salome Eiríksdóttir¹, Jónína H. Ólafsdóttir¹ & Ragnhildur Þ. Magnúsdóttir¹

¹*Hafrannsóknastofnun, rannsókna- og ráðgjafastofnun hafs og vatna, Skúlagötu 4, 121 Reykjavík*

Inngangur

Frá sjöunda áratugnum fram að síðustu aldamótum fóru fram viðamiklar rannsóknir til að meta áhrif súrnunar á ferskvatnsvistkerfi, bæði vestan- og austanhafs (sjá t.d. Haines 1981, Baker o.fl. 1991, Hermann o.fl. 1993, Wigington o.fl. 1996). Flestar þeirra rannsókna tengdust súru regni eða annarri mengun sem talið var að skaðaði lífríki í ferskvatni. Helstu niðurstöður flestra þessara rannsókna eru á sama veg, það er að súrnun ferskvatns leiðir til minni lífmassa, þéttleika og fjölbreytni lífvera í ám (t.d. Weatherly og Ormerod 1987, Courtney og Clements 1998, Kovács o.fl. 2006). Fáar rannsóknir hafa hins vegar verið framkvæmdar þar sem bein og/eða óbein áhrif eldgosa hafa verið skoðuð sérstaklega.

Eldgosið í Holuhrauni, sem hófst í ágústlok 2014 og stóð fram til 27. febrúar 2015, er stærsta flæðigos á Íslandi sl. 230 ár (Sigurður R. Gíslason o.fl. 2017). Fylgdi gosinu mikil gasmengun s.s. brennisteinsdíoxíð, brennisteinsvetni, koldíoxíð, kolmónoxíð og vetnisflúoríð (Gerður Stefánsdóttir o.fl. 2015, Andri Stefánsson o.fl. 2017, Galeczka o.fl. 2017). Hluti gassins sem streymdi frá gosstöðvunum leystist upp í raka andrúmsloftsins og féll með úrkomu yfir veturinn meðan á gosinu stóð. Úrkomusýni sem safnað var á veðurstöðvum á landinu sýndu að úrroman var súrust á Suðausturlandi (Andri Stefánsson o.fl. 2017). Önnur rannsókn sem gerð var á snjó sem féll á Vatnajökul veturinn 2014–2015 sýndi að mengunin frá eldgosinu var mest á söfnunarstöðvum á Dyngjujökli, sem var næst gosstöðvunum (Galeczka o.fl. 2017). Áhyggjur vöknðu af sýrandi áhrifum gossins á lífríki í ferskvatni, m.a. samfara breyttra eðlis- og efnafræðilegra aðstæðna í jarðvegi, holuvatni og votlendi, er kæmu fram að vori með leysingavatni. Í ljósi þessa voru sett af stað allnokkur rannsóknaverkefni til að kanna áhrif Holuhraungossins. Í þessum kafla eru kynntar helstu niðurstöður rannsókna sem sneru að hugsanlegum áhrifum gossins á vatnalíf. Meginmarkmið rannsóknarinnar var að kanna hugsanleg áhrif súrnunar af völdum gos-efna frá Holuhrauni á líf í straumvötnum og tjörnum á Norðaustur- og Austurlandi. Leitast var við að svara eftirfarandi spurningum:

1. Eru mælanlegar breytingar á pH-gildum í ám á Norðaustur- og Austurlandi frá vori og fram á haust 2015?
2. Eru mælanlegar breytingar á pH-gildi vatns í tjörnum á Fljótisdals- og Jökuldalsheiði 2015 miðað við mælingar 2004?
3. Eru merkjanleg áhrif af völdum hugsanlegrar súrnunar ferskvatns á: a) lífmassa þörunga, b) þéttleika og fjölbreytni botnlægra hryggleysinga og c) meðallengd og vöxt laxfiskaseiða í Vesturdalsá í Vopnafirði?

Til að ná settum markmiðum og svara framangreindum spurningum var haft í huga hvort til væru gögn um vatnalíf á hugsanlegu áhrifasvæði gossins í Holuhrauni sem hægt væri að

byggja á. Var þá einkum horft til þess hvort til væru gagnaraðir um vatnalíf í ám, vötnum eða tjörnum á Norðaustur- og Austurlandi. Út frá heimildum og gagnabanka Hafrannsóknastofnunar (áður Veidimálastofnunar) var vitað að gögn um vatnalíf á Norðaustur- og Austurlandi væru mun umfangsmeiri en til að mynda á Suðausturlandi auk þess sem niðurstöður um dreifingu gosmökkksins sýndu að stór hluti SO₂ í andrúmslofti fór austur og norðaustur yfir gosstöðvarnar (Sigurður R. Gíslason o.fl. 2017). Leiða má líkur að því að brennisteinninn félli meira út á þeim landssvæðum en annarsstaðar. Í því ljósi var áhersla lögð á fyrrnefndan landshluta í þessari rannsókn. Í Vesturdalsá í Vopnafirði hefur botndýralíf verið kannað, fiskveiði verið skráð og fjöldi laxfiskaseiða verið kannaður með árlegum mælingum síðastliðin 20–30 ár. Með gögn um þessa þætti í farteskinu þótti rétt að tengja rannsókn okkar við þær gagnaraðir sem til eru um vatnalíf Vesturdalsár (sjá t.d. Þórólfur Antonsson 2015). Vatnalíf Hrafnsgærðisár á Héraði var rannsakað í tengslum við rannsóknaverkefnið Skógvatn 2008–2009, þar sem m.a. voru gerðar mælingar á eðlis- og efnabáttum yfir eins árs tímabil ásamt því sem botnlægir hryggleysingar og þörungar voru rannsakaðir (Helena Marta Stefánsdóttir 2010, Medelyté 2010). Á Fljótsdalsheiði og Jökuldalsheiði voru tjarnaklasar (20–30 tjarnir) rannsakaðir m.t.t. gróðurs, hryggleysinga og efna- og eðlisþátta bæði snemm- og síðsumars 2004 (Jón S. Ólafsson o.fl.; óbirt gögn). Niðurstöður þeirra rannsókna verða nýttar við samanburð okkar frá sumrinu 2015. Engar eða litlar upplýsingar voru fyrirhagðar um vatnalíf í Fnjóská og Geitdalsá áður en rannsókn okkar var gerð, ef frá eru talðar fiskifræðilegar úttektir í Fnjóská (sjá t.d. Jón Kristjánsson 1976, Tumi Tómasson 1998, Bjarni Jónsson og Eik Elfarsdóttir 2003). Síðast töldu vatnsföllin voru valin til rannsóknarinnar vegna stærðar vatnasviða þeirra og nálægðar við áhrifasvæði eldstöðvarinnar í Holuhrauni.

Aðferðir

Til að svara fyrstu spurningunni um hugsanlegar breytingar á pH-gildi árvatnsins, frá vori fram á haust 2015, beindist rannsóknin að vatnsföllum fjórum, þ.e. Geitdalsá, Hrafnsgærðisá, Vesturdalsá og Fnjóská (1. tafla). Ein mælistöð var valin í hverju vatnsfalli þar sem gengið var út frá áðurnefndum forsendum um umsvif manna og fyrirhagð gögn. Sýnatöku- og mælistöðvar voru valdar þannig að þær væru staðsettar ofan við áhrif frá landbúnaði eða annarri starfsemi manna. Í Vesturdalsá var miðað við að nýta efstu mælistöðina í ánni, sem er ofan við Hauksstaði, og fylgst hefur verið með í nokkra áratugi. Í Hrafnsgærðisá var sömuleiðis notast við sömu mælistöð og notuð var í Skógvatnsverkefninu, en sú stöð er töluvert ofan við áhrif landbúnaðar en innan skógræktarsvæðis. Á hverri stöð var komið fyrir síritandi pH-nema (AquStar® TempHion™ frá Geotech, Environmental Equipment Inc. USA - http://www.geotechenv.com/datalogging_water_quality_sensors.html) sem skráði hita og pH-gildi vatns á 5 mínútna fresti frá mailokum fram í byrjun september 2015. Tilgangur þessara mælinga var að nema hugsanlegar breytingar á pH-gildi árvatnsins samfara leysingum ofar á vatnasviðunum. Allir nemarnir voru kvarðaðir í upphafi og síðan endurkvarðaðir ef þörf var á samfara því sem gögnum var safnað úr mælunum (2. tafla). Við hverja vitjun voru gerðar punktmælingar á pH-gildi, rafleiðni og hitastigi vatnsins með YSI pro 1030 handmæli, auk þess sem vatnssýni til mælinga á basavirkni (alkalinity) voru tekin í lok rannsóknartímans. Mælingar á pH-gildum í Hrafnsgærðisá með síritandi nemanum mistókust og reyndust því niðurstöðurnar ónothæfar.

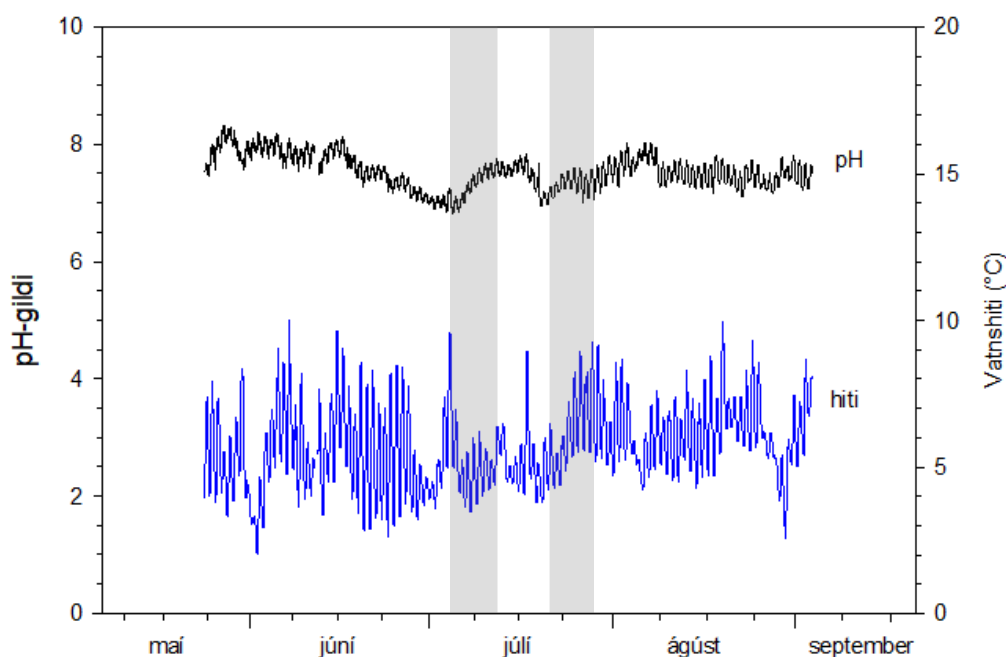
1. tafla. Hnattstaða mæli- og sýnatökustaða, hæð þeirra yfir sjávarmáli og stærð vatnasviða ofan við mælistaði.

Vatnsfall	Hnit N (DD.MM.mmm)	Hnit V (DD.MM.mmm)	Hæð yfir sjávarmáli (m)	Stærð vatnasviðs (km ²)
Geitdalsá	64°59,415'	014°41,201'	147	185,6
Hrafnsgærðisá	65°09,249'	014°43,900'	202	23,0
Vesturdalsá	65°39,511'	015°10,510'	195	96,1
Fnjóská	65°34,175'	017°45,754'	237	544,7

Til að svara annarri spurningunni um hugsanlegan mun á pH-gildi vatns í tjörnum á Fljótsdals- og Jökuldalsheiði 2015 borið saman við árið 2004 voru pH mælingar gerðar í 10 af þeim tjörnum sem rannsakaðar voru í júnílok 2004. Mælingarnar voru gerðar 29. júní 2004 og 16. júlí 2015. Í hverri tjörn var pH-gildi, vatnshiti og rafleiðni mæld mæld með YSI pro 1030 handmæli. Auk þess voru tekin sýni til efnagreininga úr þremur af þessum 10 tjörnum. Niðurstöður efnamælinga liggja ekki fyrir enn sem komið er. Þó var basavirkni titruð og var endapunktur tírtunar ákvarðaður með Gran-falli (Stumm & Morgan 1996). Basavirkni í vatni ræðst að mestu leyti á magni leysts ólífræns kolefnis, og er óbein

mæling á því hve mikil efnaskipti hafa orðið á milli vatns og bergs. Ljóstillífun og rotnun getur einnig haft áhrif á basavirkni, sérstaklega þar sem lífræn virkni er mikil. Ljóstillífun eyðir basavirkni og rotnun eykur basavirkni. Basavirkni er mælikvarði á hve mikla sýru hægt er að setja í vatn án þess að brjóta niður temprunareiginleika vatnsins gagnvart pH breytingum (e. buffer capacity).

Til að svara þriðju spurningunni um hvort hugsanleg súrnun hefði haft merkjanleg áhrif á lífmassa þörungna, þéttleika og fjölbreytni botnlægra hryggleysingja, og meðallengd og vöxt laxfiskaseiða í ám á Norðaustur- og Austurlandi var annars vegar um samanburð við fyrri rannsóknir í Vesturdalsá, en einnig í Hrafnsgærðisá. Hins vegar voru mælingar gerðar í vatnsföllum með vatnasvið sem nær langt inn á hálendið og þar sem talið var líklegt að snjóur hefði orðið fyrir áhrifum af gosefnum. Lífmassi þörungna var mældur upp úr miðjum júlí 2015 þar sem burstað var með miðlungsstífum tannbursta af ákveðnu flatarmáli (24x36 mm) af 10 steinum sem safnað var af tilviljunarkenndum stöðum af botni hverrar ár. Rammanum var komið fyrir ofantil á hverjum steini og svæðið innan rammans burstað vandlega, næst var sprautað varlega með eimuð vatni á burstaða svæðið af hverjum steini og skolað ofan í hvítan plastbakka. Það sem burstaðist af var síðan síað í gegnum glertrefjasíu (Whatman GF/C, 47 mm í þvermál). Að lokinni síun var síupappírinn brotinn til helminga og þerraður vel og síðan komið fyrir í frostþolnu sýnaglassi og fryst í fljótandi köfnunarefni. Mælingar á lífmassa þörungna (blaðgrænu) voru gerðar á rannsóknarstofu eftir að heim var komið. Sýnin voru afþídd og látin liggja í 96% etanóli í myrkri við 6°C í um sólarhring til að leysa upp blaðgrænu þörunganna. Fyrir mælingu var hvert sýni sett í skilvindu til að losna við trefjar úr GF/C síunni sem og óhreinindi úr sýninu og 4 ml teknir af hverju sýni til mælinga á ljósgleypni. Mælingar á ljósgleypni blaðgrænu var gerð í litrófsmæli (HACH DR 5000) við bylgjulengdir 665 nm og 750 nm. Söfnun botnlægra hryggleysingja var gerð á sama tíma og á sömu stöðum og mælingar voru gerðar á lífmassa þörungna (2. tafla). Sýni voru tekin með því að safna 10 hnefastórum eða minni steinum af botni hverrar ár. Þegar hver steinn var fjarlægður af botni var háfi haldið neðan við steininn þannig að allt sem kynni að falla af myndi verða fangað í háfinn. Hver steinn var síðan burstaður rækilega með síuðu árvatni í plastfötu. Allt sem í háfinn barst og það sem burstað var af hverjum steini var sett í plast dollu og varðveitt í 70% etanóllausn. Ofanvarp hvers steins var dregið á pappír til að hægt væri að uppreikna fjölda dýra á fermetra á hverjum stað. Flokkun og greining botnlægra hryggleysingja var gerð undir víðsjá, en greiningar á rykmýslirfum voru gerðar í smásjá við allt að 1000 falda stækkun. Gagnaraðir um laxaseiði úr Vesturdalsá voru notaðar til grundvallar við samanburð á vexti og meðallengd seiða fyrir og eftir gos. Stærð vatnasviða vatnsfallanna sem rannsóknin náði til, ofan mælistaða, er æði mismunandi. Stærst er vatnasvið Fnjóskár eða 544,7 km², næst er Geitdalsá 185,6 km², þá Vesturdalsá 96,1 km² og minnst var vatnasvið Hrafnsgærðisár, 23 km² (1. tafla).



1. mynd. Niðurstöður samfelldra mælinga á pH-gildum og vatnshita í Fnjóská frá 23. maí til 3. september 2015. Bláa línan sýnir vatnshita og svarta línan sýnir pH-gildi. Skyggðu svæðin afmarka marktækar breytingar á pH-gildum.

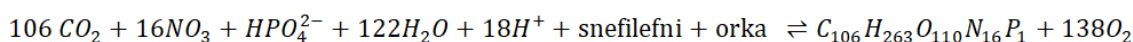
Niðurstöður og umræður

Árstíðabundinn breytileiki í pH-gildum í ám á Norðaustur- og Austurlandi

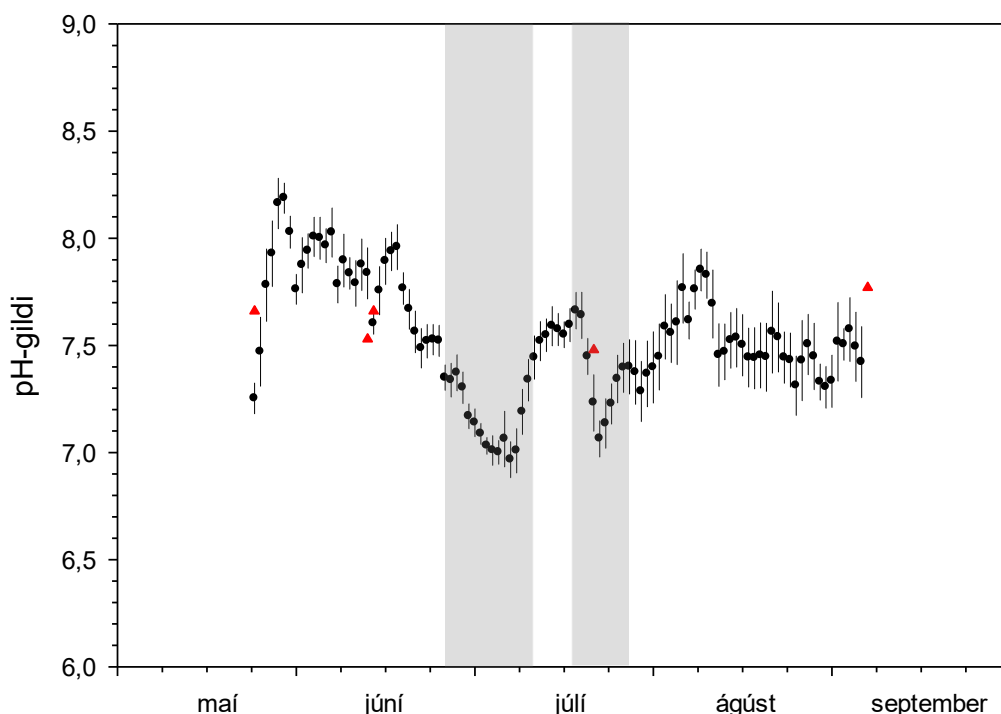
Nýtanleg gögn fengust úr þremur af fjórum pH síritum, en því miður misfórurst skráningar á mæligildum í Hrafnsgarðisá sem fyrr segir.

Fnjóská.

Í Fnjóská var sólarhringsmeðaltal pH-gilda á bilinu 6,97 til 8,19 og sólarhringsmeðaltal fyrir vatnshita var á bilinu 3,3 til 7,5°C yfir athugunartímabilið (1. mynd). Greinilega má sjá dægursveiflur í pH-gildum, þar sem gildin falla nokkuð yfir nóttina og hækka síðan er líða tekur á daginn (2. mynd). Slíkt munstur er vel þekkt í vötnum, en vatnið verður basískara, þ.e. pH vatnsins hækkar, samfara aukinni ljóstillífun yfir daginn þar sem ljóstillífun tekur til sín CO₂ ásamt nauðsynlegum næringarefnum úr vatninu. Ljóstillífun tekur einnig til sín H⁺ jónir (sýru) úr vatninu og í kjölfarið verður vatnið basískara, þ.e. pH vatnsins hækkar. Þannig verður vatnið basískara yfir daginn (sbr. jafna um ljóstillífun hér að neðan). Að nóttu til gengur þetta ferli síðan í öfuga átt þannig að öndun plantna leiðir þess að lífrænt efni brotnar niður og H⁺ jónir skila sér í vatnið aftur (sjá t.d. Odum 1956, Guasch 1998). Því er vatnið súrara á nóttunni (vegna rotnunar) en á daginn (vegna ljóstillífunar).



Mestur sólarhringsmunur á pH-gildum í Fnjóská var 0,714, en að meðaltali munaði 0,38 á lægstu og hæstu skráðum pH-gildum innan sólarhrings. Hliðstæðar dægursveiflur mátti einnig sjá á vatnshita. Frá miðjum júní lækkaði pH í Fnjóská og náði lágmarki í fyrstu viku júlímánaðar er það var í kringum 7 (1. og 2. mynd).



2. mynd. Sólarhringsmeðaltöl mælinga á pH-gildum í Fnjóská frá 23. maí til 3. september 2015 (svartir fylltir hringir) ásamt staðalfrávikum hvers sólarhrings (lóðrættar línur). Auk þess eru sýnd pH-gildi sem mæld voru í Fnjóská í hverri vitjun (rauðir þríhyrningar). Skyggðu svæðin afmarka marktækar breytingar á pH-gildum.

Vatnshitinn lækkaði á sama tíma og pH-gildin, en hækkaði síðan umtalsvert aftur snemma í júlí. Í þriðju viku júlí varð aftur lækkun á pH-gildum, en sú lækkun varði skemur en fyrr í júlí. Fram að þeim tíma hafði vatnshiti verið nokkuð lágur eða um og rétt yfir 5°C (1. mynd). Ætla má að þessi

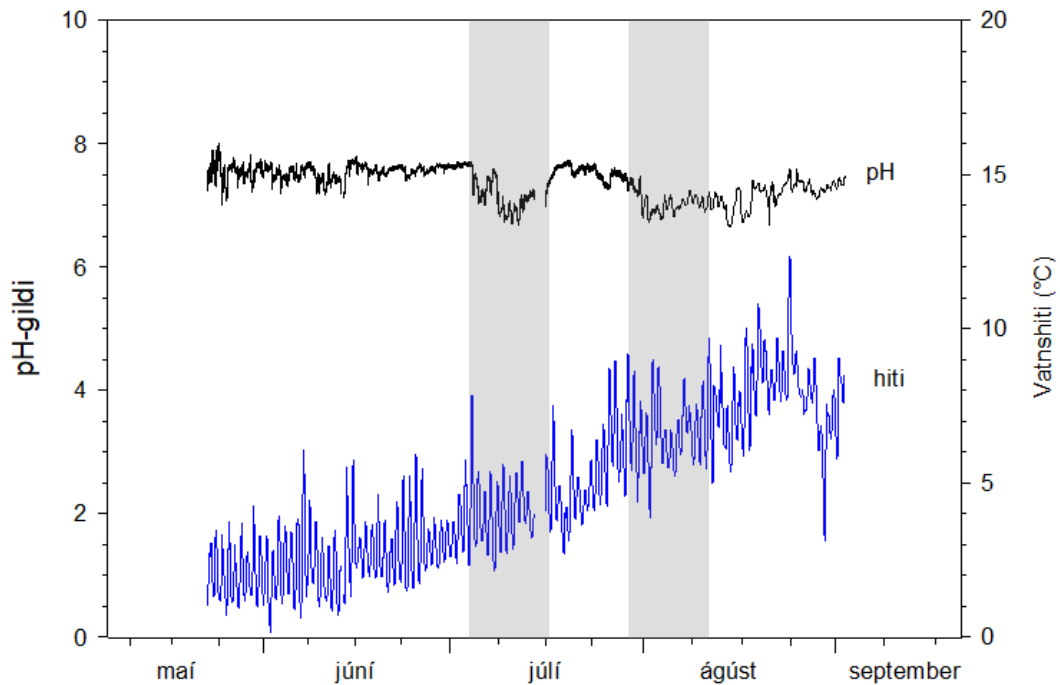
lækkun á pH-gildum megi rekja til snjóbráðnunar á hálendinu, en á hinn bóginn er erfitt að tengja lækkunina beint Holuhraunsgosinu. Ómenguð úrkoma mettuð m.t.t. CO₂ andrúmlöftsins (395 ppmv) hefur pH gildið 5,56 við 25°C (Galeczka o.fl. 2017), en það hækkar fljótt vegna efnahvarfa við berggrunninn (Sigurður Reynir Gíslason 1996). Snjóbráð sem rennur hratt af landi hefur því áhrif til lækkunar á pH gildi ferskvatns á vatnasviðum, þrátt fyrir að um ómengið snjóbráð sé að ræða. Lækkun á pH frá miðjum júní fram í fyrstu viku júlí var frá pH 8 niður í pH 7, en í þriðju viku júlí var lækkunin mun minni eða úr pH 7,6 í pH 7. Það sem eftir lifði af sumri voru pH-gildin nokkuð stöðug og engar marktækar dýfur, ef frá eru taldar dægursveiflurnar sem áður er getið um. Við skoðun á meðaltölum og staðalfrávikum pH-gilda yfir hvern sólarhring sem mælingar voru gerðar má sjá að umtalsverður breytileiki var innan sólarhrings (2. mynd). Samanburður á mælingum sem gerðar voru við hverja vitjun í Fnjóská (2. tafla) sýna að mælingum á pH ber nokkuð saman á milli pH síritandi nema og punktmælingum með handmæli (2. mynd). Rafleiðni í Fnjóská var á bilinu 32,6 og 45,8 µS/cm og mældust hæstu gildin í fyrstu tveimur vitjununum (maí og júní) en lægst um miðjan júlí (2. tafla). Basavirknin endurspeglar getu vatnsins til að draga úr pH breytingum í vatninu. Basavirkni Fnjóskár var einungis mæld í lok rannsóknatímabilsins og var þá 0,373 meq/L. Hlutfallslega miklar breytingar á pH í Fnjóská á rannsóknatímabilinu, innan hvers sólarhrings samfara öndun/ljóstillífun og milli tímabila sem tengja má leysingum, má skýra með því hve vatnið hefur lága basavirkni (2. tafla).

2. tafla. Niðurstöður mælinga á pH-gildum (YSI Pro 1030 handmælir), vatnshita, leiðni og basavirkni. Í töflunni er auk þess tilgreint hvenær þörunga- og botndýrasýni voru tekin og hvenær pH síritar voru kvarðaðir.

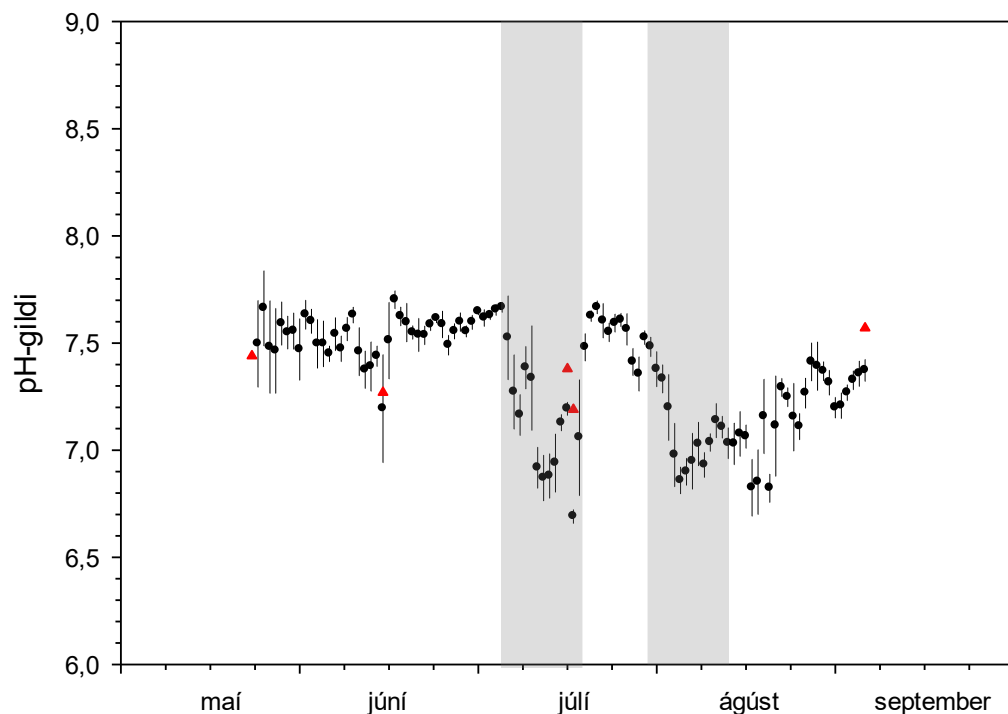
Vatnsfall	Dags	Klukkan	AquaStar kvörðun	Þörunga- og botndýr	pH	T (°C)	Leiðni (µS/cm @25°C)	Basavirkni (meq/L)
Fnjóská	23.5.2015	19:45	X		7,66	6,6	43,8	
Fnjóská	12.6.2015	12:47	X		7,66	5,5	45,8	
Fnjóská	19.7.2015	13:45	X	X	7,48	4,5	32,6	
Fnjóská	3.9.2015	17:50	X		7,77	8,3	40,8	0,373
Geitdalsá	22.5.2015	17:57	X		7,44	3,4	47,9	
Geitdalsá	13.6.2015	13:35	X		7,27	2,5	39,8	
Geitdalsá	14.7.2015	15:00	X	X	7,38	4,1	23,1	
Geitdalsá	15.7.2015	22:10	X		7,19	5,3	23,1	
Geitdalsá	2.9.2015	12:30	X		7,57	8,6	36,7	0,308
Vesturdalsá	23.5.2015	12:10	X		7,49	2,1	53,0	
Vesturdalsá	12.6.2015	18:54	X		7,58	7,5	59,7	
Vesturdalsá	15.7.2015	16:20	X	X	7,88	8,8	83,9	
Vesturdalsá	2.9.2015	18:55	X		8,07	10,8	96,5	0,846
Hrafnsgerðisá	22.5.2015	19:20	X		7,7	1,1	83,2	
Hrafnsgerðisá	13.6.2015	17:05	X		7,53	2,6	55,5	
Hrafnsgerðisá	14.7.2015	21:00	X	X	7,73	6,0	49,3	
Hrafnsgerðisá	2.9.2015	15:10	X		8,15	11,3	99,4	0,952

Geitdalsá.

Í Geitdalsá voru nokkuð meiri sveiflur í pH en sáust í Fnjóská, á það bæði við um breytileika innan sólarhrings og yfir tímabilið (3. mynd). Yfir rannsóknatímabilið voru pH-gildin ívið lægri í Geitdalsá en í Fnjóská og voru meðaltöl hvers sólarhrings lægst 6,69 og hæst 7,70. Töluverðar dægursveiflur í pH voru í Geitdalsá, en breytileiki innan hvers sólarhrings (staðalfrávik) var þó ekki eins jafn á milli daga og sást í Fnjóská (2. og 4. mynd). Mestur munur á pH-gildum innan sólarhrings var 0,957 en að meðaltali var munurinn 0,317. Mestan hluta júní og fram í fyrstu viku júlí voru pH-gildin nokkuð stöðug, en töluverð lækkun varð í fyrstu viku júlí. Gildin fóru síðan aftur hækkandi og upp úr miðjum júlí voru pH-gildin orðin svipuð og þau voru fyrir lækkunina (3. mynd). Um mánaðamót júlí og ágúst lækkuðu pH-gildin aftur í Geitdalsá en hækkðu aftur í byrjun ágúst, þó gildin næðu aldrei hliðstæðum stærðagráðum og mældust fyrr um sumarið. Í ágúst má greina einstaka stutt tímabil með lægra pH-gildi, þar sem gildin fóru niður fyrir 7,0 líkt og gerðist fyrr um sumarið (3. og 4. mynd). Dægursveiflur á pH-gildum voru fremur miklar í Geitdalsá eins og sést best þegar staðalfrávik sólarhringsmeðaltala eru skoðuð (4. mynd). Mælingar á pH sem gerðar voru í hverri vitjun voru svipaðar þeim mælingum sem skráðar voru með pH síritanum (2. tafla og 4. mynd).



3. mynd. Niðurstöður samfelldra mælinga á pH-gildum og vatnshita í Geitdalsá frá 22. maí til 2. september 2015. Bláa línan sýnir vatnshita og svarta línan sýnir pH-gildi. Skyggðu svæðin afmarka marktækar breytingar á pH-gildum.



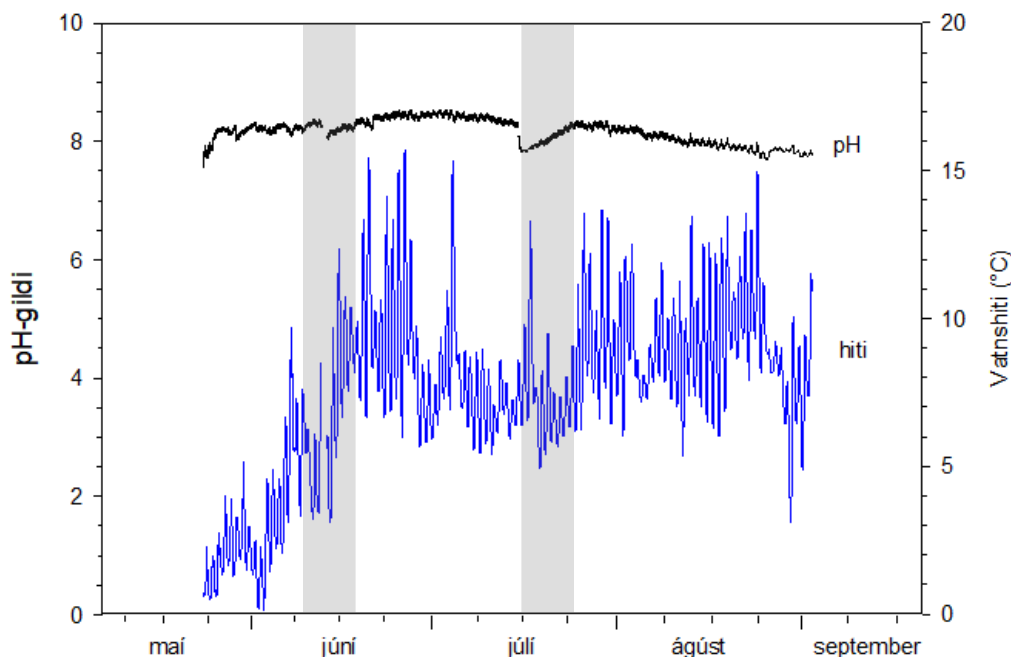
4. mynd. Sólarhringsmeðaltöl mælinga á pH-gildum í Geitdalsá frá 22. maí til 2. september 2015 (svartir fylltir hringir) ásamt staðalfrávikum hvers sólarhrings (lóðréttar línur). Auk þess eru sýnd pH-gildi sem mæld voru í Geitdalsá í hverri vitjun (rauðir þríhyrningar). Skyggðu svæðin afmarka marktækar breytingar á pH-gildum.

Vatnshiti hækkaði nær stöðugt yfir tímabilið og var hann kominn í tæplega 10°C í ágústlok, en einstakar mælingar fóru þó yfir 10 gráðurnar. Á sama tíma og pH-gildin lækkuðu snemma í júlí, hækkaði vatnshitinn snögglega í stuttan tíma (3. mynd). Í lok júlí og fram í september hækkaði hitinn

stöðugt, en hitasveiflur voru miklar innan þessa tímabils. Leiðnin í Geitdalsá var á bilinu 23,1 og 47,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sem er svipað eða ívið lægra en mældist í Fnjóská (2. tafla). Hæsta gildið mældist í upphafi mælinga (22. maí) og lægst mældist leiðnin um miðjan júlí. Basavirknin í Geitdalsá var heldur lægri en í Fnjóská eða 0,308 meq/L (2. tafla) sem getur verið skýringin á því að pH sveiflast meira í Geitdalsá en í Fnjóská (7. mynd).

Vesturdalsá.

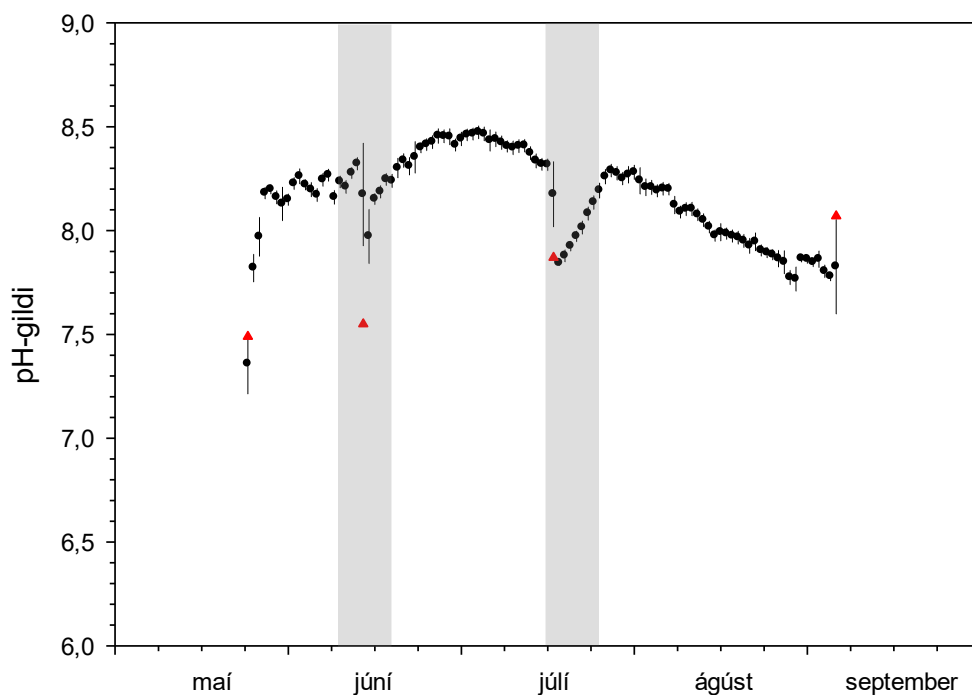
Í Vesturdalsá voru pH-gildin að jafnaði töluvert hærri en í Fnjóská og Geitdalsá, oftast um eða yfir 8 (5. mynd). Sólarhringsmeðaltöl voru á bilinu 7,36 og 8,47. Ferill pH-gilda frá maílokum fram í septemberbyrjun er nánast beinn, ef undanskildir eru dagarnir um það leyti sem síritarnir voru endurkvarðaðir, þ.e. 12. júní og 15. júlí, og þar er um truflun að ræða vegna inngrípsins (5. mynd). Mun minni breytileiki var innan sólarhrings á pH-gildum í Vesturdalsá en sást í Fnjóská og Geitdalsá (6. mynd). Mun meiri frávik voru á punktmælingum með handmæli í samanburði við þau pH-gildi sem síritarnir mældu, einkum í fyrri tveimur mælingunum. Í þeim mælingum munaði 0,3 og 0,4 pH gildum, en pH-gildin fyrir báðar seinni mælingarnar voru í mun meiri takt milli mæliaðferða. Vatnshitinn var mjög lágur til að byrja með, einungis rúmlega 2°C, og fór hitinn ekki að hækka að ráði fyrir en í fyrstu og annari viku júní og var hitinn kominn um og yfir 10°C upp úr miðjum júní. Vatnshitinn hélst síðan 8–11°C fram í ágústlok. Leiðnin var mun hærri í Vesturdalsá en í Fnjóská og Geitdalsá, eða á bilinu 53 til 96,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Lægst var leiðnin í lok maí og um miðjan júní, en mun hærri um miðjan júlí og hæsta gildið mældist í byrjun september (2. tafla). Basavirknin var hærri í Vesturdalsá en í Fnjóská og Geitdalsá, 0,846 meq/L, sem þýðir að árvatnið hefur innbyggða tregðu til pH breytinga vegna breytilegs pH í ákomu/afrennsli á vatnasviðinu. Þessi eiginleiki árvatsins í Vesturdalsá er líklega skýringin á því að á því að dægur- og árstíðasveiflur í pH eru minni í Vesturdalsá miðað við í Fnjóská og Geitdalsá (7. mynd).



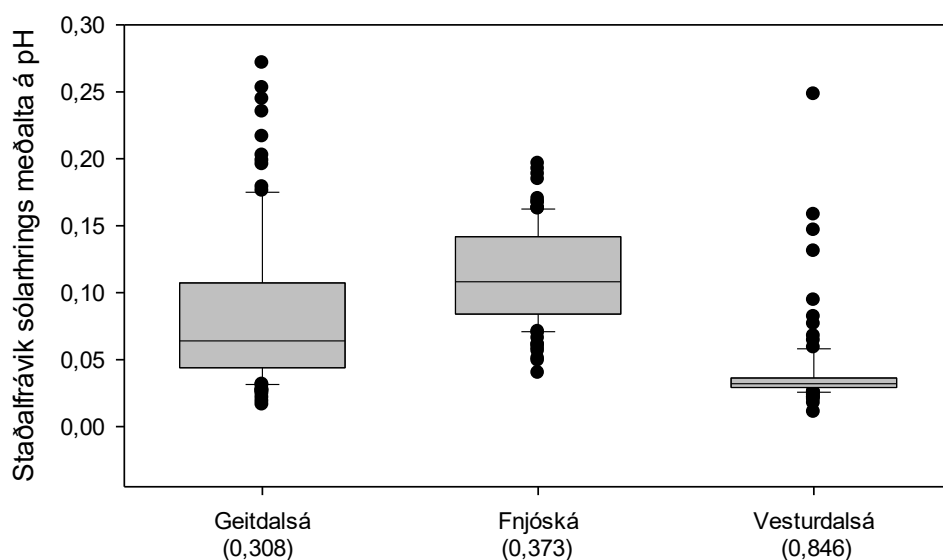
5. mynd. Niðurstöður samfelldra mælinga á pH-gildum og vatnshita í Vesturdalsá frá 23. maí til 2. september 2015. Bláa línan sýnir vatnshita og svarta línan sýnir pH-gildi. Skyggðu svæðin afmarka marktækar breytingar á pH-gildum.

Hrafnsgerðisá.

Í Hrafnsgerðisá misfórast mælingar með síritandi pH mæli sem fyrr segir, en stakar mælingar á pH-gildum yfir rannsóknartímabilið sýndu að gildin voru áþekkt þeim sem sáust í Vesturdalsá fyrir samsvarandi tímabil. Hæsta pH-gildið mældist í september (8,15) en gildin fyrir hina daganna voru á bilinu 7,5 og 7,7 (2. tafla). Vatnshitinn var mjög lágur í byrjun, aðeins 1,1°C, og var reyndar enn lágur um miðjan júní (2,6°C). Um miðjan júlí var hitinn kominn upp í 6 gráður og síðan mældist hann 11,3°C í lok tímabilsins. Leiðnin í Hrafnsgerðisá var frekar há í byrjun og lok athugunartímans, 83,2 og 99,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$, en 55,5 og 49,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ um miðjan júní og júlí (2. tafla). Basavirknin í Hrafnsgerðisá var sú hæsta sem mældist í ánum fjórum, 0,952 meq/L.



6. mynd. Sólarhringsmeðaltöl mælinga á pH-gildum í Vesturdalsá frá 23. maí til 2. september 2015 (svartir fylltir hringir) ásamt staðalfrávikum hvers sólarhrings (lóðréttar línur). Auk þess eru sýnd pH-gildi sem mæld voru í Vesturdalsá í hverri vitjun (rauðir þríhyrningar). Skyggðu svæðin afmarka marktækar breytingar á pH-gildum.

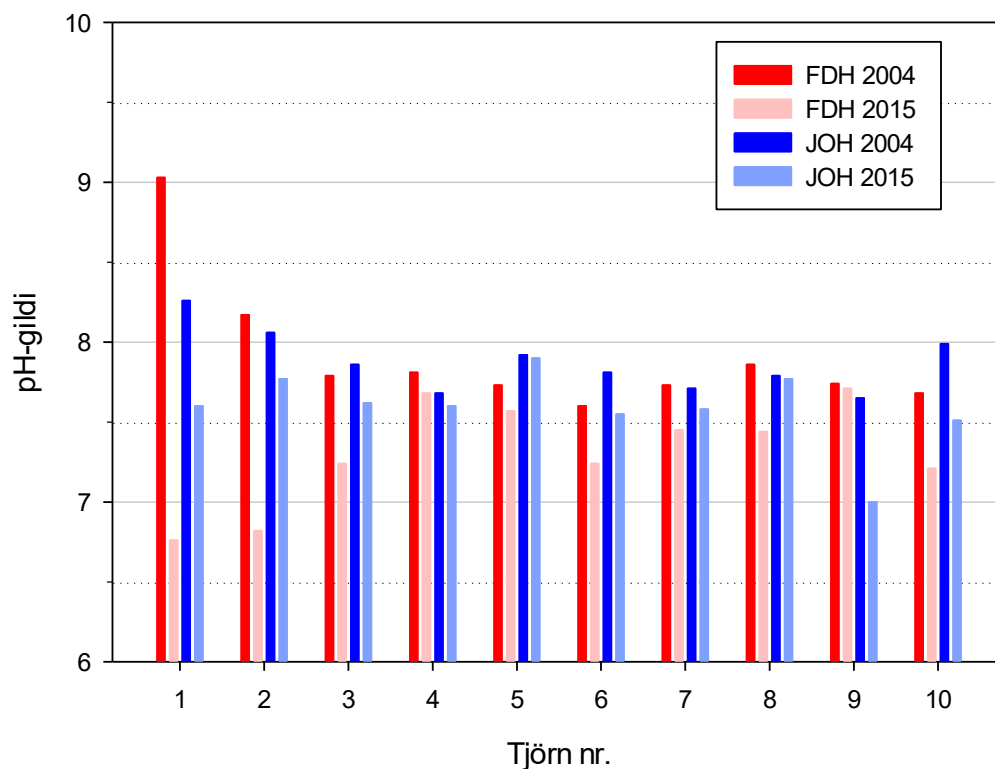


7. mynd. Meðalbreytileiki á pH-gildum innan hvers sólarhrings (staðalfrávik) í Geitdalsá, Fnjóská og Vesturdalsá frá 23. maí til 2. september 2015 við mismunandi basavirkni vatns (gildi í svigum við x-ás). Hver kassi sýnir hvar megnið af mælingum liggja, 25% mælinga liggja neðan við neðri mörk kassana og 75% mælinga liggja neðan við efri mörk kassana. Svört lárétt lína innan hvers kassa sýnir miðgildið. Útgildin eru sýnd sem punktar og lóðréttu línurnar sýna hvar efri 95% og neðri 5% mörk mælinganna liggja.

Við nánari skoðun á breytileika (staðalfrávik) innan sólarhrings á pH-gildum og basavirkni vatns kom fram greinilegur munur á milli annars vegar Vesturdalsár og hins vegar Geitdalsár og Fnjóskár (7. mynd). Eins og fyrr segir er basavirkni mælikvarði á það hve mikla sýringu þarf til að brjóta niður „búffer“ eiginleika vatnsins (Sigurður Reynir Gíslason o.fl. 2017). Í Geitdalsá og Fnjóská var basavirknin lág og sveiflur á pH-gildum vegna ljóstillífunar/rotnunar innan hvers sólarhrings voru miklar. Basavirkni Vesturdalsár var hins vegar mun hærri og pH vatnsins stöðugra innan sólarhrings (7. mynd). Afrennsli súrrar, mengaðrar úrkomu í vatnsföll með lága basavirkni getur valdið því að „búffer“ eiginleiki þeirra hrynnur, sem veldur súrnun vatnsfallanna og hefur þar með mikil áhrif á vistkerfi viðkomandi áa. Afrennsli súrrar, mengaðrar úrkomu í vatnsföll með háa basavirkni er hins vegar ekki eins líklegt til að hafa mjög alvarlegar afleiðingar fyrir vistkerfi viðkomandi áa, þar sem meira þarf til að hreyfa við pH gildi vatnsins við háa basavirkni en lága.

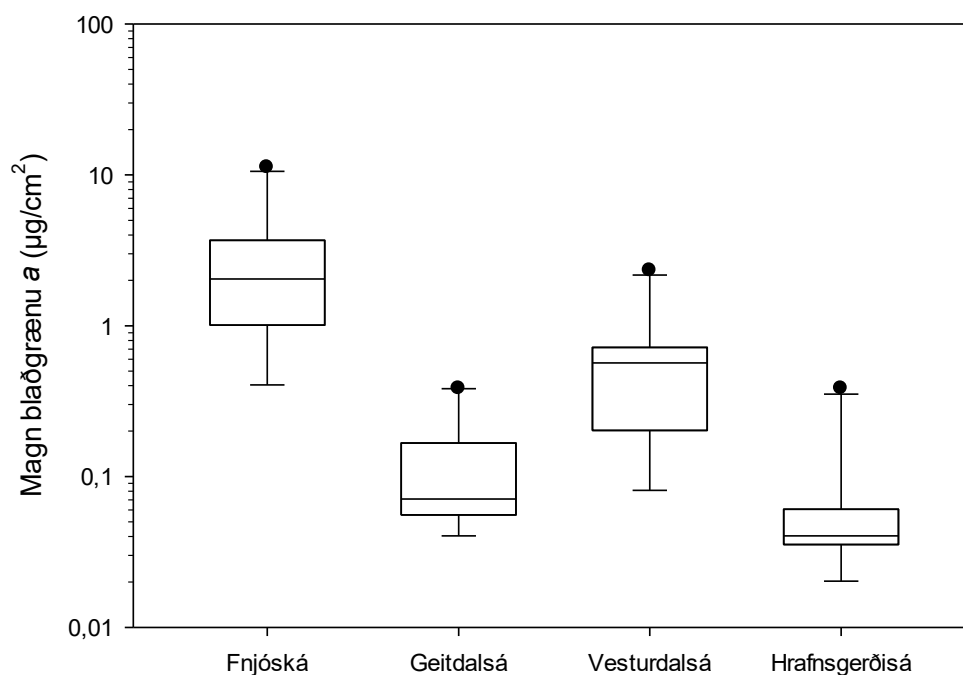
Samanburður á pH-gildum vatns í tjörnum á Fljótsdals- og Jökuldalsheiði fyrir árin 2004 og 2015

Samanburður á fáum mæligildum milli ára getur verið varasamur og ber því að túlka niðurstöður þar sem borin eru saman tvö mæligildi, þar sem 11 ár skilja á milli, með varúð. Tvö votlendissvæði á hálendi Austurlands voru notuð til að svara spurningunni er lúta að hugsanlegum áhrifum Holuhraungossins á pH-gildi tjarnavatns. Tjarnirnar voru á Jökuldalsheiði austan við Sænautavatn og austan við Þrælaháls á Fljótsdalsheiði. Á Jökuldalsheiði var pH-gildi tjarnavatnsins marktækt herra 2004 en 2015 (Mann-Whitney; $P=0,005$). Munurinn var einna mestur í tjörnum 1, 9 og 10 (8. mynd). Þær tjarnir eru allar á sama stað, austast í tjarnaþyrpingunni. Ef niðurstöður mælinga í þessum þremur tjörnum er sleppt þá er ekki marktækur munur á pH-gildum tjarnavatnsins 2004 og 2015 ($P=0,053$). Í tjörnunum á Fljótsdalsheiði voru pH-gildi vatns úr tjörnunum marktækt lægri 2015 en þau voru 2004 (Mann-Whitney; $P<0,001$). Líkt og í tjörnunum á Jökuldalsheiði voru það nokkrar tjarnanna sem skáru sig frá þar sem munurinn var mjög mikill á milli mælinga t.a.m. tjarnir nr. 1–3, 8 og 10 (8. mynd). Stutt var á milli allra þeirra tjarna, líkt og var með tjarnirnar á Jökuldalsheiði. Það er vandkvæðum bundið að túlka mun á pH-gildum á milli ára á báðum þessum svæðum hvort um sé að ræða súrnun (2015) vegna áhrifa frá gosinu í Holuhrauni eða annarra þátta.

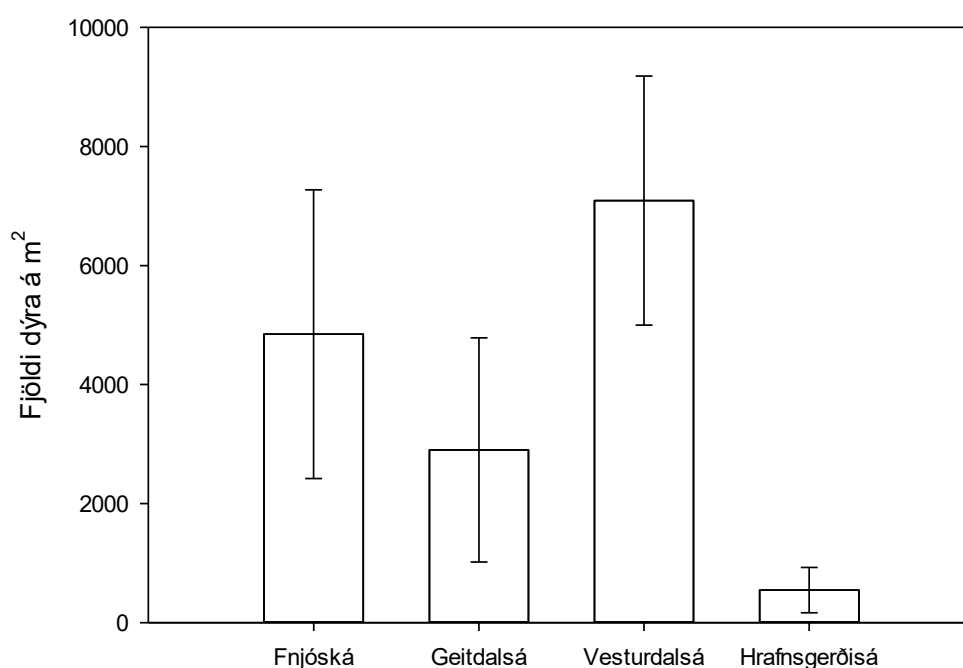


8. mynd. Niðurstöður mælinga á pH-gildum í tjörnum á Jökuldals- og Fljótsdalsheiði 2004 og 2015. Rauðu og bleiku súlurnar sýna mæligildin fyrir Jökuldalsheiði og bláu og ljósbláu súlurnar sýna mæligildin fyrir Fljótsdalsheiði.

Hugsanleg áhrif súrnunar vegna gosefna úr Holuhraunsgosinu á lífmassa þörunga og magn botnlægra hryggleysingja

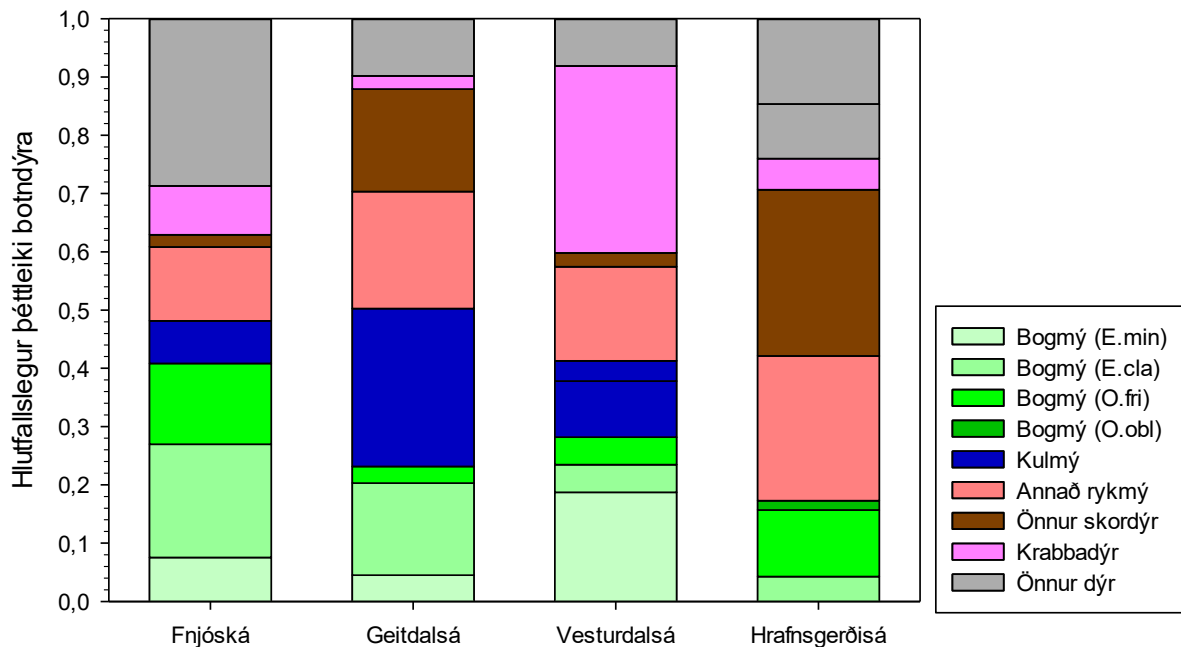


9. mynd. Kassarit sem sýnir lífmassa botnlægra þörunga og blágrænbaktería (styrkur blaðgrænu a) á fersentimetra í Fnjóská (19. júlí), Vesturdalsá (15. júlí), Geitdalsá (14. júlí) og Hrafnsgerðisá (14. júlí) 2015. Hver kassi sýnir hvar megnið af mælingum liggja, 25% mælinga liggja neðan við neðri mörk kassana og 75% mælinga liggja neðan við efri mörk kassana. Svört lárétt lína innan hvers kassa sýnir miðgildið. Útgildin eru sýnd sem punktar og lóðréttu línurnar sýna hvar efri 95% og neðri 5% mörk mælinganna liggja.

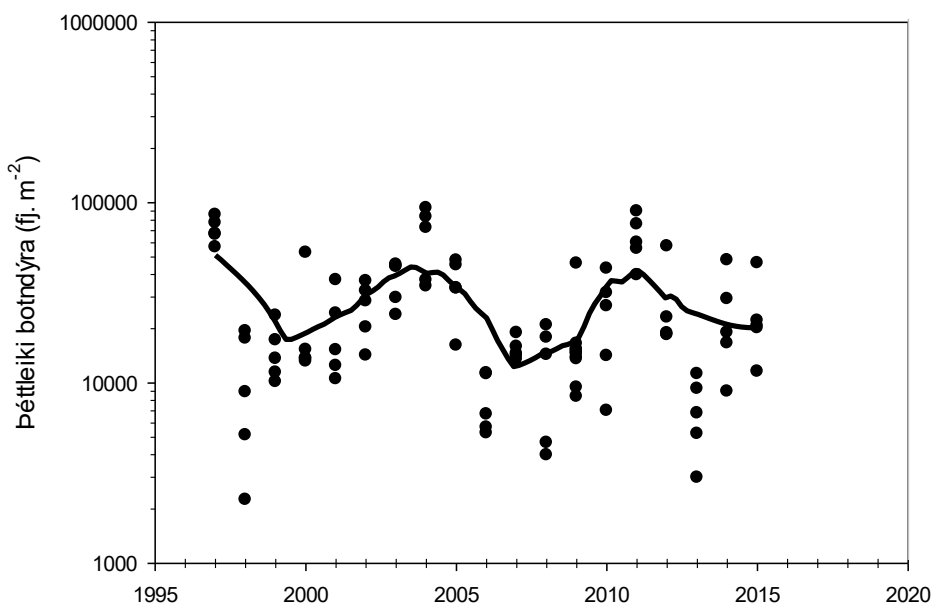


10. mynd. Fjöldi botnlægra hryggleysingja á fermetra í Fnjóská (19. júlí), Vesturdalsá (15. júlí), Geitdalsá (14. júlí) og Hrafnsgerðisá (14. júlí) 2015. Hver súla sýnir meðaltal 7 sýna ásamt staðalfrávikum (lóðréttar línur).

Eldri samanburðarhæf gögn um blaðgrænu er einungis að finna úr Vesturdalsá af þeim fjórum ám sem mælingar náðu til. Magn blaðgrænu og þar með lífmassi þörungna og blábaktería á botni var að meðaltali mest í Fnjóská, $2,0 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, í Vesturdalsá, $0,65 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, í Geitdalsá $0,13 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ og minnst í Hrafnsgærðisá, $0,07 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ (9. mynd). Breytileiki á milli einstakra mæligilda var mestur í Fnjóská þar sem magn blaðgrænu mældist á bilinu $0,4$ til $11,23 \mu\text{g}/\text{cm}^2$. Magn blaðgrænu í Vesturdalsá var að meðaltali $0,65 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ sumarið 2015, tvöfalt herra en mælt var 17. júlí 2014 í Vesturdalsá neðan við Hauksstaði (óbirt gögn Hafrannsóknastofnunar).

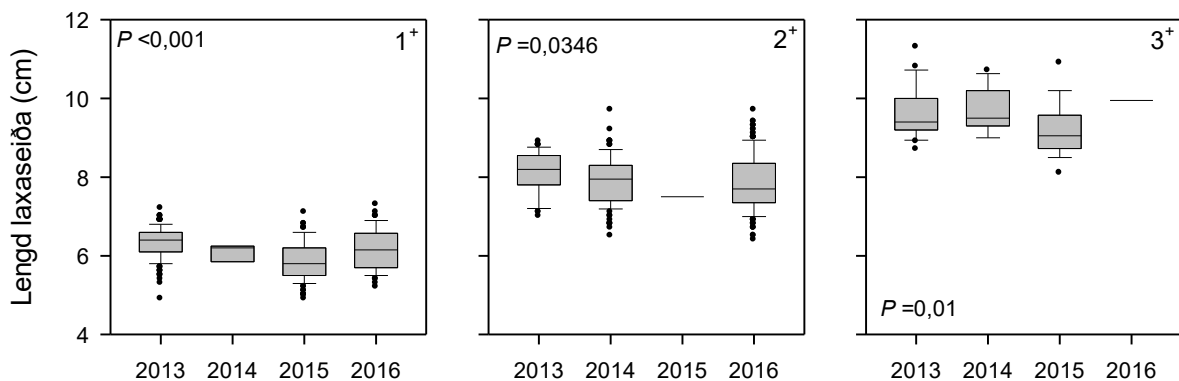


11. mynd. Hlutfallslegur fjöldi mismunandi hópa botnlægra hryggleysingja í Fnjóská (19. júlí), Vesturdalsá (15. júlí), Geitdalsá (14. júlí) og Hrafnsgærðisá (14. júlí) 2015. Þeir hlutar súlnanna sem eru litaðir grænum, bláum og laxableikum lit sýna allir hlutfall rykmýs á botni ána.



12. mynd. Heildarþéttleiki botndýra (svartir punktar og lína) síðsumars í Vesturdalsá, ofan við Hauksstaði. Hver hringur táknar eitt sýni og línan sem dregin er í gegnum punktana er byggð á LOESS staðbundnum aðhvarfsgreiningum (Locally weighted scatterplot smoothing) og er þá miðað við 30% skörun við aðhvarfsgreiningarnar ($\alpha=0,3$).

Þéttleiki botnlægra hryggleysingja var mestur í Vesturdalsá þar sem rúmlega sjö þúsund einstaklingar voru á hvern fermetra, í Fnjóská voru tæplega fimm þúsund dýr á hvern fermetra, tæplega þrjú þúsund í Geitdalsá og ekki nema 547 einstaklingar á fermetra í Hrafnsgarðsá (10. mynd). Fjölbreytileiki botndýrafánunnar var mestur í Vesturdalsá, 26 tegundir/hópar en 17 og 18 í hinum ánum. Hlutfurð rykmýs var á bilinu 57,5 til 70,7% af heildarfjölda botndýra (11. mynd), þar af var kulmý (Diamesinae) í mestum mæli í Geitdalsá og Hrafnsgarðsá, en bogmýstegundirnar (Orthocladinae) *Eukiefferiella claripennis* og *E. minor* í mestum fjölda í hinum tveimur. Auk rykmýs voru krabbadýr áberandi hópur botnlægra hryggleysingja í Vesturdalsá (11. mynd). Við samanburð á eldri gögnum um botndýr úr Vesturdalsá, neðan við Hauksstaði, má sjá að magn hryggleysingja 2015 skar sig ekkert sérstaklega frá fyrri árum (12. mynd). Sjá má að síðastliðin tæp 20 ár hafa einkennst af nokkuð reglulegum sjö ára sveiflum í þéttleika hryggleysingja, þar sem lögð var árin 2000, 2007 og 2014. Í því ljósi er ekki hægt að álykta að gosfni úr Holuhraungosinu hafi haft neikvæð áhrif á þéttleika botnlægra hryggleysingja í Vesturdalsá.



13. mynd. Lengd laxaseiða í Vesturdalsá 2013 og 2014 (fyrir og eftir að gos var hafð í Holuhrauni) 2015 og 2016 (eftir að gosi lauk). Sýndar eru niðurstöður mælinga á laxaseiðum á mismunandi aldri sem veidd voru á sex stöðum í Vesturdalsá. Myndin lengst til vinstri sýnir lengd laxaseiða á öðru ári (1⁺), miðmyndin sýnir lengd laxaseiða á þriðja ári (2⁺) og myndin lengst til hægri sýnir lengd laxaseiða á fjórða ári (3⁺). Á hverri mynd er sýnt p-gildi fyrir niðurstöður tölfræðiprófa (Kruskal-Wallis). Hver kassi sýnir mörk þess þar sem 75% (efri) og 25% (neðri) mælinganna liggja, lóðréttu línurnar sýna síðan hvar 95% (efri) og 5% (neðri) mörkin liggja og punktarnir sýna útgildin. Lárétta línan innan hvers kassa sýnir miðgildi mælinganna.

Vöxtur laxaseiða í Vesturdalsá frá fyrsta (1⁺) yfir á annað ár (2⁺) annars vegar og seiða frá þriðja (2⁺) yfir á fjórða ár (3⁺) hins vegar sýndi greinilega fylgni við þéttleika botndýra. Sveiflurnar voru nánast í takt, þó með hniki þar sem toppur í vexti seiða, einkum þeirra eldri, var ári á eftir toppi í þéttleika botnlægra hryggleysingja. Engin vísbending kom fram um marktækar breytingar á vexti laxaseiða í kjölfar eldgossins í Holuhrauni. Gögn um lengd seiða sýna að jafnaði ekki marktækar breytingar í lengd seiða 2013 og 2014 annars vegar og 2015 og 2016 hins vegar, nema hvað varðar meðallengd ársгамalla laxaseiða (1⁺) (13. mynd). Meðallengd þeirra var meiri á árunum 2013 og 2014 en á árunum 2015 og 2016. Við frekari greiningu má sjá að mestur var munurinn á meðallengd seiða árin 2013 og 2015 annars vegar og 2016 og 2015 hins vegar. Ársögmul laxaseiði voru að meðaltali marktækt styttri ($P < 0,05$) árið 2015 en jafngömul seiði voru á árunum 2013 og 2016. Sumarið 2015 (júní–ágúst) var vatnshiti í Vesturdalsá marktækt lægri en hann var árin 2014 og 2016 ($P < 0,05$). Leiða má líkum að því að hitinn í Vesturdalsá skýri lægri meðallengd laxaseiða 2015 frekar en að þau skrifist á áhrif frá Holuhraungosinu.

Þakkir

Landeigendum í Geitdal, Hauksstöðum og Droplaugarstöðum fyrir að leyfa aðgengi að landi til að framkvæma rannsóknina. Sigurður Óskar Helgason aðstoðaði við sýnatökur í Fnjóská. Rannsóknin var styrkt af Almannavarnardeild Ríkislögreglustjóra. Öllum þessum aðilum eru færðar góðar þakkir er leiddu til þess rannsóknin var framkvæmanleg.

Heimildir

- Andri Stefánsson, Gerður Stefánsdóttir, Nicole S. Keller, N. S., Sara Barsotti, Árni Sigurðsson, Svava Björk Þorláksdóttir, Melissa Anne Pfeffer, Eydis S. Eiríksdóttir, Elín Björk Jónasdóttir, Sibylle von Löwis & Sigurður R. Gíslason 2017. Major impact of volcanic gases on the chemical composition of precipitation in Iceland during 2014 – 2015 Holuhraun eruption. *Journal of Geophysical Research, Atmospheres* 122(3):1971–1982.
- Baker, L. A., Herlihy, A. T., Kaufman, P. R. & Eilers, J. M. 1991. Acidic lakes and streams in the United States: the role of acidic deposition. *Science* 252:1151–1154.
- Bjarni Jónsson & Eik Elfarsdóttir 2003. *Rannsóknir á seiðastofnum Fnjóskár árið 2003*. Veiðimálastofnun, VMST-N/0311. 32 bls.
- Courtney, L.A. & Clements, W.H. 1998. Effects of acidic pH on benthic macroinvertebrate communities in stream microcosms. *Hydrobiologia* 379:135–145.
- Galeczka I. M., Eydis Salome Eiríksdóttir, Finnur Pálsson, Eric Oelkers, Stefanie Lutz, Liane Benning, Andri Stefánsson, Rikey Kjartansdóttir, Jóhann Gunnarsson-Robin, Shuhei Ono, Rósa Ólafsdóttir, Elín Björk Jónasdóttir, Sigurður Reynir Gíslason 2017. Pollution from the 2014–15 Bárðarbunga eruption monitored by snow cores from the Vatnajökull glacier, Iceland. *Rit LbhÍ* 83: 41–45.
- Gerður Stefánsdóttir, Nicole S. Keller, Elín Björk Jónasdóttir, Árni Sigurðsson, Svava Björk Þorláksdóttir, Melissa Anne Pfeffer, Andri Stefánsson, Sibylle von Löwis, Sigurður Reynir Gíslason & Sara Barsotti 2015. The effect of the 2014 Holuhraun eruption (Bárðarbunga, Iceland) on precipitation chemistry and associated environmental impact. *Geophysical Research Abstracts*, 17, EGU2015-9969-1, 2015.
- Guasch, H., Armengol, J., Marti, E. & Sabater, S. 1998. Diurnal variation in dissolved oxygen and carbon dioxide in two low-order streams. *Water Research* 32(4): 1067–1074.
- Haines, T.A. 1981. Acidic precipitation and its consequences for aquatic ecosystems: a review. *Trans. Am. Fish. Soc.* 110:669–707.
- Herrmann, J., Degerman, E., Gerhardt, A., Johannson, C., Lingdell, P. & Muniz, I.P. 1993. Acid-stress effects on stream biology. *Ambio* 22: 298–307.
- Jón Kristjánsson 1976. *Rannsóknir í Eyjafjarðará og Fnjóská 1975*. Veiðimálastofnun, fjölrit. 6 bls.
- Kovács, C., Kahlert, M. & Padisák, J. 2006. Benthic diatom communities along pH and TP gradients in Hungarian and Swedish streams. *J. Appl. Phy.* 2(18):105–117.
- Medelytė, G. 2010. *Influences of forests on invertebrate communities in Icelandic streams*. Ritgerð til meistara-prófs við Háskóla Íslands. 126 bls.
- Odum, H.T. 1956. Primary production in flowing waters. *Limnology and Oceanography* 1(2):102–117.
- Sigurður Reynir Gíslason, Stefán Arnórsson & Halldór Ármannsson 1996. Chemical weathering of basalt in Southwest Iceland; effects of runoff, age of rocks and vegetative/glacial cover. *Am. J. Sci.* 296: 837–907.
- Sigurður R. Gíslason, Gerður Stefánsdóttir, Melissa A. Pfeffer, Sara Barsotti, Þorsteinn Jóhannsson, Iwona M. Galeczka, Eniko Bali, Olgeir Sigmarsson, Andri Stefánsson, Nicole S. Keller, Árni Sigurðsson, Baldur H. Bergsson, Bo Galle, Valdimir C. Jacobo, Santioco Arellano, Alessandro Aiuppa, Elín B. Jónasdóttir, Eydis S. Eiríksdóttir, Sigurður Jakobsson, Guðmundur H. Guðfinnsson, Sæmundur A. Halldórsson, Haraldur Gunnarsson, Babbiste Haddadi, Ingibjörg Jónsdóttir, Þorvaldur Þórðarson, Morten Riishuus, Þórdís Högnadóttir, Tobias Dürig, Gro B. M. Pedersen, Ármann Höskuldsson & Magnús T. Guðmundsson 2017. Gosið í Holuhrauni 2014–2015. Magn gosefna, dreifing mengunar og mikilvægi tímasetningar og staðsetningar eldgosa með tilliti til umhverfisáhrifa. *Rit LbhÍ* 83: 15–28.
- Helena M. Stefánsdóttir, H.M. 2010. *Transport and decomposition of allochthonous litter in Icelandic headwater streams: Effects of forest cover*. Ritgerð til meistara-prófs við Landbúnaðarháskóla Íslands. 110 bls.
- Sigurður Reynir Gíslason, Deirdre Clark, Svava Björk Þorláksdóttir, Jörunn Harðardóttir & Eydis Salome Eiríksdóttir 2017. *Efnasamsetning, rennsli og aurburður straumvatna á Suðurlandi*. Gagnagrunnur Jarðvísindastofnunar og Veðurstofunnar. RH-03-2017, 67 bls.
- Stumm, W. & Morgan, J. 1996. *Aquatic Chemistry. Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters*, 3rd ed. John Wiley & sons, New York, 1022 bls.
- Tumi Tómasson 1998. *Fnjóská 1997*. Veiðimálastofnun, VMST-N/98012. 10 bls.
- Weatherly, N.S. & Ormerod, S.J. 1987. The impact of acidification on macroinvertebrate assemblages in Welsh streams: towards an empirical model. *Envir. Pollut.* 46:223–240.
- Wigington, P.J.Jr., DeWalle, D.R., Murdoch, P.S., Krester, W.A., Simonin, H.A., Van Sickle, J. & Baker, J.P. 1996. Episodic acidification of small streams in the northeastern United States: ionic controls of episodes. *Ecol. App.* 6: 389–407.

Hluti IV:

Áhrif á gróður og jarðveg

10.

kafli

Áhrif Holuhraunsgossins á gróður á Fljótsdalshéraði

Edda Sigurdís Oddsdóttir¹, Ásrún Elmarsdóttir², Járngerður Grétarsdóttir³ & Bjarni Diðrik Sigurðsson³

¹Rannsóknastöð skógræktar, Mógilsá, ²Náttúrufræðistofnun Íslands, ³Landbúnaðarháskóla Íslands

Inngangur

Á Austurlandi má finna einn elsta friðaða birkiskóg landsins, Hallormsstaðaskóg, auk þess sem þar er mikil og öflug skógrækt. Lerki og birki eru þær trjategundir sem mest er gróðursett af á svæðinu en einnig furu- og grenitegundir (Björn Traustason 2013). Árið 2002 hófst verkefnið SkógVist á Fljótsdalshéraði. Það verkefni hafði m.a. það markmið að rannsaka áhrif skógræktar á líffræðilegan fjölbreytileika og var botngróður mismunandi skóga rannsakaður í verkefninu (Ásrún Elmarsdóttir o.fl. 2007, Ásrún Elmarsdóttir o.fl. 2011).

Plöntur eru misnæmar fyrir áhrifum loftmengunar og teljast þær trjategundir sem algengar eru á Austurlandi (birki, lerki, ösp og ýmsar barrtegundir) frekar viðkvæmar gagnvart mengun (Stravinskiene o.fl. 2013). Vitað er að hár styrkur brennisteinsdíoxíðs (SO₂) getur bæði haft bein áhrif á gróður í gegnum lauf en einnig getur hár styrkur í jarðvegi haft áhrif (De Vries o.fl. 2000). Beinu áhrifin felast t.d. í skertri ljóstillífun og breytingum á nýtingu sykra sem m.a. veldur því að rötarkerfið visnar, auk þess súrt andrúmsloft getur leitt til hraðari sölnunar blaða og laufa (Klap o.fl. 2000, Ozolincus & Stakenas 2001, Stravinskiene o.fl. 2013).

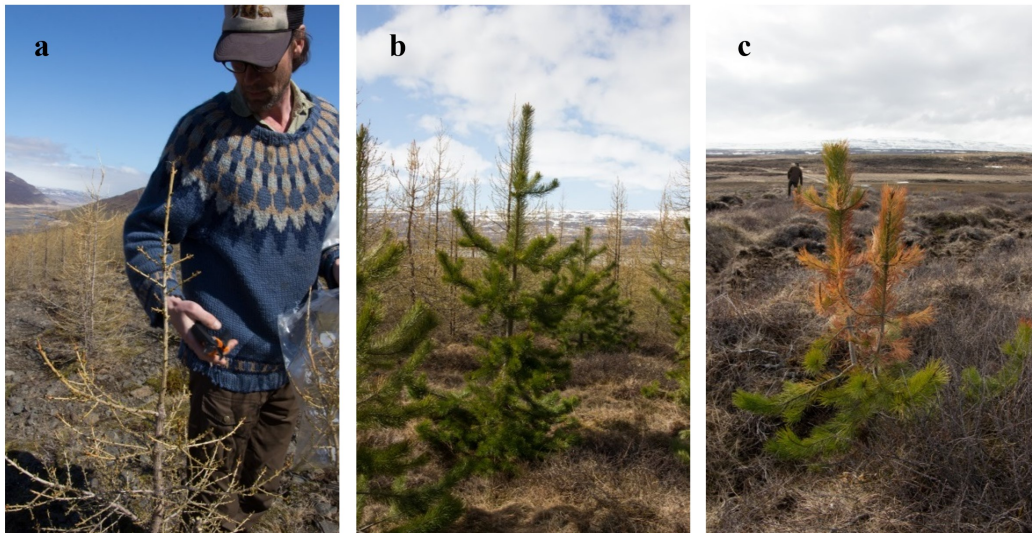
Holuhraunsgosið stóð yfir frá hausti og fram á vetur 2014/2015, á þeim tíma sem flestar plöntur eru í dvala og því minni líkur á því að mengunin ylli verulegu tjóni á trjám. Þó eru til heimildir um að SO₂ mengun á dvalartíma geti seinkað laufgun birkis (Freer-Smith 1984), en óljóst var hvaða áhrif mengunin gæti haft á barrtegundir. Í kjölfar gossins var áhugi á að kanna hugsanleg áhrif loftmengunar á tré og annan gróður á Austurlandi, ekki síst í ljósi þess að mikil loftmengun varð á svæðinu (Sigurður Reynir Gíslason o.fl. 2015).

Ákveðið var að taka sýni af trjám á nokkrum stöðum á Austurlandi til að kanna áhrif loftmengunar á þau vorið 2015, skömmu eftir goslokin í Holuhraunsgosinu, auk þess sem gert var ráð fyrir að gera frekari úttekt til að meta skemmdir á trjám þegar liði á sumarið. Að auki var hluti þeirra mæltreita sem lagðir voru út árið 2002 í verkefninu SkógVist endurmældir í þeim tilgangi að kanna áhrif gossins á gróðurfar.

Aðferðir

Efnainnihald trjáa

Þann 19. maí 2015 var sýnum safnað af birki, lerki og furu á fjórum stöðum á Austurlandi; Litla Steinsvaði í Hróarstungu, Sturluflöt í Fljótsdal, Mjóanesi á Völlum og á Reyðarfirði. Annars vegar var safnað brumsýnum á birki og lerki og hins vegar furunálum (1. mynd). Í öllum tilfellum var klipptur sproti af trjánum, settur í plastpoka og geymdur í kæli þar til hægt var að vinna úr þeim á Mógilsá.



1. mynd. Sýnataka á nálum af (a) lerki, (b) heilbrigðri stafafuru og (c) furu með rauðar, skemmdar nálar á Austurlandi í maí 2015, í kjölfar Holuhraungossins. (Ljós. ESO).

Sýnin af barrnállum stafafuru voru flokkuð í þrjá flokka eftir því hve skemmdar nálarnar voru: i) heilbrigðar nálar (grænar), ii) nálar sem voru nýbyrjaðar að skemmast (gular) og iii) mikið skemmdar nálar (rauðar) (1. mynd; 1. tafla).

Sýni voru skoluð með afjónuðu vatni, viktud og þurrkuð áður en þau voru send til efnagreiningar. Styrkur kalsíums (Ca), fosfórs (P), magnesíums (Mg), natríums (Na), brennisteins (S), járns (Fe), mangans (Mn), zinks (Zn) og kopars (Cu) var mældur í þurrefni sýnanna í ICP-MS tæki hjá Efnagreiningu ehf. á Hvanneyri.

Efnainnihald furunála úr mismunandi skemmdarflokkum var borið saman með fervikagreiningu (ANOVA) eða Kruskal-Wallis prófi ef gögnin voru ekki normaldreifð.

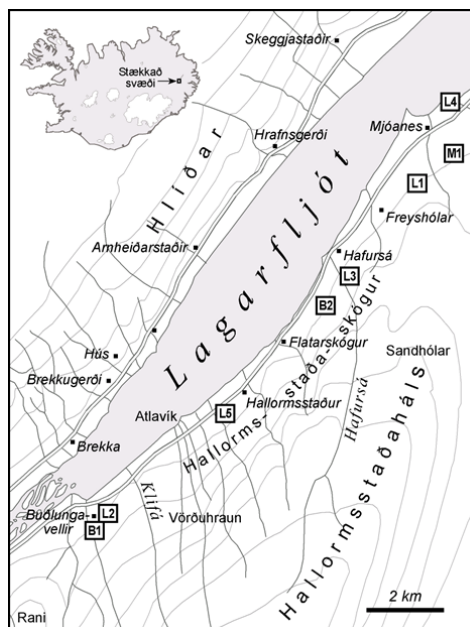
1. tafla. Fjöldi sýna sem tekin voru af birki, lerki og furu á Austurlandi í maí 2015. Furusýnum er skipt upp eftir skemmdarflokkum.

	Birki	Lerki	Fura		
			Grænar nálar	Gular nálar	Rauðar nálar
Sýnatökustaður					
Litla Steinsvað	3	3	2	3	3
Sturluflöt	3	3	3	3	1
Mjóanes	3	3	3	3	1
Reyðarfjörður	3	3	1	3	1

Vorið 2015 var fylgst með laufgun lerkis og birkis á Austurlandi. Gert var ráð fyrir frekari sýnatökum á brumum, laufum og nálum ef augljósar skemmdir á gróðri kæmu fram er leið á sumarið 2015. Þar sem þær skemmdir urðu ekki verulegar var hætt við þá úttekt.

Breytingar á gróðurfari

Gróður var mældur í átta mæliteigum í ágúst 2015, sem lagðir voru upphaflega út árið 2002 og liggja austan Lagarfljóts á Fljótsdalshéraði, frá Mjóanesi í norðri og suður að Buðlungavöllum (2. mynd). Fimm mæliteiganna eru í 25-63 ára gömlum síberiulerkiskógum (L1-5), þar sem L1 er yngsti mæliteigurinn og L5 sá elsti. Tveir mæliteigar eru í birkiskógi, annars vegar í ungum sjálf-sánum birkiskógi á Buðlungavöllum (B1) og hins vegar í gamalgrónum skógi í Hallormstað (B2). Einnig var mæliteigur í skóglausu mólendi (M1). Sjá einnig Bjarni D. Sigurðsson o.fl. (2017) fyrir aldur skóga og upplýsingar um jarðvegspætti. Athuganir ársins 2015 voru bornar saman við athuganir ársins 2002 innan hvers mæliteigs með t-prófi.

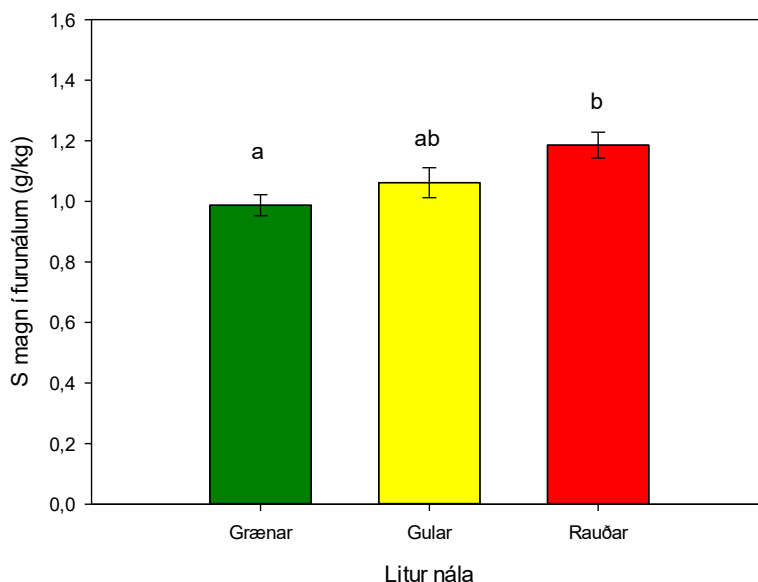


2. mynd. Mæliteigar á Fljótshálsa. L1-L5 eru misgamlir lerkiskógar, B1-B2 eru birkiskógar og M1 er mólendi.

Niðurstöður og umræður

Marktækur munur var á styrk brennisteins (S) á milli skemmdaflokkanna þriggja í stafafuru en skemmdar furunálar (rauðar) innihéldu marktækt meira magn af brennisteini en heilbrigðar furunálar (grænar) (3. mynd). Af þessu má álykta að þær sýnilegu skemmdir á furunálum sem sást vorið 2015 megi að minnsta kosti að hluta rekja til brennisteinsmengunar í lofti.

Aðrar niðurstöður efnamælinga á nálum furu og brumum birkis og lerkis á Austurlandi má sjá í 2. töflu, en ekki reyndist vera marktækur munur milli skemmdaflokkanna þriggja í stafafuru fyrir flest efnin sem mæld voru. Styrkur efna í brumum birkis og lerkis (2. tafla) var nokkuð í samræmi við sambærilegar rannsóknir í óstressuðum birki og barrtrjám í nágrannalöndunum (t.d. Ericsson 1994, Alriksson & Eriksson 1998), og því benti ekkert til að lauffellandi tegundir hafi orðið fyrir neikvæðum áhrifum af gosinu.



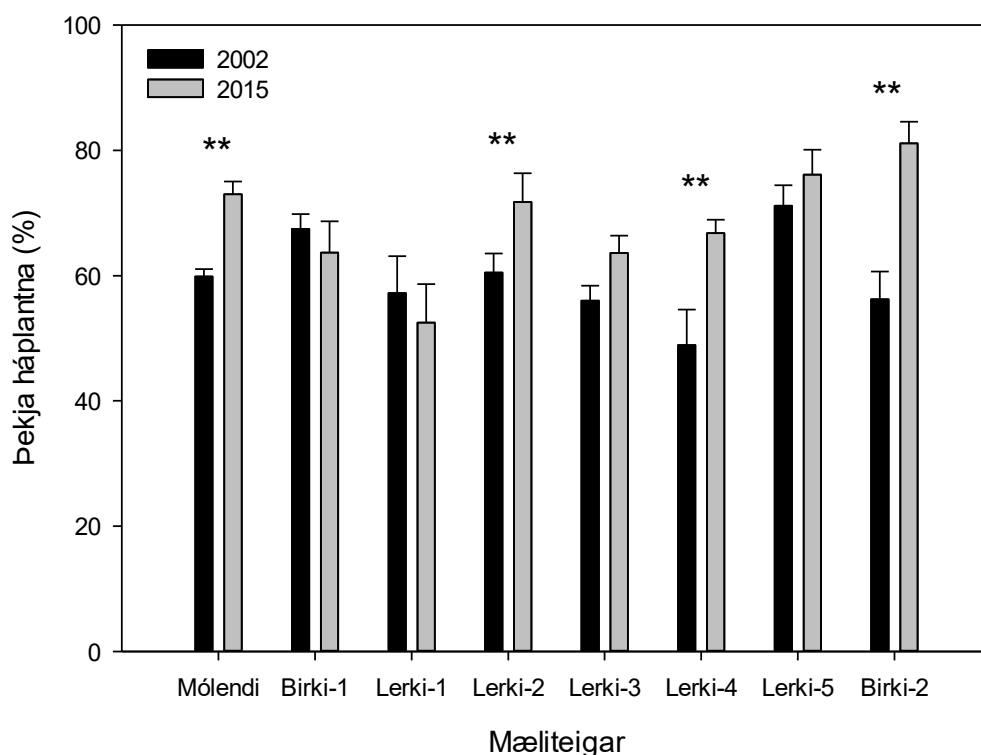
3. mynd. Samanburður á styrk (g/kg) brennisteins (S) í heilbrigðum (grænar), sködduðum (gular) og skemmdum (rauðar) furunálum á Austurlandi. Sami bókstafur fyrir ofan sílu táknar að ekki sé marktækur munur milli mælinga. Lóðréttar línur sýna staðalskekkju (± 1 SE).

2 tafla. Niðurstöður efnamælinga á nálum furu og brumum birkis og lerkis (meðal-þyngd í grömmum m.v. 100% þurrefni). Niðurstöður tölfræðiprófs sýnir mun á skemmdarflokkunum þremur fyrir furunálar (NS = ekki marktækur munur).

	Skemmdarflokkar furunála			Marktækni	Birki	Lerki
	grænar	gular	rauðar			
Ca (g/kg)	2,44	2,26	2,14	NS	3,44	1,81
P (g/kg)	1,43	1,45	1,58	NS	2,29	3,25
Mg (g/kg)	1,43	1,44	1,52	NS	1,75	1,77
K (g/kg)	4,31	4,75	4,90	NS	5,07	10,00
Na (g/kg)	0,16	0,96	1,00	H=12,17 P=0,002	0,90	1,26
S (g/kg)	0,99	1,06	1,19	F=3,65 P=0,041	1,18	1,50
Fe (mg/kg)	76,29	96,45	83,27	NS	823,83	951,22
Mn (mg/kg)	78,33	66,69	64,31	NS	59,77	266,14
Zn (mg/kg)	122,93	49,23	52,00	H=14,39 P<0,001	140,45	29,43
Cu (mg/kg)	2,83	3,23	3,59	NS	8,66	8,97

Þegar bornar voru saman niðurstöður gróðurmælinga 2002 og 2015 kom í ljós að þekja hafði aukist í helmingi mæliteiganna (4. mynd); hún var marktækt hærri í mólendinu M1, lerkiteigunum L2 og L4 og einnig eldri birkiteignum B2. Þessar niðurstöður benda eindregið til þess að þekja og gróska háplantna hafi verið meiri árið 2015 samanborið við 2002 og sýna því engin neikvæð tengsl á milli mengunar frá Holuhraungosinu við þekju háplantna.

Aukna þekju háplantna má eflaust tengja við hagstæð skilyrði í veðurfari á undanförunum árum. Í mæliteig L1, yngsta lerkiskóginum, voru hins vegar merki um að þekju háplantna hafi hnignað frá 2002, sem tengist þá frekar því að skógurinn hafi þéttst, en árið 2002 var mæliteigurinn opinn, trén fremur lágvaxin og ljós náði vel niður á botngróðurinn (Bjarni D. Sigurdsson o.fl. 2005, Ásrún Elmarsdóttir o.fl. 2011).



4. mynd. Þekja háplantna (%) árið 2002 og 2015 í mólendi, birki- og lerkiteigum á Fljótsdalshéraði. ** = marktækur munur ($p < 0,05$) milli ára. Lóðréttar línur sýna staðalskekkju (+1 SE).

Á meðan á gróðurmælingum stóð sáust engin merki um skemmdir á botngróðri eða trjám sem rekja mætti til áhrifa gossins í Holuhrauni. Mikil gróska einkenndi almennt allan botngróður í mæliteigum, og því ekki sjáanlegt að súr ákoma frá gosmekkinum hafi haft nein meiriháttar áhrif á botngróður skóganna eða gróðurfur mólendisins. Ekkert gjóskufall átti sér stað á Fljótsdalshéraði frá Holuhraungosinu og því voru engin bein áhrif á gróður svæðisins.

Á meðan á gróðurmælingum stóð sumarið 2015 bar ekki á neinum skemmdum á trjám eða öðrum gróðri og þá um vorið varð engin seinkun á laufgun birkis samkvæmt athugunum. Því þótti ekki ástæða til að fara í frekari sýnatöku eða úttekt á áhrifum gossins á trjágróður. Niðurstöðurnar benda þó til þess að brennisteinn í lofti hafi haft áhrif á vetrarskemmdir í furu og má ætla að þau áhrif megi rekja til mengunar frá gosinu, en þessi áhrif voru ekki mjög útbreidd og þau ullu ekki neinum mælanlegum skemmdum til langframa.

Heimildir

Alriksson, A. & Eriksson, H.M. 1998. Variations in mineral nutrient and C distribution in the soil and vegetation compartments of five temperate tree species in NE Sweden. *Forest Ecology and Management* 108: 261-273.

Ásrún Elmarsdóttir, Bjarni D. Sigurðsson, Borgþór Magnússon, Bjarni E. Guðleifsson, Edda S. Oddsdóttir, Erling Ólafsson, Guðmundur Halldórsson, Guðriður Gyða Eyjólfssdóttir, Kristinn H. Skarphéðinsson, María Ingimarsdóttir og Ólafur K. Nielsen 2007. ICEWOODS: Age-related dynamics in biodiversity and carbon cycling of Icelandic woodlands. Experimental design and site descriptions. Í: TemaNord 2007:508. Proceedings of the AFFORNORD conference. Effects of afforestation on ecosystem, landscape and rural development. Reykholt, Iceland 200, bls. 105-112.

Ásrún Elmarsdóttir, Bjarni D. Sigurðsson, Edda Sigurðis Oddsdóttir, Arne Fjellberg, Bjarni E. Guðleifsson, Borgþór Magnússon, Erling Ólafsson, Guðmundur Halldórsson, Guðmundur A. Guðmundsson, Guðriður Gyða Eyjólfssdóttir, Kristinn Haukur Skarphéðinsson, María Ingimarsdóttir og Ólafur K. Nielsen. 2011. Áhrif skógræktar á tegundaauði. *Náttúrufræðingurinn* 81(2): 69-81.

Bjarni Diðrik Sigurðsson, Borgþór Magnússon, Ásrún Elmarsdóttir & Brynhildur Bjarnadóttir. 2005. Biomass and composition of understory vegetation and the forest floor carbon stock across Siberian larch and mountain birch chronosequences in Iceland. *Annals of Forest Science* 62: 881-888.

Bjarni Diðrik Sigurðsson, Gunnhildur E. Gunnarsdóttir, Ásrún Elmarsdóttir, Borgþór Magnússon & Edda S. Oddsdóttir. 2017. 11. kafli. Mælingar á sýrustigi jarðvegs í mólendi og skógum á Fljótsdals-héraði fyrir og eftir Holuhraungosið. *Rit LbhÍ* 83: 63-72.

Björn Traustason. 2013. Flatarmál skóglendis flokkað eftir sveitarfélögum og skógræktarfélögum. *Skógræktarritið* 2013(1): 46-50.

De Vries, W., Klap, J. M., & Erisman, J. W. 2000. Effects of environmental stress on forest crown condition in Europe. Part I: Hypotheses and approach to the study. *Water, Air, and Soil Pollution*, 119(1): 317-333.

Ericsson, T. 1994. Nutrient dynamics and requirements of forest crops. *New Zealand Journal of Forestry Science* 24: 133-168.

Freer-Smith, P. H. 1984. The responses of six broadleaved trees during long-term exposure to SO₂ and NO₂. *New Phytologist* 97(1): 49-61.

Klap, J. M., Oude Voshaar, J. H., De Vries, W., & Erisman, J. W. 2000. Effects of Environmental Stress on Forest Crown Condition in Europe. Part IV: Statistical Analysis of Relationships. *Water, Air, and Soil Pollution*, 119(1): 387-420.

Ozolincius, R., & Stakenas, V. 2003. Effects of air pollution and droughts on forest condition in Lithuania. *Biologija*, 2: 99-101.

Sigurður Reynir Gíslason, Stefánsdóttir G., Pfeffer M.A., Barsotti S., Jóhannsson Th., Galeczka I., Bali E., Sigmarsson O., Stefánsson A., Keller N.S., Sigurðsson Á., Bergsson B., Galle B., Jacobo V.C., Arellano S., Aiuppa A., Jónasdóttir E.B., Eiríksdóttir E.S., Jakobsson S., Guðfinnsson G.H., Halldórsson S.A., Gunnarsson H., Haddadi B., Jónsdóttir I., Thordarson Th., Riishuus M., Högnadóttir Th., Dürig T., Pedersen G.B.M., Höskuldsson Á. & M.T. Gudmundsson, 2015. Environmental pressure from the 2014-15 eruption of Bárðarbunga volcano, Iceland. *Geochemical Perspectives Letters* 1: 84-93.

Stravinskiene, V., Bartkevicius, E., & Plausinyte, E. 2013. Dendrochronological research of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) radial growth in vicinity of industrial pollution. *Dendrochronologia* 31(3): 179-186.

11.

kafli

Mælingar á sýrustigi jarðvegs í mólendi og skógum á Fljótsdalshéraði fyrir og eftir Holuhraunsgosið

Bjarni Diðrik Sigurðsson¹, Gunnhildur E. Gunnarsdóttir¹, Ásrún Elmarsdóttir²,
Borgþór Magnússon² & Edda S. Oddsdóttir³

¹Landbúnaðarháskóli Íslands, ²Náttúrufræðistofnun Íslands, ³Rannsóknastöð skógræktar, Mógilsá

Inngangur

Holuhraunsgosið sem stóð frá 31. ágúst 2014 til 27. febrúar 2015 losaði um 11-12 milljón tonn af brennisteinsdíoxíði (SO_2) upp í andrúmsloftið (Sigurður R. Gíslason o.fl. 2015). Það er vel þekkt að losun SO_2 frá t.d. þungaiðnaði, getur myndað brennisteinssýru í andrúmslofti og valdið súru regni og ef magn sýru sem þannig berst á landið er mikið þá getur þetta haft mikil neikvæð áhrif á lífríkið (ApSimon o.fl. 2014). Til dæmis varð mikill skógardauði í mið-Evrópu á áttunda og níunda áratug síðustu aldar rakinn til áhrifa súrrar úrkomu (e. acid rain) vegna SO_2 mengunar frá iðnaði (Kandler & Innes 1995). Magn SO_2 frá Holuhraunsgosinu var mjög mikið og til samanburðar var heildarlosun SO_2 frá Evrópu-sambandinu og EES löndunum 7,3 milljónir tonna árið 2011 (European Environment Agency 2015).

Þegar atvinnuvega- og nýsköpunarráðuneytið óskaði eftir tillögum að rannsóknaverkefnum til að meta áhrif Holuhraunsgossins haustið 2014 varð það strax ljóst að mjög gagnlegt væri að bera saman niðurstöður mælinga á umhverfispáttum við eldri mælingar gerðar fyrir gos.

Umfangsmiklar mælingar höfðu verið gerðar í rannsóknaverkefninu SkógVist á sýrustigi í jarðvegi í skógum og beittu mólendi á Fljótsdalshéraði og Borgarfirði á árunum 2002-2005 (Bjarni D. Sigurðsson o.fl. 2005, Ásrún Elmarsdóttir o.fl. 2011). Ákveðið var að endurtaka sýnatöku á rannsóknareitunum á Fljótsdalshéraði haustið 2015 til að athuga hvort marktæk áhrif findust eftir Holuhraunsgosið.

Þessi rannsókn miðaði að því að meta áhrif eldsumbrotanna á sýrustig í jarðvegi í útjörð á Fljótsdalshéraði haustið eftir gosið og bera niðurstöðurnar saman við eldri mælingar frá sömu rannsóknareitum.

Aðferðir

Árið 2002 voru valdir átta mæliteigar í mólendi (M), birkiskógum (B) og lerkiskógum (L) á Fljótsdalshéraði (1. mynd) í sambandi við rannsóknir á áhrifum skógræktar á lífríkið og aðra umhverfispætti (Bjarni D. Sigurðsson o.fl. 2005, Ásrún Elmarsdóttir o.fl. 2011). Hver mæliteigur var 3-9 ha af stærð. Innan hvers mæliteigs voru lagðir út 5 mælireitir (2 x 50 m) eftir GPS hnítum sem staðsett voru tilviljanakennt. Síðan voru fjórir 50x20 cm smáreitir lagðir út, þar sem uppskerumæling var gerð á botngróðri og feyrulagi og síðan voru tekin jarðvegssýni í 0-10 og 10-30 cm dýpi í haustið 2002. Haustið 2015 voru ný uppskeru- og jarðvegssýni tekin við hliðina á upphaflegu uppskerureitunum á fjórum af fimm mælireitum á hverjum mæliteig (alls 32 mælireitir). Jarðvegssýnin úr öllum smáreitum á sama mælireit voru sameinuð áður en mælingar á sýrustigi fóru fram.

Sameinuð jarðvegssýni sem þurrkuð höfðu verið við 40°C í 48 klst voru sigtuð í gegnum 2 mm sigti og blönduð afjónuðu vatni í hlutföllunum 1:2,5 (per massa) og hrist í 20 mín. Eftir að hafa staðið í 2 klst voru sýnin hrist aftur í stutta stund og sýrustig þeirra mælt með Two Channel Benchtop pH/mV/ISE sýrustigsmæli (Hanna Instruments, Temse, Belgíu). Tvö hlutsýni voru mæld úr hverju sameinuðu jarðvegssýni og meðaltal tekið við frekari úrvinnslu.

Breyting á meðalsýrustigi í mælireitum var greind með pöruðu t-prófi og samband súrnunar og upphaflegs sýrustigs í reitum var greint með aðhvarfsgreiningu með tölfraeðiforritinu SAS 9.2.



1. mynd. Staðsetning mæliteiga á Fljótsdalshéraði. M= mólendi, B= birkiskógar og L= lerki-skógar. Í skógunum stendur tölustafurinn fyrir hlutfallslegan aldur (sjá 1. töflu). Mynd: Anette Meier.

Niðurstöður og umræður

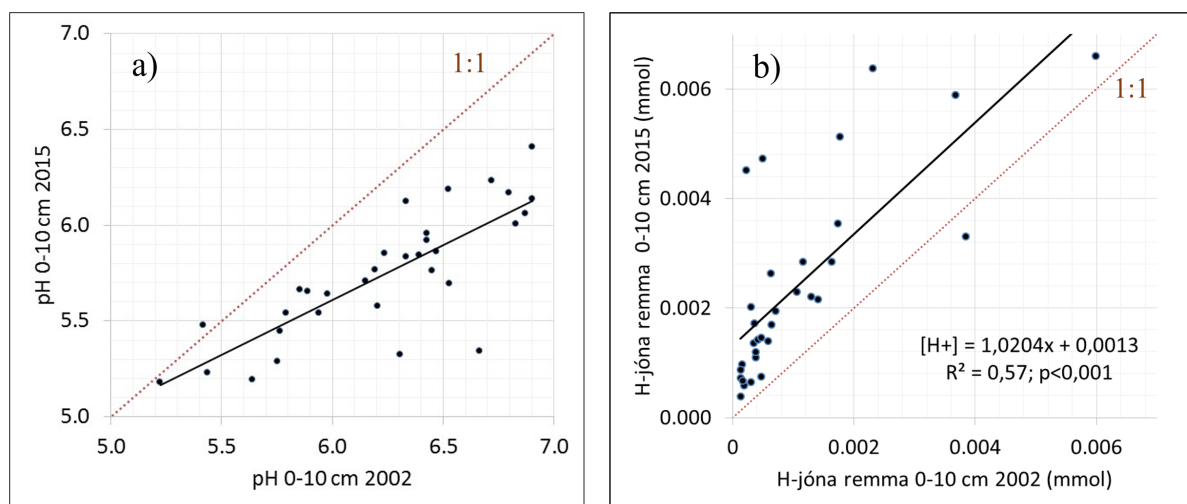
Sýrustig í 0-10 cm jarðvegslagi allra 32 mælireitanna á Fljótsdalshéraði var á bilinu 5,2 til 6,9 árið 2002 en á bilinu 5,2 til 6,4 haustið 2015 (1. tafla, 2a. mynd). Samanburður á einstökum reitum sýndi að hámarktæk súrnun, upp á 0,27 á pH skala að meðaltali, hafði orðið þegar sömu reitir voru endurmældir eftir Holuhraunsgosið haustið 2015 ($p < 0,001$ parað t-próf; 2a. mynd). Þar sem pH skalinn er ekki línulegur þýðir sú súrnun að heildarmagn H^+ jóna var ríflega tvöfalt meira í jarðveginum haustið eftir Holuhraunsgosið (127% aukning á magni H^+ að jafnaði) samanborið við árið 2002 (2b. mynd).

Þegar sýrustig einstakra mælireita var borið saman á milli 2002 og 2015 kom í ljós súrnunin á pH skala var einnig mest í þeim reitum sem voru basískastir (með hæst pH gildi; 2a. mynd). Þetta er einmitt sú svörun sem búast má við ef að ytri áhrif, svo sem ákoma súrrar úrkomu, valda súrnuninni. Ástæðan er aftur hinn ólínulegi pH skali; ef sama magni súru er bætt við kerfið þá verður súrnunin á pH skala minni eftir því sem sýrustigið (pH) er lægra og þar sem heildarmagn súru í kerfinu er mest.

1. tafla. Helstu lýsibreytur fyrir mæliteiga á Fljótsdalshéraði sem sýndir eru á 1. mynd. „Staða“ gefur almenna stöðu landnýtingar árið 2002 og 2015. „Stærð“ er flatarmál teigs í ha, „Upphaf“ er ár gróðursetningar eða ár sem sauðffjárbeit var aflétt*. Í efstu 10 cm í jarðvegi stendur „pH“ fyrir sýrustig mælt í vatni, „N“ er heildar köfnunarefni í mg/g og „C/N“ er hlutfall kolefnis og köfnunarefnis árið 2002.

Mæliteigur	Staða 2002	Staða 2015	Stærð ha	Upphafs ár	Jarðvegur (0-10 cm) 2002		
					pH	N	C/N
Mólendi M1	Beitt	Friðað	7,4	2003*	6,7	0,41	15,6
Birki B1	Ungskógur	Lokaður	5,1	1979*	6,0	0,37	20,3
Birki B2	Í endurnýjun	Í endurnýjun	6,1	1905*	5,5	0,42	22,8
Lerki L1	Opinn	Hálflokaður	4,6	1990	6,5	0,31	16,6
Lerki L2	Hálflokaður	Grisjaður	7,2	1984	6,7	0,23	17,7
Lerki L3	Hálflokaður	Grisjaður	9,5	1983	6,4	0,31	16,6
Lerki L4	Lokaður	Grisjaður	3,2	1966	5,9	0,37	18,4
Lerki L5	Grisjaður	Tvígrisaður	7,3	1952	6,1	0,33	20,8

* beit aflétt.



2. mynd. a) Sýrustig (í H₂O) í yfirborðslagi jarðvegs (0-10 cm) fyrir gos (2002) og eftir (2015) í öllum rannsóknareitum. Svört lína sýnir leitnina. Brúna punktalínan sýnir 1:1 sambandið (engin breyting). b) Remma H-jóna (mM H₃O⁺) í sömu rannsóknareitum.

Til að skoða áhrifin á heildarmagn sýru í jarðveginum þá var pH skalanum umbreytt í heildarmagn H⁺ jóna í hverjum reit (2b. mynd). Þegar það var gert kom í ljós hámarktækt línulegt samband þar sem hallatalan var ekki martækt frábrugðin 1,0 og skurðpunkturinn var hámarktækur ($p < 0,001$) upp á 0,0013 mmol H₃O⁺ dm⁻³. Þetta þýðir með öðrum orðum að súrnun í útjörð var að jafnaði sú sama á öllum mæliteigunum á Fljótsdalshéraði, óháð því hvort svæðin voru mólendi, birkiskógar eða ræktaðir lerkiskógar. Þessar niðurstöður styðja þá túlkun að súrnunin stafi af súrri úrkomu sem varð á meðan á Holuhraungosinu stóð.

Þrátt fyrir að magn síru í jarðveginum hafi verið rúmlega tvöfalt meira haustið eftir Holuhraungosið, þá var súrnunin á pH skala ekki það mikil að búast mætti við mælanlegum neikvæðum áhrifum á gróður eða lífverur. Lægsta sýrustig sem mældist var 5,2 á pH skala, en oft er miðað við að sýrustig í jarðvegi þurfi að fara niður fyrir 5,0 til að viðkvæmar lífverur verði fyrir áhrifum og niður fyrir 4,3-3,8 áður en mælanleg neikvæð áhrif fara að verða á flestar lífverur (Rengel 2003).

Ályktanir

Sýrustig mældist marktækt lægra í útjörð á Fljótsdalshéraði haustið 2015 miðað við sýrustig árið 2002. Þrátt fyrir súrnunina þá var hún vel innan þolmarka lífvera og því var engra neikvæðra áhrifa að vænta á lífríkið. Að hluta til má þakka þetta hárra jónarýmd og háu sýrustigi í íslenskum eldfjallajarðvegi, en aðallega því hversu lítill hluti þess SO₂ sem losnaði í Holuhraungosinu náði að hvarfast yfir í brennisteinssýru yfir landinu (Sigurður Reynir Gíslason o.fl. 2015).

Þakkir

Átvinnuvega- og nýsköpunarráðuneytið fær þakkir fyrir að fjármagna endurmælingarnar á rannsóknareitum SkógVistar á Fljótsdalshéraði 2015. Helena Marta Stefánsdóttir fær þakkir fyrir aðstoð við sýnatöku.

Heimildir

ApSimon, H., D. Pearce & E. Ozdemiroglu. 2014. *Acid rain in Europe: counting the cost*. Routledge, New York.

Ásrún Elmarsdóttir, Bjarni D. Sigurðsson, Edda S. Oddsdóttir, A. Fjellberg, Bjarni E. Guðleifsson, Borgþór Magnússon, . . . & Ólafur K. Nielsen. 2011. Áhrif skógræktar á tegundaauðgi. *Náttúrufræðingurinn* 81(2), 69-81.

Bjarni D. Sigurðsson, Borgþór Magnússon, Ásrún Elmarsdóttir & Brynhildur Bjarnadóttir. 2005. Biomass and composition of understory vegetation and the forest floor carbon stock across Siberian larch and mountain birch chronosequences in Iceland. *Annals of Forest Science* 62: 881–888.

Crippa, M., G. Janssens-Maenhout, F. Dentener, D. Guizzardi, K. Sindelarova, M. Muntean, . . . & C. Granier. 2016. Forty years of improvements in European air quality: regional policy-industry interactions with global impacts. *Atmos. Chem. Phys.* 16: 3825-3841.

European Environment Agency. 2015. Sótt af: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/eea-32-sulphur-dioxide-so2-emissions-1/assessment-3>, 3. jan, 2017.

Kandler, O. & J.L. Innes. 1995. Air pollution and forest decline in Central Europe. *Environmental Pollution* 90: 171-180.

Rengel, Z. 2003. *Handbook of soil acidity*. Marcel Dekker Inc. Basel.

12.

kafli

Áhrif eldgossins í Holuhrauni á túngróður og jarðveg túna

Guðni Þorvaldsson¹ & Borgar Páll Bragason²

¹ Landbúnaðarháskóli Íslands, ² Ráðgjafarmiðstöð landbúnaðarins

Inngangur

Það er vel þekkt að eldgos geta haft afdrifarík áhrif á gróður og jarðveg. Aska getur borist langar leiðir og lagst yfir gróður á stórum svæðum. Ef öskulagið er ekki þykkt hefur það ekki skaðleg áhrif til lengri tíma lítið en getur borið næringarefni í jarðvegin og bætt hann. Þykkt öskulag getur hins vegar kaffært gróður og skemmt landið til lengri eða skemmri tíma. Þar sem hraun fer yfir gróið land verða varanlegar skemmdir.

Eldgosum fylgja einnig lofttegundir sem geta verið skaðlegar mönnum og dýrum og stundum gróðri. Í Holuhraungosinu kom upp mikið af lofttegundum, einkum vakti mikið magn brennisteins (S) athygli. Mælingar sýndu að um $11,8 \pm 4,1$ Mt af brennisteinstvíldi (SO_2) hefðu komið upp í gosinu (Gíslason o.fl. 2015). Ef brennisteinninn oxast yfir í brennisteinssýru í andrúmsloftinu ($2\text{SO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{SO}_4$) getur úrkoman súrnað og brennt gróðurinn.

Árstíminn sem gosið stóð yfir og fleiri umhverfisþættir gerðu það að verkum að þetta ferli gekk mjög hægt fyrir sig (Gíslason o.fl. 2015). Árið 1862 varð eldgos norðan undan Vatnajökli sem hófst í lok júní. Í því gosi brann gróður eftir að súrt regn féll á hann (Þjóðólfur 1862). Ef Holuhraungosið hefði orðið að sumri til er hætt við að slíkar skemmdir hefðu orðið á gróðri.

Brennisteinn er nauðsynlegur plöntum þar sem hann er m.a. mikilvægt byggingarefni próteina. Plöntur taka hann upp í formi sulfats (SO_4^{2-}). Sulfatið er óstöðugt, binst ekki í jarðveginum og skolast auðveldlega út. Við útskolun getur sulfatið tekið með sér einhverjar katjónir og jarðvegurinn súrnar. Ef styrkur sulfats verður mikill í jarðvegslauninni getur myndast gifs (CaSO_4) sem er torleyst.

Í votlendi getur brennisteinn safnast fyrir og líklegt að hann afoxist og myndi t.d. sambönd við járn (FeS) eða að brennisteinsvetni (H_2S) verður til (Lamers o.fl. 2013).

Bilið milli skorts- og eitrunarmarka brennisteins hjá búfé er ekki breitt. Oft er talað um að skortsmörk liggi við 0,1% S í þurrefni en eitrunarmörk fyrir jörturdýr við 0,4% S í þurrefni (Kandylis 1984). Eitrunarmörk fyrir hross eru hærri.

Markmið þessa verkefnis var að athuga hvort mikið útstreymi brennisteins í Holuhraungosinu hefði áhrif á brennisteinsmagn jarðvegs og gróðurs túna sem og sýrustig jarðvegsins. Enn fremur var flúor mældur í gróðri haustið 2014.

Efni og aðferðir

Grassýni

Dagana 29.-30. september 2014 tók Ásdís Helga Bjarnadóttir starfsmaður hjá Matvælastofnun grassýni úr túnnum á átta bæjum á Austurlandi. Túnin höfðu öll verið slegin a.m.k. einu sinni um sumarið. Ásdís Helga tók aftur sýni úr þessum sömu túnnum 18. júní 2015. Til voru mælingar á grassýnum frá fimm af þessum átta bæjum sem gerðar voru árið 2013, þ.e. öllum bæjunum nema Skriðuklaustri, Hallbjarnarstöðum og Berufirði II. Þær mælingar voru notaðar til viðmiðunar í þessari athugun. Bæirnir og athugasemdir skráðar við sýnatöku 2015 eru sýndar í 1. töflu:

1. tafla. Sýnatökustaðir vorið 2015.

Bæir	Athugasemdir
Egilsstaðir í Fljótsdal	Fimmta stykki neðan vegar. Töluverður smári í túninu. Fé í túninu.
Skriðuklaustur í Fljótsdal	Kirkjuflöt, fuglaskítur í túni en ekki sauðfé.
Arnheiðarstaðir í Fljótsdal	Tún neðan vegar. Mikill fuglaskítur í túni og lambfé.
Setberg í Fellum	Tún neðan vegar, næst veginum. Mikill fuglaskítur.
Arnhólsstaðir í Skriðdal	Flugbrautin, tún neðan vegar. Nýáborið
Hallbjarnarstaðir í Skriðdal	Tún við gatnamót, óáborið við sýnatöku. Snarrót í túninu.
Gilsá í Breiðdal	Tún út frá oliutanki, mikil snarrót. Beitt af lambfé.
Berufjörður II í Berufirði	Ofan vegar, næst bænum. Nýleg ræktun og áborin. Friðað.

Sýnin voru undirbúin hjá Landbúnaðarháskóla Íslands og Arngrímur Thorlacius mældi öll efni nema flúor en hann var dreginn út og mældur hjá Nýsköpunarmiðstöð. Flúor var ekki mældur í sýnunum sem tekin voru vorið 2015 vegna þess hve gildin voru lág um haustið.

Grassýni voru tekin úr 25 túnnum víðsvegar á landinu af starfsmönnum Ráðgjafarmiðstöðvar landbúnaðarins. Sýnin voru tekin á tímabilinu 2. júní til 23. júní 2015. Sýni frá ofangreindum bæjum á Austurlandi eru einnig í þessu 25 sýna safni. Meðalsýnatökudagur var 12. júní.

Auk þessa voru niðurstöður heyeftnagreininga hjá bændum fyrir árin 2013, 2014 og 2015 bornar saman til að skoða hvort Holuhraunsgosið hefði haft einhver áhrif á mæld efni í heyinu.

Jarðvegssýni

Jarðvegssýni voru tekin af starfsmönnum Ráðgjafarmiðstöðvar landbúnaðarins úr 33 túnnum víðsvegar um landið haustið 2014 (5 cm dýpt). Jarðvegssýni voru tekin úr sömu túnnum vorið 2015 (5 cm dýpt) eftir því sem það var hægt, ekki var þó hægt að taka úr öllum túnunum bæði árin. Sýrustig var mælt í sýnunum sem og innihald ýmissa efna. Greiningar voru gerðar hjá Efnagreiningu ehf. á Hvanneyri.

Auk þessa voru niðurstöður greininga á jarðvegssýnum frá bændum haustin 2014 og 2015 bornar saman. Þessi sýni voru ekki úr sömu túnnum bæði árin, heldur var þetta úrtak úr bændasýnum þessi ár, 170 sýni 2014 en 78 sýni 2015. Þessar jarðvegsgreiningar voru fengnar úr meistaraverkefni Sigurðar Max Jónssonar (óbirt).

Niðurstöður og umræður

Grassýni

Í 2.- 4. töflu eru sýndar niðurstöður efnagreininga á grassýnum frá nokkrum bæjum á Austurlandi. Sýnin í 2. töflu eru frá árinu 2013, ári fyrir gosið í Holuhrauni. Sýnin í 3. töflu voru tekin í lok september 2014 og þá var gosið í fullum gangi. Sýnin í 4. töflu voru tekin 18. júní 2015, en þá var komið á fjórða mánuð frá því gosinu lauk.

2. tafla. Niðurstöður greininga á grassýnum frá Austurlandi sem tekin voru sumarið 2013.

Bæir	Ca %	Mg %	K %	Na %	P %	S %	Fe mg/kg	Mn mg/kg	Cu mg/kg	Zn mg/kg	F mg/kg
Egilsstaðir	0,34	0,19	2,01	0,03	0,31	0,19	148,1	147,2	5,9	25	9,2
Setberg	0,34	0,24	1,25	0,04	0,21	0,19	164,4	90,5	7,5	25	1,6
Arnheiðarstaðir	0,34	0,29	1,67	0,03	0,29	0,20	226,9	69,8	7,8	26	0,8
Gilsá	0,30	0,22	1,46	0,13	0,37	0,25	113,6	221,9	7,6	28	9,7
Arnhólsstaðir	0,28	0,26	1,82	0,14	0,34	0,25	138,7	203,1	8,8	31	5,4
Meðaltal	0,32	0,24	1,64	0,07	0,30	0,22	158,3	146,5	7,5	26,7	5,3

3. tafla. Niðurstöður greininga á grassýnum frá Austurlandi haustið 2014. Einnig sýnd meðaltöl sömu fimm bæja og mældir voru 2013 (2. tafla).

Bæir	Ca %	Mg %	K %	Na %	P %	S %	Fe mg/kg	Mn mg/kg	Cu mg/kg	Zn mg/kg	F mg/kg
Egilsstaðir	0,49	0,25	2,15	0,01	0,32	0,28	212,5	62,3	7,1	23,4	13,0
Skriðuklaustur	0,56	0,36	2,42	0,01	0,43	0,40	171,5	110,6	9,8	31,0	6,0
Arnheiðarstaðir	0,43	0,22	2,44	0,01	0,49	0,37	99,4	311,7	7,5	46,8	6,0
Setberg	0,60	0,44	1,14	0,06	0,38	0,49	157,3	108,9	12,3	27,4	3,0
Arnhólsstaðir	0,80	0,56	1,05	0,17	0,38	0,45	135,2	152,8	16,0	40,5	8,0
Hallbjarnarstaðir	0,91	0,42	1,14	0,08	0,33	0,46	148,0	62,0	12,8	34,1	5,0
Gilsá	0,47	0,35	1,33	0,29	0,38	0,39	154,7	482,9	9,2	51,8	3,0
Berufjörður II	0,60	0,29	1,27	0,01	0,26	0,27	110,3	340,4	5,3	23,1	1,0
Meðaltal	0,61	0,36	1,62	0,08	0,37	0,39	148,6	204,0	10,0	34,8	5,6
Meðaltal 5 bæja	0,56	0,36	1,62	0,11	0,39	0,40	151,8	223,7	10,4	38,0	6,6

4. tafla. Niðurstöður greininga á grassýnum frá Austurlandi vorið 2015. Einnig sýnd meðaltöl sömu fimm bæja og mældir voru 2013 (2. tafla).

Bæir	Ca %	Mg %	K %	Na %	P %	S %	Fe %	Mn mg/kg	Cu mg/kg	Zn mg/kg
Arnhólsstaðir	0,24	0,18	1,52	0,01	0,32	0,20	96	183,4	6,0	31,9
Arnheiðarstaðir	0,37	0,22	2,41	0,02	0,41	0,29	119	61,3	8,2	32,5
Hallbjarnarstaðir	0,29	0,18	2,19	0,01	0,41	0,23	119	138,8	7,2	53,0
Gilsá	0,26	0,18	1,40	0,06	0,38	0,29	132	172,4	9,3	46,7
Egilsstaðir	0,32	0,18	2,89	0,01	0,49	0,37	274	52,3	9,1	36,0
Skriðuklaustur	0,49	0,22	1,75	0,03	0,37	0,28	355	46,3	9,1	37,8
Berufjörður II	0,37	0,19	1,94	0,02	0,45	0,39	347	96,7	7,3	26,1
Setberg	0,49	0,24	1,27	0,04	0,35	0,28	103	83,3	7,9	35,2
Meðaltal	0,35	0,20	1,92	0,02	0,40	0,29	193	104,3	8,0	37,4
Meðaltal 5 bæja	0,34	0,20	1,90	0,03	0,39	0,29	145	110,5	8,1	36,5

5. tafla. Niðurstöður greininga á grassýnum af öllu landinu. Meðaltal er einnig reiknað fyrir austurhluta landsins og vesturhluta þess. Mörkin eru við Eyjafjörð og Mýrdalssand.

<i>Austurhluti landsins</i>		Ca	Mg	K	Na	P	S	Fe	Mn	Cu	Zn
Bær	Sveit	%	%	%	%	%	%	%	mg/ kg	mg/ kg	mg/ kg
Dvergasteinn	Eyjafjörður	0,30	0,18	3,04	0,02	0,29	0,32	123	74,9	9,9	36,6
Dvergasteinn	Eyjafjörður	0,40	0,27	1,77	0,04	0,32	0,36	305	95,2	11,0	34,8
Arnhólsstaðir	Skriðdalur	0,24	0,18	1,52	0,01	0,32	0,20	96	183,4	6,0	31,9
Arnheiðarst.	Fljótisdalur	0,37	0,22	2,41	0,02	0,41	0,29	119	61,3	8,2	32,5
Hallbjarnarst.	Skriðdalur	0,29	0,18	2,19	0,01	0,41	0,23	119	138,8	7,2	53,0
Gilsá	Breiðdalur	0,26	0,18	1,40	0,06	0,38	0,29	132	172,4	9,3	46,7
Egilsstaðir	Fljótisdalur	0,32	0,18	2,89	0,01	0,49	0,37	274	52,3	9,1	36,0
Skriðuklaustur	Fljótisdalur	0,49	0,22	1,75	0,03	0,37	0,28	355	46,3	9,1	37,8
Berufjörður II	Berufjörður	0,37	0,19	1,94	0,02	0,45	0,39	347	96,7	7,3	26,1
Setberg	Fell	0,49	0,24	1,27	0,04	0,35	0,28	103	83,3	7,9	35,2
Árbær	Mýrar	0,42	0,24	2,89	0,02	0,53	0,37	161	99,5	14,0	45,1
Hnappavellir 4	Öræfi	0,39	0,26	2,92	0,09	0,56	0,40	164	238,3	7,9	60,6
Þverá	Fljótshverfi	0,31	0,22	2,11	0,03	0,40	0,28	296	85,0	13,2	42,2
Kálfafell	Fljótshverfi	0,36	0,18	1,63	0,02	0,30	0,28	280	120,2	11,2	33,6
Hnappavellir 4	Öræfi	0,38	0,33	1,86	0,17	0,44	0,37	772	341,6	9,8	52,1
Árbær	Mýrar	0,46	0,20	2,88	0,03	0,40	0,32	916	141,3	11,3	36,3
Krossar	Svarfaðard.	0,36	0,19	1,38	0,17	0,33	0,28	116	127,6	7,6	30,4
Meðaltal		0,37	0,22	2,11	0,05	0,40	0,31	275	126,9	9,4	39,5
<i>Vesturhluti landsins</i>											
Skerðingsst.	Hvammssveit	0,34	0,19	1,46	0,03	0,32	0,35	366	65,2	8,8	34,2
Gerðar	Flói	0,27	0,17	2,41	0,02	0,34	0,38	151	57,8	8,8	41,4
Skeiðháholt	Skeið	0,29	0,21	3,38	0,02	0,43	0,48	230	116,0	10,7	55,3
Skeiðháholt 1	Skeið	0,28	0,23	2,37	0,03	0,45	0,41	255	145,5	9,5	56,7
Háafell	Miðdalir	0,33	0,22	2,20	0,03	0,40	0,36	151	162,7	11,6	40,9
Háafell	Miðdalir	0,30	0,25	2,53	0,03	0,43	0,37	218	95,5	8,4	44,4
Reykjavellir	Skagafjörður	0,39	0,23	1,69	0,03	0,24	0,25	85	63,8	9,0	28,4
Reykjavellir	Skagafjörður	0,50	0,28	1,05	0,06	0,31	0,31	188	143,5	13,0	35,8
Viðimelur	Skagafjörður	0,44	0,26	2,45	0,02	0,31	0,33	126	84,5	9,4	27,5
Stokkhólmi	Skagafjörður	0,42	0,36	2,30	0,02	0,40	0,35	1382	41,2	9,3	28,8
Skerðingsst.	Hvammssveit	0,31	0,19	2,32	0,03	0,37	0,43	94	95,8	11,4	31,6
Skeiðháholt 1	Skeið	0,23	0,19	2,71	0,04	0,38	0,29	184	90,2	7,4	39,5
Skeiðháholt 1	Skeið	0,26	0,18	4,04	0,03	0,37	0,31	99	92,9	9,2	45,6
Gerðar	Flói	0,32	0,21	2,34	0,06	0,40	0,34	74	69,4	7,9	48,0
Fagridalur	Mýrdalur	0,40	0,31	2,16	0,22	0,45	0,32	889	248,0	10,4	44,4
Fagridalur	Mýrdalur	0,43	0,30	2,33	0,18	0,49	0,34	737	229,2	10,6	45,6
Meðaltal		0,34	0,24	2,36	0,05	0,38	0,35	327	112,6	9,7	40,5
Meðaltal, allt landið		0,36	0,23	2,23	0,05	0,39	0,33	300	120,0	9,6	40,0

Varðandi brennisteininn vekur athygli að hann var töluvert hærri í sýnunum sem tekin voru haustið 2014 en á sömu bæjum árið áður, enda gosið í fullum gangi (2. og 3. tafla). Í júní 2015 hafði brennisteinn lækkað frá haustinu en var enn nokkuð hærri en venjulega í heysýnum, bæði í sýnunum á Austurlandi og annars staðar á landinu (4. og 5. tafla). Þetta þarf þó ekki alfarið að tengjast gosinu því brennisteinn fellur í grasi eftir því sem liður á sumarið líkt og nitur gerir. Þessi hærri gildi í júní 2015 geta a.m.k. að hluta stafað af því að þau eru að meðaltali tekin fyrir um sumarið en heysýnin almennt hjá bændum. Þegar brennisteinsmælingar í heysýnum árin 2013, 2014 og 2015 eru skoðaðar kemur í ljós að niðurstöðurnar eru þær sömu öll árin (6. tafla). Áhrif eldgossins á brennistein í grasi virðast því hafa verið mjög skammvinn.

6. tafla. Niðurstöður efnagreininga á heysýnum bænda (%), árin 2013 (N=743), 2014 (N=840) og 2015 (N=963).

	2013	2014	2015
Ca	0,37	0,37	0,36
Mg	0,24	0,28	0,24
K	1,94	1,86	1,70
P	0,32	0,32	0,28
S	0,23	0,23	0,23

7. tafla. Niðurstöður efnagreininga og sýrustigsmælinga á jarðvegi úr ýmsum landshlutum haustið 2014. Auðar línur tákna bæi sem voru mældir 2015 og koma fyrir í 8. töflu.

Bæir	Sveit	Ca mg/kg	Mg mg/kg	K mg/kg	Na mg/kg	P mg/kg	S mg/kg	pH
Fagradalur	Mýrdalur	927	282	216	223	143	66	5,47
Fagradalur	Mýrdalur	950	294	352	219	84	71	5,21
Skeiðháholt I	Skeið	972	409	902	58	15	76	5,6
Skeiðháholt I	Skeið	1245	681	2113	94	44	117	5,32
Arbær	Hornafjörður							
Arbær	Hornafjörður	1541	294	282	133	375	43	5,03
Hnappavellir	Öræfi	755	272	282	81	121	29	4,95
Hnappavellir	Öræfi	514	209	164	108	101	65	5,01
Gerðar	Flói	1779	540	905	127	41	118	5,37
Kálfafell II	Fljótshverfi							
Kálfafell II	Fljótshverfi							
Háafell	Miðdalir	3695	910	187	182	51	98	5,23
Háafell	Miðdalir	2373	688	261	133	31	62	5,52
Skerðingsstaðir	Hvammssv.	4750	641	263	146	35	83	5,49
Skerðingsstaðir	Hvammssv.	3613	953	402	140	26	27	5,25
Bustarfell	Vopnafjörður	2854	521	296	97	65	68	5,62
Arnheiðarstaðir	Fljótisdalur	4419	1070	662	196	208	127	5,5
Arnheiðarstaðir	Fljótisdalur	4760	851	494	229	220	103	5,87
Hofteigur	Jökuldalur	4014	632	375	85	32	50	5,88
Hofteigur	Jökuldalur	3198	640	431	160	19	63	5,73
Brú	Jökuldalur	2659	541	747	93	125	70	5,58
Aðalból	Jökuldalur	2108	333	611	118	120	66	5,24
Aðalból	Jökuldalur	2007	361	572	120	206	109	5,16
Reykjavellir	Skagafjörður	2338	902	899	110	56	160	5,25
Reykjavellir	Skagafjörður	3382	1431	1235	111	34	105	5,79
Viðimelur	Skagafjörður							
Stokkhólmi	Skagafjörður							
Dvergasteinn	Eyjafljörður	644	298	241	144	62	112	5,25
Dvergasteinn	Eyjafljörður	3924	852	483	88	10	45	5,85
Krossar	Eyjafljörður	2177	814	935	119	128	90	5,42
Meðaltal		2464	617	572	133	94	81	5,42

8. tafla. Niðurstöður efnagreininga og sýrustigsmælinga á jarðvegi úr ýmsum landshlutum vorið 2015. Sömu tún og í 7. töflu. Einnig er sýnt meðaltal sömu 25 bæja sem mældir voru 2014.

Bæir	Sveit	Ca mg/ kg	Mg mg/ kg	K mg/ kg	Na mg/ kg	P mg/ kg	S mg/ kg	pH	Mn mg/ kg	Cu mg/ kg	Zn mg/ kg
Fagridalur	Mýrdalur	1065	435	442	327	123	85	5,72	68	0,38	8,7
Fagridalur	Mýrdalur	1073	366	260	318	52	64	5,52	66	0,47	6,3
Skeiðháholt I	Skeið	1542	418	342	154	11	36	6,02	65	1,74	6,9
Skeiðháholt I	Skeið	1420	564	534	186	52	77	5,72	138	0,79	15,5
Árbær	Hornafjörður	1578	346	370	181	152	35	5,18	51	1,17	4,7
Árbær	Hornafjörður	1822	246	390	179	100	25	5,56	72	2,58	1,1
Hnappavellir	Öræfi	732	326	257	104	203	35	5,45	79	0,59	6,8
Hnappavellir	Öræfi	605	285	274	168	102	74	5,31	47	0,58	6,2
Gerðar	Flói	1975	444	272	241	27	56	5,69	135	1,00	13,1
Kálfafell II	Fljótshverfi	782	196	90	127	180	38	5,49	41	0,73	5,0
Kálfafell II	Fljótshverfi	1159	198	99	101	27	37	5,52	79	2,81	4,3
Háafell	Miðdalir	3207	880	426	199	66	109	5,47	700	1,41	18,5
Háafell	Miðdalir	4605	838	332	214	24	107	5,30	146	0,52	17,5
Skerðingsst.	Hvammssv.	4317	761	452	226	40	114	5,36	174	0,81	13,2
Skerðingsst.	Hvammssv.	3539	1162	400	195	15	38	7,34	209	1,95	4,0
Bustarfell	Vopnafj.	2440	431	32	-5	83	61	5,86	177	3,04	20,1
Arnheiðarst.	Fljótssdalur	4329	829	327	280	132	97	5,77	428	4,36	14,8
Arnheiðarst.	Fljótssdalur	3967	609	173	181	33	3	6,05	260	4,89	7,5
Hofteigur	Jökuldalur	3496	611	318	94	11	31	6,24	185	8,54	7,0
Hofteigur	Jökuldalur	3580	730	186	142	10	36	6,19	485	5,74	5,1
Brú	Jökuldalur	2351	381	232	83	128	39	6,00	125	4,14	9,7
Aðalból	Jökuldalur	1890	238	319	96	61	41	5,55	107	4,03	10,8
Aðalból	Jökuldalur	1787	204	129	85	68	47	5,40	148	4,64	3,2
Reykjavellir	Skagafjörður	2709	538	121	163	85	119	5,39	251	3,69	8,9
Reykjavellir	Skagafjörður	4790	994	193	213	25	62	6,15	266	1,90	9,6
Viðimelur	Skagafjörður	3831	906	49	220	13	29	6,21	182	8,04	1,9
Stokkhólmi	Skagafjörður	4235	1297	74	216	32	32	6,51	131	5,17	2,6
Dvergasteinn	Eyjafjörður	2452	686	234	157	18	77	5,34	168	3,87	11,1
Dvergasteinn	Eyjafjörður	3415	780	313	107	4	35	5,86	323	2,98	12,3
Krossar	Eyjafjörður	2280	550	341	200	160	77	5,54	201	3,51	19,2
Meðaltal, allir bæir		2566	575	266	172	68	57	5,76	184	2,87	9,2
Meðaltal 25 bæja		2616	572	292	172	65	62	5,75			

Annað sem var öðru vísi í sýnunum frá haustinu 2014 var það að kalsíum og magnesíum var töluvert hærra en venjulega í heysýnum. Þetta getur þó tengst því að spretta var farin að hægja verulega á sér og grösín farin að undirbúa sig fyrir veturinn. Kalíum og fosfór fellur í grösúm með auknum þroska en kalsíum og magnesíum breytist minna með þroska (Gunnar Ólafsson 1979).

Jarðvegssýni

Jarðvegssýni voru tekin úr 25 túnúm víðsvegar af landinu haustið 2014 og aftur úr sömu túnúm vorið 2015 áður en borið var á (7. og 8. tafla). Í 9. töflu eru niðurstöður þessara greininga bornar saman og er þá fyrst og fremst verið að horfa til brennisteins og sýrustigs. Kalsíum hefur aðeins aukist yfir veturinn og sýrustig hækkað. Þetta mikla útstreymi brennisteins í gosinu virðist því ekki hafa haft merkjanleg áhrif á sýrustig eða brennistein í jarðvegi þessara túna. Einhver skekkja er í þessum samanburði, m.a. vegna þess að sýnin voru ekki endilega tekin á sömu stöðum í túnunum.

9. tafla. Niðurstöður efnagreininga (mg/kg) og sýrustigsmælinga á jarðvegssýnunum sem kynnt eru í 7. og 8. töflu. Meðaltal allra sýna (N=25)

	Haut 2014	Vor 2015
Ca	2464	2616
Mg	617	572
K	572	292
Na	133	172
P	94	65
S	81	62
pH	5,42	5,75

Svipuð útkoma fæst þegar bornar eru saman niðurstöður á sýnum bænda sem tekin voru haustið 2014 og svo aftur haustið 2015 (10. tafla). Sýrustig virðist ekki hafa breyst og hafi einhver breyting orðið hefur hún varað í skamman tíma.

10. tafla. Niðurstöður efnagreininga (mg/kg) og sýrustigsmælinga á jarðvegssýnum bænda, haustin 2014 (N=170) og 2015 (N=78). Sýnin voru tekin í 5 cm dýpt.

	Haut 2014	Haut 2015
Ca	3222	2382
Mg	534	538
K	443	272
P	79	86
S	104	86
pH	5,3	5,3

Ályktanir

Brennisteinn í grasi hækkaði goshaustið og var enn nokkuð hár í júní 2015 en eðlilegur í heysýnum sumarsins.

Gosið virtist ekki hafa veruleg áhrif á sýrustig jarðvegs eða brennistein í jarðvegi túna.

Gosið virtist ekki hafa umtalsverð áhrif á önnur efni í jarðvegi eða gróðri túna.

Þakkarorð

Við færum öllum þeim sem komu að sýnatöku og annarri vinnu við þetta verkefni bestu þakkir. Atvinnuvega- og nýsköpunarráðuneytið styrkti þetta verkefni.

Heimildir

Gunnar Ólafsson. 1979. Efnainnihald og meltanleiki ýmissa túngrasa á mismunandi þroskastigi. *Fjölrit RALA* 42: 20 bls.

Kandylis, K. 1984. Toxicity of sulfur in ruminants: review. *Journal of Dairy Science* 67: 2179-2187.

Lamers, L.P.M., L.L. Govers, I.C.J.M. Janssen, J.J.M. Geurts, M.E.W. Van der Welle, M.M. Van Katwijk, T. Van der Heide & J.G.M. Roelofs. 2013. Sulfide as a soil phytotoxin – a review. *Plant Physiology* 4: 1-14.

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. *Geochem. Persp. Let.* 1: 84-93.

Þjóðólfur 1862. Eldgosið norðan undir Vatnajökli 14, 127-129.

13.

kafli

Gosið í Holuhrauni. Endurmælingar Landgræðslu ríkisins á gróðursýnum úr fjórum vöktunarreitum

Jóhann Þórsson¹ & Ágústa Helgadóttir¹

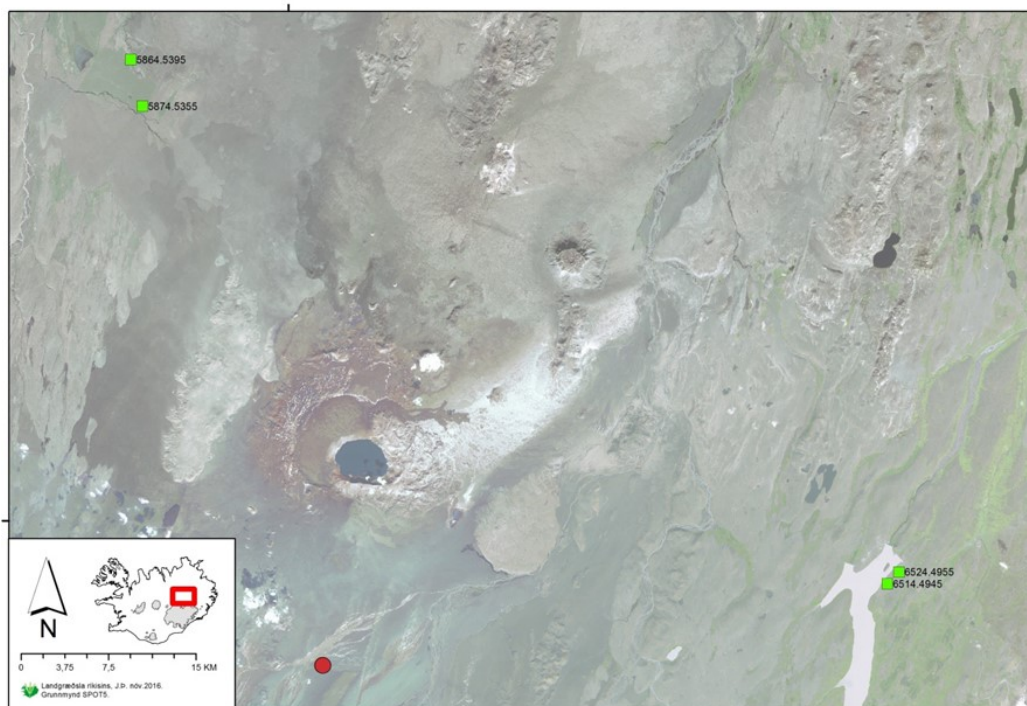
¹ Landgræðsla ríkisins

Inngangur

Í kjölfar gossins í Holuhrauni sem hófst síðusumars 2014 var ljóst að það myndi hafa áhrif á bæði þurrlendis- og vatnavistkerfi á svæðinu. Leitað var til stofnana og annarra sem hafa staðið að umhverfissrannsóknum og –vöktun í næsta nágrenni eldstöðvanna um endurmælingar svo hægt væri að bera saman mæligildi fyrir og eftir eldsumbrotin.

Á vegum Landgræðslu ríkisins hafa verið lagðir út rúmlega 600 mælireitir um allt land þar sem fylgst er með framvindu gróðurs og jarðvegsbreytingum á landgræðslusvæðum. Stofnunin lagði til að fjórir af þeim reitum sem voru næst Holuhrauni yrðu endurmældir og var það samþykkt.

Allir þessir reitir eru í um 50 km fjarlægð frá gosstöðvunum, tveir eru sunnan Mývatns og tveir eru við Háslón, sjá 1. mynd. Stefna þeirra er þannig í NNA og ANA frá Holuhrauni (1. tafla).



1. mynd Gosstöðvarnar (rauður hringur) ásamt sýnatökureitunum fjórum (grænir kassar). Stærð reitanna er talsvert ýkt á myndinni, hver þeirra er 10x10 m.

Aðferðir

Við hefðbundnar vöktunarmælingar Landgræðslu ríkisins er einungis mælt C og N í gróður- og jarðvegssýnum. Þau eru hins vegar geymd svo hægt sé að skoða þau á ný ef þörf krefur.

Fimm sýni eru að jafnaði tiltæk frá hverjum reit, eitt gróðursýni af fimm 0,25 m² tilviljanakenndum reitum (samsýni) og fjögur jarðvegssýni (0-5 sm, 5-10 sm, 10-20 sm og 20-30 sm). Jarðvegssýnin eru tekin úr sömu reitum og gróðursýnin, þeim er síðan blandað saman fyrir hvert dýptarbil (samsýni) til að minnka svæðisbreytileika sýnatökureitsins.

Sýni voru tekin dagana 9. júlí og 17. ágúst sumarið 2015, sbr. 1. töflu.

1. tafla. Heiti sýnatökureita, sýnatökudagur, staðsetning og fjarlægð frá gosstöðvunum í Holuhrauni.

sýnareitur	fyrri sýnataka	síðari sýnataka	staður	fjarlægð og stefna frá gíg
5864.5395	11/8 2011	17/8 2015	sunnan Mývatns	54,5 km, NNA
5874.5355	11/8 2011	17/8 2015	sunnan Mývatns	50,5 km, NNA
6514.4945	10/8 2011	9/7 2015	Háslón	49,1 km, ANA
6524.4955	9/8 2011	9/7 2015	Háslón	50,1 km, ANA

Niðurstöður og umræða

Einungis niðurstöður efnagreininga á gróðursýnum eru birtar hér, sjá 2. töflu. Fjöldi sýna gefur ekki tækifæri til að meta nákvæmlega möguleg áhrif Holuhraungossins á gróður á þessum fjórum sýnatökustöðum. Til þess þyrfti fleiri endurtekningar sem eru ekki fyrir hendi enda var vöktunarverkefni Landgræðslunnar ekki sett upp í þeim tilgangi að fylgjast með umhverfisbreytingum í kjölfar gosvirkni. Niðurstöðurnar gefa á hinn bóginn vísbendingar um hvort einhverra gosáhrifa m.t.t. breytinga á magni S og F gæti í gróðri og jarðvegi á þessum sýnatökustöðum.

2. tafla. Niðurstöður efnagreininga á gróðursýnum. Mældur var brennisteinn (S) og flúor (F).

sýnareitur	S kg/ha		F kg/ha	
	2011	2015	2011	2015
5864.5395	0,633	0,139	0,010	0,002
5874.5355	0,547	0,883	0,003	0,004
6514.4945	0,993	0,409	0,009	0,011
6524.4955	1,508	0,443	0,006	0,009

Miðað við þessar takmörkuðu mælingar þá virðast ekki hafa orðið miklar breytingar á brennisteini og flúor í gróðri milli áranna 2011 og 2015. Ef einhverjar breytingar hafa orðið þá væri það helst að magn flúors hefði aukist lítillega við Háslón. Slíkt er þó með engu móti hægt að fullyrða út frá þessum gögnum.

Þakkir

Kristín Svavarsdóttir, Anne Bau og Elín Fjóla Þórarinsdóttir aðstoðuðu við sýnatöku í feltri. Kristþór Hróarsson og Magnús Ingi Gunnarsson sáu um sýnavinnslu undir leiðsögn Anne Bau. Þeim er öllum þakkað þeirra framlag.

Hluti V:

Áhrif á heilsu dýra og manna

Áhrif eldgossins í Holuhrauni 2014/2015 á heilsufar manna

Hanne Krage Carlsen^{1,2}, Thor Aspelund³, Haraldur Briem⁴, Þórarinn Gíslason^{5,6},
Þorsteinn Jóhannsson⁷, Unnur Valdimarsdóttir^{1,8,9} & Þórólfur Guðnason⁴

¹ Centre of Public Health Sciences, University of Iceland, Reykjavík, Iceland; ² School of Engineering and Natural Sciences, University of Iceland, Reykjavík, Iceland; ³ School of Health Sciences, University of Iceland, Reykjavík, Iceland; ⁴ Chief Epidemiologist, Directorate of Health, Centre for Health Threats and Communicable Diseases, Reykjavík, Iceland; ⁵ Landspítali – the National University Hospital, Reykjavík, Iceland; ⁶ Faculty of medicine, University of Iceland, Reykjavík, Iceland; ⁷ The Environmental Agency, Reykjavík, Iceland; ⁸ Department of Epidemiology, Harvard T.H. Chan School of Public Health, Boston, Massachusetts, USA. ⁹ Department of Medical Epidemiology and Biostatistics, Karolinska Institutet, Stockholm, Sweden.

Inngangur

Brennisteinsgastegundir sem losnuðu úr Holuhraungosinu 2014/2015 mældust í byggð u.þ.b. einni viku eftir að gosið hófst og var styrkur nokkuð yfir heilsuverndarmörkum ($125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 24-klukkutíma meðaltal; Althingi 2002).

Brennisteinsdíoxíð (SO_2) getur haft áhrif á heilsu manna og þá sérstaklega öndunarfærin og lýsa einkenni sér sem versnun á teppusjúkdómi í lungum (t.d. astma), hósta og ertingi í augum (WHO 2007). Rannsóknir á áhrifum SO_2 frá eldgosum hafa leitt í ljós að útsettir fullorðnir einstaklingar og börn voru með aukna tíðni á langvinnum hósta og ertingi í hálsi (Ishigami o.fl. 2008, Iwasawa o.fl. 2009 og 2015, Longo o.fl. 2013) og sérstaklega einstaklingar með astma (Iwasawa o.fl. 2015), ofnæmi og hækkaðan (diastolískan) blóðþrýsting (Longo o.fl. 2008, 2013). Rannsóknir hafa þó sýnt mismunandi niðurstöður hvað varðar áhrif á lungnastarfsemi hjá börnum (Iwasawa o.fl. 2015, Tam o.fl. 2016). Flestar rannsóknir hafa þó verið framkvæmdar á svæðum þar sem mengun hafði verið til staðar í langan tíma. Longo og kollegar (2008, 2013) rannsökuðu einstaklinga fyrir og eftir gosvirkni í Kilauea, Hawai, á árinu 2008 og fundu að lækniheimsóknum vegna öndunarfæraeinkenna fjölgaði marktækt í kjölfar gossins.

Haustið 2014 var ákveðið að rannsaka möguleg heilsufarsáhrif eldgossins í Holuhrauni og náði rannsóknin annars vegar til einstaklinga sem unnu við gosstöðvarnar við mælingar og eftirlit, og hins vegar til almennings í byggð sem urðu útsettir þegar gosmökkurinn barst til byggða.

Aðferðir

Rannsókn á starfsmönnum sem unnu við gosstöðvarnar

Starfsmenn ríkislögreglustjóra, Háskóla Íslands, og Veðurstofu Íslands sem ætluðu að sækja gosstöðvarnar heim vegna vinnu sinnar var boðið að mæta í heilsufarsskoðun á Landspítala háskóla-sjúkrahúsi eða á Sjúkrahúsið á Akureyri. Þátttakendur voru einnig hvattir til að mæta aftur í skoðun eins fljótt og hægt var eftir heimsóknina á gosstöðvarnar til endurmats. Rannsóknartímabilið var 30. janúar til 31. mars 2015. Við skoðun var spurt um öndunarfæraheilsu með stöðluðum spurningum á meðan dvalist var á gossvæðinu. Þátttakendur voru einnig látnir undirgangast blásturspróf með berkjuvíkkandi lyfjum, og í Reykjavík var mælt hlutfall NO í útöndunarlofti, sem er mælikvarði á bólgu í lungum/öndunarvegum.

Rannsókn á almenningi

Gögn voru sótt úr gagnagrunnum Embættis landlæknis varðandi sjúkdómsgreiningar á heilbrigðisstofnunum á Íslandi sem endurspegla möguleg áhrif af brennisteinsdíoxíði. Einnig voru upplýsingar sóttar í lyfjagagnagrunn landlæknis um sölu lyfseðilsskyldra astmalyfja. Við mat á mengun af völdum brennisteinsdíoxíðs var notast við gögn frá Umhverfisstofnun frá mælistöðvum víðs vegar um land.

Rannsóknirnar voru báðar samþykktar og tillkynntar til Vísindasiðanefndar (VSNb2015050022/-03.01 & VSNb2015040002/03.03).

Megin niðurstöður

Rannsókn á starfsmönnum sem unnu við gosstöðvarnar.

Alls voru 32 einstaklingar (þar af 6 konur) rannsakaðir fyrir ferð að gosstöðvunum á tímabilinu 30. janúar 2014 og 13. mars 2015. Eftir ferð að gosstöðvunum mættu 17 til endurmats. Af þeim sem mættu í grunnrannsókn í janúar og febrúar greindi u.þ.b. helmingurinn frá því að hafa verið með erting í augum og nefi á meðan dvöl stóð við gosstöðvarnar og þriðjungur var með kvefeinkenni. Eftir að komið var frá gosstöðvunum gengu þessi einkenni hins vegar í flestum tilfellum til baka. Ekki mældust marktækar breytingar á lungnastarfsemi eða merki um bólgu í öndunarvegum þessara einstaklinga eftir komuna frá eldstöðvunum. Nokkrir einstaklingar greindu frá því að næmi þeirra fyrir brennisteinsdíoxíði hefði aukist frá byrjun gossins þannig að þeir fundu lykt eða bragð af brennisteinsdíoxíði við lægri styrkur en áður.

Rannsókn á almenningi

Niðurstöður leiddu í ljós að á svæðum þar sem aukinn styrkur brennisteinsdíoxíðs mældist varð marktæk aukin aðsókn einstaklinga til heilbrigðisþjónustunnar með öndunarfæravandamál. Hins vegar varð ekki marktæk aukning á greiningum sem tengdust ertingi í augum, höfuðverk, hjarta og æðasjúkdómum eða magaverkjum. Einnig sást marktæk aukning í sölu astmalyfja þá daga sem SO₂ mældist yfir 24-klst lofgæðamörkum einkum á höfuðborgarsvæðinu.

Þegar greint var samband sölu astmalyfja á austur- og norðurhluta landsins og styrks brennisteinsdíoxíðs kom í ljós að sambandið reyndist ekki marktækt.

Umræður

Niðurstöður okkar benda til að brennisteinsdíoxíð í háum styrk við gosstöðvarnar valdi ertingi í öndunarvegum meðan á dvöl þar stendur sem gangi hratt til baka eftir að þaðan er komið. Á þessu er þó einstaklingsbundinn munur en enginn einstaklingur var með merki um skerta öndunarstarfsemi eða bólgu í lungum nokkrum dögum eftir dvöl við gosstöðvarnar.

Ekki er hægt að útiloka merkjanleg áhrif brennisteinsdíoxíðs á heilsu almennings. Frumniðurstöður okkar benda til aukinnar aðsóknar til heilbrigðisstofnana vegna öndunarfæraeinkenna og sala astmalyfja jóks með aukinni mengun en þetta má að einhverjum hluta skýra af hvatningu opinberra aðila til einstaklinga með undirliggjandi öndunarfærasjúkdóma um að birgja sig upp af astmalyfjum.

Engar tilkynningar um alvarleg atvik vegna mengunar af völdum brennisteinsdíoxíðs bárust þó heilbrigðisyfirvöldum á meðan gosinu stóð.

Niðurstöður okkar munu reynast opinberum aðilum gagnlegar í framtíðinni við útgáfu leiðbeininga um viðbrögð og varnandi aðgerðir vegna mengunar frá eldgosum.

Þakkir

Rannsóknin var styrkt af Ríkisstjórn Íslands. Þakka ber þeim sem tók þátt í rannsókninni og þeim sem unnu við að kalla inn þátttakendur ásamt starfsmönnum lungnadeilda LSH og FSA.

Heimildir

Althingi. 2002. *Reglugerð um brennisteinsdíoxíð, köfnunarefnisdíoxíð og köfnunarefnisoxíð, bensen, kolsýring, svifryk og blý í andrúmsloftinu og upplýsingar til almennings*. 251/2002. <http://www.reglugerd.is/interpro/dkm/WebGuard.nsf/key2/251-2002>

Ishigami A., Y. Kikuchi, S. Iwasawa, Y. Nishiwaki, T. Takebayashi, S. Tanaka, o.fl. 2008. Volcanic sulfur dioxide and acute respiratory symptoms on Miyakejima island. *Occupational and Environmental Medicine* 65(10): 701–707.

Iwasawa, S., Y. Kikuchi, Y. Nishiwaki, M. Nakano, T. Michikawa, Tsuboi T, o.fl. 2009. Effects of SO₂ on respiratory system of adult Miyakejima resident 2 years after returning to the island. *J. Occup. Health*. 51(1): 38–47.

Iwasawa, S., M. Nakano, T. Tsuboi, T. Kochi, S. Tanaka, T. Katsunuma, o.fl. 2015. Effects of sulfur dioxide on the respiratory system of Miyakejima child residents 6 years after returning to the island. *Int. Arch. Occup Environ. Health* 5: 1–8.

Longo, B.M., A. Rossignol, J.B. Green. 2008. Cardiorespiratory health effects associated with sulphurous volcanic air pollution. *Public Health* 122(8): 809–820.

Longo, B.M., W. Yang, J.B. Green, F.L. Crosby, V.L. Crosby. 2010. Acute health effects associated with exposure to volcanic air pollution (vog) from increased activity at Kilauea Volcano in 2008. *J. Toxicol. Environ. Health Part A* 73(20):1 370–381.

Sandström, T. 1995. Respiratory effects of air pollutants: experimental studies in humans. *Eur. Respir. J.* 8: 976–995.

Tam, E., R. Miike, S. Labrenz, A.J. Sutton, T. Elias, J. Davis, o.fl. 2016. Volcanic air pollution over the Island of Hawai'i: Emissions, dispersal, and composition. Association with respiratory symptoms and lung function in Hawai'i Island school children. *Environment International*. 92–93: 543–552.

WHO. 2007. *WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Risk summary assessment*. Geneva, Switzerland: World Health Organisation. Hlaðið niður frá http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf

Áhrif eldgosa á dýr: Leiðbeiningar um forvarnir

Auður Lilja Arnþórsdóttir¹

¹ Matvælastofnun

Inngangur

Eldgos geta haft margvísleg áhrif á dýr en erfitt er að segja fyrir um hver þau verða í hverju tilviki fyrir sig, vegna ólíks eðlis gosanna. Matvælastofnun hefur því útbúið almennar leiðbeiningar fyrir dýraeigendur um helstu hættur og hvernig draga megir afleiðingum þeirra.

Þegar útlit var fyrir að til eldgoss kæmi í Bárðarbungukerfinu í ágúst 2014, vakti Matvælastofnun athygli á þessum leiðbeiningum.

Stofnunin hafði engar spurnir af sjúkdómstílfellum eða dauða, sem rekja mátti til Holuhraungossins og engar rannsóknir voru gerðar á búfé í tengslum við það. Þess ber þó að geta að veturinn eftir gosið voru óvenjumikil afföll á fé á nokkuð mörgum bæjum á landinu, sér í lagi á Suður- og Vesturlandi. Vangaveltur voru uppi um að orsök vanhaldanna mætti rekja til eldgossins, en við rannsókn á þeim kom ekkert í ljós sem benti til að svo væri. Dregin var sú ályktun að um næringarskort hefði verið að ræða sem líklega mætti rekja til lélegra heyja frá sumrinu áður, en stærstur hluti þeirra hafði verið verkaður áður en gosið hófst. Rétt er þó að taka fram að vitneskja um hversu víðtækt vandamálið var kom ekki fram fyrr en þegar langt var liðið á vorið og því óhægt um vik að rannsaka það nákvæmlega.

Leiðbeiningar fyrir dýraeigendur vegna eldgoss

Öskufall

Tryggja öllum dýrum hreint drykkjarvatn, svo sem kostur er. Sjá til þess að skepnur á útigangi hafi aðgang að rennandi vatni eða færa þeim hreint vatn reglulega og koma í veg fyrir að þær drekki úr stöðnu vatni. Kanna ástand vatnsbóla og sjá til þess að yfirborðsvatn berist ekki í þau.

Forða skepnur undan öskufalli, hýsa þær ef aðstæður eru fyrir hendi eða flytja annað.

Takmarka beit á þeim svæðum þar sem öskufall er mikið, gefa lystugt fóður vel og oft, og tryggja aðgang að selenríkum saltsteinum eða stömpum. Gera ráðstafanir til að koma í veg fyrir að aska falli á fóðrið.

Hafa daglegt eftirlit með öllum skepnur, sér í lagi lambfé og folaldshryssum. Hryssum og ám getur verið hætt við klumsi eða doða og ungviðinu við skorti á E-vítamíni og seleni.

Breiða yfir fiskeldisker, þar sem því verður við komið og tryggja gott vatnsstreymi í kerin.

Sama gildir um gæludýr og aðrar skepnur. Mikilvægast er að þau drekki ekki úr stöðnu vatni og best að halda þeim sem mest innandyrá.

Flóðahætta

Meta aðstæður og ákveða hvort skepnum sé betur borgið innanhúss eða utan.

Tryggja svo sem kostur er að skepnur á útigangi geti forðað sér undan flóði.

Slys eða sjúkdómar

Hafa samband við dýralækni ef skepnur slasast eða verða veikar. Matvælastofnun reynir að tryggja að dýralæknar komist þangað sem nauðsyn krefur og hefur milligöngu um neyðarslátrun ef þannig ber undir.

Loftmengun

Tryggja svo sem kostur er að skepnur séu ekki á svæði nálægt gosstöðvum þar sem hætta er á loftmengun. Koltvísýringur sest í lægðir og getur valdið köfnun.

Forðast álag á skepnur þegar loftmengun er mikil, t.d. hlaup og streituvaldandi aðstæður. Brennisteinsdíoxíð veldur m.a. ertingu í öndurfærum og augum.

Nánari upplýsingar

Aska og flúor

Gosefni sem berast með vindi geta mengað gróður og vatn og borist ofan í skepnur. Öskukornin eru oddhvöss eins og örsmá glerbrot. Þau særa augu, öndunarfæri og meltingarveg. Þau geta valdið niðurgangi, tannsliti og fótisæri. Flúor loðir við yfirborð kornanna. Magn flúors eykst því eftir því sem askan er finni. Fin aska langt frá eldstöð er því ekki síður hættuleg skepnum en aska sem fellur nær. Flúor bindur kalsíum í torleyst sambönd og stuðlar þannig að kalkskorti. Bráð eitrun getur valdið doða í ám og kúm, og klumsi í hryssum, einkum seint á meðgöngu og um burð eða köstun. Langvinn eitrun getur leitt af sér alvarlegt misslit á jöxlum (gadd), sem gerir skepnunum erfitt að tryggja, sem og óeðlilegar beinmyndanir á fótleggjum, sem valda holti.

Hætta vegna eldgoss er breytileg eftir árstíð, dýrategund, aldri, magni flúors og annarra efna í öskunni og hvert askan berst. Hindra skal ef unnt er öskufall á skepnurnar og í fóður þeirra og sjá til þess að þær hafi aðgang að hreinu drykkjarvatni. Ef aska fellur á óslegið tún á heyskapartíma, er vissara að bíða með slátt þar til rignt hefur, sama gildir um beitiland. Flúorinn þynnist fljótt þegar rignir og eitrunarhætta dvínar. Falli flúormenguð aska á hey þarf að meta magn flúors, sem gæti borist í skepnurnar og taka ákvörðun um nýtingu heysins á grundvelli þess.

Samkvæmt tilskipun ESB nr. 2002/32 sem innleidd var hér á landi með reglugerð 662/2010 er leyfilegt hámarksinnihald af flúori í fóðri með 12% rakainnihald sem hér segir:

Fyrir sauðfé: 50 mg/kg (ppm)

Fyrir mjólkandi ær: 30 mg/kg (ppm)

Fyrir nautgripi: 50 mg/kg (ppm)

Fyrir mjólkandi kýr: 30 mg/kg (ppm)

Fyrir svín: 100 mg/kg (ppm)

Fyrir fullorðna alifugla: 350 mg/kg (ppm)

Fyrir fiska: 350 mg/kg (ppm)

Fyrir önnur dýr: 150 mg/kg (ppm)

Ekki er fullkomið samræmi í vísindagreinum hvað varðar þolmörk búfjár gagnvart flúori í fóðri og drykkjarvatni. Sumir álíta mörkin vera lægri en reglugerðin gerir ráð fyrir.

Mikill munur er á því hvort magn flúors sé hátt yfir langan tíma eða skamman. Bráð eituráhrif geta komið fram í nautgripum, sauðfé og hrossum ef magn flúors í þurrefni í fóðri fer yfir 250 mg/kg. Algengustu einkenni eru doði í kúm og kindum, og klums í hryssum, en einnig ýmis einkenni frá taugakerfi og meltingarfærum. Ef magn flúors í fóðri og drykkjarvatni er yfir mörkum í langan tíma geta komið fram einkenni í tönnum og beinum.

Jafnframt ber að hafa í huga að ýmsir þættir hafa áhrif á þolmörkin, s.s. aldur dýrsins, almennt næringar- og heilbrigðisástand og streita. Ung dýr, dýr í lélegu ásigkomulagi og dýr sem eru undir álagi vegna lélegs aðbúnaðar eða annarra þátta eru mun viðkvæmari.

Lofteggundir

Koltvísýringur (CO_2) er þyngri en andrúmsloft og getur því sest í lægðir. Ef innöndunarloft inniheldur hátt hlutfall koltvísýrings getur það leitt til köfnunar.

Brennisteinsdíoxíð (SO_2) veldur m.a. ertingu í öndunarfærum og augum. Áhrifin eru meiri því lengur sem dýrin eru útsett fyrir menguninni. Þegar styrkur brennisteinsdíoxíðs í andrúmslofti er hár þarf að reyna að draga sem best verður á kosið úr álagi á öndunarfæri. Þetta er rétt að hafa í huga m.a. við smölun þá daga sem mengun er mikil, því meðal þess sem þarf að varast eru mikil hlaup og streita. Engin opinber viðmiðunarmörk eru til fyrir styrk brennisteinsdíoxíðs í umhverfi dýra og rannsóknir eru takmarkaðar. Matvælastofnun mælir með að miðað sé við sömu mörk og gilda fyrir fólki. Heilsuverndarmörk fyrir eina klukkustund eru $350\mu\text{g}/\text{m}^3$ en mörkin fyrir einn sólarhring eru $125\mu\text{g}/\text{m}^3$, skv. reglugerð nr. 251/2002.

Vetnisklóríð (HCl) og brennisteinsvetni (H_2S) valda ertingu í öndunarfærum og augum. Í miklum styrk geta þessar loftteggundir haft alvarleg áhrif á líkamann.

