Grímsfjall og Vatnafell á Snæfellsnesi

Niðurstöður bergefnagreininga

Alexandra Björk Guðmundsdóttir

Jarðvísindadeild
Háskóli Íslands
2016

Grímsfjall og Vatnafell á Snæfellsnesi

Niðurstöður bergefnagreininga

Alexandra Björk Guðmundsdóttir

10 eininga ritgerð sem er hluti af
Baccalaureus Scientiarum gráðu í Jarðfræði

Leiðbeinandi
Sæmundur Ari Halldórsson

Jarðvísindadeild
Verkfræði- og náttúruvísindasvið
Háskóli Íslands
Reykjavík, júní 2016

Grímsfjall og Vatnafell á Snæfellsnesi: Niðurstöður bergefnagreininga
Bergefnagreiningar á Grímsfjalli og Vatnafelli
10 eininga ritgerð sem er hluti af *Baccalaureus Scientiarum* gráðu í Jarðfræði

Höfundarréttur © 2016 Alexandra Björk Guðmundsdóttir
Öll réttindi áskilin

Jarðvísindadeild
Verkfræði- og náttúruvísindasvið
Háskóli Íslands
Sturlugata 7
101 Reykjavík

Sími: 525 4000

Skráningarupplýsingar:
Alexandra Björk Guðmundsdóttir, 2016, *Grímsfjall og Vatnafell á Snæfellsnesi: Niðurstöður bergefnagreininga*, BS ritgerð, Jarðvísindadeild, Háskóli Íslands, 58 bls.

Prentun: Háskólaprent
Reykjavík, júní 2016

Hér með lýsi ég því yfir að ritgerð þessi er samin af mér og að hún hefur hvorki að hluta né heild verið lögð fram áður til hærri prófgráðu.

Alexandra Björk Guðmundsdóttir
Kt. 090893-2899

Útdráttur

Snæfellsnes býður upp á ótrúlega fjölbreytni í jarðfræði. Elsta berg á Snæfellsnesi varð til við eldvirkni seint á tertíer og lauk þeim uppbyggingarfasa fyrir 6 milljónum ára. Á kvarter fyrir 2 milljónum ára tók eldvirkni sig aftur upp og þá hófst virkni eldstöðvakerfanna í dag, en þau eru Snæfellsjökull, Lýsuskarð og Ljósufjöll. Áhugavert er að skoða breytingar á kvikugerðum þessara eldstöðvakerfa í gegnum líftíma þeirra. Þeir Björn Sverrir Harðarson og Fitton (1991) hafa skrifað um aukna hlutbráðnun í myndunum frá Snæfellsjökli eftir hörfun ísaldarjökulsins seint á pleistósen. Niðurstöður þeirra voru að myndanir frá hlýskeiðum og jökulskeiðum eftir mörk Matuyama-Brunhes segulskeiðanna og myndanir frá nútíma eru svipaðar en myndanir frá síðjökultíma sýna merki um aukna hlutbráðnun. Í þessu verkefni voru bergefnagreiningar gerðar á Grímsfjalli og Vatnafelli á Snæfellsnesi. Grímsfjall liggur innan Ljósufjallaeldstöðvakerfisins og er talið hafa myndast við lok síðasta jökulskeiðs. Vatnafell er á jöðrum Lýsuskarðseldstöðvakerfisins og myndaðist milli umskipta frá jökulskeiði yfir í hlýskeið. Með fyrirliggjandi bergefnagreiningum af nútímahraunum frá Ljósufjalla- og Lýsuskarðseldstöðvakerfinu var gerður samanburður milli myndanna og helstu ferli sem stjórna styrk aðalefna og nokkra snefilefna í þeim könnuð. Niðurstöður voru þær að munur er á milli myndanna frá síðustu jökulskeiðum og frá nútíma. Líklegt er að þann mun megi útskýra með mismikilli hlutbráðnun á spínil lherzólíti og granat lherzólíti. Þessi tenging við aukna hlutbráðnun vegna hörfunar ísaldarjökulsins virðist þó ekki eiga við í tilfelli Grímsfjalls. Frekari rannsókna væri þörf á þeim ferlum sem mynda þessar kvikugerðir, eins og t.d. með frekari snefilefnagreiningum og mælingum á geislavirkum samsætum.

Abstract

Snæfellsnes offers an incredible variety in geology. Oldest rocks in Snæfellsnes were formed by volcanic activity in the late Tertiary period and that structure phase ended 6 million years ago. In the Quaternary period 2 million years ago the activity began again and the activity of the volcanic systems today, they are Snæfellsjökull, Lýsuskarð and Ljósufjöll. Interesting is to look at changes in magma types through lifespan of these volcanic systems. Björn Sverrir Harðarson and Fitton (1991) have suggested that increase in partial melting in formation from Snæfellsjökull can be related to the glacier retreat in the late Pleistocene. Their results showed that formations from interglacial and subglacial periods after Matuyama-Brunhes magnetic periods and formations from present time are similar but formations from late glacial time show signs of increased partial melting. In this study whole rock analysis were done on Vatnafell and Grímsfjall in Snæfellsnes. Grímsfjall lies within the Ljósufjöll volcanic system and is thought to have formed at the end of the last Ice Age. Vatnafell is located on the edge of the Lýsuskarðs volcanic system and was formed in a transition from a subglacial to an interglacial period. With whole rock analysis accessible from present time lavas from Ljósufjöll volcanic system and Lýsuskarð volcanic system a comparison was made between the formations and the key processes that control the quantity of major and several trace elements were analyzed. The results showed that apparent difference is between the formations from last glacial periods and from present time. It is likely that the differences can be explained by varying degrees of partial melting of spinel lherzolite and of garnet lherzolite. This relation to increased partial melting due to the last glacial retreat does not seem to apply in the case of Grímsfjall. Further reasearch is needed on the proccesses that generate these different magma types, such as more trace element analyzes and measurements of radioactive isotopes.

Efnisyfirlit

Myndir ..... **xi**

Töflur ..... **xiii**

Skammstafanir ..... **xiv**

Þakkir ..... **xv**

1 Inngangur **1**

2 Jarðsaga Íslands **3**
2.1 Þróun rekbelta 4
2.2 Bergfræði 5
2.2.1 Storkuberg 6

3 Jarðfræði Snæfellsness **7**
3.1 Eldvirkni á tertíer 8
3.2 Eldvirkni á kvarter 9
3.2.1 Snæfellsjökull 10
3.2.2 Lýsuskarð 10
3.2.3 Ljósufjöll 11
3.3 Bergefnafræði Ljósufjalla og Lýsuskarðs á nútíma 12

4 Rannsóknarsvæðin **15**
4.1 Grímsfjall og Vatnafell 15
4.2 Fyrri rannsóknir 16
4.3 Rannsóknaspurningar 16

5 Aðferðir **17**
5.1 Vettvangsvinna 17
5.2 Undirbúningur sýna 19
5.3 ICP-OES 20
5.4 Úrvinnsla gagna 21

6 Niðurstöður **23**
6.1 Bergefnagreiningar 23
6.2 Aðalefni 26
6.3 Snefilefni 28
6.3.1 Innangarðsefni 28
6.3.2 Utangarðsefni 29

7 Samanburður og túlkun **31**
7.1 Aðalefni 31
7.2 Snefilefni 35
7.2.1 Innangarðsefni 36

7.2.2 Utangarðsefni 37
7.3 Hlutkristöllun 40
7.3.1 Hlutkristöllunarferli – líkanreikningur 41
7.4 Hlutbráðnun 42
7.4.1 Hlutbráðnunarferli – líkanreikningar 42

8 Samantekt 47

Heimildir 49

Viðauki A 53

Viðauki B 55

Viðauki C 57

Myndir

Mynd 1. Staðsetning gosbelta og brotabelta ásamt eldstöðvakerfum landsins. *3*

Mynd 2. Þróun rekbelta í gegnum jarðsögu Íslands. *4*

Mynd 3. Meginbergraðirnar og lega þeirra miðað við gosbelti landsins á nútíma og síðjökultíma. *5*

Mynd 4. Flokkun basalts eftir kísilmettun.. ..... *6*

Mynd 5. Jarðfræðikort og virk eldstöðvakerfi á Snæfellsnesi ásamt rannsóknasvæðum. *7*

Mynd 6. Virka rekbelti Snæfellsness og eldstöðvar á tertíer. *8*

Mynd 7. Eldvirkni á Snæfellsnesi á kvarter og nútíma. *9*

Mynd 8. Samanburður nútímahrauna frá Ljósufjöllum og Lýsuskarði samkvæmt TAS grafi. *12*

Mynd 9. Samanburður nútímahrauna frá Ljósufjöllum og Lýsuskarði samkvæmt kísilmettunar grafi. *13*

Mynd 10. Dílamagn nútímahrauna frá Ljósufjöllum og Lýsuskarði af rúmmáli sýnt skáletrað. *13*

Mynd 11. Staðsetning rannsóknasvæðanna tveggja ásamt helstu kennileitum í kringum þau. *15*

Mynd 12. Sýnatökustaðir á Vatnafelli við Vatnaleið. *18*

Mynd 13. Sýnatökustaðir á Grímsfjalli við Kerlingarskarð. *18*

Mynd 14. A: Grjótakvörn og aðstaða, B: Möskvastærðir og C:Mortel. *19*

Mynd 15. D: Bræðsluofn, E: Glerperlur og F: Snúningstæki. *19*

Mynd 16. Uppbygging ICP-OES. *20*

Mynd 17. Niðurstöður bergefnagreininga frá Grímsfjalli og Vatnafelli samkvæmt TAS grafi. *26*

Mynd 18. Flokkun eftir kísilmettun. *26*

Mynd 19. Harker gröf, MgO á móti a) TiO_2, b) Al_2O_3, c) FeO, d) CaO, e) MnO og f) P_2O_5. ..... *27*

Mynd 20. Harker gröf, MgO á móti a) Co, b) Cr og c) Ni. *28*

Mynd 21. Harker gröf, MgO á móti a) Ba, b) Cu, c) Sc, d) Sr. *29*

Mynd 22. Harker gröf, MgO á móti a) V, b) Y, c) Zn og d) Zr. *30*

Mynd 23. Bergefnagreiningar frá Grímsfjalli og Vatnafelli ásamt nútímahraunum frá Ljósufjöllum og Lýsuskarði samkvæmt TAS grafi. *31*

Mynd 24. Flokkun eftir kísilmettun. *32*

Mynd 25. Harker gröf, MgO á móti a) TiO_2, b) Al_2O_3, c) FeO, d) CaO, e) MnO og f) P_2O_5. ..... *33*

Mynd 26. Harker gröf, MgO á móti a) Cr og b) Ni. *36*

Mynd 27. Harker gröf, MgO á móti a) Ba, b) Cu, c) Sc, d) Sr. *37*

Mynd 28. Harker gröf, MgO á móti a) V, b) Y, c) Zn og d) Zr. *38*

Mynd 29. TiO_2 sýnt sem fall af Mg#. *40*

Mynd 30. Hlutfall Ba/Zr sýnt sem fall af Ba. Græn lína táknar hlutbræðsluferil fyrir spínil lherzólít og rauð lína táknar hlutbræðsluferil fyrir granat lherzólít. *44*

Mynd 31. Hlutfall Zr/Y sýnt sem fall af Zr. Græn lína táknar hlutbræðsluferil fyrir spínil lherzólít og rauð lína táknar hlutbræðsluferil fyrir granat lherzólít. *45*

Mynd 32. Sýni frá Grímsfjalli. *53*

Mynd 33. Sýni frá Grímsfjalli. *54*

Mynd 34. Sýni frá Vatnafelli. *55*

Mynd 35. Sýni frá Vatnafelli. *56*

Töflur

Tafla 1. Sýnatökustaðir samanburðargagna. *16*

Tafla 2. Sýnataka – Vatnafell til vinstri og Grímsfjall til hægri. *17*

Tafla 3. Aðal- og snefilefni. *23*

Tafla 4. Grímsfjall – Aðalefni (wt%), magnesíum tala, styrkur snefilefna (ppm) og CIPW Norm útreikningar. *24*

Tafla 5. Vatnafell – Aðalefni (wt%), magnesíum tala, styrkur snefilefna (ppm) og CIPW Norm útreikningar. *25*

Tafla 6. Dreifistuðlar snefilefna fyrir steindir í basalti. *35*

Tafla 7. Mg# gildi. *40*

Tafla 8. Niðurstöður útreikninga á magn hlutkristöllunar. *41*

Tafla 9. Efnasamsetning spínil lherzólíts og granats lherzólíts. *43*

Tafla 10. Heildardreifistuðull snefilefnanna Ba, Zr og Y fyrir steindafylki spínil lherzólíts. *43*

Tafla 11. Heildardreifistuðull snefilefnanna Ba, Zr og Y fyrir steindafylki granat lherzólíts. *43*

Tafla 12. Styrkur snefilefna miðað við tiltekna hlutbráðnun á spínil lherzólíti. *44*

Tafla 13. Styrkur snefilefna miðað við tiltekna hlutbráðnun á granat lherzólíti. *44*

Tafla 14. Nútímahraun frá Ljósufjallaeldstöðvakerfinu og Lýsuskarðseldstöðvakerfinu – Aðalefni (wt%), magnesíum tala og CIPW Norm útreikningar. *57*

Tafla 15. Nútímahraun frá Ljósufjallaeldstöðvakerfinu og Lýsuskarðseldstöðvakerfinu – Styrkur snefilefna (ppm). *58*

Skammstafanir

N-MORB – Normal Mid Ocean Ridge Basalt

E-MORB – Enriched Mid Ocean ridge basalt

TAS – Total Alkali Silica

CIPW NORM – Cross, Iddings, Pirsson, Washington, NORM

km – Kílómetri

m – Metri

mm – Millimetri

^{40}Ar-^{39}Ar – ^{40}Argon-^{39}Argon

K-Ar – Kalíum-Argon

MIS – Marine Isotope Stage

GPS – Global Positioning System

ICP-OES – Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy

g – Gramm

mg – Milligramm

°C – Celsíus

K – Kelvin

ppm – Parts per million

Mg# – Magnesíum tala

DMM – Depleted MORB Mantle

PUM – Primitive Upper Mantle

Þakkir

Ég vil þakka leiðbeinanda mínum Sæmundi Ara Halldórssyni fyrir sína góðu leiðsögn, áhugasemi og verðugar ábendingar við gerð þessarar verkefnis. Haraldi Sigurðssyni vil ég þakka fyrir alla sína aðstoð, fróðleik og leiðsögn við vettvangsathuganir og sýnatöku. Þá vil ég þakka föður mínum Guðmundi Friðrikssyni fyrir sinn áhuga og aðstoð við sýnatöku. Einnig vil ég þakka öllum þeim sem aðstoðuðu mig á einn eða annan hátt við undirbúning sýnanna.

1 Inngangur

Gosbelti Íslands nær yfir 30.000 km^3 og er afmarkað af eldstöðvakerfum. Eldstöðvakerfin eru 30 talsins og einkennast af sprungusveim, megineldstöð eða hvoru tveggja. Sprungusveimarnir eru venjulega næstum samsíða rekás þess gosbeltis sem þeir tilheyra og eru ílangir í laginu, allt frá 50–200 km langir og 5–20 km breiðir. Ef megineldstöð er til staðar er hún að jafnaði stærsta eining hvers eldstöðvakerfis og miðpunktur eldvirknarinnar. Líftími eldstöðvakerfa er misjafn, hann getur verið allt frá 0,5–1,5 milljón ár (Þorvaldur Þórðarson & Ármann Höskuldsson, 2008).

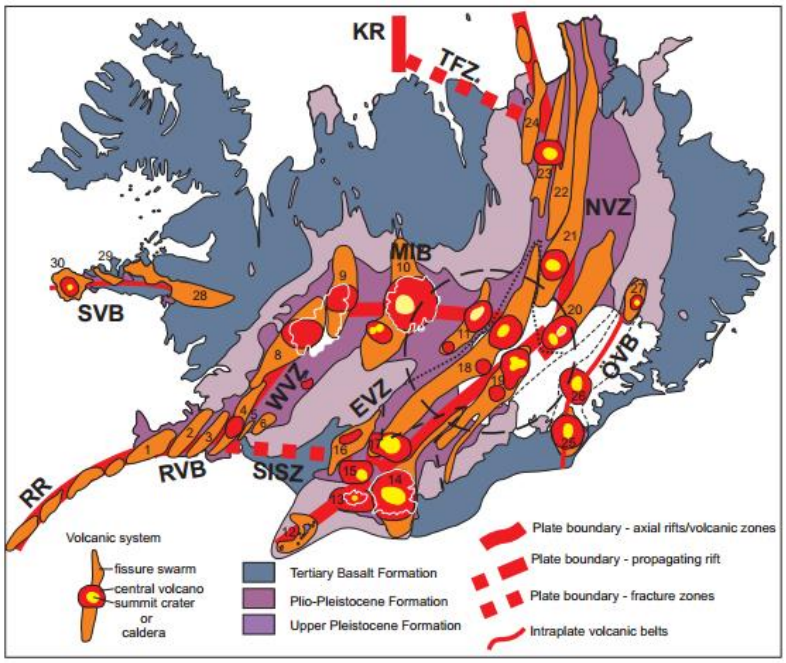
Áhugavert er að skoða breytingar á kvikugerðum í gegnum líftíma eldstöðvakerfa, þ.e. breytingar frá síðustu jökulskeiðum og fram til nútíma. Björn Sverrir Harðarson og Fitton (1991) hafa skrifað um aukna hlutbráðnun í myndunum frá Snæfellsjökli eftir hörfun ísaldarjökulsins seint á pleistósen. Snæfellsjökull er staðsettur á hliðarbelti þar sem hlutbráðnun er mjög lág og þar yrðu áhrif aukinnar hlutbráðnunnar einna best séð. Í grein sinni draga þeir saman bergefnagreiningar frá jökulskeiðum og hlýskeiðum eftir mörk Matuyama-Brunhes segulskeiðanna, frá síðjökultíma stuttu fyrir, milli eða eftir Dryas framrásarskeiðin og frá nútíma síðustu 10.000 ár. Matuyama-Brunhes mörkin voru fyrir 780.000 árum (Jóhann Helgason, 1993). Út frá niðurstöðum þeirra eru myndanir frá hlýskeiðum og jökulskeiðum eftir Matuyama-Brunhes mörkin og myndanir frá nútíma mjög svipaðar en myndanir frá síðjökultíma sýna merki um aukna hlutbráðnun. Sá mun útskýra þeir með aukinni hlutbráðnun undir 1% og tengja við hraðar flotjafnvægis-hreyfingar jarðskorpunnar (Björn S. Harðarson & Fitton, 1991).

Í þessu verkefni voru bergefnagreiningar gerðar á tveimur fjöllum, á Vatnafelli og Grímsfjalli. Fjöllin eru staðsett á Snæfellsnesi og eru helstu kennileiti þeirra stórir pýroxen dílar sem einkenna bergið. Grímsfjall liggur innan Ljósufjallaeldstöðvakerfisins en Vatnafell er á jöðrum Lýsuskarðseldstöðvakerfisins. Fjöllin eru bæði jarðmyndanir frá kvarter tímabilinu, Grímsfjall er talið hafa myndast á síðjökultíma við lok síðasta jökulskeiðs og Vatnafell fellur milli umskipta frá jökulskeiði yfir í hlýskeið (Guillou, Vliet-Lanoe, Guðmundsson, & Nomade, 2010; Haukur Jóhannesson, 1982b). Til samanburðar verða notuð gögn um bergefnagreiningar sem Björn Sverrir Harðarson gerði í doktorsritgerð sinni á þrettán nútímahraunum í Ljósufjallaeldstöðvakerfinu og Lýskuskarðseldstöðvakerfinu (Björn S. Harðarson, 1993). Með samanburðargögnunum verður leitast við að svara eftirfarandi spurningum, hvort munur sé í bergefnafræði myndanna frá síðustu jökulskeiðum og myndunum frá nútíma og ef svo er, hvaða ferli eru þar ráðandi.

2 Jarðsaga Íslands

Ísland er staðsett norðarlega á flekaskilum Atlantshafshryggjarins á heitum reit sem talinn er eiga upptök sín af djúpum möttulstrók (Páll Einarsson, 2008). Ísland hefur myndast á síðustu 25 milljón árum og er tiltölulega ungt á jarðfræðilegum skala. Jarðlagastaflinn samanstendur af myndunum frá síðtertíer og kvarter tímabilunum en elstu jarðlög á yfirborði landsins eru 14–16 milljón ára gömul. Flekaskilin liggja þvert í gegnum landið og skipta jarðlagastaflanum á tvo fleka, Norður-Ameríku flekann til vesturs og Evrasíu flekann til austurs. Undir eðlilegum kringumstæðum á flekaskilum nær hryggurinn ekki yfir sjávarmál en vegna mikillar eldvirkni af sökum heita reitsins rís Ísland úr sæ og hefur þykkari jarðskorpu en úthafsskorpan umhverfis landið (Þorvaldur Þórðarson & Ármann Höskuldsson, 2002).

Flekaskilin brotna upp og mynda röð af gos- og brotabeltum þegar þau fara yfir landið. Gosbeltin eru jafnan nefnd rekbelti þar sem frárek á sér stað og hliðarbelti þar sem frárek er takmarkandi (Haukur Jóhannesson, 1982a). Virka rekbelti landsins nær frá Reykjanes-gosbeltinu (RVB) í vestri og Tjörnes brotabeltinu (TFZ) í norðri. Milli þeirra liggur það um Vesturgosbeltið (WVZ), Mið-Ísland beltið (MIB) og Norðurgosbeltið (NVZ). Eystragosbeltið (EVB) er rekbelti í myndun og mun með tíma leysa Vesturgosbeltið af. Hliðarbeltin eru Snæfellsnesgosbeltið og Öræfajökulsgosbeltið (Þorvaldur Þórðarson & Guðrún Larsen, 2007). Á gosbeltunum eru virk eldstöðvakerfi og hafa 30 verið skilgreind (Þorvaldur Þórðarson & Ármann Höskuldsson, 2008).



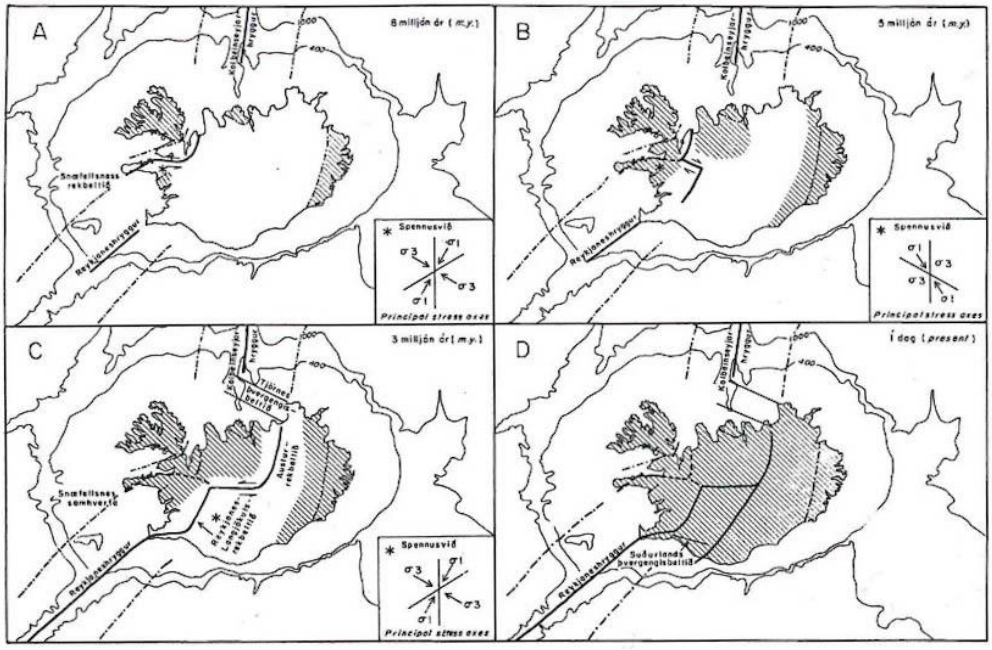
Mynd 1. Staðsetning gosbelta og brotabelta ásamt eldstöðvakerfum landsins (Haukur Jóhannesson & Kristján Sæmundsson, 1998). Skammstafanir eru eftirfarandi; RR: Reykjaneshryggur, RVB: Reykjanesgosbeltið, SISZ: Suðurlandsskjálftabeltið, WVZ: Vesturgosbeltið, MIB: Mið Íslands beltið, EVZ: Eystragosbeltið, NVZ: Norðurgosbeltið, TFZ: Tjörnes brotabeltið, KR: Kolbeinseyjarhryggur, ÖVB: Öræfajökulsgosbeltið og SVB: Snæfellsnesgosbeltið (Þorvaldur Þórðarson & Ármann Höskuldsson, 2008).

2.1 Þróun rekbelta

Fyrir u.þ.b. 60 milljónum ára hófst frárek og opnun Atlantshafsins. Núverandi möttulstrókur undir Íslandi var þá staðsettur nálægt við vestur Grænland. Flekaskil Atlantshafshryggjarins rak hægt til norðvestur með tilliti til íslenska möttulstróksins. Fyrir 35–40 milljónum ára er talið að möttulstrókurinn hafi verið við austurströnd Grænlands og við flekaskil Atlantshafshryggjarins fyrir 25 milljónum ára þegar myndun Íslands hófst (Björn S. Harðarson, Fitton og Árni Hjartarson, 2008).

Flekaskilin yfir Íslandi hafa færst í gegnum jarðsöguna miðað við rætur kyrrstæða möttulstróksins undir landinu. Þegar flekaskilin taka að fjarlægjast möttulstrókinn vegna reks hafa þau stokkið til austurs nær stróknum og myndað ný flekaskil (Páll Einarsson, 2008). Eldri flekaskilin kulna út og eru þekkt á samhverfu sem þau mynda í jarðlaga-staflanum (Björn S. Harðarson o.fl., 2008).

Fyrir 24 milljónum ára myndaðist Norðvestur rekbeltið og var virkt þar til fyrir 15 milljónum ára (Björn S. Harðarson o.fl., 2008). Þá færðust flekaskilin yfir á Snæfellsnes-gosbeltið næstu 8–10 milljón árin og mynduðu jarðlög á Vestfjörðum, Austfjörðum, Norðurlandi og Snæfellsnesi. Eldvirkni þess tók að dvína fyrir 6 milljónum ára og virkni Reykjanes-Langjökulsrekbeltsins sem nú er nefnt Vesturgosbeltið hófst. Það var virkt fyrst nyrst en breiddist út til suðurs með tímanum. Flekastökkið stóð yfir í um 2 milljón ár og á þeim tíma myndaðist Borgarnesandhverfan vegna fergingar í nýja rekbeltinu. Loks fyrir 3–4 milljónum ára kulnaði Snæfellsnesgosbeltið út og forveri norðurhluta Austurrekbeltisins sem nú er þekkt sem Norðurgosbeltið myndaðist. Eldvirkni hófst fyrst í Norðurgosbeltinu en breiddist út til suðurs fyrir 2 milljónum ára (Haukur Jóhannesson, 1980).

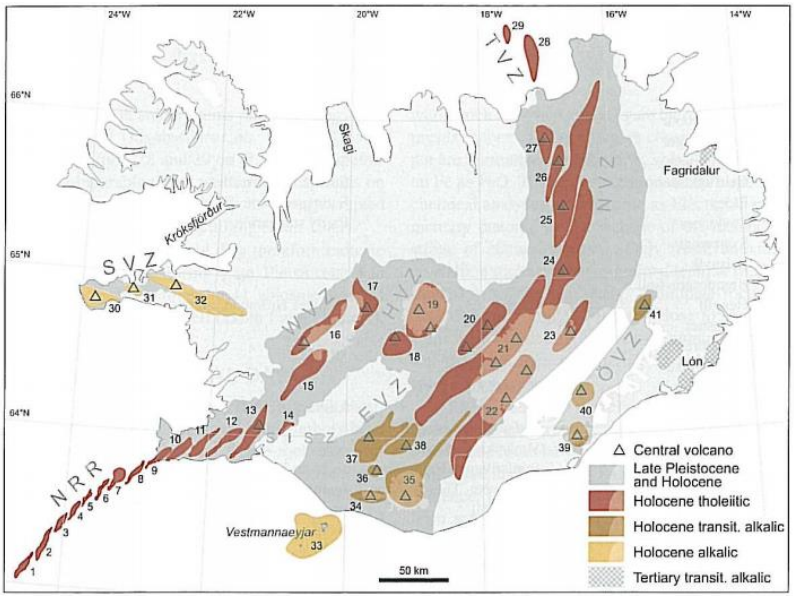


Mynd 2. Þróun rekbelta í gegnum jarðsögu Íslands (Haukur Jóhannesson, 1980).

2.2 Bergfræði

Jarðfræðilega séð er Ísland staðsett á mjög áhugaverðum stað. Hér má sjá Atlantshafshrygginn ganga á land með eldgosum og jarðhræringum og samspil hans við möttulstrókinn undir landinu. Mestmegnis af eldvirkni Íslands er úthafseyjabasalt OIB sem er alkalískt en nálægt rekhryggjum getur það verið þóleiískt, minna er af svokölluðu úthafshryggjabasalti N-MORB sem einkennir úthafshryggi (Sveinn P. Jakobsson, Kristján Jónasson & Ingvar A. Sigurðsson, 2008). Ísland hefur einnig E-MORB sem er auðgað úthafshryggjabasalt og finnst nálægt heita reitnum sem er undir landinu. Munurinn á þessum tveimur gerðum er sá að N-MORB er myndað við bráðnun á möttli sem hefur nú þegar farið í gegnum bráðnun áður en E-MORB á sér uppruna úr dýpri og frjósamari möttli og er því ríkara í utangarðsefnum eins og K_2O, TiO_2 og P_2O_5 (Frost & Frost, 2014; Fitton, 2007). Þegar K_2O gildi eru mæld kemur það í ljós að hæstu gildin fást við miðbik landsins en minnka eftir því sem farið er eftir gosbeltunum. Þetta hefur verið tengt við möttulstrókinn undir Íslandi sem ber frjósamara efni upp með sér (Sveinn P. Jakobsson, 1987).

Á Íslandi hafa þrjár meginbergraðir verið skilgreindar, þóleiíska bergröðin, millibergröðin og alkalíska bergröðin. Bergraðirnar eru aðgreindar á svokölluðu TAS grafi þar sem alkalímálmarnir Na_2O og K_2O eru sýndir sem fall af SiO_2 (Sveinn P. Jakobsson o.fl., 2008). Þær eru allar myndaðar úr samskonar möttulefni perídótíti en á mismiklu dýpi sem leiðir af sér mismikla hlutbráðnun. Hlutfall hlutbráðnunar eykst eftir því sem þrýstiléttirinn er meiri, þ.e. dýpið er minna og ræður því hvaða bergröð myndast. Þannig myndast þóleiískt berg á minna dýpi við háa hlutbráðnun en alkalískt berg á meira dýpi við lægri hlutbráðnun (Sveinn P. Jakobsson, 1987). Bergraðirnar má tengja við gosbelti landsins. Virka rekbeltið einkennist af þóleiísku bergröðinni og Eystragosbeltið af þóleiíti í norðaustri en millirröðinni í suðvestri. Af hliðarbeltunum einkennist Öræfajökulgosbeltið af millirröðinni en Snæfellsnesgosbeltið og Vestmannaeyjar sem eru syðsti partur af Eystragosbeltinu eru af alkalísku bergröðinni (Sveinn P. Jakobsson o.fl., 2008).



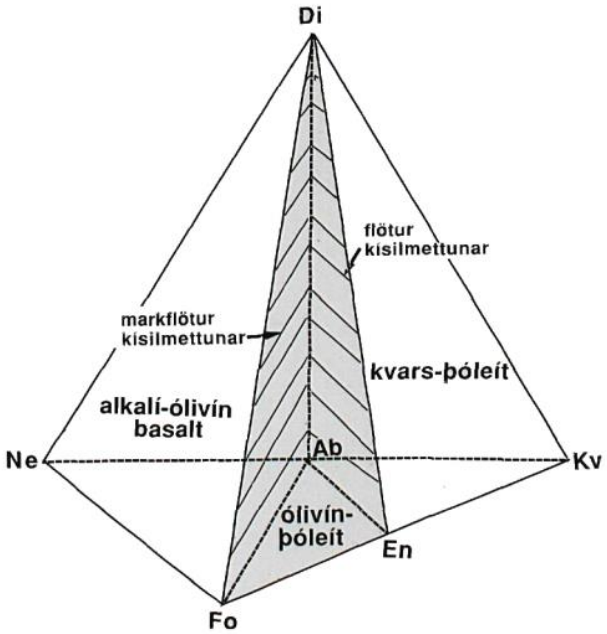
Mynd 3. Meginbergraðirnar og lega þeirra miðað við gosbelti landsins á nútíma og síðjökultíma (Sveinn P. Jakobsson o.fl., 2008).

2.2.1 Storkuberg

Storkuberg myndast við storknun og kristöllun úr kviku þegar hún kólnar. Það er samsett úr einstökum steindum, þar sem steind er skilgreint sem náttúrulegt, fast og kristallað efni með ákveðna efnasamsetningu (Sigurður Steinþórsson, 2001; Stefán Arnórsson, 1993). Hver steind hefur ákveðna kristalbyggingu sem ræður einkennum hennar og uppbyggingu. Stærsti flokkur steinda í nær öllu storkubergi eru siliköt og er grunneining þeirra kísilhyrnan SiO_4. Silikötum er skipt niður í 5 flokka eftir kristalbyggingu, hún ræður því hvernig kísilhyrnurnar tengjast saman ásamt frumefnum sem sitja í sætum í kristalgrindinni (Stefán Arnórsson, 1993).

Þessi frumefni mynda annaðhvort aðalefni eða snefilefni í bergi. Aðalefni í bergi eru um tíu talsins og mynda oft yfir 99% af því. Þau eru mun færri en snefilefnin sem geta verið allt að áttatíu talsins og mynda minnsta hluta bergsins. Hvert frumefni er einstakt með tilliti til jarðefnafræðilegra upplýsinga sem þau gefa í ljós með breytileika á styrk þeirra (White, 2015).

Ein flokkunargerð storkubergs er út frá CIPW normi og er eftir kísilmettun. Mettunarástandið ræðst af magni kísils miðað við frumefni eins og natríum og kalíum. Yfirmettað berg hefur nægan kísil til að binda allt natríum og kalíum í alkalífeldspötum og afgangskísillinn fer í að mynda kvars. Alkalískt berg er kísilundirmettað og hefur því kísilsnauðar natríum- og kalíumsteindir sem kallast feldspatíðar. Algengastur feldspatíðar er nefelín ($NaAlSiO_4$) en aðrir eru lúsít ($KAlSi_2O_6$) og analsím ($NaAlSi_2O_6$ H_2O). Ferflötungurinn skiptist í þrjú svæði, alkalí ólivín basalt, ólivín þóleiít og kvars þóleiít. Helstu steindir í alkalí ólivín basalti eru plagióklas, ágít, ólivín og nefelín. Í ólivín þóleiíti eru þær ólivín, plagióklas, ágít og enstatít. Þá hefur kvars þóleiít sömu steindir og ólivín þóleiít að undanskildu ólivíni þar sem kvars kemur í staðinn (Stefán Arnórsson, 1993).

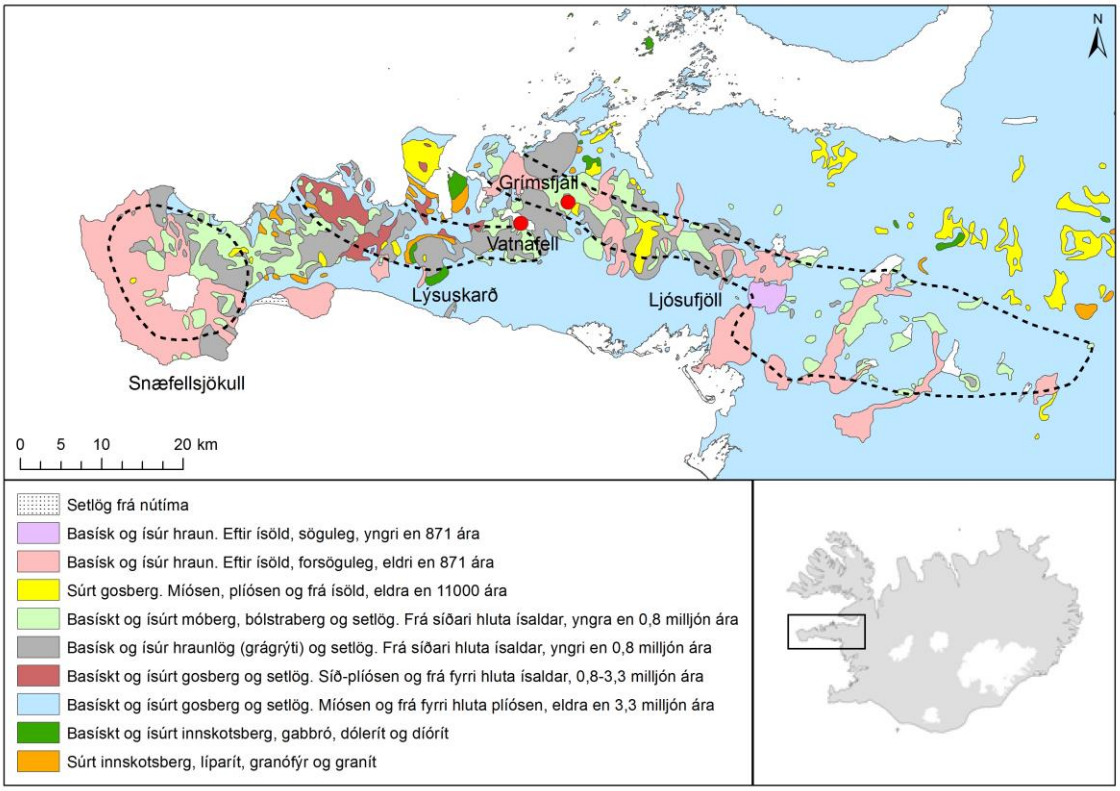


Mynd 4. Flokkun basalts eftir kísilmettun. Kv = kvars (SiO_2), Ne = nefelín ($NaAlSiO_4$), Di = díopsíð eða ágít ($CaMgSi_2O_6$), Ab = albít ($NaAlSi_3O_8$), Fo = forsterít (Mg_2SiO_4) og En = enstatít ($Mg_2Si_2O_6$) (Stefán Arnórsson, 1993).

3 Jarðfræði Snæfellsness

Snæfellsnes býður upp á ótrúlega fjölbreytni í jarðfræði og má í raun segja að nær alla jarðsögu Íslands megi sjá þar (Haukur Jóhannesson, 1982b). Jarðmyndunum á Snæfellsnesi má skipta upp í fjögur tímabil: blágrýtismyndunin frá tertíer sem hlóðst upp fyrir 3,3–16 milljónum ára, grágrýtismyndunin (plíósen–pleistósen) frá 0,8–3,3 milljónum ára, móbergsmyndunin (efra pleistósen) frá 0,015–0,8 milljónum ára og jarðlög frá síðjökultíma–nútíma sem eru yngri en 15.000 ár, að mestu leyti hraun og setlög (Björn S. Harðarson o.fl., 2008).

Blágrýtisstaflinn er nokkuð einsleitur og víðast hvar byggður upp af þykkum hraunlögum. Á tertíer voru tíð eldgos sem mynduðu samfelldan jarðlagastafla (Haukur Jóhannesson, 1982b). Milli blágrýtislaganna eru oft millilög úr seti og gjósku, sumstaðar með gróðurleifum sem hafa varpað ljósi á loftslag þess tíma. Elstu jurtaleifar sem fundist hafa eru eldri en 14 milljón ára og hafa gefið til kynna heittemprað loftslag með kulvísan lauf- og barrskóg. Þegar leið á tertíer fór loftslag kólnandi og kulvís tré hurfu með tímanum og birki, víðir og barrtré tóku við. Á efri hluta plíósen og ísöld skiptust á fjölmörg jökulskeið með mjög köldu loftslagi og hlýskeið með svipuðu loftslagi og er í dag (Leifur A. Símonarson, 1979). Á jökulskeiðum huldu jöklar landið og við eldvirkni undir þeim hlóðust upp móbergs- og bólstrabergsmyndanir en á hlýskeiðum runnu hraun um dali og milli fjalla. Á Snæfellsnesi hafa fundist ummerki um 10 jökulskeið og 20–30 jökulskeið samanlagt á Íslandi. Síðasta jökulskeiði lauk fyrir 10.000 árum og nútíminn hófst (Haukur Jóhannesson, 1982b).



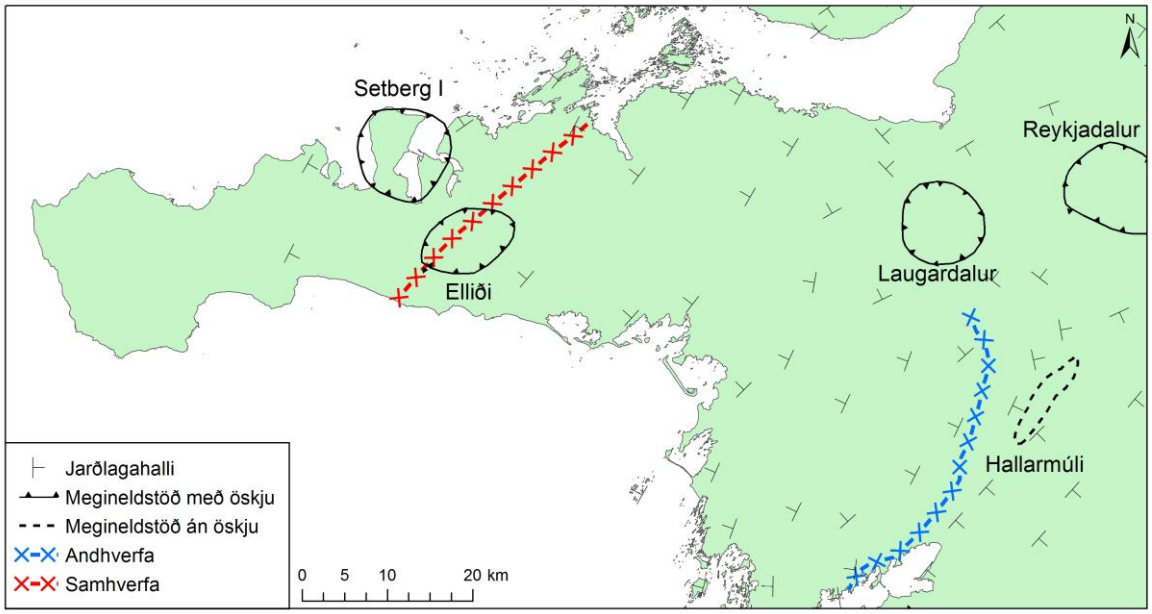
Mynd 5. Jarðfræðikort og virk eldstöðvakerfi á Snæfellsnesi ásamt rannsóknasvæðum. Útlínur eldstöðvakerfanna eru afmarkaðar með ósamfelldum línum. Kortið er unnið af höfundi og byggt á gögnum frá Landmælingum Íslands, Náttúrufræðistofnun Íslands og Hauki Jóhannessyni (2014).

3.1 Eldvirkni á tertíer

Eldvirkni á Snæfellsnesi hófst á tertíer fyrir 16 milljónum ára, þá var Snæfellsnesrekbeltið virkt og fylgdi lega þess svokallaðari Snæfellsnessamhverfu. Samhverfa myndast vegna fergingar og eldvirkni á flekaskilum og er útskýrð með Pálmason módelinu. Þar hallar jarðlögum inn að sameiginlegum ás frá tveimur gagnstæðum áttum og verða eldri eftir því sem farið er frá. Snæfellsnessamhverfan er því til marks um útkulnað rekbelti sem lá frá Staðarsveit til Helgafellssveitar og þaðan austur um Hvammsfjörð (Haukur Jóhannesson, 1980). Það er framhald af hinu útkulnaða Vatnsnes rekbelti sem var virkt á sama tíma (Þorvaldur Þórðarson & Ármann Höskuldsson, 2002). Snæfellsnesrekbeltið einkenndist af sprunguþyrpingum og megineldstöðum líkt og virka rekbeltið í dag. Í jarðlagastaflanum hafa fundist leifar af tveimur megineldstöðum, Setberg I og Elliði. Þær eru uppbyggðar af ísúrum og súrum gosmyndunum og voru virkar allt undir lok Snæfellsnesrekbeltisins (Haukur Jóhannesson, 1982a).

Setberg I megineldstöðin er staðsett á nesi milli Grundarfjarðar og Kolgrafafjarðar. Hún hefur verið rannsökuð og lýst allvel af Haraldi Sigurðssyni. Eldstöðin er uppbyggð af öskju sem er um 10 km í þvermál og er hægt að rekja öskjurima hennar í jarðlagastaflanum. Margir keilugangar eru meðfram jöðrum öskjunnar og eru þeir bæði basískir og súrir með halla inn að miðju öskjunnar (Haukur Jóhannesson, 1982b).

Elliðameginelstöðin nær yfir svæði frá Elliðahömrum og að Baulárvallavatni. Lítið er vitað um sögu eldstöðvarinnar en hún er að mestu grafin undir yngri jarðlögum. Eldstöðin er uppbyggð af öskju og er hún að mestu leyti fyllt af brotabergi, móbergi og kubbabergshraunlögum. Á jöðrum eldstöðvarinnar er að finna keiluganga líkt og við Setberg I (Haukur Jóhannesson, 1982b).



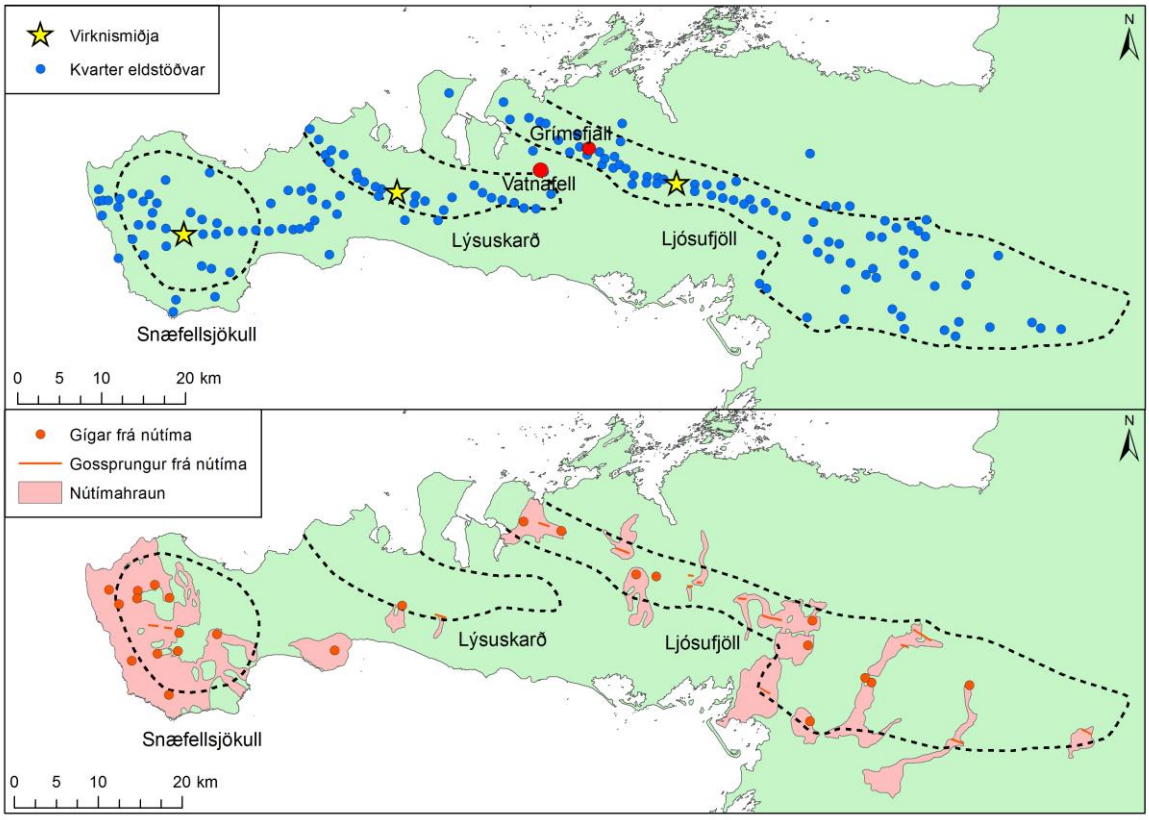
Mynd 6. Virka rekbelti Snæfellsness og eldstöðvar á tertíer. Staðsetning eldstöðva er byggð á Hauki Jóhannessyni (1982b). Kortið er unnið af höfundi og byggt á gögnum frá Landmælingum Íslands og Náttúrufræðistofnun Íslands.

3.2 Eldvirkni á kvarter

Eftir að eldvirkni á tertíer á Snæfellsnesi lauk fyrir rúmum 6 milljónum ára tóku roföflin við. Á þeim tíma náðu jöklar og ár að afmá um 500–1000 m ofan af jarðlagastaflanum og móta að vissu leyti landslagið í dag (Haukur Jóhannesson, 1982b).

Á Íslandi er miðað við að kvarter hefjist fyrir um 3,1 milljónum ára og er þá stuðst við neðsta útbreidda jökulbergslagið hér á landi. Kvarter tímabilið er til marks um upphaf ísaldarinnar þar sem skiptust á mörg jökulskeið og hlýskeið (Haukur Jóhannesson, 1982b).

Eldvirkni á kvarter á Snæfellsnesi hófst fyrir rúmum 2 milljónum ára og þar með virkni eldstöðvakerfanna sem við þekkjum í dag. Frá vestri til austurs eru þau Snæfellsjökull, Lýsuskarð og Ljósufjöll. Á kvarter og á nútíma er eldvirkninni öðruvísi háttað en á tertíer, henni fylgir engin gliðnun og því er ekki talað um rekbelti heldur hliðarbelti. Á mynd 7. má sjá eldvirkni eldstöðvakerfanna frá kvarter og á nútíma (Haukur Jóhannesson, 1982a, 1982b).



Mynd 7. Eldvirkni á Snæfellsnesi á kvarter og nútíma. Kortið er unnið af höfundi og byggt gögnum frá Landmælingum Íslands og Náttúrufræðistofnun Íslands. Þekjugögn um kvartereldstöðvar eru byggðar á Hauki Jóhannessyni (1982b).

3.2.1 Snæfellsjökull

Eldstöðvakerfið Snæfellsjökull er staðsett vestast á Snæfellsnesi með sjálfan Snæfellsjökul sem megineldstöð. Sprungurein kerfisins er 20 km breið og nær um 30 km frá Mælifelli í Staðarsveit og út á Öndverðarnes (Haukur Jóhannesson, 1982a). Snæfellsjökull er tignarleg eldkeila og má rekja eldvirkni hennar um 800.000 ár aftur í tímann. Sá aldur er byggður á ^{40}Ar-^{39}Ar aldursgreiningum á hraunlagi suður af Ólafsvík en það öfugt segulmagnað og liggur mislægt ofan á tertíer jarðlagastaflanum (Björn S. Harðarson, 1993).

Umhverfis jökulinn er mikið af eldstöðvum en dreifing þeirra er fremur óregluleg. Flestar fylgja þær nokkuð mjóu belti sem hefur norðvestlæga stefnu frá Búðakletti og út á Öndverðarnes (Ari Trausti Guðmundsson, 2001). Eldvirkni eldstöðvanna á láglendinu í kringum jökulinn er basísk en þegar nær dregur að tindinum og við hann fer að bera meira á súrum og ísúrum gosefnum. Ljós öskulög frá Snæfellsjökli hafa fundist í jarðvegi á norðanverðu Snæfellsnesi og allt til Vestfjarða. Þessi öskulög má rekja til þriggja þeytigosa sem urðu á nútíma. Yngri gosin eru 1.800 og 4.100 ára en það þriðja er frá því snemma á nútíma og er um 8.000–10.000 ára (Haukur Jóhannesson, 2013).

Eldri gosminjar frá Snæfellsjökli eru þónokkrar. Má þar nefna t.d. Lóndranga sem eru leifar af móbergsgíg og Bárðarlaug sem er gígur frá síðasta hlýskeiði. Þá myndaðist Ólafsvíkurenni undir lok síðasta jökulskeið við gos í jökli (Haukur Jóhannesson, 1982b).

Haukur Jóhannesson hefur aðgreint 20 nútímahraun í eða umhverfis Snæfellsjökul. Hér verða aðeins nokkur nefnd; austast er Búðahraun og er það talið vera um 5.000–8.000 ára, Hnausahraun rennur frá gíg sem heitir Búðaklettur og mjög líklega frá sama gíg rennur Klifshraun. Af hraunum norðan við jökulinn má nefna Saxhólahraun, Prestahraun og Væruhraun sem er líklegast yngst, en það er yngra en síðasta þeytigos (Haukur Jóhannesson, 1982b).

3.2.2 Lýsuskarð

Eldstöðvakerfið Lýsuskarð er staðsett fyrir miðju Snæfellsnesi með virknismiðju frá Lýsuskarði og að Helgrindum. Sprungurein kerfisins er um 5 km breið og nær 30 km frá Tröllatindum og að Búlandshöfða. Stefna þess er í A-V átt en það beygir til norðvestur í vestanverðum Helgrindum (Haukur Jóhannesson, 2013). Eldvirkni kerfisins hófst á kvarter fyrir rúmum 2 milljónum ára en virknin var mest fyrir milljón árum (Þorvaldur Þórðarson & Ármann Höskuldsson, 2002). Þegar litið er á upphleðslu jarðlagastaflans frá ísöld sést að eldvirknin hefur verið stöðug og að mestu bundin við virknismiðju kerfisins. Eldvirkni Lýskuskarðs svipar nokkuð til Ljósufjallaeldstöðvakerfisins þótt minna sé um súrt berg (Haukur Jóhannesson, 1982b).

Í Helgrindum er að finna leifar af gjallgígum frá ýmsum tímum, má þar nefna Rauðukúlu sem er talinn vera frá síðasta hlýskeiði og austar af honum er enn eldri gígur. Af hlýskeiðshraunum myndaði eitt Melrakkaey sem er staðsett út fyrir Grundarfjörð og hefur hraunið runnið um tíu kílómetra frá háfjallinu (Haukur Jóhannesson, 1982b).

Tvisvar hefur gosið í Lýsuskarðskerfinu á nútíma. Báðar gosmyndanirnar eru úr basalti og staðsettar sunnarlega á háhryggnum (Haukur Jóhannesson, 1982b; Þorvaldur Þórðarson & Ármann Höskuldsson, 2002). Frá Rauðukúlum rann Bláfeldarhraun og úr gígum við Ánahyrnu rann Hraunsmúlahraun (Ari Trausti Guðmundsson, 2001).

3.2.3 Ljósufjöll

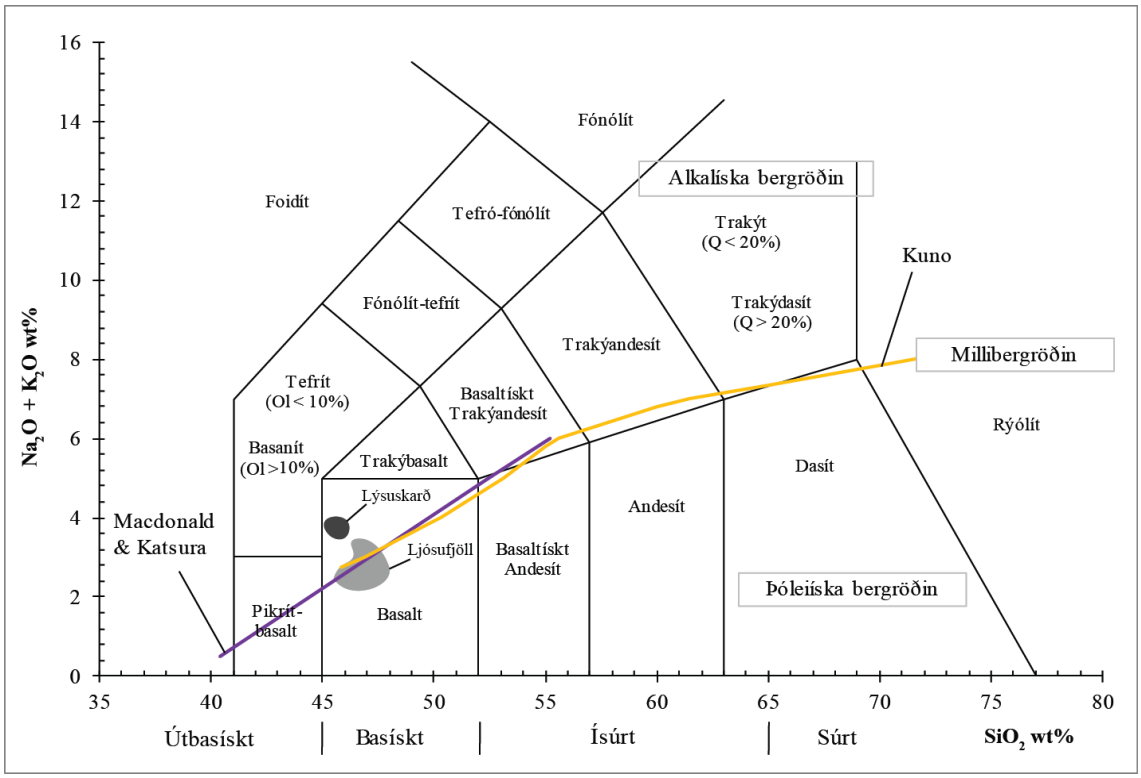
Eldstöðvakerfið Ljósufjöll er austast á Snæfellsnesi og stærst þeirra þriggja. Það hefur virknismiðju í Ljósufjöllum en þau draga nafn sitt af súrum bergtegundum, þá aðallega rýólíti í fjallgarðinum (Flude, Burgess & McGarvie, 2008; Haukur Jóhannesson, 1982a). Sprungurein eldstöðvakerfisins hefur VNV stefnu og nær yfir 90 km, alla leið frá Norðurárdal yfir til Kolgrafarfjarðar og jafnvel enn lengra út á Breiðafjörð en breidd þess breytileg frá 3–20 km. Ljósufjöll mynduðust á síðasta jökulskeiði við gos undir jökli eða í kringum jökul. Á jökulskeiðum hlóðust upp móbergshryggir en á hlýskeiðum eins og á nútíma runnu hraun niður fjallshlíðarnar (Haukur Jóhannesson, 2013; Haraldur Sigurðsson, 1970). Aldursgreiningar á súrum gosmyndunum frá Ljósufjöllum hafa gefið aldursbil frá 100–700 þúsund ára en talið er að eldvirknin nái enn lengra aftur, fyrir allt að 1 milljón árum (Flude o.fl., 2008; Ingibjörg Snædal Guðmundsdóttir & Olgeir Sigmarsson, 2008).

Af eldstöðvum frá kvarter má nefna Grímsfjall sem hér er til umfjöllunar og Kerlingarfjall í Kerlingarskarði. Kerlingarfjall er frá síðasta jökulskeiði og myndaðist við gos undir þunnum jökli. Fjallið er að mestu leyti úr móbergi þar sem kvikan hefur tæst í snertingu við vatn og myndað gjósku sem seinna meir hefur harnað og umbreyst (Haukur Jóhannesson, 1982b).

Á nútíma hefur gosið 23 sinnum í eldstöðvakerfinu og verða hér taldar upp nokkrar eldstöðvar. Frá vestri til austurs eru fyrst eldstöðvarnar fjórar í Berserkjahrauni; Kothraunskúla, Smáhraunskúla, Gráakúla og Rauðakúla en aldur þeirra er talinn vera um 4.000 ár. Þá taka við Ljósufjöll þar sem hafa orðið nokkur eldgos á nútíma. Í Hnappadal og Hítardal eru Gullborgarhraun, Eldborgarhraun, Barnaborgarhraun, Hagahraun og Hólmshraun (Haukur Jóhannesson, 1982b; 2013). Auk þeirra er vitað um aldur Rauðamelskúla, þær eru um 2.600 ára (Kristján Sæmundsson, 1966) og Rauðhálsahraun er frá tíundu öld, stuttu eftir landnám (Haukur Jóhannesson, 1978). Austast í eldstöðvakerfinu er Grábrókarhraun sem er yngra en 3.600 ára (Schwarzbach & Münnich, 1956).

3.3 Bergefnafræði Ljósufjalla og Lýsuskarðs á nútíma

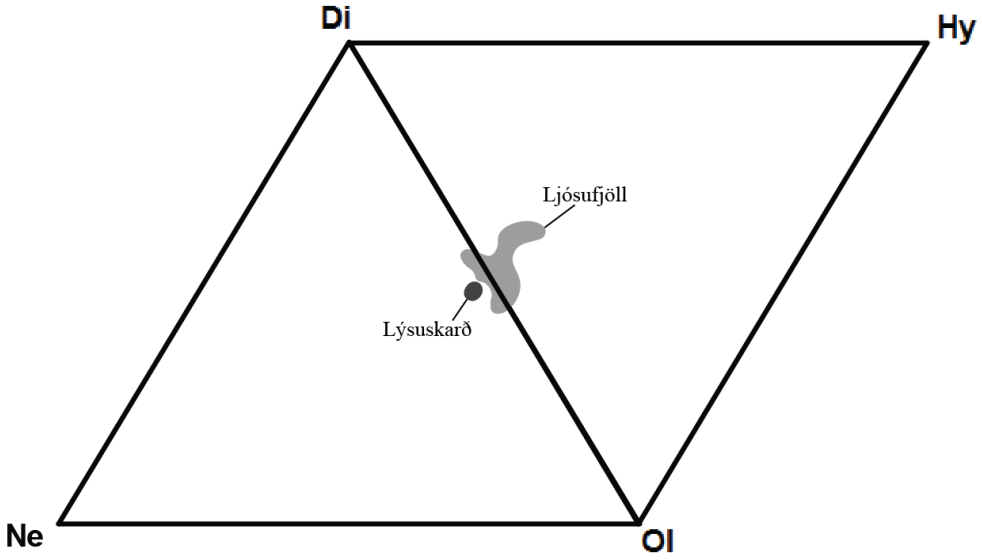
Samkvæmt bergefnagreiningum á nútímahraunum sem Björn Sverrir Harðarson gerði í doktorsritgerð sinni er greinanlegur munur milli nútímahrauna Ljósufjallaeldstöðvakerfisins og Lýsuskarðseldstöðvakerfisins. Þegar gögnin eru sett fram á TAS grafi þar sem alkalímálmar eru sýndir sem fall af SiO_2 (mynd 8) sést að nútímahraunin frá Lýsuskarðseldstöðvakerfinu eru alkalískari og hafa lægra kísilinnihald en nútímahraunin frá Ljósufjallaeldstöðvakerfinu (Björn S. Harðarson, 1993).



Mynd 8. Samanburður nútímahrauna frá Ljósufjöllum og Lýsuskarði samkvæmt TAS grafi (Kuno, 1966; Lebas, Streckeisen & Zanettin, 1986; Macdonald & Katsura, 1964; Stefán Arnórsson, 1993; Sveinn P. Jakobsson o.fl., 2008).

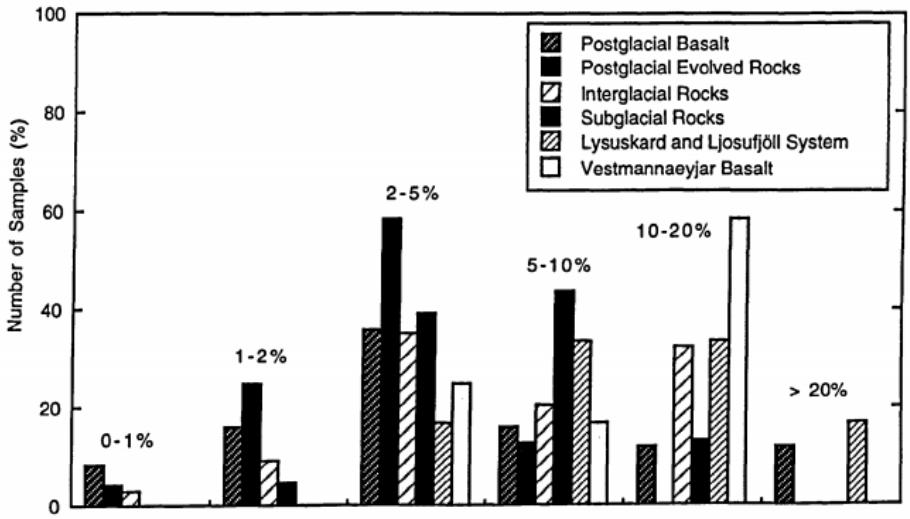
Á grafi þar sem TiO_2 er sýnt sem fall af magnesíum tölu (Mg#) kemur í ljós að nútímahraunin frá Ljósufjöllum hafa hærri Mg# og eru almennt frumstæðari en nútímahraunin frá Lýsuskarði. Þá er einnig greinanlegur munur á TiO_2 og Fe_2O_3 þar sem nútímahraunin frá Lýsuskarði eru ríkari í því (Björn S. Harðarson, 1993).

Einnig hefur verið sýnt fram á með CIPW norm útreikningum sem settir eru fram á ferflötung sem skiptist í þrjá þríhyrninga eftir kísilmettun (mynd 9) að bæði nútímahraunin frá Lýsuskarði og rúmur helmingur af nútímahraununum frá Ljósufjöllum nefelín normatíf (Björn S. Harðarson, 1993).



Mynd 9. Samanburður nútímahrauna frá Ljósufjöllum og Lýsuskarði samkvæmt kísilmettunar grafi (Stefán Arnórsson, 1993).

Magn díla er misjafn milli eldstöðvakerfanna. Fyrir nútímahraun frá Lýsuskarði er dílamagn í kringum 10% af rúmmáli og fyrir nútímahraun frá Ljósufjöllum er dílamagn frá 5–20% með meðaltal rétt undir 8% af rúmmáli. Á mynd 10 má sjá dreifingu dílamagns frá samanlögðum sýnum frá Ljósufjöllum og Lýsuskarði. Helmingur nútímahrauna frá Ljósufjöllum hafa steindafylki með ólivín+klínópýroxen+plagióklas+ógagnsæjum oxíðum og hinn helmingurinn hefur ólivín+plagióklas±klínópýroxen. Fyrir nútímahraunin tvö frá Lýsuskarði er steindafylki þeirra ólivín+plagióklas (Björn S. Harðarson, 1993).



Mynd 10. Dílamagn nútímahrauna frá Ljósufjöllum og Lýsuskarði af rúmmáli sýnt skáletrað (Björn S. Harðarson, 1993).

Af þessum samanburði milli nútímahraunanna frá sitthvoru eldstöðvakerfinu er hér með lagður grundvöllur fyrir samanburð við eldri myndanir frá sömu eldstöðvakerfum.

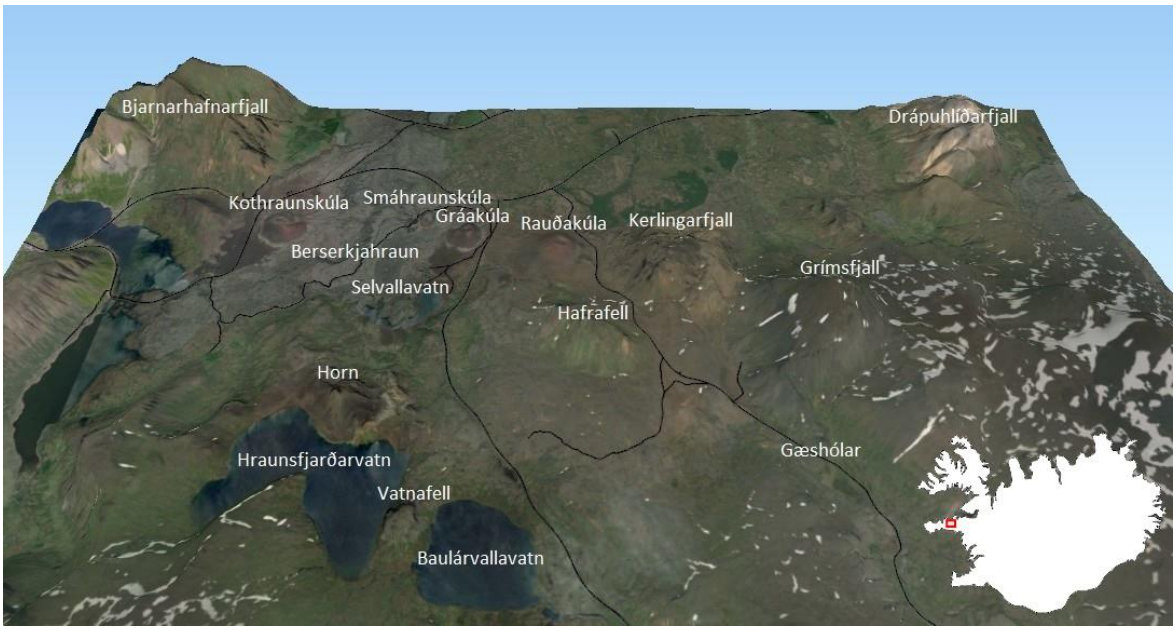
4 Rannsóknarsvæðin

4.1 Grímsfjall og Vatnafell

Í þessu verkefni voru tvö fjöll skoðuð sérstaklega, það eru Grímsfjall og Vatnafell. Í bergsýnum frá þeim voru aðalefni ásamt nokkrum snefilefnum efnagreind. Á mynd 11 sést staðsetning þeirra ásamt helstu kennileitum í kringum þau.

Grímsfjall rís hæst í 823 metra hæð yfir sjávarmáli og er staðsett á Kerlingarskarði, suðaustur af Kerlingarfjalli (Landmælingar Íslands, 2016). Það er talið hafa myndast á síðjökultíma í lok síðasta jökulskeiðs við gos undir þunnum jökli. Neðri hluti fjallsins úr móbergi og kubbabergi en efsti hluti þess er úr hrauni. Á toppi Grímsfjalls má finna gíg sem hraunið hefur runnið frá og er hann vel varðveittur, líklega vegna þess að jöklar hafa ekki náð að ganga yfir hann (Haukur Jóhannesson, 1982b).

Vatnafell nær 345 metra hæð yfir sjávarmáli og er staðsett á Vatnaleið mitt á milli tveggja stöðuvatna, Hraunsfjarðarvatns og Baulárvallavatns. Norðan við Hraunsfjarðarvatn er móbergsfjallið Horn sem skilur það af frá Selvallavatni sem Berserkjahraun liggur að (Landmælingar Íslands, 2016). Uppbygging Vatnafells er að mestu leyti stuðlað basalt en neðst í fjallinu er að finna móbergsmyndun með bólstrabergi inn á milli. Vatnafell hefur verið aldursgreint með K-Ar aðferðinni og var sýnið tekið úr innskoti innan móbergsmyndunarinnar. Sýnið reyndist vera 414 ± 11 þúsund ára og samanborið við $\delta^{18}O$ gildi botngötunga í djúpsjávarsetlögum frá Lisiecki og Raymo (2005) fellur það á milli umskipta frá MIS 12 jökulskeiðinu yfir í MIS 11 hlýskeiðið (Guillou o.fl., 2010).



Mynd 11. Staðsetning rannsóknasvæðanna tveggja ásamt helstu kennileitum í kringum þau. Vegir eru táknaðir með svörtum línum. Myndin er unnin af höfundi og byggð á gögnum frá Landmælingum Íslands ásamt gervitunglamynd frá Google Maps (Ath. hæð hefur verið ýkt til að skapa meira landslag).

4.2 Fyrri rannsóknir

Fáar rannsóknir hafa verið gerðar á Grímsfjalli og Vatnafelli. Haukur Jóhannesson (1982b) hefur skrifað aðeins um aldur og uppbyggingu Grímsfjalls og Guillou o.fl. (2010) gerðu aldursgreiningu á Vatnafelli. Af bergefnagreiningum gerði Björn Sverrir Harðarson aðal- og snefilefnagreiningar á mörgum myndunum í eldstöðvakerfum á Snæfellsnesi. Hraunmyndanirnar sem Björn efnagreindi eru allar frá nútíma og eru ellefu frá Ljósufjallaeldstöðvakerfinu en tvær frá Lýsuskarðseldstöðvakerfinu. Þessar greiningar verða notaðar til samanburðar í þessu verkefni og má sjá nöfn þeirra í töflu 1. Aðalefni, styrk snefilefna og CIPW norm útreikningana má sjá í viðauka C (Björn S. Harðarson, 1993).

Tafla 1. Sýnatökustaðir samanburðargagna (Björn S. Harðarson, 1993).

Ljósufjallaeldstöðvakerfið		**Lýsuskarðseldstöðvakerfið**	
Sýni (nr)	**Nafn**	**Sýni (nr)**	**Nafn**
SNB94	Barnaborgarhraun	SNB127	Bláfeldarhraun
SNB95	Eldborgarhraun	SNB128	Hraunsmúlahraun
SNB96	Rauðhálsahraun		
SNB97	Rauðamelshraun		
SNB129	Hörgsholtshraun (eldri hluti)		
SNB130	Hörgsholtshraun (yngri hluti)		
SNB131	Nykurhraun		
SNB132	Hraundalshraun		
SNB133	Staðarhraun		
SNB321B	Berserkjahraun		
IC7	Grábrókarhraun		

4.3 Rannsóknaspurningar

Grímsfjall og Vatnafell eru myndanir frá síðustu jökulskeiðum en mikill aldursmunur er á milli þeirra eins og áður hefur komið fram. Grímsfjall er talið hafa myndast á síðjökultíma, við lok síðasta jökulskeiðs og Vatnafell hefur verið aldursgreint 414 ± 11 þúsund ára mitt á milli umskipta frá jökulskeiði yfir í hlýskeið (Guillou o.fl., 2010; Haukur Jóhannesson, 1982b).

Með samanburðargögnum af nútímahraunum frá Ljósufjallaeldstöðvakerfinu og Lýsuskarðseldstöðvakerfinu verður leitast við að svara eftirfarandi spurningum:

- Er munur í bergefnafræði myndanna frá síðustu jökulskeiðum og myndunum frá nútíma?
- Ef svo, hvaða ferli eru þar ráðandi?

5 Aðferðir

5.1 Vettvangsvinna

Sýnataka fór fram á tímabilinu 19. ágúst til 11. nóvember 2015. Farnar voru þrjár ferðir á þessu bili, ein á Vatnafell og tvær á Grímsfjall. Alls voru tekin um 20 sýni af hvoru svæði fyrir sig og 10 sýni valin til efnagreiningar sem þóttu lýsa sem mestum fjölbreytileika og dreifingu. Fyrir hvert sýni var tekinn GPS-punktur og stutt lýsing skráð um staðsetningu og berggerð.

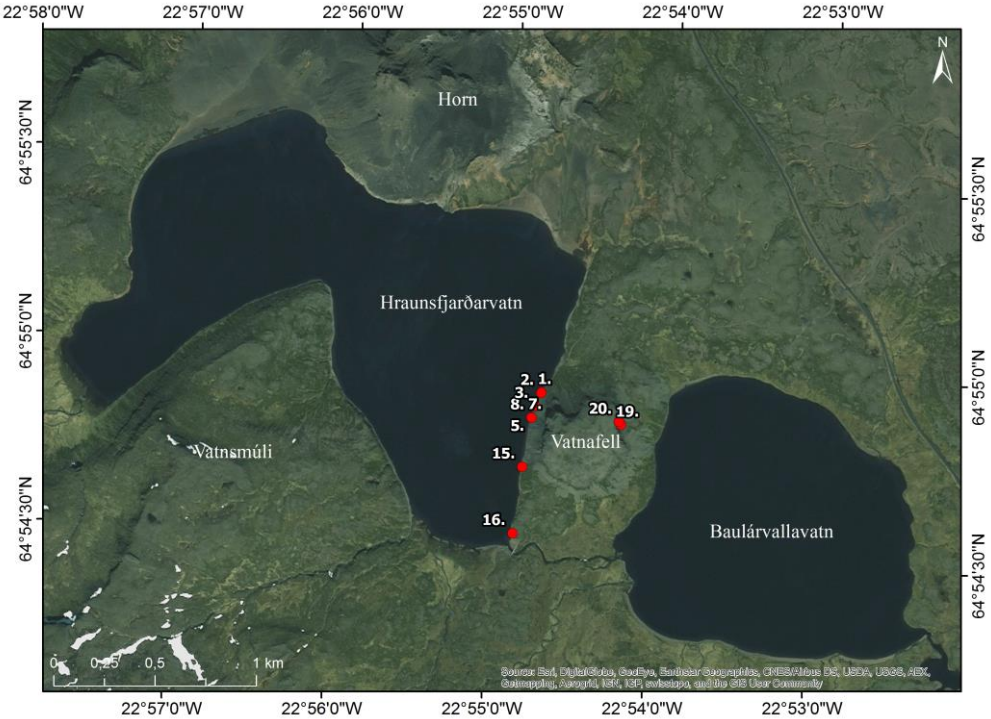
Tafla 2. Sýnataka – Vatnafell til vinstri og Grímsfjall til hægri.

Sýni (nr)	Berggerð
V1	Basalt
V2	Basalt
V3	Basalt
V5	Basalt
V7	Basalt
V8	Basalt
V15	Bólstraberg
V16	Bólstragler (veðrað)
V19	Móberg breksía
V20	Basalt

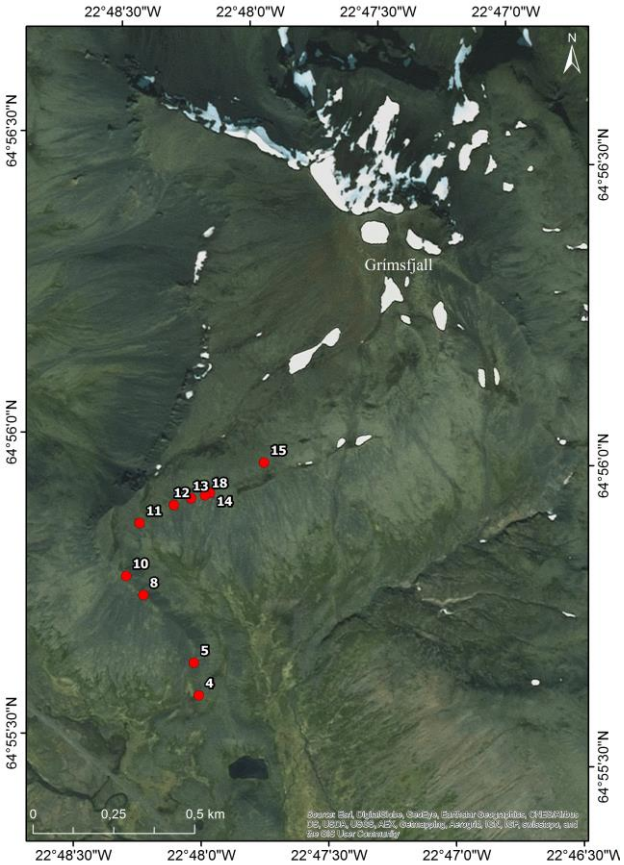
Sýni (nr)	Berggerð
G4	Basalt
G5	Basalt
G8	Basalt
G10	Basalt
G11	Basalt
G12	Bólstraberg
G13	Basalt
G14	Basalt
G15	Basalt
G18	Basalt

Við Vatnafell var gengið umhverfis fjallið og sýnum safnað (mynd 12). Hentugast þótti að safna sýnum við vesturhlíð fjallsins í átt að Hraunsfjarðarvatni þar sem mikið var um stuðlabergsskriður og auðvelt að komast í laust grjót. Þar voru tekin sýni nr. 1–3, 5 og 7–8 af basalti. Við vesturhlíð fjallsins var opna með bólstrabergi og móbergi þar sem sýni nr. 15 var tekið af bólstrabergi og enn sunnar sýni nr. 16 af gleri úr bólstra. Við austurhlíð þess var sýni nr. 19 tekið af móbergsbreksíu og sýni nr. 20 af mjög kristölluðu basalti.

Fyrir Grímsfjall var sýnum safnað áleiðis upp hrygg í átt að tindinum (mynd 13) en fjallið er býsna bratt og því þótti best að halda þá leið. Ekki tókst að finna móberg né komast í bólstrabergsopnu. Flest öll sýnin nr 4–5, 8, 10–15 og 18 voru basalt fyrir utan sýni nr. 12 sem var bólstraberg, það var þó ekki tekið í bólstrabergsopnu heldur lá ofarlega í fjallshlíðinni og ber því að taka með fyrirvara.



Mynd 12. Sýnatökustaðir á Vatnafelli við Vatnaleið. Kortið er unnið af höfundi og byggt á gögnum frá Landmælingum Íslands og gervitunglamynd frá ESRI.



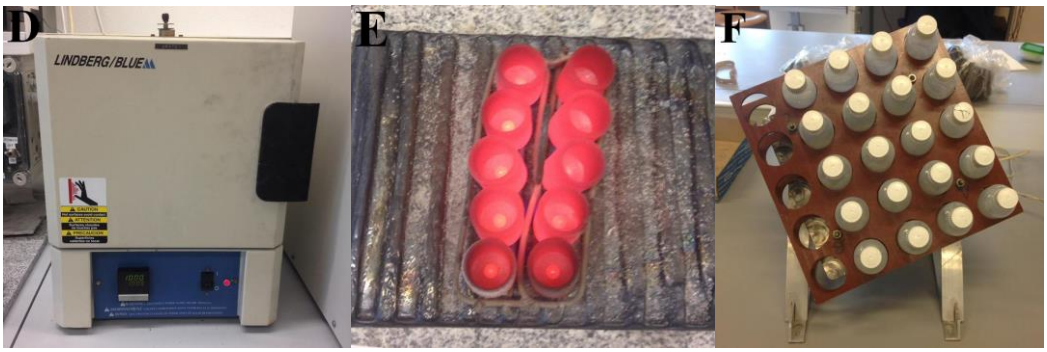
Mynd 13. Sýnatökustaðir á Grímsfjalli við Kerlingarskarð. Kortið er unnið af höfundi og byggt á gögnum frá Landmælingum Íslands og gervitunglamynd frá ESRI.

5.2 Undirbúningur sýna

Undirbúningur hvers sýnis var með þeim hætti að fyrst var það grófmulið með grjótakvörn. Þar var gætt að því að kvörnin væri þrifin eftir hvert sýni til að minnka óhreinindi og mulið var smá af hverju sýni áður en sýnamulningur hófst og hent. Grjótmulningurinn af hverju sýni var síðan sigtaður með tilliti til möskvastærðar 2 x 80 mm, 1 x 18 mm og 0.500 mm. Kornastærð 1 x 18 mm var tekin frá og um 2 g var vigtað af hverju sýni. Glersýnið frá Vatnafelli var skolað með vatni og etanóli til að ná sem mestri veðrunarkápunni af áður en hægt var að fínmylja það. Eftir grófmulninginn voru sýnin fínmulin í duft í morteli. Líkt og í grjótakvörninni var gætt að hreinlæti og farið eftir sömu vinnubrögðum.

Mynd 14. A: Grjótakvörn og aðstaða, B: Möskvastærðir og C:Mortel.

Eftir mulninginn voru 100 mg af hverju sýni vigtuð saman við flúx ($LiBO_2$) í grafítdeiglu í hlutföllunum 1:2. Flúx er bráðið salt sem myndar gler við hraða kólnun og er allajafna snefilefni í gosbergi. Sex þekkt staðalsýni voru einnig undirbúin, þar voru þrjú vigtuð eins og áður en fyrir seinni staðalsýnin voru 250 mg vigtuð á móti flúx í sömu hlutföllum. Hlutfallið er haft eins hátt og hægt er (1:2) því þá er möguleiki á að leysa upp meira af bergi per rúmmálseiningu af sýrublöndu. Grafítdeiglurnar voru þá settar í bræðsluofn í 30 mínútur með hitastig við 1000°C til að mynda glerperlur. Eftir það voru deiglurnar teknar úr ofninum og sýnin látin storkna í glerperlur. Glerperlurnar voru loks leystar upp í 30 ml sýrublöndu í plastflösku sem gerð var úr afjónuðu vatni með 5% saltpétursýru (HNO_3), 1,33% saltsýru (HCl) og 1,33% mettaðri oxalsýru ($H_2C_2O_4$). Um leið og glerperlurnar fóru í lausnina í plastflöskunum voru þær samstundis færðar á snúningstæki á stöðugri hreyfingu því annars væri hætta á að kísill myndi falla út á yfirborði perlanna. Á nokkrum klukkustundum leystust glerperlurnar upp og sýnin voru þá tilbúin til efnagreininga með ICP-OES.

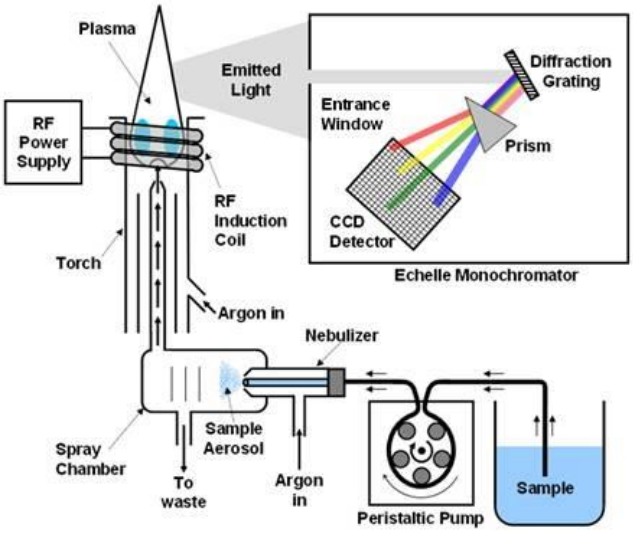


Mynd 15. D: Bræðsluofn, E: Glerperlur og F: Snúningstæki.

5.3 ICP-OES

Bergefnagreiningar voru gerðar á 20 sýnum, 10 frá hverju rannsóknasvæði með ICP-OES litrófsgreini Jarðvísindastofnunnar. Tækið er af gerðinni SPECTRO CIROS og les af allar litrófslínur samtímis þannig að hlutföll hinna mældu efna eru greind með mikilli vissu. Það veltur síðan á stöðluninni ásamt innvigtun og upplausn sýnisins hver summa aðalefnanna verður. Áður en mælingar á sýnunum hófust voru þrjú stöðluð sýni mæld með þekkta efnasamsetningu sem hafa verið kvörðuð með alþjóðabergstöðlum. Í þessu tilfelli voru innanhússtaðlarnir A-THO (rýólít), B-THO (ólivín-þóleiít) og B-ALK (FeTi-basalt) notaðir. Stillilausnin var mæld fyrst en hún er blanda af stöðluðu sýnunum þremur. Þá hófst mæling á sýnunum af handahófi þar sem sjötta hvert sýni var ávalt sama stillilausnin til skrá hugsanlegar sveiflur sem verða í greiningum þegar líður á mælingatímann. Inn á milli sýnanna voru einnig þrjú viðmiðunarsýni sem hafa þekkta efnasamsetningu, það eru alþjóðastaðlarnir USGS-BIR-1, USGS-RGM-1 og K1919 frá Kilauea. Eftir mælingarnar voru niðurstöðurnar leiðréttar miðað við stillilausnina. Niðurstöður eru gefnar sem þyngdarprósenta fyrir aðalefni og ppm fyrir snefilefni.

Á mynd 16 má sjá uppbyggingu tækisins. Sýninu er fyrst pumpað í úðahólf (nebulizer), þar sem það er brotið niður í örsmáar agnir af argon gasinu. Þaðan ferðast það í gegnum hólf sem eyðir stærri ögnunum og er flutt í plasmað. Í argon plasmanu eru atómin jónuð og örvuð, og gríðarmikli hitinn sem er allt að 10.000 K veldur því að jónirnar fara frá grunnástandi í örvað orkuástand. Í argon spanglóðinni er sýnið eimað og litróf þess myndað í Paschen-Runge litrófsgreini. Litrófslínur og bakgrunnur allra efna (nema He og F) mælast samtímis á röð CCD skynjara. Í efsta hluta plasmans þegar hitastigið lækkar, falla jónirnar til baka í lægra orkustig og geisla frá sér ljósi. Ljósið ferðast síðan til einlita ljósgjafa (monochromators) þar sem það er aðskilið í mismunandi bylgjulengdir og mælt. Bylgjulengd ljóssins sem hvert frumefni gefur frá sér virkar sem fingrafar fyrir það tiltekna frumefni. Með því að mæla bylgjulengd og magn ljóssins sem hvert frumefni gefur frá sér er hægt að greina frumefnin í sýninu og ákvarða styrk þeirra (Skoog, Holler & Crouch, 1998).



Mynd 16. Uppbygging ICP-OES (Concordia College, á.á.).

5.4 Úrvinnsla gagna

CIPW norm útreikningar voru gerðir út frá bergefnagreiningum. Þeir byggja á mólhlutfalli helstu aðalefna, þar sem hlutfall steinda er umreiknað í þyngdarprósentu. Útreikningarnir gefa hugmynd um hvaða steindir ættu að myndast miðað við hlutkristöllun í fullkomnu jafnvægi. Skilyrðin eru sú að gert er ráð fyrir að kvikan sé óvötnuð og að steindir eins og bíótít og hornblendi séu ekki til. Einnig er hlutfall Fe/Mg af öllum Fe-Mg steindum sagt vera það sama. Norm útreikningar geta því verið talsvert frábrugðnir sjáanlegu steindaefnasamsetningu bergsins (Rollinson, 2013).

Niðurstöður bergefnagreininga og samanburðargögn voru framsett á myndrænan hátt. Flokkunaraðferðir fyrir bergtegundir eru fjölmargar og var notast við þær helstu.

Total Alkali Silica (TAS) graf skiptir berginu eftir kísilmagni í útbasískt, basískt, ísúrt og súrt berg og í bergraðirnar þrjár eftir magni alkalímálmanna Na_2O og K_2O (Jakobsson o.fl, 2008). Nokkur bergheiti geta ekki verið greind nema eftir norm útreikningum, af þeim má nefna t.d. tefrít sem inniheldur >10% normatíft ólivín og basanít sem inniheldur <10% normatíft ólivín (Rollinson, 2013).

Kísilmettunar graf byggir á CIPW norm útreikningum og er sett fram á ferflötung. Það grundvallast af steindunum nefelíni eða öðrum feldspatíðum, ólivíni, díopsíði, hypersthene og kvarsi. Ferflötungurinn skiptist í þrjá þríhyrninga eftir kísilmettun í Ne-Ol-Di, Ol-Di-Hy og Di-Hy-Q sem tákna undirmettun, mettun og yfirmettun af kísilmagni (Rollinson, 2013).

Harker gröf eru tvíþátta gröf þar sem helstu aðalefni eru sýnd sem fall af SiO_2. Þau eru oft hentug þegar lýsa á breytileika og sýna oft vel hvort fylgni sé til staðar, þá annaðhvort neikvæð eða jákvæð milli þáttanna tveggja (Rollinson, 2013).

6 Niðurstöður

6.1 Bergefnagreiningar

Bergefnagreiningarnar með ICP-OES á Grímsfjalli og Vatnafelli gáfu niðurstöður á tíu aðalefnum og ellefu snefilefnum. Þau má sjá í töflu 3 hér að neðan.

Tafla 3. Aðal- og snefilefni.

Aðalefni	**Snefilefni**
Kísill (Si)	Baríum (Ba)
Títan (Ti)	Kóbalt (Co)
Ál (Al)	Króm (Cr)
Járn (Fe)	Kopar (Cu)
Mangan (Mn)	Nikkel (Ni)
Magnesíum (Mg)	Skandíum (Sc)
Kalsíum (Ca)	Strontíum (Sr)
Natríum (Na)	Vanadíum (V)
Kalíum (K)	Yttríum (Y)
Fosfór (P)	Sink (Zn)
	Sirkon (Zr)

Niðurstöður bergefnagreininga og útreikninga á CIPW norm má sjá í töflum 4 og 5. Athugið að ekki er tekið tillit til magn þeirra reikula efna sem mögulega gætu verið til staðar og því eru efnagreiningar normaliseraðar á 100%. Útreikningar á CIPW Norm voru gerðir eftir Hollocher (á.á.). Til að tryggja samanburð á sýnunum var gildi af $Fe_2O_3/(FeO+Fe_2O_3)=0,15$ (af þyngd) notað við útreikninga á norminu að fyrirmynd Björn Sverrirs Harðarsonar (1993).

Tafla 4. Grímsfjall – Aðalefni (wt%), magnesíum tala, styrkur snefilefna (ppm) og CIPW Norm útreikningar.

Sýni	**G4**	**G5**	**G8**	**G10**	**G11**	**G12**	**G13**	**G14**	**G15**	**G18**
SiO_2	48,06	48,19	47,79	47,31	47,41	48,99	47,10	48,11	47,43	47,87
TiO_2	2,48	2,42	2,40	2,29	2,35	2,38	2,31	2,32	2,26	2,33
Al_2O_3	15,13	14,87	14,88	14,22	14,69	14,94	14,49	14,47	14,25	14,20
FeO*	10,25	10,31	10,12	10,06	9,99	9,98	9,96	9,74	9,84	10,00
MnO	0,20	0,20	0,20	0,18	0,19	0,21	0,19	0,18	0,18	0,18
MgO	7,76	8,11	8,58	9,58	8,74	7,72	9,42	8,65	9,52	9,35
CaO	10,82	10,63	10,88	12,18	11,94	9,97	12,38	12,20	12,39	11,78
Na_2O	2,95	2,93	2,93	2,43	2,67	3,21	2,38	2,52	2,36	2,50
K_2O	1,28	1,28	1,24	0,96	1,14	1,45	0,99	1,02	0,98	0,99
P_2O_5	0,83	0,82	0,77	0,57	0,65	0,92	0,55	0,56	0,54	0,56
Mg#	0,638	0,647	0,664	0,689	0,671	0,643	0,688	0,674	0,693	0,685
Ba	444	440	425	330	374	492	337	350	332	340
Co	54	55	55	59	57	52	58	56	58	59
Cr	373	395	420	567	545	416	562	537	646	562
Cu	69	68	66	81	82	65	81	86	84	79
Ni	119	128	137	174	153	128	166	154	179	178
Sc	32	32	33	38	36	30	39	38	40	38
Sr	494	486	474	432	459	490	440	441	430	437
V	271	277	268	299	296	253	308	304	305	308
Y	30	30	28	21	24	33	22	22	21	22
Zn	83	82	77	69	72	80	67	68	66	69
Zr	214	207	206	161	179	228	165	171	166	167
NORM										
Plagíóklas	49,47	48,99	47,06	44,25	44,37	49,77	43,90	46,83	44,20	46,28
Orþóklas	7,62	7,62	7,39	5,73	6,80	8,69	5,91	6,09	5,85	5,91
Nefelín	0,17		1,11	1,03	1,89		1,46	0,10	0,92	
Díopsíð	19,60	19,38	20,50	25,71	24,64	17,52	25,95	25,79	26,46	24,54
Hypersthene		0,56				1,53				0,21
Ólivín	14,17	14,61	15,30	15,34	14,08	13,58	14,86	13,29	14,81	15,07
Ilmenít	4,77	4,65	4,62	4,41	4,52	4,58	4,44	4,44	4,33	4,48
Magnetít	2,26	2,28	2,22	2,20	2,19	2,19	2,19	2,15	2,16	2,20
Apatít	1,95	1,92	1,81	1,34	1,53	2,15	1,30	1,32	1,27	1,32

*FeO er heildarmagn járns. Fyrir NORM útreikninga er gert ráð fyrir að $Fe_2O_3/(FeO+Fe_2O_3)=0,15$.

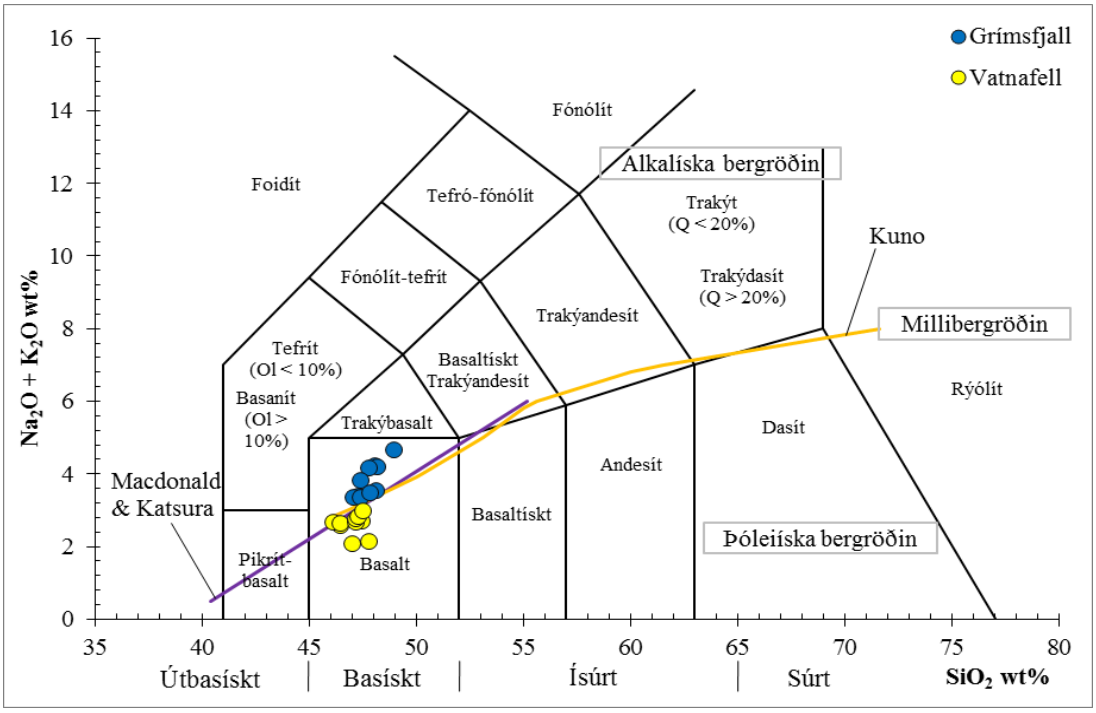
Tafla 5. Vatnafell – Aðalefni (wt%), magnesíum tala, styrkur snefilefna (ppm) og CIPW Norm útreikningar.

Sýni	**V1**	**V2**	**V3**	**V5**	**V7**	**V8**	**V15**	**V16**	**V19**	**V20**
SiO_2	46,48	46,12	47,44	46,46	47,16	47,16	47,32	47,53	47,79	47,04
TiO_2	2,35	2,44	2,27	2,29	2,26	2,28	2,06	2,20	2,24	1,96
Al_2O_3	14,48	14,29	14,09	14,36	14,19	14,37	15,69	16,03	15,70	12,73
FeO*	10,75	11,44	10,42	10,31	10,57	10,35	9,93	10,04	11,21	10,34
MnO	0,19	0,19	0,18	0,18	0,18	0,18	0,17	0,18	0,18	0,16
MgO	9,42	9,77	9,55	9,88	9,95	9,62	8,93	7,19	9,58	12,35
CaO	13,26	12,56	12,83	13,36	12,52	12,74	12,49	13,25	10,75	12,89
Na_2O	1,96	2,00	2,04	2,01	2,01	2,09	2,21	2,34	1,57	1,55
K_2O	0,62	0,67	0,65	0,64	0,65	0,68	0,62	0,64	0,56	0,54
P_2O_5	0,32	0,33	0,33	0,30	0,32	0,33	0,41	0,44	0,22	0,24
Mg#	0,671	0,665	0,681	0,691	0,687	0,684	0,677	0,625	0,666	0,736
Ba	214	222	215	215	219	227	231	257	221	172
Co	64	69	61	60	63	60	60	55	67	69
Cr	401	331	463	576	504	481	241	246	472	600
Cu	66	67	80	70	78	87	81	80	82	64
Ni	133	157	160	159	172	163	141	76	168	231
Sc	42	39	41	44	41	41	37	39	39	45
Sr	378	378	372	361	373	379	385	397	417	303
V	366	376	353	369	353	340	306	317	316	334
Y	15	15	15	14	15	16	14	16	13	12
Zn	67	72	66	64	63	65	67	61	123	60
Zr	110	114	112	112	111	114	96	105	116	90
NORM										
Plagíóklas	45,05	44,65	45,12	43,18	45,27	45,99	50,25	51,63	47,96	39,73
Orþóklas	3,72	4,02	3,90	3,84	3,90	4,08	3,72	3,84	3,37	3,25
Nefelín	0,49	0,45		1,40						
Díopsíð	28,42	26,25	27,80	29,35	26,27	27,06	23,03	25,87	14,56	29,36
Hypersthene			2,99		2,91	0,73	2,48	0,68	23,21	4,80
Ólivín	14,69	16,66	12,78	14,88	14,25	14,72	13,45	10,53	3,61	16,28
Ilmenít	4,52	4,69	4,37	4,41	4,33	4,37	3,95	4,22	4,31	3,76
Magnetít	2,36	2,52	2,29	2,26	2,32	2,28	2,17	2,20	2,46	2,28
Apatít	0,74	0,76	0,76	0,70	0,74	0,76	0,95	1,02	0,51	0,56

*FeO er heildarmagn járns. Fyrir NORM útreikninga er gert ráð fyrir að $Fe_2O_3/(FeO+Fe_2O_3)=0,15$.

6.2 Aðalefni

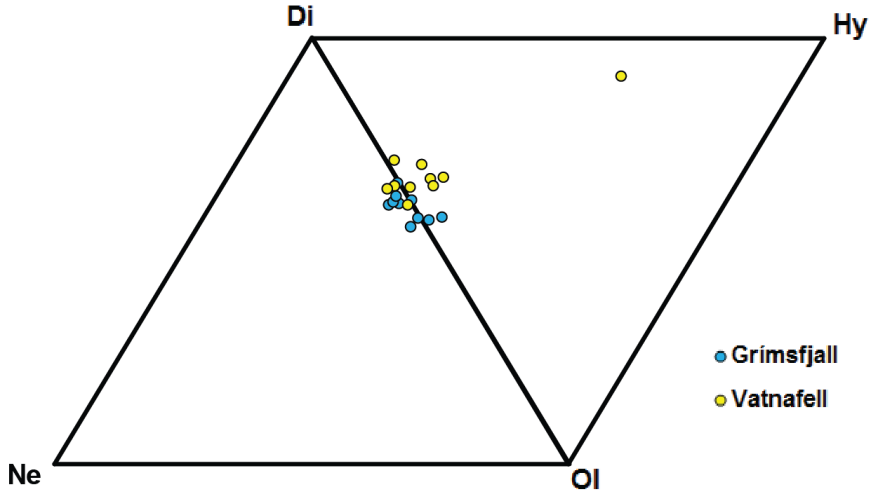
Niðurstöður bergefnagreininga eru birtar á TAS grafi þar sem alkalímálmarnir Na_2O og K_2O eru sýndir sem fall af SiO_2.



Mynd 17. Niðurstöður bergefnagreininga frá Grímsfjalli og Vatnafelli samkvæmt TAS grafi (Kuno, 1996; Lebas o.fl., 1986; Macdonald & Katsura, 1964; Stefán Arnórsson, 1993; Sveinn P. Jakobsson o.fl., 2008).

Samkvæmt TAS grafinu sést að bæði fjöllin eru úr basalti en þó er bergið frá Grímsfjalli marktækt alkalískara miðað við bergið frá Vatnafelli.

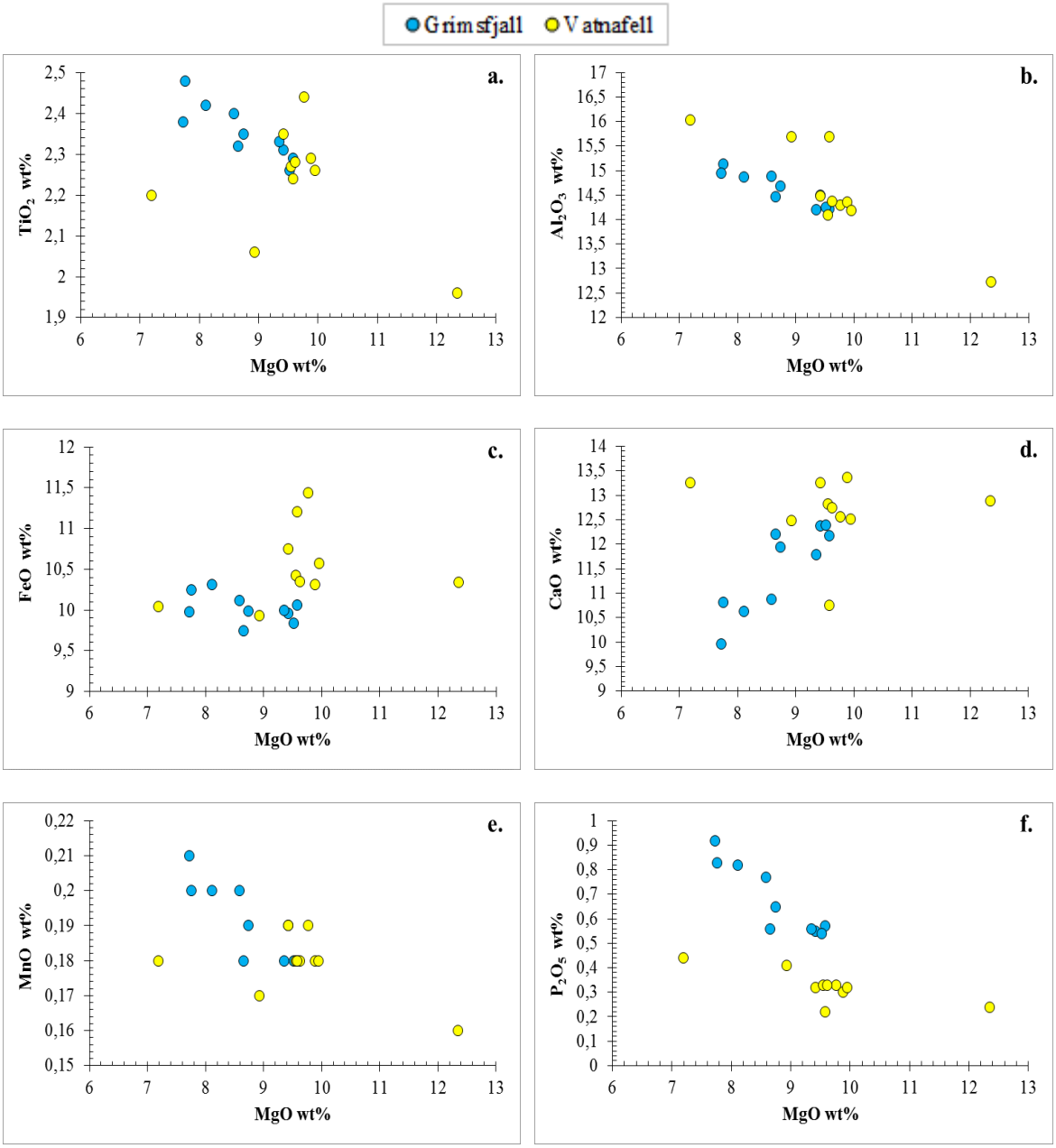
Niðurstöður frá CIPW normi eftir kísilmettun eru birtar á ferflötungi. Út frá niðurstöðum dugar að rissa upp tvo fyrri þríhyrninganna, Ne-Ol-Di og Ol-Di-Hy.



Mynd 18. Flokkun eftir kísilmettun. Ne = nefelín, Di = díopsíð, Ol = ólivín og Hy = hypersthene (Stefán Arnórsson, 1993).

Á mynd 18 sést að bæði Vatnafell og Grímsfjall eru ríkari í díopsíði og falla að því horni. Eitt sýni frá Vatnafelli sker sig vel frá og er það sýni númer 19 sem er móbergsbreksía. Meirihluti Vatnafells fellur undir hypersthene normatíft á meðan meirihluti Grímsfjalls er nefelín normatíft.

Niðurstöður voru settar fram á Harker gröfum, þar sem aðalefni eru sýnd sem fall af MgO. Það hentar betur þegar lítill breytileiki er á SiO_2.



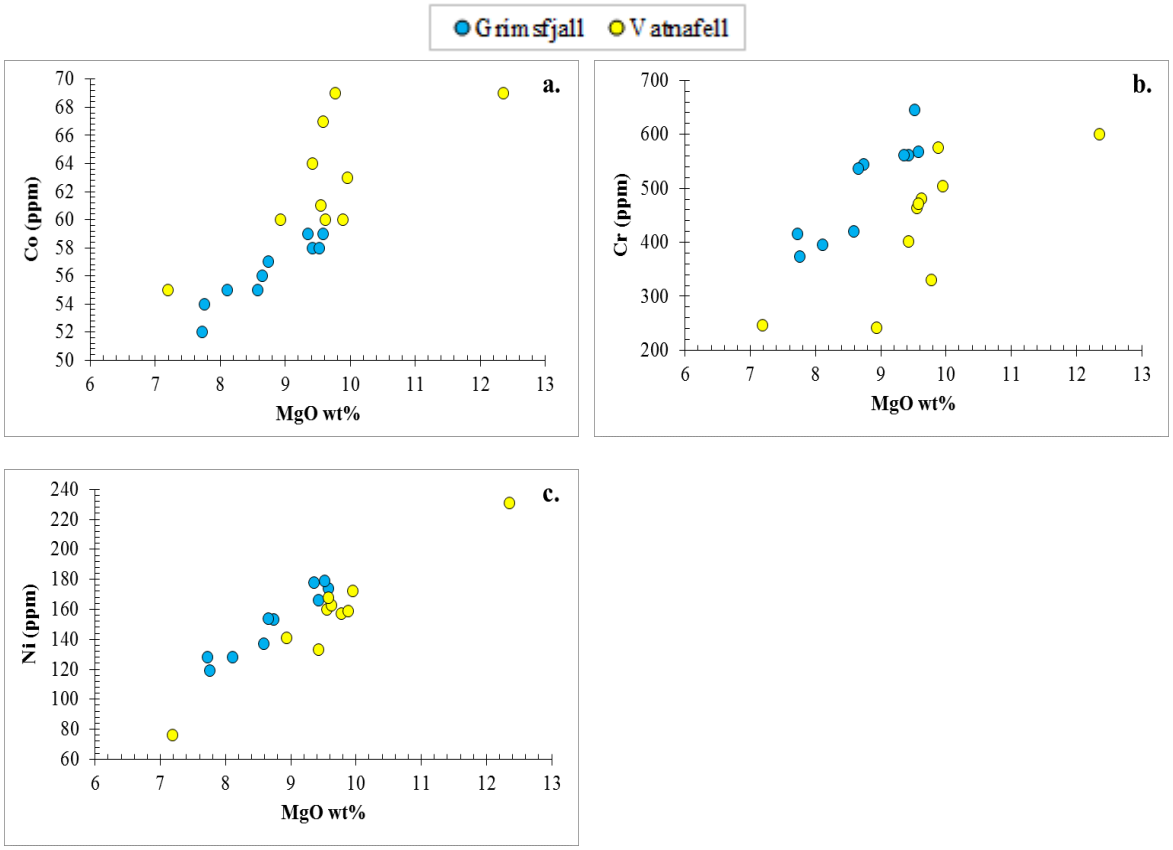
Mynd 19. Harker gröf, MgO á móti a) TiO_2, b) Al_2O_3, c) FeO, d) CaO, e) MnO og f) P_2O_5.

Á mynd 19 sést að greinanlegur munur er milli fjallanna í styrk ýmsra aðalefna. Grímsfjall hefur almennt hærri styrk í aðalefnum eins og Al_2O_3 en jafnframt minni efnum eins og TiO_2, MnO og P_2O_5 á meðan Vatnafell hefur hærri styrk af FeO og CaO. Á gröfunum sést að eitt sýni frá Vatnafelli sker sig verulega frá og er það sýni nr 20 sem er mjög dílaríkt.

6.3 Snefilefni

6.3.1 Innangarðsefni

Niðurstöður snefilefna voru settar fram á Harker gröfum, þar sem innangarðsefnin Co, Cr og Ni eru sýnd sem fall af MgO. Innangarðsefni eru svo nefnd vegna þess að þau hafa tilhneigingu til að staðganga inn í kristalgrind ólivíns, ortópýroxens og klínópýroxens við kristöllun.

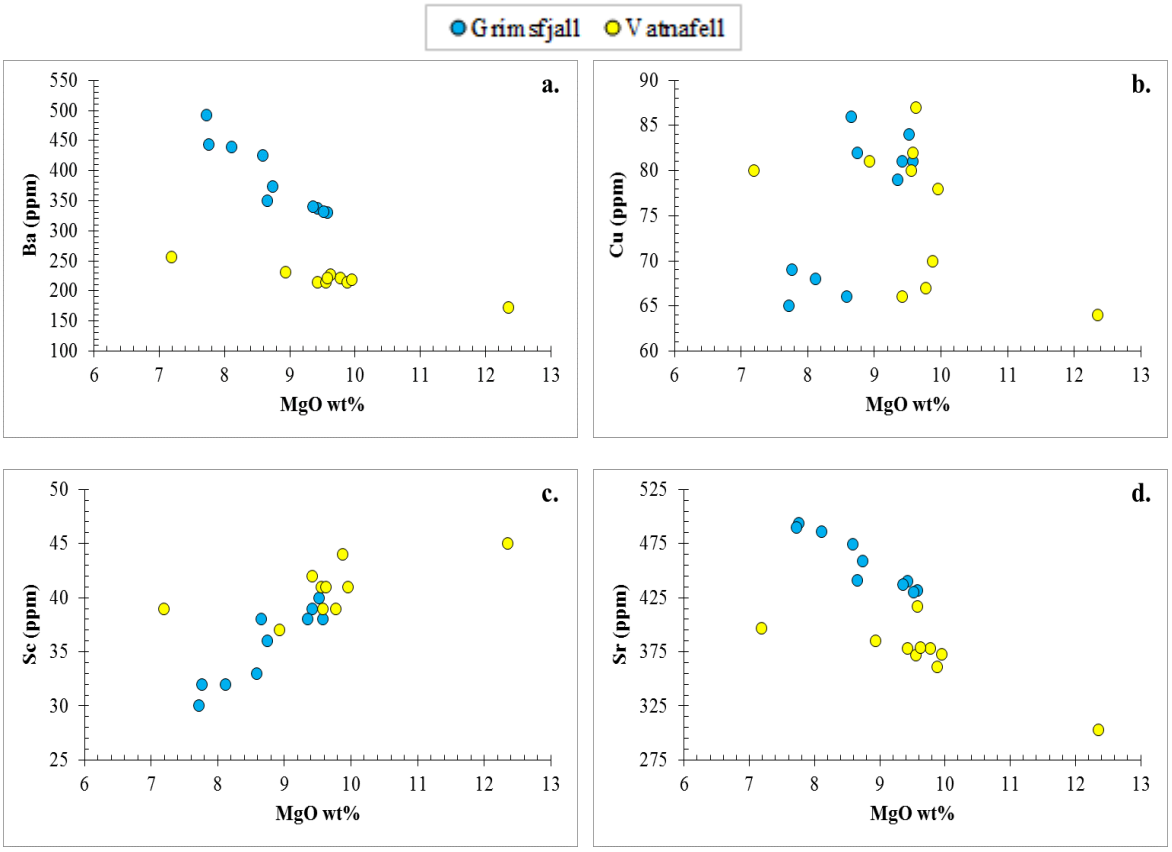


Mynd 20. Harker gröf, MgO á móti a) Co, b) Cr og c) Ni.

Á mynd 20 sést að sýnin frá Vatnafelli og Grímsfjalli sýna jákvæða fylgni og sérstaklega sterka fylgni í tilfelli Co og Ni við MgO. Sýni hópanna eru almennt lík nema í tilfelli Co sem er talsvert hærra í sýnunum frá Vatnafelli.

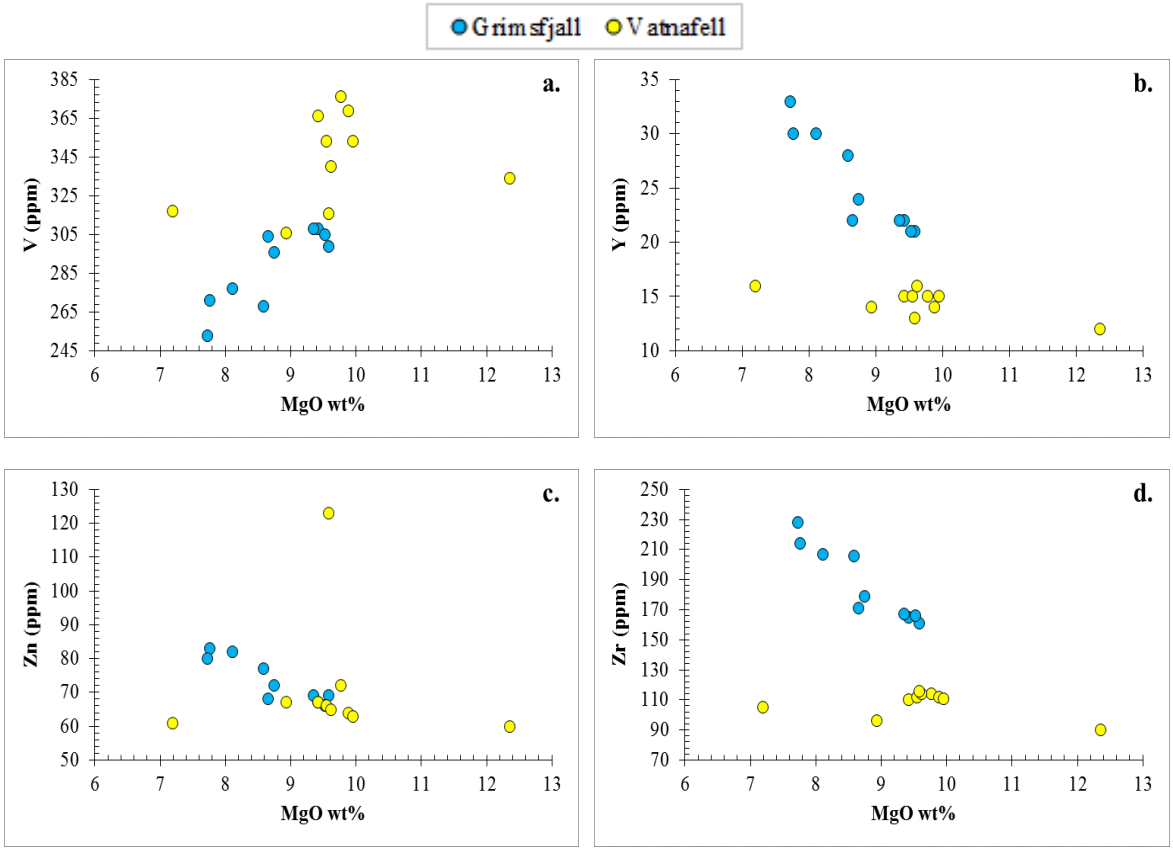
6.3.2 Utangarðsefni

Niðurstöður snefilefna voru settar fram á Harker gröfum, þar sem utangarðsefnin Ba, Cu, Sc, Sr, V, Y, Zn og Zr eru sýnd sem fall af MgO. Utangarðsefni eru svo nefnd vegna þess að þau staðganga ekki greiðlega í kristalgrind steinda við kristöllun.



Mynd 21. Harker gröf, MgO á móti a) Ba, b) Cu, c) Sc, d) Sr.

Á mynd 21 sést að bæði Vatnafell og Grímsfjall sýna jákvæða fylgni með tilliti til Sc en neikvæða fylgni fyrir Ba og Sr. Fyrir Cu virðist Grímsfjall sýna jákvæða fylgni á meðan Vatnafell sýnir neikvæða. Þegar litið er á Grímsfjall fyrir styrk snefilefnanna Sr og Ba, sést að styrkur þeirra er talsvert meiri heldur en fyrir Vatnafell.



Mynd 22. Harker gröf, MgO á móti a) V, b) Y, c) Zn og d) Zr.

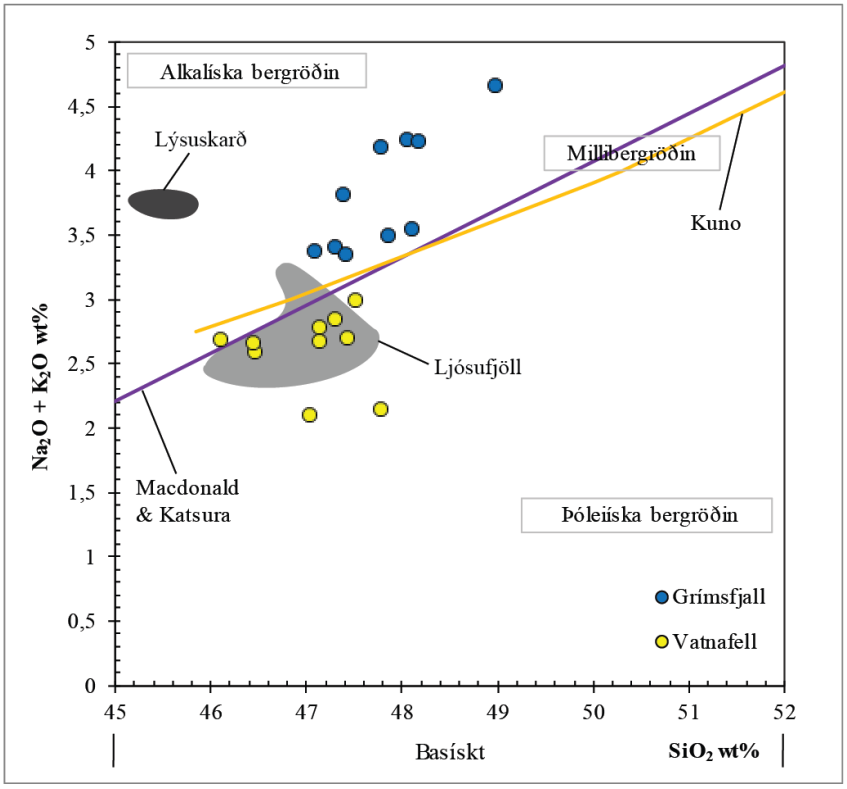
Á mynd 22 sést að bæði Vatnafell og Grímsfjall sýna jákvæða fylgni með tilliti til V en neikvæða fylgni fyrir Y. Fyrir Zn og Zr sýnir Grímsfjall neikvæða fylgni en styrkur Vatnafells helst nokkuð stöðugur. Þegar litið er á snefilefnin Zr og Y sést að talsverður munur er á milli sýnahópanna, þar sem Grímsfjall hefur hærri styrk heldur en Vatnafell.

7 Samanburður og túlkun

Hér verða niðurstöður bergefnagreininga frá Grímsfjalli og Vatnafelli bornar saman við gögn af nútímahraunum frá Ljósufjallaeldstöðvakerfinu og Lýsuskarðseldstöðvakerfinu. Með þeim samanburði verða einnig dregnar ályktanir varðandi líkleg bergfræðiferli sem koma við sögu.

7.1 Aðalefni

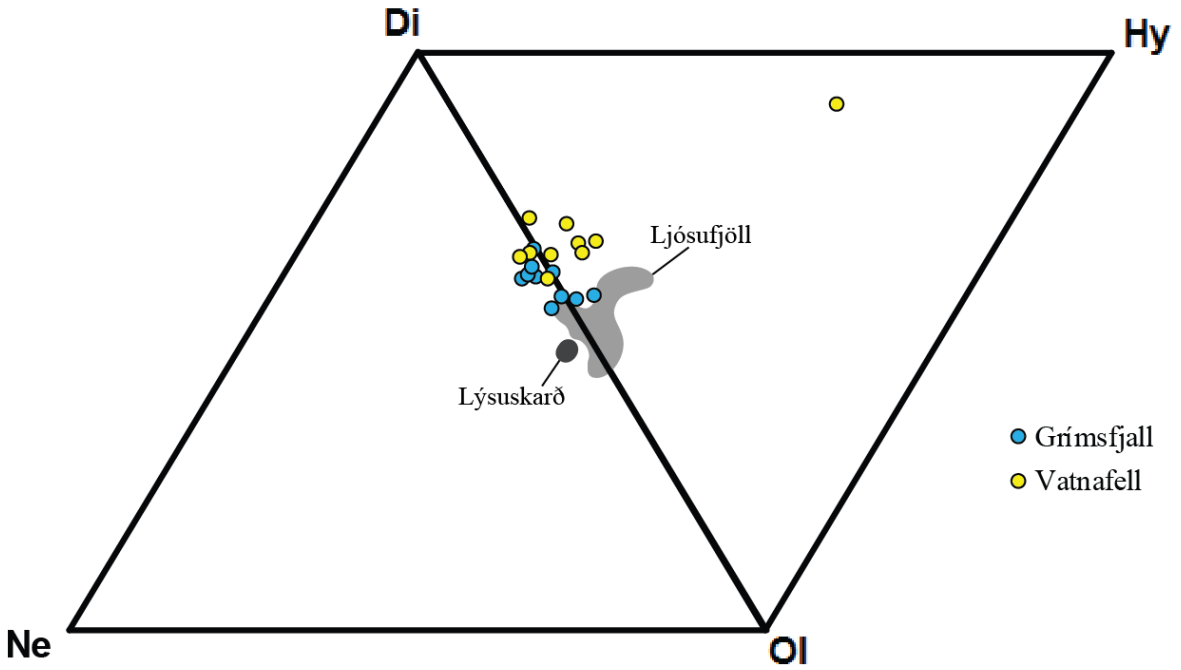
Niðurstöður og samanburðargögn eru sett fram á TAS grafi þar sem alkalímálmarnir Na_2O og K_2O eru sýndir sem fall af SiO_2. Bæði fjöllin og samanburðargögnin eru basalt og því dugar að rissa upp þann hluta grafsins.



Mynd 23. Bergefnagreiningar frá Grímsfjalli og Vatnafelli ásamt nútímahraunum frá Ljósufjöllum og Lýsuskarði samkvæmt TAS grafi (Kuno, 1966; Lebas o.fl., 1986; Macdonald & Katsura, 1964; Stefán Arnórsson, 1993; Sveinn P. Jakobsson o.fl., 2008).

Samkvæmt TAS grafinu sést að Grímsfjall er ríkara í alkalímálmum en Vatnafell og fellur hvorki inn að gildum nútímahrauna frá Ljósufjöllum né Lýsuskarði. Þegar litið er á gildi Vatnafells sést að það fellur nokkuð vel saman við nútímahraunin frá Ljósufjöllum. Nútímahraunin frá Lýsuskarði skera sig frá þar sem þau hafa lægra kísilinnihald og eru ríkari í alkalímálmum líkt og Grímsfjall.

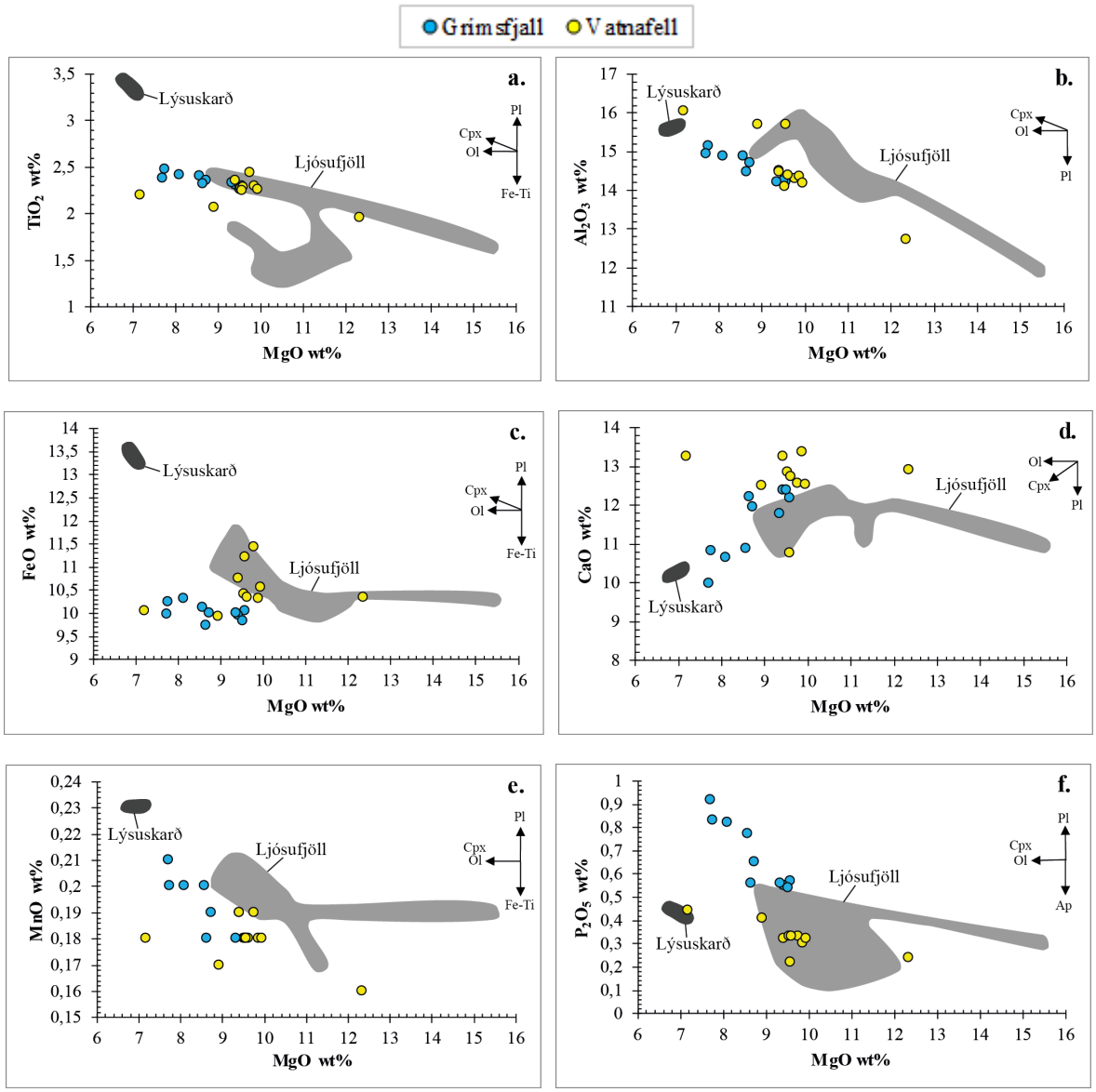
Niðurstöður og samanburðargögn frá CIPW normi eftir kísilmettun eru birt á ferflötungi. Út frá niðurstöðum dugar að rissa upp tvo fyrri þríhyrninganna, Ne-Ol-Di og Ol-Di-Hy.



Mynd 24. Flokkun eftir kísilmettun. Ne = nefelín, Di = díopsíð, Ol = ólivín og Hy = hypersthene (Stefán Arnórsson, 1993).

Á mynd 24 sést að nútímahraunin frá Lýsuskarði og rúmur helmingur af nútímahraunum Ljósufjalla eru nefelín normatíf. Bæði Vatnafell og Grímsfjall eru ríkari í díopsíði heldur en nútímahraunin og færast því nær því horni. Ástæður fyrir því gæti verið vegna þess að bæði Grímsfjall og Vatnafell eru snauðari í járni heldur en nútímahraunin. Eitt sýni frá Vatnafelli sker sig vel frá og er það sýni númer 19 sem er móbergsbreksía. Meirihluti Vatnafells (7 sýni af 10) fellur undir hypersthene normatíf á meðan meirihluti Grímsfjalls (7 sýni af 10) er nefelín normatíf. Það styður enn frekar mynd 23 þar sem Grímsfjall er ríkara í alkalímálmum en Vatnafell og hefur því kísilsnauðar natríum- og kalíumsteindir eins og til dæmis nefelín.

Niðurstöður og samanburðargögn eru sett fram á Harker gröfum. Venjan er að sýna hin ýmsu frumefni sem fall af SiO_2, hinsvegar þar sem lítill breytileiki er á styrk SiO_2 verður notast við MgO.



Mynd 25. Harker gröf, MgO á móti a) TiO_2, b) Al_2O_3, c) FeO, d) CaO, e) MnO og f) P_2O_5. Örvar tákna hlutkristöllun steinda úr bráð, ap = apatít, cpx = klínópýroxen, Fe-Ti = Fe-Ti steindir, ol = ólivín og pl = plagíóklas.

Á mynd 25a má sjá að TiO_2 í nútímahraunum frá Ljósufjöllum og Lýsuskarði ásamt Grímsfjalli og Vatnafelli sýna neikvæða fylgni. Neikvæða fylgni má túlka að sé vegna kristöllunar Fe-Ti steinda. Nútímahraun frá Ljósufjöllum virðast skiptast í tvennt. Annar hlutinn sýnir lækkandi gildi á TiO_2 frá 2,41–1,63 wt% og aukningu á magnesíum frá 8,75–15,5 wt%. Hinn sýnir lækkandi gildi á TiO_2 frá 1,84–1,26 og aukningu á magnesíum frá 9,37–10,53 wt%. Nútímahraunin frá Lýsuskarði eru hæst í TiO_2 magni. TiO_2 lækkar frá 3,43–3,28 wt% og magnesíum gildi eykst frá 6,8–7,1 wt%. Fyrir Grímsfjall lækkar TiO_2 frá 2,48–2,26 wt% og magnesíum magnið eykst frá 7,7–9,5 wt%. Fyrir Vatnafell lækkar TiO_2 almennt frá 2,44–1,96 wt% og magnesíum gildið eykst frá 7–12,3 wt%.

Á mynd 25b má sjá að Al_2O_3 í nútímahraunum frá Ljósufjöllum ásamt Grímsfjalli og Vatnafelli sýna neikvæða fylgni. Nútímahraunin frá Lýsuskarði virðast sýna jákvæða fylgni, þar eykst Al_2O_3 frá 15,55–16,55 wt% samhliða aukningu í magnesíum frá 6,8–7,1 wt%. Neikvæða fylgni má túlka að sé vegna kristöllunar plagióklas. Nútímahraun frá Ljósufjöllum sýna lækkun á Al_2O_3 frá 15,86–11,92 wt% og aukningu á magnesíum frá 9–15,5 wt%. Fyrir Grímsfjall lækkar Al_2O_3 frá 15,13–14,20 wt% og magnesíum magnið eykst frá 7,7–9,5 wt%. Fyrir Vatnafell lækkar Al_2O_3 frá 16,03–12,73 wt% og magnesíum magnið eykst frá 7–12,3 wt%.

Á mynd 25c má sjá að FeO í nútímahraunum frá Ljósufjöllum og Lýsuskarði sýna neikvæða fylgni. Bæði Grímsfjalli og Vatnafelli virðast sýna stöðuga fylgni. Neikvæða fylgni má túlka að sé vegna kristöllunar Fe-Ti steinda. Nútímahraunin frá Lýsuskarði sýna lækkun á FeO frá 13,58–13,21 wt% og magnesíum magnið eykst frá 6,8–7,1 wt%. Nútímahraun frá Ljósufjöllum sýna lækkun á FeO frá 11,76–9,91 wt% og magnesíum magnið eykst frá 9–15,5 wt%. Grímsfjall sýnir stöðugt gildi á FeO frá 10,31–9,74 wt% samhliða aukningu á magnesíum frá 7,7–9,5 wt%. Vatnafell sýnir einnig stöðugt gildi á FeO frá 11,44–9,93 wt% samhliða aukningu á magnesíum frá 7–12,3 wt%.

Á mynd 25d má sjá að CaO í nútímahraunum frá Ljósufjöllum ásamt Vatnafelli sýna neikvæða fylgni. Nútímahraunin frá Lýsuskarði ásamt Grímsfjalli sýna jákvæða fylgni. Neikvæða fylgni má túlka með aukinni kristöllun plagióklas og klínópýroxens. Nútímahraun frá Ljósufjöllum sýna lækkun á CaO frá 12,31–10,80 wt% og aukningu á magnesíum frá 9–15,5 wt%. Nútímahraun frá Lýsuskarði sýna aukningu á CaO frá 10,14–10,28 wt% og aukningu á magnesíum frá 6,8–7,1 wt%. Fyrir Grímsfjall hækkar CaO frá 9,97–12,39 wt% og magnesíum magnið eykst frá 7,7–9,5 wt%. Fyrir Vatnafell lækkar CaO frá 13,36–10,75 wt% og magnesíum magnið eykst frá 7–12,3 wt%.

Á mynd 25e má sjá að MnO í nútímahraunum frá Ljósufjöllum ásamt Grímsfjalli og Vatnafelli sýna neikvæða fylgni. Nútímahraunin frá Lýsuskarði virðast sýna stöðuga fylgni, þar helst gildi á MnO 0,23 wt% samhliða aukningu í magnesíum frá 6,8–7,1 wt%. Neikvæða fylgni má túlka að sé vegna kristöllunar Fe-Ti steinda þar sem Mn^{2+} getur staðgengið inn fyrir Fe^{2+}. Nútímahraun frá Ljósufjöllum sýna lækkun á MnO frá 0,21–0,17 wt% samhliða aukningu á magnesíum frá 9–15,5 wt%. Fyrir Grímsfjall lækkar MnO frá 0,20–0,18 wt% og magnesíum magnið eykst frá 7,7–9,5 wt%. Fyrir Vatnafell lækkar MnO frá 0,19–0,16 wt% og magnesíum magnið eykst frá 7–12,3 wt%.

Á mynd 25f má sjá að P_2O_5 í nútímahraunum frá Ljósufjöllum og Lýsuskarði ásamt Grímsfjalli og Vatnafelli sýna neikvæða fylgni. Neikvæða fylgni má túlka að sé vegna kristöllunar apatíts. Nútímahraunin frá Ljósufjöllum sýna lækkun á P_2O_5 frá 0,52–0,12 wt% og magnesíum magnið eykst frá 9–15,5 wt%. Nútímahraunin frá Lýsuskarði sýna lækkun á P_2O_5 frá 0,45–0,42 wt% og magnesíum magnið eykst frá 6,8–7,1 wt%. Fyrir Grímsfjall lækkar P_2O_5 frá 0,83–0,54 wt% og magnesíum magnið eykst frá 7,7–9,5 wt%. Fyrir Vatnafell lækkar P_2O_5 frá 0,44–0,22 wt% og magnesíum magnið eykst frá 7–12,3 wt%.

7.2 Snefilefni

Snefilefni eru mjög mikilvæg fyrir rannsóknir í jarðefnafræði storkubergs. Þótt þau séu í miklum minnihluta veita þau miklar upplýsingar um jarðefnafræðileg ferli. Snefilefni sýna oft meiri breytingu á styrk heldur en aðalefni og eru oft næm á ferli sem erfitt er að lesa í gegnum aðalefni (White, 2015). Skilgreining á snefilefni er ekki alveg skýr en átt er við þau efni í bergi sem eru um þúsund ppm eða minna af þyngd. Vegna þess í hversu litlu magni þau eru mynda þau venjulega ekki aðalsteindir í bergi heldur staðganga inn í kristalgrind annarra steinda (Björn S. Harðarson, 1993). Staðgengni frumefna inn í kristalgrind steinda ræðst af reglum Goldschmidts og á sér stað milli efna með svipaða jónastærð og hleðslu. Ef tvær jónir hafa sambærilegan radíus og jafngilda hleðslu gildir það að smærri jónin mun frekar staðganga í fastefnið en í vökvann og ef tvær jónir hafa sambærilegan radíus en ólíka hleðslu mun jónin sem hefur hærri hleðslu leita frekar í fastefnið en í vökvann (White, 2015).

Sum snefilefni eru kristalsækin og geta gengið inn í kristalgrind vissra steinda á meðan önnur leita frekar í vökvan og eru vökvasækin. Dreifistuðlar (D) segja til um hvort efni ganga inn í steindir eða haldast í vökva og eru skilgreindir samkvæmt jöfnu 7.1:

$$D = C_s / C_l \tag{7.1}$$

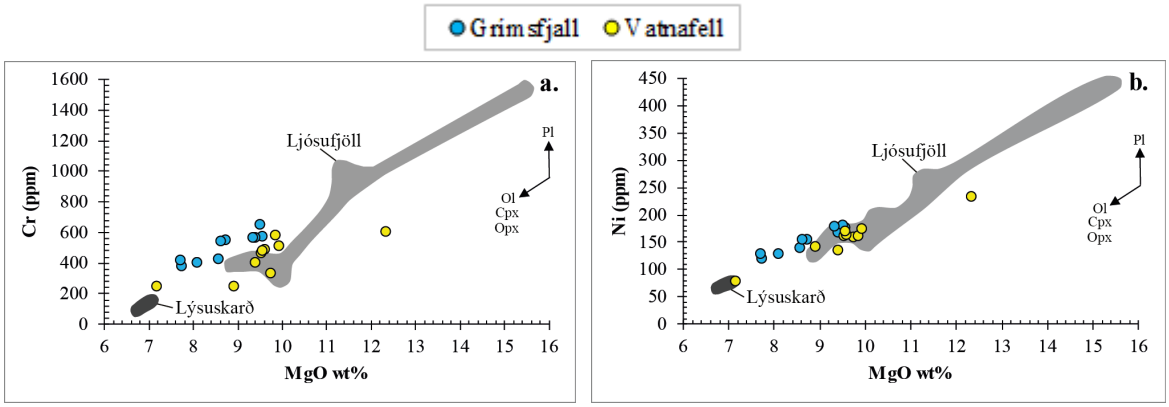
Þar sem C_s er styrkur efnis í föstum fasa og C_l er styrkur efnis í bráð við jafnvægiaðstæður. Efni sem hafa $D > 1$ eru sögð kristalsækin eða innangarðsefni og efni með $D < 1$ eru sögð vökvasækin eða utangarðsefni (White, 2015). Innangarðsefni hverfa því úr bráð við hlutkristöllun á meðan utangarðsefni haldast í bráðinni (Rollinson, 1993). Dreifistuðla snefilefna fyrir steindir í basalti má sjá í töflu 6. Út frá henni má sjá að sum snefilefni sem almennt eru talin vera utangarðsefni geta verið innangarðsefni með tilliti til vissra steinda.

Tafla 6. Dreifistuðlar snefilefna fyrir steindir í basalti (Byggt á Bougault & Hekinian, 1974; Rollinson, 2013; White, 2015).

	ólivín	**ortópýroxen**	**klínópýroxen**	**plagióklas**
Ba	0,000002	0,000002	0,0005	0,3
Co	6,60	2–4	0,5–2,0	0,1
Cr	0,70	10	34	0,02
Cu	0,11		0,18	0,17
Ni	5,9–29	5	1,5–14	0,06
Sc	0,3	0,6	2	0,08
Sr	0,0001	0,001	0,1	1,5
V	0,09	2,6	0,78	0,1
Y	0,005	0,01	0,4	0,008
Zn	0,86		0,5	0,11
Zr	0,001	0,004	0,12	0,03

7.2.1 Innangarðsefni

Niðurstöður og samanburðargögn snefilefna voru sett fram á Harker gröfum, þar sem innangarðsefnin Cr og Ni eru sýnd sem fall af MgO. Ekki voru til samanburðargögn frá Ljósufjallaeldstöðvakerfinu og Lýsuskarðseldstöðvakerfinu um styrk Co.



Mynd 26. Harker gröf, MgO á móti a) Cr og b) Ni. Örvar tákna hlutkristöllun steinda úr bráð, cpx = klínópýroxen, opx = ortópýroxen, ol = ólivín og pl = plagióklas.

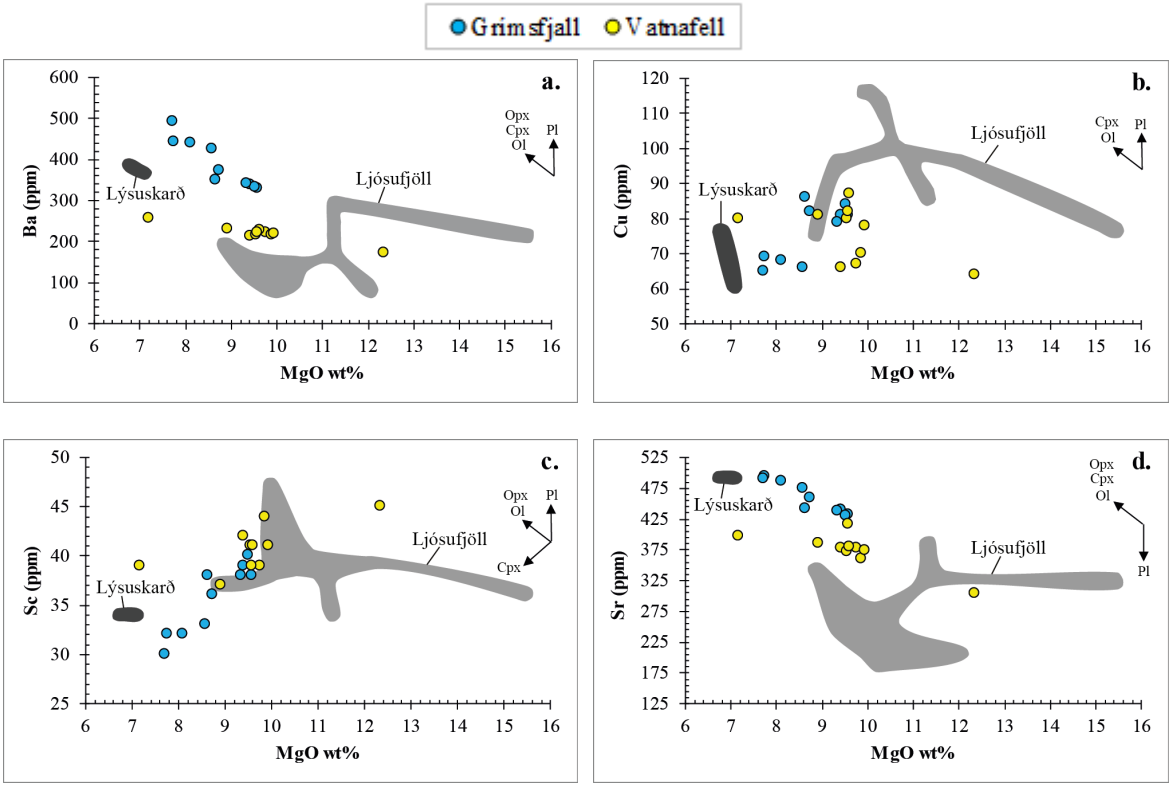
Af mynd 26 sést að bæði niðurstöður og samanburðargögn sýna jákvæða fylgni með tilliti til snefilefnanna Cr og Ni. Aukinn styrkur innangarðsefnanna samhliða aukningu í MgO má útskýra með kristöllun, þar sem snefilefnin staðganga inn í kristalgrind ólivíns, ortópýroxens og klínópýroxens.

Á mynd 26a má sjá að Cr í nútímahraunum frá Ljósufjöllum sýna mesta breytileikann, þar sem styrkur Cr eykst frá 292–1516 ppm með auknu magni magnesíums frá 9–15,5 wt%. Nútímahraun frá Lýsuskarði sýna aukningu í styrk Cr frá 97–138 ppm samhliða aukningu á magnesíum frá 6,8–7,1 wt%. Í tilfelli Grímsfjalls eykst styrkur Cr frá 370–650 ppm og magn magnesíums frá 7,7–9,5 wt%. Fyrir Vatnafell eykst styrkur Cr frá 240–600 ppm og magn magnesíums frá 7–12,3 wt%.

Á mynd 26b má sjá að Ni í nútímahraunum frá Ljósufjöllum sýna aftur mesta breytileikann. Þar eykst styrkur Ni frá 120–440 ppm og magn magnesíums frá 9–15,5 wt%. Nútímahraunin frá Lýsuskarði sýna aukningu í styrk Ni frá 67–74 ppm samhliða aukningu á magnesíum frá 6,8–7,1 wt%. Fyrir Grímsfjall eykst styrkur Ni milli 120–180 ppm og magnesíum magn eykst frá 7,7–9,5 wt%. Fyrir Vatnafell eykst styrkur Ni frá 75–230 ppm og magnesíum magn frá 7–12,3 wt%.

7.2.2 Utangarðsefni

Niðurstöður og samanburðargögn snefilefna voru sett fram á Harker gröfum, þar sem utangarðsefnin Ba, Cu, Sc, Sr, V, Y, Zn og Zr eru sýnd sem fall af MgO.



Mynd 27. Harker gröf, MgO á móti a) Ba, b) Cu, c) Sc, d) Sr. Örvar tákna hlutkristöllun steinda úr bráð, cpx = klínópýroxen, opx = ortópýroxen, ol = ólivín og pl = plagióklas.

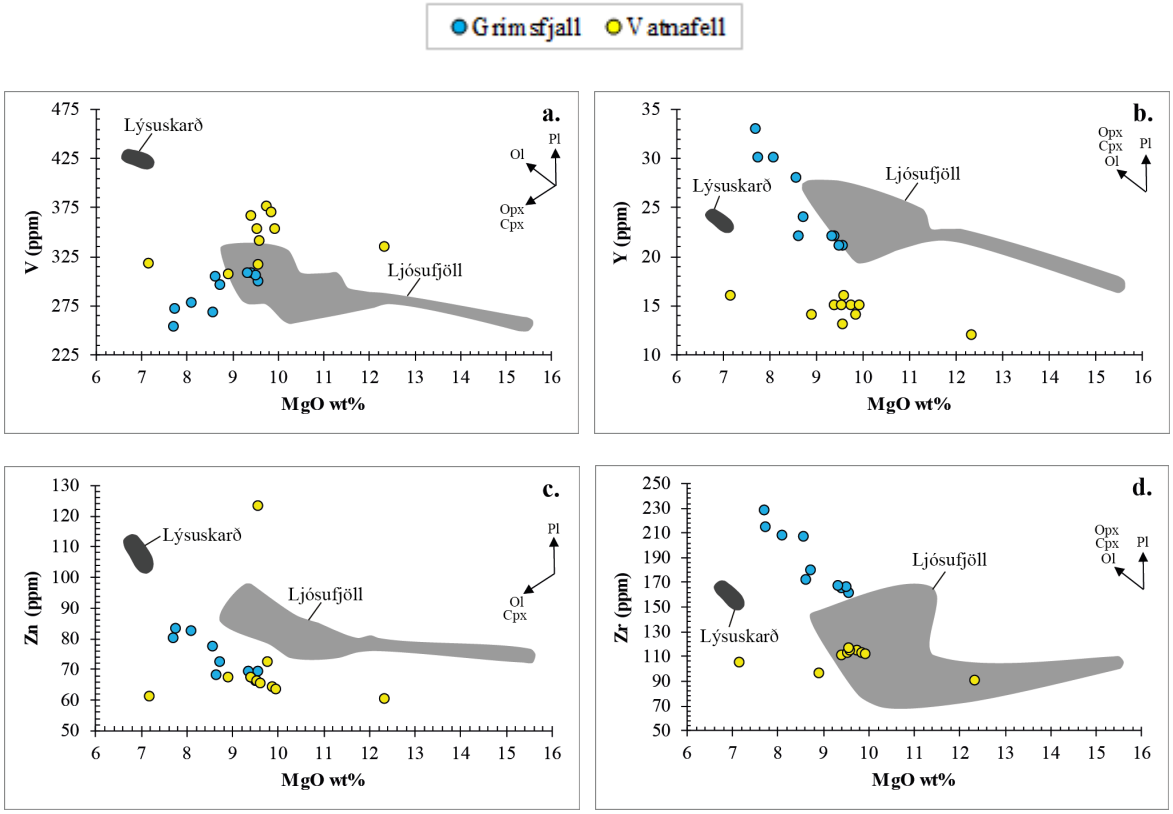
Á mynd 27a má sjá að Ba í nútímahraunum frá Ljósufjöllum og Lýsuskarði ásamt Grímsfjalli og Vatnafelli sýna neikvæða fylgni. Neikvæða fylgni má túlka sem svo að Ba hegði sér sem utangarðsefni við vaxandi kristöllun. Nútímahraun frá Ljósufjöllum skiptast nokkurn veginn í tvennt. Annar hlutinn sýnir lækkandi styrk Ba frá 189–79 ppm og aukningu á magnesíum frá 9–12 wt%. Hinn sýnir lækkandi styrk Ba frá 289–212 og aukningu á magnesíum frá 11–15,5 wt%. Nútímahraun frá Lýsuskarði sýna lækkandi styrk Ba frá 382–267 ppm með auknu magnesíum magni frá 6,8–7,1 wt%. Fyrir Grímsfjall lækkar styrkur Ba frá 444–330 ppm samhliða aukningu í magnesíum frá 7,7–9,5 wt%. Fyrir Vatnafell lækkar styrkur Ba frá 257–172 ppm samhliða aukningu í magnesíum frá 7–12,3 wt%.

Á mynd 27b má sjá að Cu í nútímahraunum frá Lýsuskarði og Vatnafelli sýna neikvæða fylgni. Grímsfjall sýnir jákvæða fylgni og nútímahraunin frá Ljósufjöllum virðast sýna bæði jákvæða og neikvæða fylgni eftir magni magnesíums. Neikvæða fylgni má túlka sem svo að Cu hegði sér sem utangarðefni með vaxandi kristöllun. Fyrir Ljósufjöll er jákvæð fylgni með hækkandi styrk Cu frá 76–101 ppm og auknu magnesíum magni frá 9–10,5 wt%. Neikvæð fylgni er með lækkandi styrk Cu frá 116–77 ppm og auknu magnesíum magni frá 10–15,5 wt%. Nútímahraun frá Lýsuskarði sýna lækkandi styrk Cu frá 76–61 ppm með auknu magnesíum magni frá 6,8–7,1 wt%. Fyrir Grímsfjall eykst styrkur Cu frá

65–86 ppm samhliða aukningu í magnesíum frá 7,7–9,5 wt%. Fyrir Vatnafell lækkar styrkur Cu frá 87–64 ppm samhliða aukningu í magnesíum frá 7–12,3 wt%.

Á mynd 27c má sjá að Sc í nútímahraunum frá Ljósufjöllum virðast almennt sýna neikvæða fylgni á meðan nútímahraunin frá Lýsuskarði sýna stöðuga fylgni. Bæði Grímsfjall og Vatnafell sýna jákvæða fylgni með tilliti til Sc og Mg. Jákvæða fylgni má túlka sem svo að Sc staðgangi inn í kristalgrind klínópýroxens með vaxandi kristöllun. Nútímahraun frá Ljósufjöllum sýna lækkun í styrk Sc frá 47–34 ppm samhliða aukningu í styrk magnesíums frá 9–15,5 wt%. Nútímahraunin frá Lýsuskarði skera sig frá þar sem þau sýna stöðugan styrk á Sc, 34 ppm samhliða aukningu á magnesíum frá 6,8–7,1 wt%. Fyrir Grímsfjall eykst styrkur Sc frá 32–40 ppm samhliða aukningu í magnesíum frá 7,7–9,5 wt%. Fyrir Vatnafell eykst styrkur Sc frá 37–45 pm samhliða aukningu í magnesíum frá 7–12,3 wt%.

Á mynd 27d má sjá að Sr í nútímahraunum frá Ljósufjöllum ásamt Grímsfjalli og Vatnafelli virðast sýna neikvæða fylgni og nútímahraunin frá Lýsuskarði stöðuga fylgni. Neikvæða fylgni má túlka sem svo að Sr hegði sér sem utangarðsefni með vaxandi kristöllun. Nútímahraun frá Ljósufjöllum virðast skiptast í tvennt. Annar hlutinn sýnir lækkandi styrk Sr frá 339–205 ppm og aukningu á magnesíum frá 9–12 wt%. Hinn sýnir lækkandi styrk Sr frá 380–321 og aukningu á magnesíum frá 11–15,5 wt%. Nútímahraunin frá Lýsuskarði skera sig frá þar sem þau sýna stöðugan styrk á Sr frá 493–491 ppm samhliða aukningu á magnesíum frá 6,8–7,1 wt%. Fyrir Grímsfjall lækkar styrkur Sr frá 494–430 ppm samhliða aukningu í magnesíum frá 7,7–9,5 wt%. Fyrir Vatnafell lækkar styrkur Sr almennt frá 397–303 pm samhliða aukningu í magnesíum frá 7–12,3 wt%.



Mynd 28. Harker gröf, MgO á móti a) V, b) Y, c) Zn og d) Zr. Örvar tákna hlutkristöllun steinda úr bráð, cpx = klínópýroxen, opx = ortópýroxen, ol = ólivín og pl = plagióklas.

Á mynd 28a má sjá að V í nútímahraunum frá Ljósufjöllum og Lýsuskarði sýna neikvæða fylgni á meðan Grímsfjall og Vatnafell sýna jákvæða fylgni. Jákvæða fylgni má túlka sem svo að V hegði sér sem innangarðsefni og staðgangi inn í kristalgrind ortópýroxens og klínópýroxens með aukinni kristöllun. Nútímahraun frá Ljósufjöllum sýna lækkun í styrk V frá 330–250 ppm samhliða aukningu MgO frá 9–15,5 wt%. Nútímahraun frá Lýsuskarði sýna einnig lækkun í styrk V frá 425–420 ppm samhliða aukningu magnesíums frá 6,8–7,1 wt%. Fyrir Grímsfjall eykst styrkur V frá 250–310 ppm með auknu gildi magnesíums frá 7,7–9.5 wt%. Fyrir Vatnafell eykst styrkur V frá 310–375 ppm með auknu gildi magnesíums frá 7–12,3 wt%.

Á mynd 28b má sjá að Y í nútímahraunum frá Ljósufjöllum og Lýsuskarði ásamt Grímsfjalli og Vatnafelli sýna neikvæða fylgni. Neikvæða fylgni má túlka sem svo að Y hegði sér sem utangarðefni með vaxandi kristöllun. Nútímahraun frá Ljósufjöllum sýna lækkandi styrk Y frá 27–17 ppm með auknu magnesíum magni frá 9–15,5 wt%. Nútímahraun frá Lýsuskarði sýna lækkandi styrk Y frá 24–23 ppm með auknu magnesíum magni frá 6,8–7,1 wt%. Fyrir Grímsfjall lækkar styrkur Y frá 30–21 ppm samhliða aukningu í magnesíum frá 7,7–9,5 wt%. Fyrir Vatnafell lækkar styrkur Y frá 16–12 ppm samhliða aukningu í magnesíum frá 7–12,3 wt%.

Á mynd 28c má sjá að Zn í nútímahraunum frá Ljósufjöllum og Lýsuskarði ásamt Grímsfjalli sýna neikvæða fylgni. Vatnafell er sker sig frá þar sem það sýnir stöðugan styrk Zn samhliða aukningu á magnesíum. Neikvæð fylgni má túlka sem svo að Zn hegði sér sem utangarðefni með aukinni kristöllun og stöðug fylgni gefur hugmynd um að Zn gæti verið að staðganga inn í ólivín og klínópýroxens sem með vaxandi kristöllun. Nútímahraun frá Ljósufjöllum sýna lækkandi styrk Zn frá 95–74 ppm með auknu magnesíum magni frá 9–15,5 wt%. Nútímahraun frá Lýsuskarði sýna lækkandi styrk Zn frá 111–103 ppm með auknu magnesíum magni frá 6,8–7,1 wt%. Fyrir Grímsfjall lækkar styrkur Zn frá 83–66 ppm samhliða aukningu í magnesíum frá 7,7–9,5 wt%. Fyrir Vatnafell helst styrkur Zn stöðugur frá 72–60 ppm samhliða aukningu í magnesíum frá 7–12,3 wt%.

Á mynd 28d má sjá að Zr hegðar sér svipað og Zn. Bæði nútímahraunin frá Ljósufjöllum og Lýsuskarði ásamt Grímsfjalli sýna neikvæða fylgni. Vatnafell er frábrugðið og sýnir stöðugan styrk Zr samhliða aukningu magnesíums. Neikvæð fylgni má túlka sem svo að Zr hegði sér sem utangarðefni með vaxandi kristöllun Nútímahraun frá Ljósufjöllum sýna lækkandi styrk Zr frá 160–74 ppm með auknu magnesíum magni frá 9–15,5 wt%. Nútímahraun frá Lýsuskarði sýna lækkandi styrk Zr frá 164–154 ppm með auknu magnesíum magni frá 6,8–7,1 wt%. Fyrir Grímsfjall lækkar styrkur Zr frá 228–161 ppm samhliða aukningu í magnesíum frá 7,7–9,5 wt%. Fyrir Vatnafell helst styrkur Zr stöðugur frá 116–90 ppm samhliða aukningu í magnesíum frá 7–12,3 wt%.

7.3 Hlutkristöllun

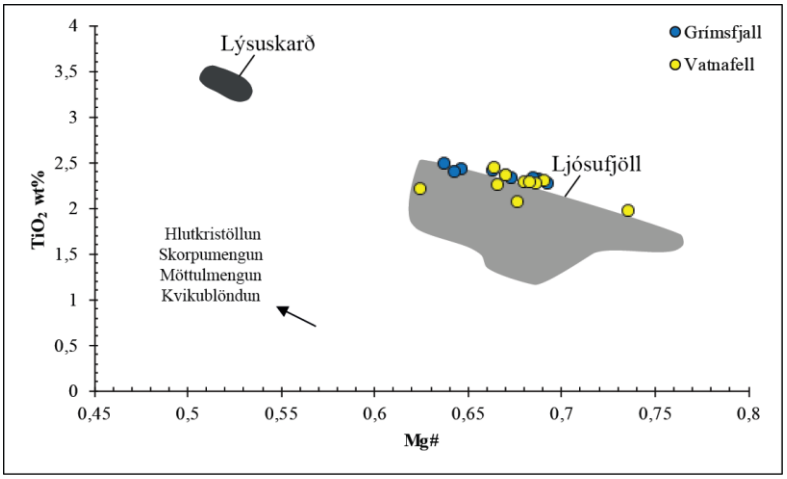
Hér verður leitast við að kanna áhrif hlutkristöllunarferla á efnasamsetningu Vatnafells og Grímsfjall ásamt samanburðargagna. Í tengslum við hlutkristöllunarferli er gagnlegt að skoða svokallaða magnesíum tölu (Mg#). Hún er reiknuð sem mólhlutfall af MgO í samanburði við FeO (Grove, 2000; Hollocher, á.á.).

$$Mg\# = (wt\%\ MgO/40{,}3044)/[(wt\%\ MgO/40{,}3044) + (wt\%\ FeO/71{,}8464)] \qquad (7.1)$$

Hlutfallið er ónæmt fyrir hlutbráðnunarferlum en er mjög næmt fyrir ólivín hlutkristöllun, þar sem MgO og FeO staðganga inn í kristalgrind ólivíns (Björn S. Harðarson, 1993; Grove, 2000). Snauður MORB möttull (DMM) hefur Mg# í kringum 0,9 sem og frumstæður efri möttull (PUM). N-MORB er í jafnvægi við ólivín og hefur Mg# í kringum 0,7 (Workman & Hart, 2005). Frumkvikur eru kvikur sem myndast við bráðnun á möttulbergi og er Mg# hentug til að ákvarða þær. Ef gildi Mg# er lægra en það, þá gefur það til kynna að kvikan hafi gengið í gegnum hlutkristöllun, skorpu- og möttulmengun eða kvikublöndun. Ef kristallar eru til staðar í kvikunni og safnast saman í einum punkti getur Mg# verið hærri en rétta gildi fyrir kvikuna. Í töflu 7 má sjá gildi Mg# í nokkrum berggerðum auk samanburðargagna og rannsóknasvæða.

Tafla 7. Mg# gildi (Björn S. Harðarson, 1993; Workman & Hart, 2005).

Svæði	Mg#
Bulk DMM	0,894
PUM	0,893
Primary N-MORB	0,706
Ljósufjöll	0,626–0,760
Vatnafell	0,625–0,736
Grímsfjall	0,638–0,693
Lýsuskarð	0,512–0,530



Mynd 29. TiO_2 sýnt sem fall af Mg#. Örvar tákna hlutkristöllun steinda úr bráð, skorpumengun, möttulmengun eða kvikublöndun.

Á mynd 29 eru niðurstöður ásamt samanburðargögnum settar fram á grafi þar sem TiO_2 er sýnt sem fall af Mg#. Vatnafell og Grímsfjall hafa tiltölulega svipuð gildi á TiO_2 og Mg# og liggja innan gilda nútímahrauna frá Ljósufjöllum. Lýsuskarð sker sig frá og er með hærri gildi á TiO_2 og lægri Mg#. Þetta má túlka sem svo að þónokkur hlutkristöllun, skorpumengun eða kvikublöndun eigi sér stað fyrir nútímahraunin frá Lýsuskarði en sé ekki eins mikil fyrir Grímsfjall og Vatnafell og nútímahraunin frá Ljósufjöllum. Í framhaldi af þessum ályktunum verður sett fram magnbundið líkan til að kanna frekari þátt hlutkristöllunarferla.

7.3.1 Hlutkristöllunarferli – líkanreikningur

Hægt er að sýna fram á magn hlutkristöllunar samkvæmt jöfnu 7.2:

$$C/C_0 = (1-X)^{D-1} \tag{7.2}$$

Þar sem C er styrkur í bergi, C_0 er upphafsstyrkur, X er hlutfall kristöllunar og D er heildardreifistuðull (White, 2015).

Könnum hvort Vatnafell tengist Grímsfjalli með hlutkristöllun. Athugum hversu mikið þarf að hlutkristalla fyrir snefilefnin Ba og Zr. Notum lægsta gildið fyrir Vatnafell og það hæsta fyrir Grímsfjall. Gerum þá nálgun að Ba og Zr séu fullkomin utangarðsefni (D=0).

Tafla 8. Niðurstöður útreikninga á magn hlutkristöllunar.

	Vatnafell lægsta gildi (ppm)	**Grímsfjall hæsta gildi (ppm)**	**Magn hlutkristöllunar (%)**
Ba	172	492	65,0
Zr	90	228	60,5

Dæmi um útreikninga í tilviki Ba:

$$\frac{C}{C_0} = (1-X)^{0-1}$$

$$(1-X) = \sqrt[-1]{492/172}$$

$$(1-X) = 0{,}350$$

$$X = 1 - 0{,}350$$

$$X = 0{,}650$$

Samkvæmt útreikningum út frá lægsta styrk Vatnafells sem er 172 ppm má áætla að hlutkristalla þurfi 65% til að fá bráð sem hefur 492 ppm í tilfelli Grímsfjalls. Fyrir lægsta gildi Zr fyrir Vatnafell sem er 90 ppm þarf samkvæmt útreikningum að hlutkristalla 60,5% til að fá bráð í tilviki Grímsfjalls sem hefur 228 ppm.

Kokfelt, Hoernle, Lundstrom, Hauff og Bogaard (2009) hafa sýnt fram á að þróað berg í Snæfellsjökli hafi myndast við rúma 80% hlutkristöllun á innan við 54 þúsund árum. Í ljósi þess að Grímsfjall eru úr basalti, þá ætti þessi mikla hlutkristöllun sem útreikningar gefa í skyn að breyta bergefnasamsetningu Grímsfjalls. Bergið ætti þar með að vera mun þróaðara en það er í raun. Það bendir eindregið til þess að hlutkristöllunarferli sé ekki meginferlið sem skýrir þennan mun í efnasamsetningu þessara fjalla heldur bendir það til hlutbráðnunnar. Innbyrðisbreytileiki sýna frá Grímsfjalli annars vegar og Vatnafelli mætti þó útskýra með hlutkristöllun.

7.4 Hlutbráðnun

Í framhaldi af kafla 7.3 verður þáttur hlutbráðnunarferla nú kannaður. Hlutbráðnunarferli eru best séð með því að skoða styrk snefilefna þar sem aðalefni eru oft ónæm fyrir slíkum ferlum (Björn S. Harðarson, 1993). Tvenns konar hlutbráðnunarferli eru til, annars vegar jafnvægishlutbráðnun og hinsvegar ójafnvægishlutbráðnun. Fyrir jafnvægishlutbráðnun er bráð mynduð sem sífellt er að ná endurjafnvægi við fasta efnisþáttinn sem eftir stendur án þess að rísa. Fyrir ójafnvægishlutbráðnun er aðeins lítil bráð mynduð og rís hún samstundis frá fasta efnisþættinum. Því skapast ójafnvægi milli bráðarinnar og steinda (Rollinson, 2013).

7.4.1 Hlutbráðnunarferli – líkanreikningar

Hér verður sett fram magnbundið líkan til að kanna hvort mismikil hlutbráðnun á annaðhvort spínil lherzólíti eða granat lherzólíti eigi sér stað í myndun þessara kvikugerða.

Basalt myndast við bráðnun á möttulberginu perídótíti sem er að meginhluta lherzólít (Guðmundur H. Guðfinnsson, 2010; Sigurður Steinþórsson, 2001). Lherzólít hefur steindirnar ólivín, ortópýroxen og klínópýroxen auk Al_2O_3 steindafasa sem ræðst eftir þrýsting og er annaðhvort granat, spínill eða plagíóklas (Guðmundur H. Guðfinnsson, 2010).

Undir Íslandi á hlutbráðnun sér aðallega stað í spínil lherzólít steindafylkinu en að auki frá bráð sem mynduð er á meira dýpi við litla hlutbráðnun á granat lherzólíti. Þessi litla hlutbráðnun á granat lherzólíti er aðeins lítið brot af heildarmagni bráðarinnar en hefur veruleg áhrif á styrk tiltekinna utangarðsefna (Björn S. Harðarson & Fitton, 1991).

Í því líkani sem verður prófað er gert er ráð fyrir að jafnvægishlutbráðnun eigi sér að stað á spínil lherzólíti eða granat lherzólíti.

Tafla 9. Efnasamsetning spínil lherzólíts og granats lherzólíts (McKenzie & O´Nions, 1991).

	Ol (%)	Opx (%)	Cpx(%)	Sp (%)	Gt (%)
Spínil lherzólít	57,8	27,0	11,9	3,3	
Granat lherzólít	59,8	21,1	7,6		11,5

Heildardreifistuðull milli bráðar og kristalla í steindafylki er reiknaður samkvæmt jöfnu 7.3:

$$D = \sum m_{\phi} D^{\phi/l} \tag{7.3}$$

þar sem D er heildardreifistuðull steindafylkis, m_{ϕ} er hlutfall steindar í steindafylki og $D^{\phi/l}$ er dreifistuðull milli bráðar og kristalla (White, 2015). Dreifistuðlar eru fengnir frá White (2015). Í töflu 10 og 11 má sjá niðurstöður útreikninga.

Tafla 10. Heildardreifistuðull snefilefnanna Ba, Zr og Y fyrir steindafylki spínil lherzólíts (White, 2015).

	Ol	Opx	Cpx	Sp	Heildardreifistuðull
Ba	0,000002	0,000002	0,0005	0,0006	0,00008
Zr	0,001	0,004	0,12	0,06	0,01792
Y	0,005	0,01	0,4	0,05	0,05484

Tafla 11. Heildardreifistuðull snefilefnanna Ba, Zr og Y fyrir steindafylki granat lherzólíts (White, 2015).

	Ol	Opx	Cpx	Gt	Heildardreifistuðull
Ba	0,000002	0,000002	0,0005	0,0007	0,000120
Zr	0,001	0,004	0,12	0,27	0,0416
Y	0,005	0,01	0,4	3,1	0,392

Með reiknuðum heildardreifistuðlum fyrir bæði steindafylkin má reikna jafnvægis-hlutbráðnun samkvæmt jöfnu 7.4:

$$C/C_0 = 1/(D + F(1-D)) \tag{7.4}$$

þar sem C er styrkur í bergi, C_0 er upphafsstyrkur, D er heildardreifistuðull og F er hlutfall bráðar (White, 2015). Gert er ráð fyrir að upphafsstyrkur sé frá frumstæðum möttli og eru gildi snefilefna í slíkum möttli fengin frá Hofmann (1988). Í töflu 12 og 13 má sjá niðurstöður útreikninga.

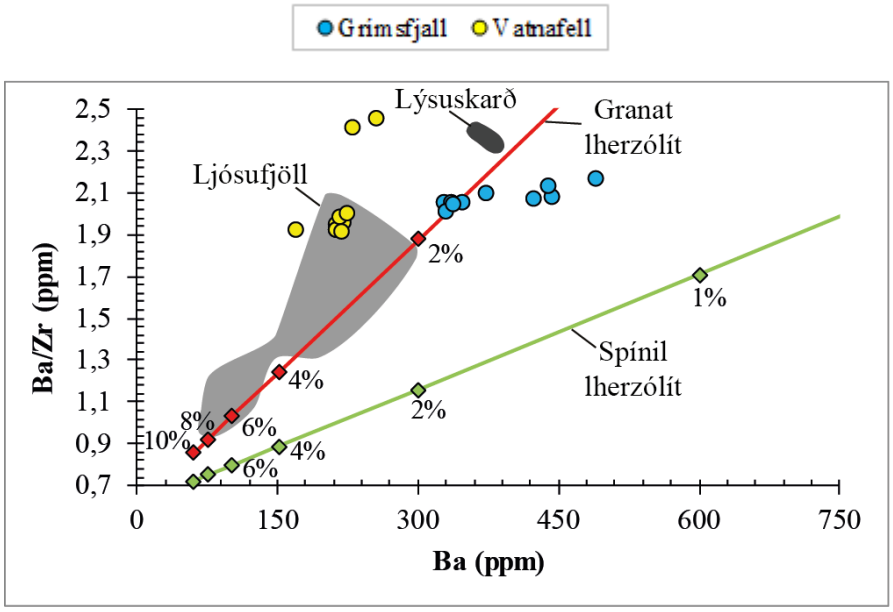
Tafla 12. Styrkur snefilefna miðað við tiltekna hlutbráðnun á spínil lherzólíti (Hofmann, 1988).

	P-möttull (ppm)	Heildar-dreifistuðull	0,25%	0,50%	1%	2%	4%	6%	8%	10%
						(ppm)				
Ba	6,049	0,000081	2344	1191	600	301	151	101	75,5	60,4
Zr	9,714	0,0179	477	426	350	259	170	126	101	83,7
Y	3,940	0,05484	68,9	66,1	61,3	53,4	42,5	35,3	30,2	26,4
Ba/Zr			4,92	2,80	1,71	1,16	0,889	0,797	0,750	0,723
Zr/Y			6,92	6,43	5,71	4,84	3,99	3,58	3,33	3,17

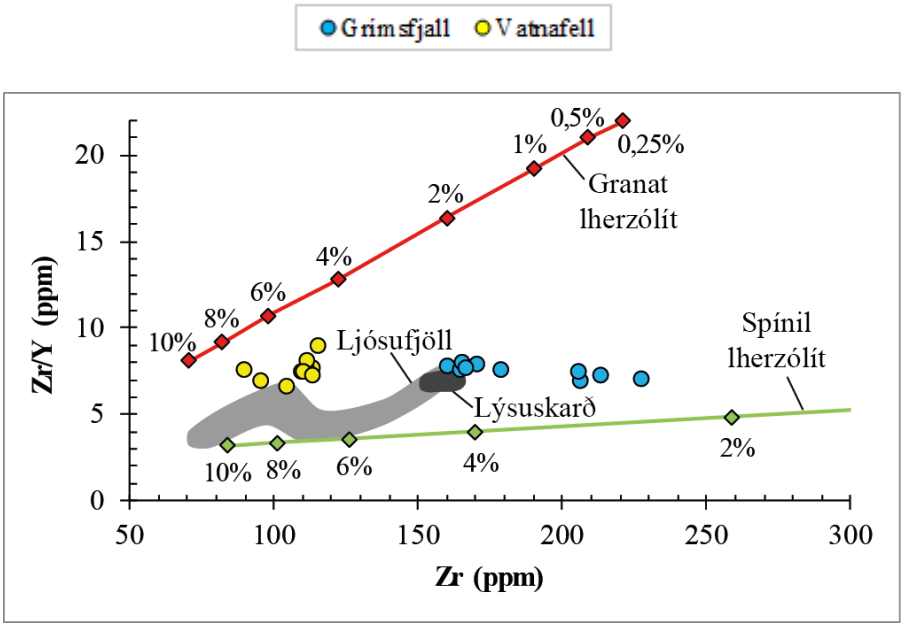
Tafla 13. Styrkur snefilefna miðað við tiltekna hlutbráðnun á granat lherzólíti (Hofmann, 1988).

	P-möttull (ppm)	Heildar-dreifistuðull	0,25%	0,5%	1%	2%	4%	6%	8%	10%
						(ppm)				
Ba	6,049	0,000120	2309	1182	598	301	151	101	75,5	60,4
Zr	9,714	0,0416	221	209	190	160	122	98,0	82,1	70,7
Y	3,940	0,392	10,0	9,97	9,90	9,75	9,46	9,20	8,94	8,70
Ba/Zr			10,5	5,64	3,15	1,88	1,24	1,03	0,919	0,855
Zr/Y			22,0	21,0	19,2	16,4	12,8	10,7	9,18	8,12

Út frá útreikningum er tvö gröf gerð með hlutföllum utangarðsefna fyrir báðar myndanirnar ásamt nútímahraunum frá Ljósufjöllum og Lýsuskarði. Til samanburðar er hlutbræðsluferill fyrir spínil lherzólít möttul og granat lherzólít möttul.



Mynd 30. Hlutfall Ba/Zr sýnt sem fall af Ba. Græn lína táknar hlutbræðsluferil fyrir spínil lherzólít og rauð lína táknar hlutbræðsluferil fyrir granat lherzólít.



Mynd 31. Hlutfall Zr/Y sýnt sem fall af Zr. Græn lína táknar hlutbræðsluferil fyrir spínil lherzólít og rauð lína táknar hlutbræðsluferil fyrir granat lherzólít.

Út frá myndum 30 og 31 má draga ályktun um hugsanleg hlutbráðnunarferli. Samkvæmt myndunum sem byggja á líkan útreikningunum má áætla að lítil hlutbráðnun komi við sögu við myndun þessara mismunandi kvikugerða. Þá kemur það einnig bersýnilega í ljós að möttullinn er greinilega misleitur sem veldur þessum breytileika í kvikugerðum.

Á mynd 30 fyrir Ba/Zr hlutfallið sem fall af Ba sést að nútímahraunin frá bæði Ljósufjöllum og Lýsuskarði ásamt Grímsfjalli og Vatnafelli falla í kringum hlutbræðsluferils granats lherzólíts. Út frá þeirri mynd má áætla að Grímsfjall og nútímahraunin frá Lýsuskarði myndist við lægstu hlutbráðnunina, minni en 2%, nútímahraunin frá Lýsuskarði í kringum 4%, nútímahraunin frá Ljósufjöllum allt frá 2–10% og Vatnafell í kringum 2%.

Á mynd 31 fyrir Zr/Y hlutfallið sem fall af Zr sést að bæði nútímahraunin frá Ljósufjöllum og Lýsuskarði ásamt Grímsfjalli og Vatnafelli falla nálægt hlutbræðsluferils spínils lherzólíts og liggja þar aðeins ofar. Út frá þeirri mynd má áætla að Grímsfjall myndist við lægstu hlutbráðnunina frá 2–4%, nútímahraunin frá Lýsuskarði í kringum 4%, nútímahraunin frá Ljósufjöllum allt frá 4–10% og Vatnafell í kringum 6–10%. Þá gæti lítil hlutbræðsla á granat lherzólíti orsakað aukninguna sem myndanirnar sýnar frá spínil lherzólítinu.

Ljóst er að greinanlegur munur er milli myndanna frá nútíma og myndanna frá síðustu jökulskeiðum. Þessi þrjú utangarðsefni sem valin voru virðast ekki vera alveg á sama máli um magn hlutbræðslu en gefa þó hugmynd um það. Í heild sinni væri þó hægt draga ályktun um að þennan mun mætti útskýra með hlutbræðslu á misleitum möttli, með mismikilli hlutbráðnun á spínil lherzólíti og granat lherzólíti.

8 Samantekt

Hér eru helstu niðurstöður verkefnisins dregnar saman og línurnar lagðar fyrir áframhaldandi rannsóknir og rannsóknaspurningar.

Greinanlegur munur er á milli myndanna frá síðustu jökulskeiðum og myndunum frá nútíma. Afar ólíklegt verður að teljast að þennan mun megi útskýra með hlutkristöllunarferlum þó að slík ferli gætu verið ráðandi innan hvorrar myndunnar fyrir sig. Í ljósi þess að báðar myndanirnar samanstanda af nokkuð frumstæðu basalti en mis alkalísku er mun líklegra að skýringa á breytileika í efnasamsetningu myndanna sé að leita í nokkuð flóknu hlutbræðsluferli. Lagt er til líkan sem útskýrir breytileika í efnasamsetningu myndanna með mismikilli hlutbráðnun á spínil lherzólíti og á granat lherzólíti og það sannreynt með utangarðsefnunum Ba, Zr og Y. Til að sannreyna þetta líkan enn frekar er lagt til að greina flest þau utangarðsefni sem völ er á ásamt mælingum á langlífum geislavirkum samsætum eins og Sr, Nd, Hf og Pb.

Út frá niðurstöðum bergefnagreininga á Grímsfjalli og Vatnafelli og með samanburði við nútímahraun frá Ljósufjallaeldstöðvakerfinu og Lýsuskarðseldstöðvakerfinu virðist þessi tenging við aukna hlutbráðnun vegna hörfunar ísaldarjökulsins seint á pleistósen ekki eiga við í tilfelli Grímsfjalls. Grímsfjall sýnir minni hlutbráðnun en nútímahraunin frá Ljósufjöllum. Hafa ber í huga að enginn aldursgreining er á Grímsfjalli þótt það sé talið vera frá síðjökultíma en ljóst er að frekari efnagreininga eins og lýst hefur verið hér að ofan ásamt aldursgreiningu myndu hjálpa til við að skýra ferlin enn frekar.

Heimildir

Ari Trausti Guðmundsson (2001). *Íslenskar Eldstöðvar.* Reykjavík: Vaka-Helgafell.

Björn S. Harðarson & Fitton, J.G. (1991). Increased mantle melting beneath Snæfellsjökull volcano during Late Pleistocene deglaciation. *Nature, 30,* 62–64.

Björn S. Harðarson (1993). *Alkalic rocks in Iceland with special reference to the Snaefellsjokull system*. Doktorsritgerð, University of Edinburgh, Edinborg.

Björn S. Harðarson, Fitton, J.G. & Hjartarson, Á. (2008). Tertiary volcanism in Iceland. *Jökull, 25,* 161–178.

Bougault, H. & Hekinian, R. (1974). Rift valley in the Atlantic Ocean near 36 degrees 50‘N; petrology and geochemistry of basalt rocks. *Earth and Planetary Science Letters, 24*(2), 249–261.

Concordia College (á.á.). *Simultaneous Determination of Manganese and Nickel in Steel by Inductively Coupled Plasma Emission Spectrometry.* Skoðað 10. maí 2016 á http://sites.cord.edu/chem-330-lab-manual/experiments/icp-aes

Fitton, J.G. (2007). The OIB paradox. *Geological Society of America, 430,* 387–412.

Flude, S., Burgess, R. & McGarvie, D. W. (2008). Silicic volcanism at Ljósufjöll, Iceland: Insight into evolution and eruptive history from Ar-Ar dating. *Journal of Volcanology and Geothermal Research, 169,* 154–175.

Frost, B.R. & Frost, C.D. (2014). *Essentials of Igneous and Metamporphic Petrology.* United States: Cambridge University Press.

Google Maps (2015, 7. júlí). Landsat.

Grove, T.L. (2000). Origin of magmas. Í Haraldur Sigurðsson (ritstj.), *Encyclopedia of Volcanoes* (bls. 133–147). Cambridge: Academic Press.

Guðmundur H. Guðfinnsson (2010, nóvember). Stafar endurkastsflötur á um 40 km dýpi undir Íslandi af fasabreytingum í möttli?. Erindi flutt á Haustráðstefnu Jarðfræðafélags Íslands, Reykjavík.

Haraldur Sigurðsson (1970). Structural origin and plate tectonics of the Snæfellsnes volcanic zone, Western Iceland. *Earth and Planetary Science Letters, 10,* 129–135.

Haukur Jóhannesson & Kristján Sæmundsson (1998). Jarðfræðikort af Íslandi. 1:500.000. Berggrunnskort (1.útg.). Reykjavík: Náttúrufræðistofnun Íslands og Landmælingar Íslands.

Haukur Jóhannesson (1978). Þar var ei bærinn, sem nú er borgin. *Náttúrufræðingurinn, 47,* 129–141.

Haukur Jóhannesson (1980). Jarðlagaskipan og þróun rekbelta á Vesturlandi. *Náttúrufræðingurinn, 50,* 13–31.

Haukur Jóhannesson (1982a). Kvarter eldvirkni á Vesturlandi. Í Helga Þórarinsdóttir o.fl. (ritstj.), *Eldur er í norðri* (bls. 129–137). Reykjavík: Sögufélag.

Haukur Jóhannesson (1982b). Yfirlit um jarðfræði Snæfellsness. Árbók Ferðafélags Íslands 1982. 151–172.

Haukur Jóhannesson (2013). „Snæfellsnes“. Náttúruvá á Íslandi - Eldgos og jarðskjálftar, bls. 367–377. Háskólaútgáfa. Ritst. Júlíus Sólnes o.fl.

Haukur Jóhannesson (2014). *Berggrunnur, Jarðfræðikort af Íslandi. 1:600 000.* Reykjavík (2. útgáfa): Náttúrufræðistofnun Íslands.

Hofmann, A.W. (1988). Chemical differentation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters, 90*(3), 297–314.

Hollocher, K. (á.á.). *Calculation of a CIPW norm from bulk chemical analysis*. Skoðað 17. apríl 2016 á http://minerva.union.edu/hollochk/c_petrology/norms.htm

Ingibjörg Snædal Guðmundsdóttir & Olgeir Sigmarsson (2008). Aldur yngsta bergs Ljósufjalla á Snæfellsnesi. *Náttúrufræðingurinn, 77,* 19–23.

Jóhann Helgason (1993). Aldursákvörðun hraunlaga og segultímatal. *Náttúrufræðingurinn, 63*(1–2), 15–28.

Kristján Sæmundsson (1966). Zwei neue C^{14}- Datierungen isländischer Vulkanausbrüche. *Eiszeitalter und Gegenwart, 17,* 85–86.

Kuno, H. (1966). Lateral variation of basalt magma type across continental margins and island arcs. *Bulletin of Volcanology, 29*(1), 195–222.

Kokfelt, T.F., Hoernle, K., Lundstrom, C., Hauff, F. & Bogaard, C.v.d (2009). Time-scales for magmatic differentiation at the Snaefellsjökull central volcano, western Iceland: Constraints from U-Th-Pa-Ra disequilibria in post-glacial lavas. *Geochimica et Cosmochimica Acta, 70*(4), 1120–1144.

Landmælingar Íslands (2016). *Kortasjá Landmælinga Íslands.* Skoðað 17. febrúar 2016 á http://atlas.lmi.is/kortasja/

Landmælingar Íslands (á.á.). *Niðurhal á gögnum Landmælinga Íslands.* Skoðað 10. maí 2016 á http://atlas.lmi.is/LmiData/

Lebas, M.J., Lemaitre, R.W., Streckeisen, A. & Zanettin, B. (1986). A Chemical Classification of Volcanic-Rocks Based on the Total Alkali Silica Diagram. *Journal of Petrology, 27*(3), 745–750.

Leifur A. Símonarson (1979). Um loftslagsbreytingar á Íslandi. *Jökull, 29,* 44–46.

Lisiecki, L.E. & Raymo, M.E. (2005). A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic δ^{18}O records. *Paleoceanography, 20*(1).

Macdonald, G.A. & Katsura, T. (1964). Chemical composition of Hawaiian lavas. *Journal of Petroleum Science and Engineering, 5*(1), 82–133.

McKenzie, D. & O'Nions, R.K. (1991). Partial melt distributions from inversion of rare earth element concentrations. *Journal of Petroleum Science and Engineering, 32*(5), 1021–1091.

Náttúrufræðistofnun Íslands (á.á.). *Niðurhal á gögnum Náttúrufræðistofnunar Íslands.* Skoðað 10. maí 2016 á http://atlas.lmi.is/NI_Data/

Páll Einarsson (2008). Plate boundaries, rifts and transforms in Iceland. *Jökull, 58,* 35–58.

Rollinson, H. (2013). *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation.* United States: Routledge.

Schwarzbach, M. & Münnich, K.O. (1956). Zur Bestimmung des absoluten Alters der Grábrók-Vulkane (West-Island). *Naturwissenschaften, 43,* 177.

Sigurður Steinþórsson (2001). Myndun meginlandsskorpu. *Náttúrufræðingurinn, 70,* 165–174.

Skoog, D.A., Holler, F.J. & Crouch, S.R. (1998). *Principles of Instrumental Analysis (6th edition).* Belmont, Canada: Brooks/Cole.

Stefán Arnórsson (1993). Inngangur að bergfræði storkubergs. *Náttúrufræðingurinn, 62,* 181–205.

Sveinn P. Jakobsson (1987). Ágrip: Um bergfræði Íslands. *Jökull, 29,* 57–73.

Sveinn P. Jakobsson, Kristján Jónasson & Ingvar A. Sigurðsson (2008). The three igneous rock series of Iceland. *Jökull, 58,* 117–138.

White, W.M. (2015). *Geochemistry.* Bretland: Wiley-Blackwell.

Workman, R.K. & Hart, S.R. (2005). Major and trace element composition of the depleted MORB mantle (DMM). *Earth and Planetary Science Letters, 231*(2–3), 53–72.

Þorvaldur Þórðarson & Ármann Höskuldsson (2002). *Iceland.* England: Biddles Ltd.

Þorvaldur Þórðarson & Ármann Höskuldsson (2008). Postglacial volcanism in Iceland. *Jökull, 58,* 197–223.

Þorvaldur Þórðarson & Guðrún Larsen (2007). Volcanism in Iceland in historical time: Volcano types, eruption styles and eruptive history. *Jökull, 43,* 118–152.

Viðauki A

Sýni G4.

Sýni G5.

Sýni G8

Sýni G10

Sýni G11

Sýni G12

Mynd 32. Sýni frá Grímsfjalli.

Sýni G13

Sýni G14

Sýni G15

Sýni G18

Mynd 33. Sýni frá Grímsfjalli.

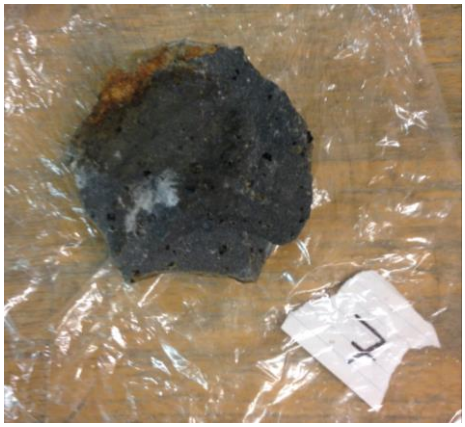
Viðauki B

Sýni V1

Sýni V2

Sýni V3

Sýni V5



Sýni V7

Sýni V8

Mynd 34. Sýni frá Vatnafelli.

Sýni V15

Sýni V16

Sýni V19

Sýni V20

Mynd 35. Sýni frá Vatnafelli.

Viðauki C

Samanburðargögn nútímahrauna frá Ljósufjallaeldstöðvakerfinu og Lýsuskarðseldstöðvakerfinu (Björn S. Harðarson, 1993).

Tafla 14. Nútímahraun frá Ljósufjallaeldstöðvakerfinu og Lýsuskarðseldstöðvakerfinu – Aðalefni (wt%), magnesíum tala og CIPW Norm útreikningar.

Sýni	SNB94	SNB95	SNB96	SNB97	SNB129	SNB130	SNB131	SNB132	SNB133	SNB321B	IC7	SNB127	SNB128
SiO_2	47,26	47,51	47,67	46,05	46,80	46,78	46,58	46,90	47,15	46,90	47,55	45,30	45,71
TiO_2	1,39	1,26	1,57	1,63	2,41	1,53	2,04	1,48	1,84	1,76	1,61	3,43	3,28
Al_2O_3	15,86	15,36	14,74	11,92	14,97	14,04	14,46	15,62	15,44	13,87	15,45	15,55	15,65
Fe_2O_3	11,69	11,26	11,85	11,39	12,22	11,43	11,47	11,64	13,07	11,01	12,15	15,09	14,68
MnO	0,19	0,19	0,20	0,19	0,20	0,19	0,19	0,19	0,21	0,17	0,19	0,23	0,23
MgO	9,94	10,53	10,29	15,45	8,90	12,04	11,22	10,02	9,37	11,34	10,03	6,80	7,10
CaO	12,12	12,31	11,85	10,94	11,68	11,97	11,84	11,89	10,80	11,14	11,66	10,14	10,28
Na_2O	2,18	2,26	2,13	1,87	2,56	2,12	2,23	2,12	2,53	2,16	2,05	2,91	2,88
K_2O	0,32	0,29	0,56	0,58	0,64	0,29	0,49	0,37	0,48	0,76	0,50	0,86	0,86
P_2O_5	0,14	0,12	0,22	0,30	0,52	0,20	0,43	0,16	0,23	0,34	0,19	0,45	0,42
LOI	-0,12	-0,23	-0,24	-0,15	-0,22	-0,33	0,00	-0,07	-0,19	-0,02	-0,39	-0,20	-0,14
Total	100,97	100,86	100,84	100,17	100,68	100,26	100,95	100,32	100,93	99,43	100,99	100,56	100,95
Mg#	0,665	0,686	0,669	0,760	0,629	0,711	0,695	0,667	0,626	0,706	0,658	0,512	0,530
Plagíóklas	50,96	49,19	47,00	36,97	48,02	45,36	45,96	50,24	50,76	44,84	48,65	48,58	48,79
Orþóklas	1,89	1,71	3,31	3,43	3,78	1,71	2,90	2,19	2,84	4,55	2,95	5,08	5,08
Nefelín		0,43		0,83	0,63	0,37	0,49					1,72	1,57
Díopsíð	21,60	23,73	22,94	24,07	22,01	24,41	22,50	21,13	18,50	22,15	20,29	16,99	17,26
Hypersthene	1,00		2,93					2,05	1,33	1,47	5,42		
Ólivín	19,06	19,83	17,77	28,39	17,11	22,27	20,77	18,64	19,71	20,35	16,59	16,74	16,88
Ilmenít	2,64	2,39	2,98	3,11	4,58	2,92	3,87	2,83	3,49	3,40	3,04	6,55	6,25
Magnetít	2,54	2,45	2,58	2,49	2,67	2,49	2,49	2,55	2,84	2,44	2,64	3,29	3,20
Apatít	0,32	0,28	0,51	0,70	1,20	0,46	1,00	0,37	0,53	0,81	0,44	1,04	0,97

Samanburðargögn nútímahrauna frá Ljósufjallaeldstöðvakerfinu og Lýsuskarðseldstöðvakerfinu (Björn S. Harðarson, 1993).

Tafla 15. Nútímahraun frá Ljósufjallaeldstöðvakerfinu og Lýsuskarðseldstöðvakerfinu – Styrkur snefilefna (ppm).

Sýni	SNB94	SNB95	SNB96	SNB97	SNB129	SNB130	SNB131	SNB132	SNB133	SNB321B	IC7	SNB127	SNB128
Ba	79	143	87	212	189	83	165	96	121	289	146	382	367
Co													
Cr	292	557	474	1516	385	958	787	349	419	1019	299	97	138
Cu	116	101	113	77	76	96	89	116	96	86	98	76	61
Ni	166	178	198	436	124	279	224	171	167	265	146	67	74
Sc	41	41	41	36	37	39	37	38	37	34	47	34	34
Sr	211	257	185	321	339	205	318	240	241	380	276	493	491
V	276	301	264	255	328	279	301	279	283	273	326	425	420
Y	20	21	21	17	27	22	24	21	27	22	21	24	23
Zn	80	84	76	74	86	78	80	82	95	76	80	111	103
Zr	81	108	74	104	140	77	112	88	110	160	110	164	154