



**ORKUSTOFNUN**

**RANNSÓKNASVIÐ - Reykjavík, Akureyri**

# **Forðafraeðistuðlar**

**Samspil ummyndunar og  
efnainnihalds í bergi**

**Hjalti Franzson**

**Unnið fyrir auðlindadeild Orkustofnunar**

**1999**

**OS-99108**





**ORKUSTOFNUN**

Rannsóknasvið

Reykjavík - Akureyri

Verknr. 8-720105

**Hjalti Franzson**

## **Forðafraeðistuðlar**

**Samspil ummyndunar og efnainnihalds í bergi**

**Unnið fyrir auðlindadeild Orkustofnunar**

**OS-99108**

**Desember 1999**

ORKUSTOFNUN - RANNSÓKNASVIÐ

Reykjavík: Grensásvegi 9, 108 Rvk. - Sími 569 6000 - Fax 568 8896

Akureyri: Glerárgötu 36, 600 Ak. - Sími 463 0957 - Fax 463 0998

Netfang: os@os.is - Veffang: <http://www.os.is>



Skýrsla nr: OS-99108	Dags: Desember 1999	Dreifing: <input checked="" type="checkbox"/> Opin <input type="checkbox"/> Lokuð til
Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill: FORÐAFRÆÐISTUÐLAR Samspil ummyndunar og efnainnihalds í bergi	Upplag: 30	
	Fjöldi síðna: 30	
Höfundar: Hjalti Franzson	Verkefnisstjóri: Ómar Sigurðsson	
Gerð skýrslu / Verkstig: Bergfræðirannsókn, framhald verkefnis	Verknúmer: 8-720105	
Unnið fyrir: Auðlindadeild Orkustofnunar		
Samvinnuaðilar:		
Útdráttur: Gerð er grein fyrir rannsóknum á tengslum efnafræði bergs og ummyndunar þess. Verkið er hluti af verkefninu Forðafræðistuðlar og byggist á þunnarneiða- og efnagreiningum sýna sem tekin voru í tengslum við þetta verk. Helstu niðurstöður eru þær að ummyndun bergs eykst með hita í viðkomandi jarðhitasvæði, og ummyndun eykst einnig í réttu hlutfalli við upprunalegan poruhluta. Glæðitap eykst í réttu hlutfalli við ummyndun bergs, og hlutfall CO <sub>2</sub> og H <sub>2</sub> O, sem eru meginhluti glæðitapsins, er því hærra sem ummyndun er meiri. Tiltölulega mikið magn CO <sub>2</sub> í bergi úr epidót-amfiból ummyndunarbeltinu bendir til að kalsít hafi fallið út á kælingartíma jarðhitakerfis. Samband einstakra efna og magns útfellinga í sýnum gefur til kynna efnaflutninga í jarðhitakerfi. Því er líklegt að aukning hafi orðið á SiO <sub>2</sub> og Na <sub>2</sub> O en minnkun á K <sub>2</sub> O með aukinni ummyndun. Þau efni sem sýna minnstu breytingar við ummyndun eru Zr, TiO <sub>2</sub> , P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> og jafnvel Mg. Önnur efni sýna fremur breytilega svörun við ummyndun. Settar eru fram tillögur um frekari rannsóknir til að fá betri heildarmynd af viðfangsefninu.		
Lykilorð: Forðafræðistuðlar, efnagreining bergs, ummyndun, þunnarneiðar, poruhluti, útfellingar	ISBN-númer:	
	Undirskrift verkefnisstjóra: 	
	Yfirfarið af: VS, Ómar	



## ÁGRIP

Í þessari skýrslu er að meginhluta fjallað um tengsl efnafræði bergs og ummyndunar. Gögnin eru fengin úr þunnsneiða- og efnagreiningum sýna sem tekin hafa verið í tengslum við verkefnið Forðafræðistuðlar. Jákvæð tengsl eru á milli háa upprunalegs poruhluta í bergi og aukinnar ummyndunar bergs. Sýnt er fram á að glæðitap (summa bundins vatns í bergi og koldíoxíðs) eykst með aukinni ummyndun. Bornar voru saman þróunarlínur í bergefnum frá Skarðsheiði, Kröflu og Reykjanes-Langjökulsbeltinu, og sýnt fram á að þær séu það breytilegar að erfitt sé að nota þær beint til samanburðar við og til að meta efnaflutninga sem átt hafa sér stað í ummynduðum sýnum. Bent er á að meta má efnaflutninga í bergi með því að tengja saman magn útfellinga sem fall af efnastyrk einstakra efna í sýnum. Sá samanburður sýnir meðal annars að ummyndun í basalti leiðir yfirleitt til aukningar í kísli ( $\text{SiO}_2$ ) og natríumoxíði ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), en kálfumoxíð ( $\text{K}_2\text{O}$ ) skolast úr bergi með aukinni ummyndun (og hita). Þau efni sem virðast bregðast minnst við ummyndun eru Zr,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  og jafnvel MgO. Önnur efni sýna breytilega svörun við ummyndun. Talið er líklegt að unnt sé að nálgast upprunalegt magn Zr (og jafnvel  $\text{TiO}_2$ ) í bergi í þeim sýnum sem ummyndast hafa. Ef svo er, þá er fengin leið til að meta efnaflutninga nákvæmar en hér hefur verið gert.

## **Efnisyfirlit**

<b>Ágrip</b>	<b>2</b>
<b>1. Inngangur</b>	<b>5</b>
<b>2. Ummyndun bergs með hliðsjón af upprunalegum poruhluta</b>	<b>6</b>
<b>3. Glæðitap og ummyndun</b>	<b>8</b>
<b>4. Efnafræði fersks bergs og ummyndaðs</b>	<b>13</b>
<b>5. Samanburður á efnafræði ummyndaðs bergs og útfellingum</b>	<b>17</b>
<b>6. Frekari rannsóknir</b>	<b>28</b>
<b>7. Helstu niðurstöður</b>	<b>29</b>
<b>Heimildir</b>	<b>30</b>

## **Töfluskrá**

<b>1. Fjöldi efnagreininga og þunnsneiða</b>	<b>6</b>
<b>2. Samantekt um efnaflutninga í bergi og efnadreifing í fersku bergi</b>	<b>18</b>

## Myndaskrá

1. Ferskleiki móbergs á móti blöðrufyllingum	7
2. Ferskleiki hraunlaga á móti blöðrufyllingum	7
3. Ferskleiki basaltinnskota á móti blöðrufyllingum	7
4. Ferskleiki hraunlaga á móti glæðitapi	9
5. Ferskleiki hraunlaga á móti $H_2O^+$ (bundnu vatni)	9
6. Ferskleiki hraunlaga á móti $CO_2$	9
7. Ferskleiki basaltinnskota á móti glæðitapi	10
8. Ferskleiki basaltinnskota á móti $H_2O^+$	10
9. Ferskleiki basaltinnskota á móti $CO_2$	10
10. Ferskleiki móbergs á móti glæðitapi	11
11. Ferskleiki móbergs á móti $H_2O^+$	11
12. Ferskleiki móbergs á móti $CO_2$	11
13. Einföld skematísk mynd sem sýnir efnaflutning í bergi	12
14. Sýnasvæði í forðafræðistuðlaverkefningu	12
15. $K_2O$ á móti $SiO_2$ í sýnum frá Skarðsh., Kröflu og Reykjanes-Langj.beltinu	15
16. $TiO_2$ á móti $SiO_2$ í sýnum frá Skarðsh., Kröflu og Reykjanes-Langj.beltinu	15
17. $MgO$ á móti $SiO_2$ í sýnum frá Skarðsh., Kröflu og Reykjanes-Langj.beltinu	15
18. $Zr$ á móti $TiO_2$ í sýnum frá Skarðsh., Kröflu og Reykjanes-Langj.beltinu og samanburður við forðafræðisýnin.	16
19. Einfölduð skýringamynd af breytingar í efnastyrk með tilkomu útfellinga	17
20. $SiO_2$ í basalti á móti útfellingum	20
21. $Al_2O_3$ í basalti á móti útfellingum	20
22. $FeO$ í basalti á móti útfellingum	20
23. $CaO$ í basalti á móti útfellingum	21
24. $MgO$ í basalti á móti útfellingum	21
25. $Na_2O$ í basalti á móti útfellingum	21
26. $K_2O$ í basalti á móti útfellingum	22
27. $TiO_2$ í basalti á móti útfellingum	22
28. $MnO$ í basalti á móti útfellingum	22
29. $P_2O_5$ í basalti á móti útfellingum	23
30. $Zr$ í basalti á móti útfellingum	23
31. $Zn$ í basalti á móti útfellingum	23
32. $Cu$ í basalti á móti útfellingum	24
33. $Rb$ í basalti á móti útfellingum	24
34. $Sr$ í basalti á móti útfellingum	24
35. $Ga$ í basalti á móti útfellingum	25
36. $Nb$ í basalti á móti útfellingum	25
37. $Ce$ í basalti á móti útfellingum	25
38. $V$ í basalti á móti útfellingum	26
39. $Pb$ í basalti á móti útfellingum	26
40. $Y$ í basalti á móti útfellingum	26
41. $S$ í basalti á móti útfellingum	27
42. $As$ í basalti á móti útfellingum	27

## 1. Inngangur

Í þessari skýrslu er fjallað um þann hluta verkefnisins um forðafræðistuðla er lýtur að efnagreiningum og bergfræði sýnasafnsins. Áður hafa komið út 6 skýrslur og greinargerðir um þennan hluta gagnagrunnsins (Ásgrímur Guðmundsson o.fl. 1995; Hjalti Franzson o.fl. 1997; Hjalti Franzson 1998a,b,c; Hjalti Franzson og Helga Tulinius 1999).

Þeirri vinnu, sem liggur að baki þessari skýrslu, var skipt í eftirfarandi þætti:

- Allar efnagreiningar voru teknar saman og endurreiknaðar í 100% án glæðitaps og allt járn reiknað sem FeO.
- Efnafræðigögnin voru tengd við gögn úr eðlisfræðilegum forðafræðimælingum, en ekki var frekar unnið úr samanburði þar á milli.
- Nokkuð skorti á að til væru sambærileg bergfræðileg gögn, og var gerð kerfisbundin þunnsneiðaskoðun á um 30 þunnsneiðum, til að gera samanburð á berg- og efnafræði sýnanna trúverðugri.
- Farið var yfir greinasafn sem fjallar um efnaflutninga í jarðhitakerfum.
- Fengin voru efnafræðileg sýnasöfn af fersku bergi frá Reykjanes-Langjökulsbeltinu (óbirt gögn frá Sveini Jakobssyni) og frá Kröflu (gögn frá Karli Grönvold, sem fengin eru úr völdum sýnum úr doktorsritgerð Hugh Nickolson frá Edinborgarháskóla) til að bera saman við efnafræði sýna úr Forðafræðistuðlum.

Skýrslunni er skipt í 7 kafla. Fyrst er fjallað um bergfræði sýna (kafla 2) þar sem sýnt er fram á aukna ummyndun bergs með auknum hita (ummyndunarbelti) og hvernig ummyndun tengist upprunalegum poruhluta bergs. Þar næst er fjallað í kafla 3 um tengsl glæðitaps ( $\text{CO}_2$  og  $\text{H}_2\text{O}$ ), berggerða og ummyndunarbelta. Í kafla 4 er tæpt á samanburði á efnafræði í fersku og ummynduðu bergi. Í kafla 5 er gerður samanburður á magni útfellinga og ýmissa efna í basalti, með það fyrir augum að meta efnatilfærslur í berginu við mismunandi ummyndunaraðstæður. Í kafla 6 er bent á nokkra þætti sem betur þyrfti að kanna. Að síðustu er gerð grein fyrir helstu niðurstöðum í kafla 7 og bent á frekari rannsóknir sem gera þarf.

## 2. Ummyndun bergs með hliðsjón af upprunalegum poruhluta

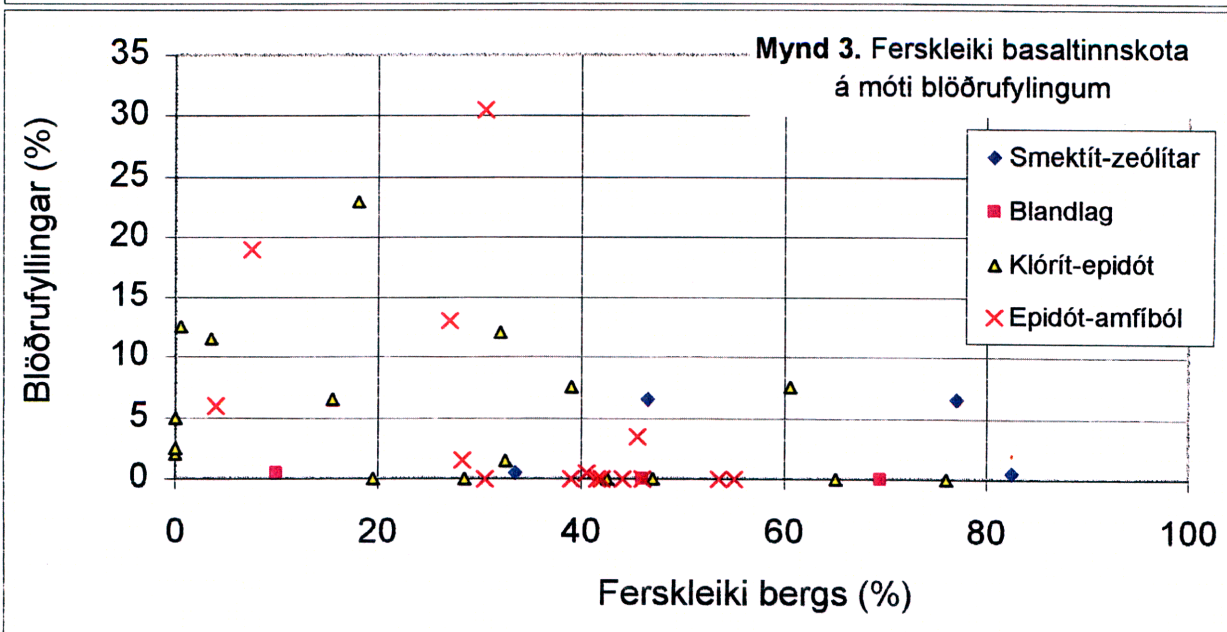
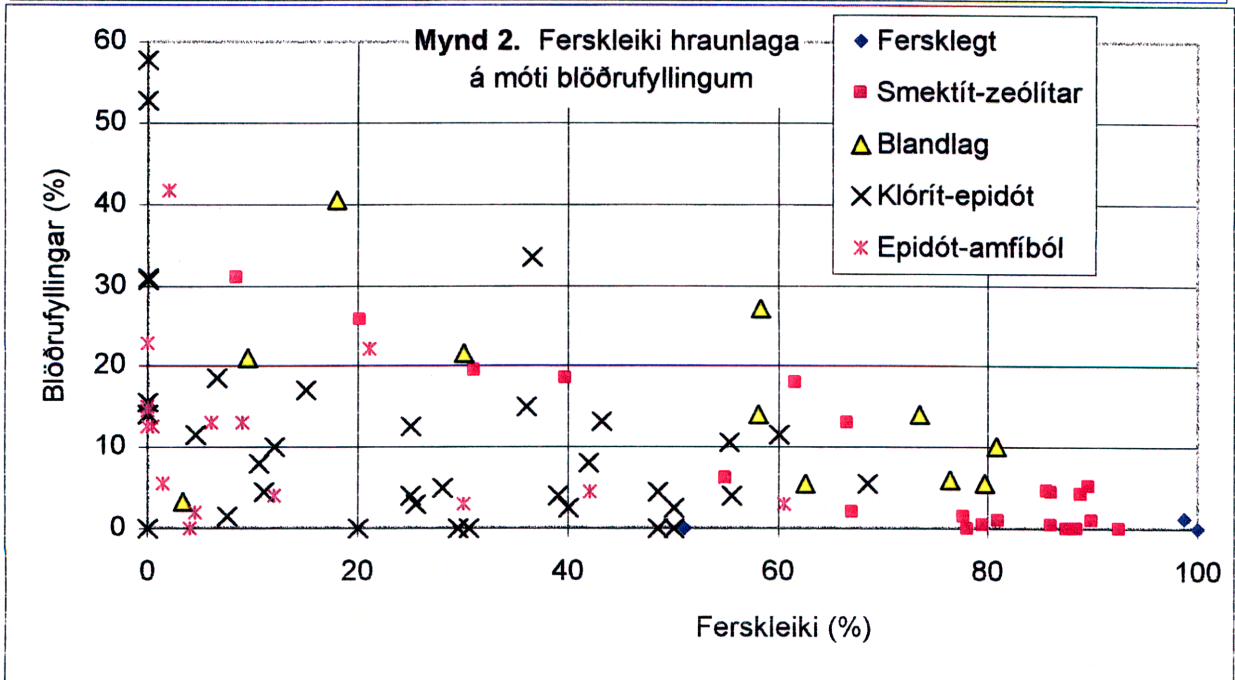
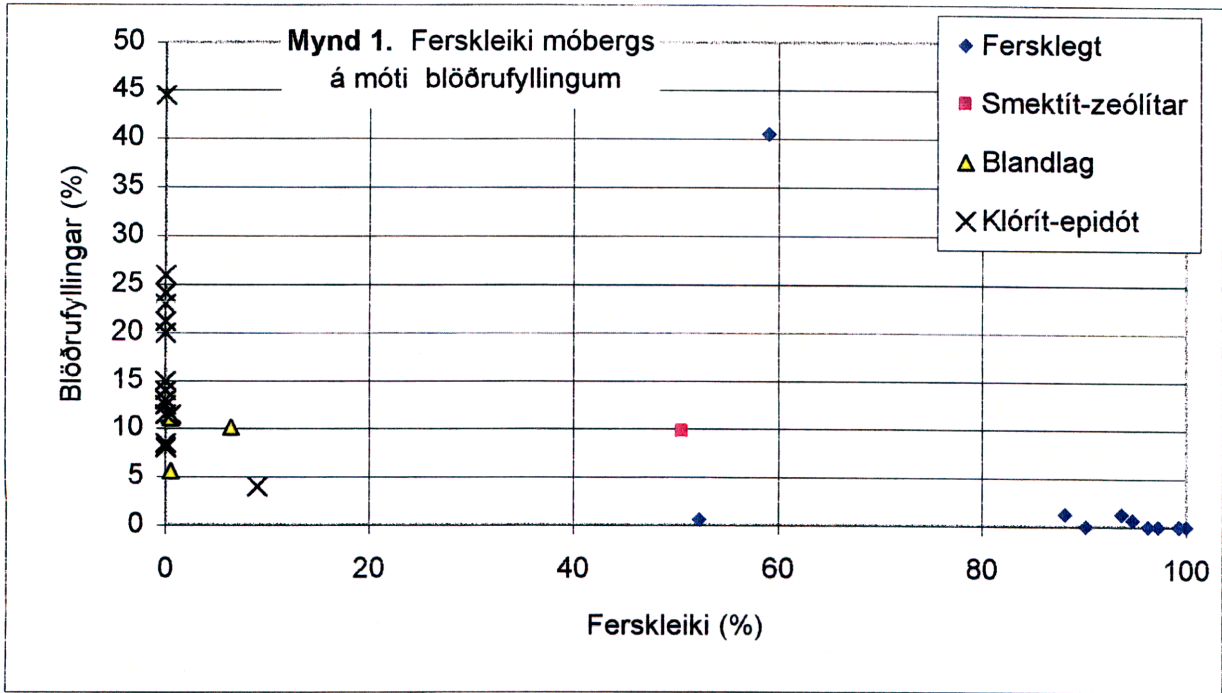
Bergsýnum hefur verið skipt upp í 5 ummyndunarbelti á grundvelli feltlýsinga, en þau eru; fersklegt berg, og bergsýni úr smektít-zeólíta -, blandlags-, klórít-epidót -, og epidót-amfíbólbelti.

Fjöldi bergsýna innan hvers ummyndunarbeltis er misjafn, eins og tafla 1 sýnir, og eru þau langfæst í blandlagsbeltinu. Nokkru færri þunnsneiðasýni reyndust vera í safninu en þau efnagreindu, og er lagt til að gerðar verði 27 viðbótar þunnsneiðar til að samanburður efnagreininga og bergfræði sýnanna verði betri.

**Tafla 1.** Fjöldi efnagreininga og þunnsneiða.

Ummyndunarbelti	Fj. efnagr. Basaltsýna	Fj. efnagr. þróaðra bergsýna	Fjöldi þunnsneiðasýna	Mism. á fj. efnagr. og þunnsneiða
Fersklegt berg	47	0	43	4
Smektít-zeólítar	39	17	41	15
Blandlag	18	1	17	1
Klórít-epidót	78	8	80	6
Epidót-amfíból	40	9	48	1

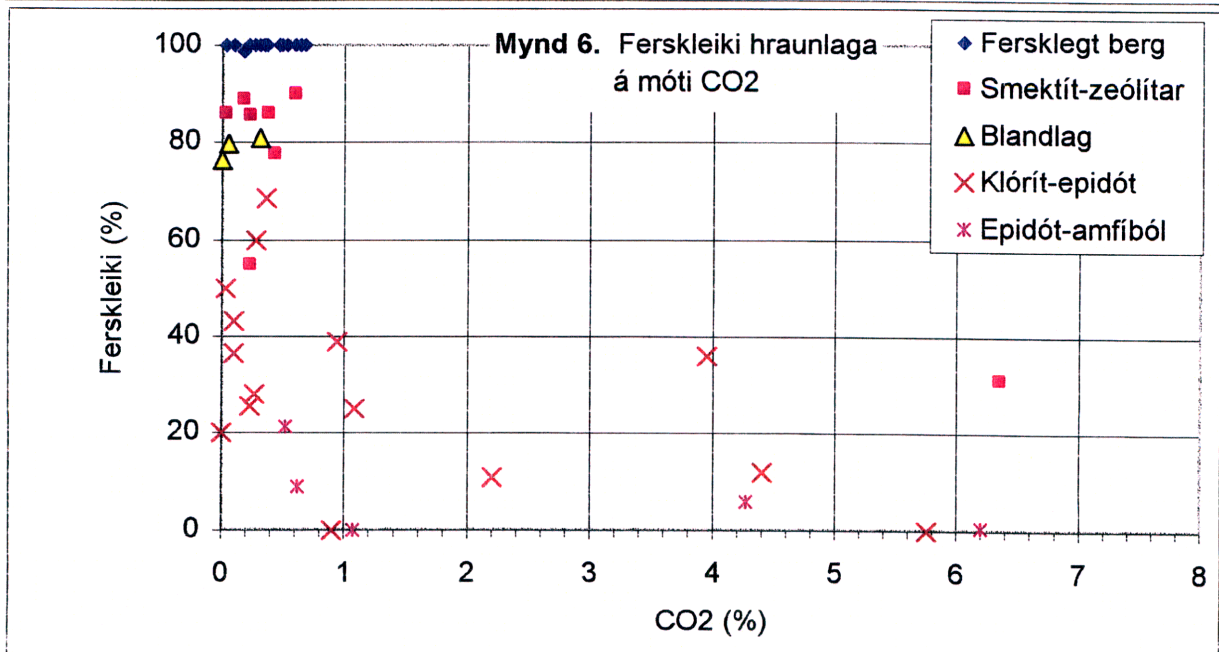
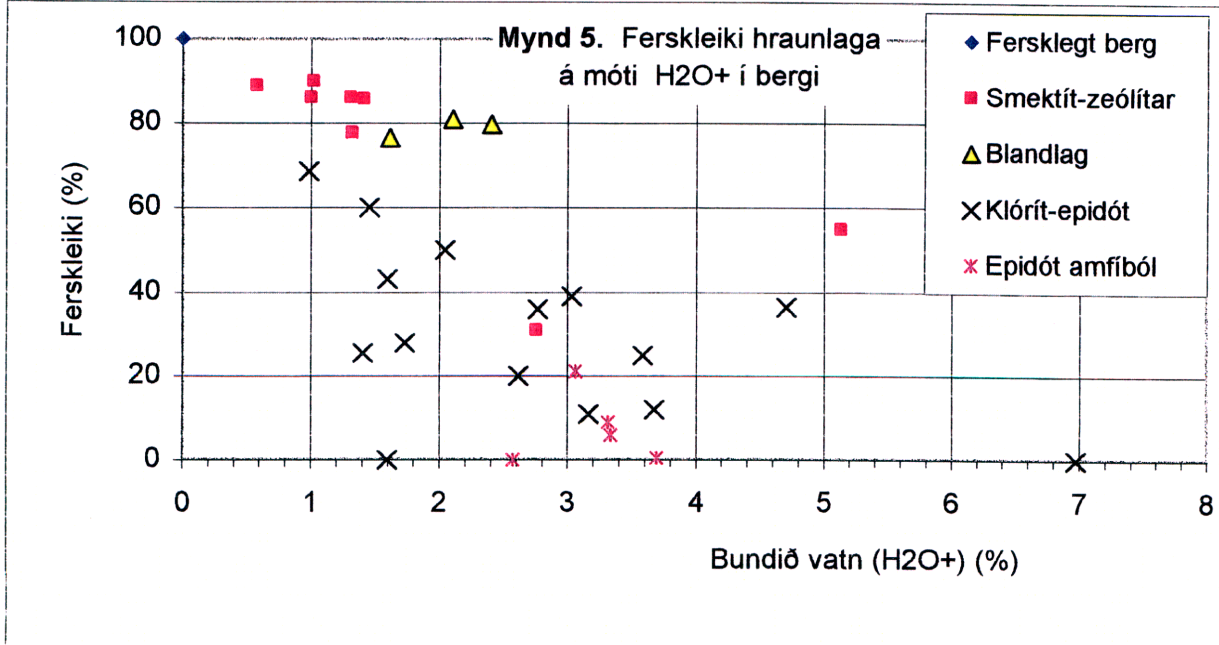
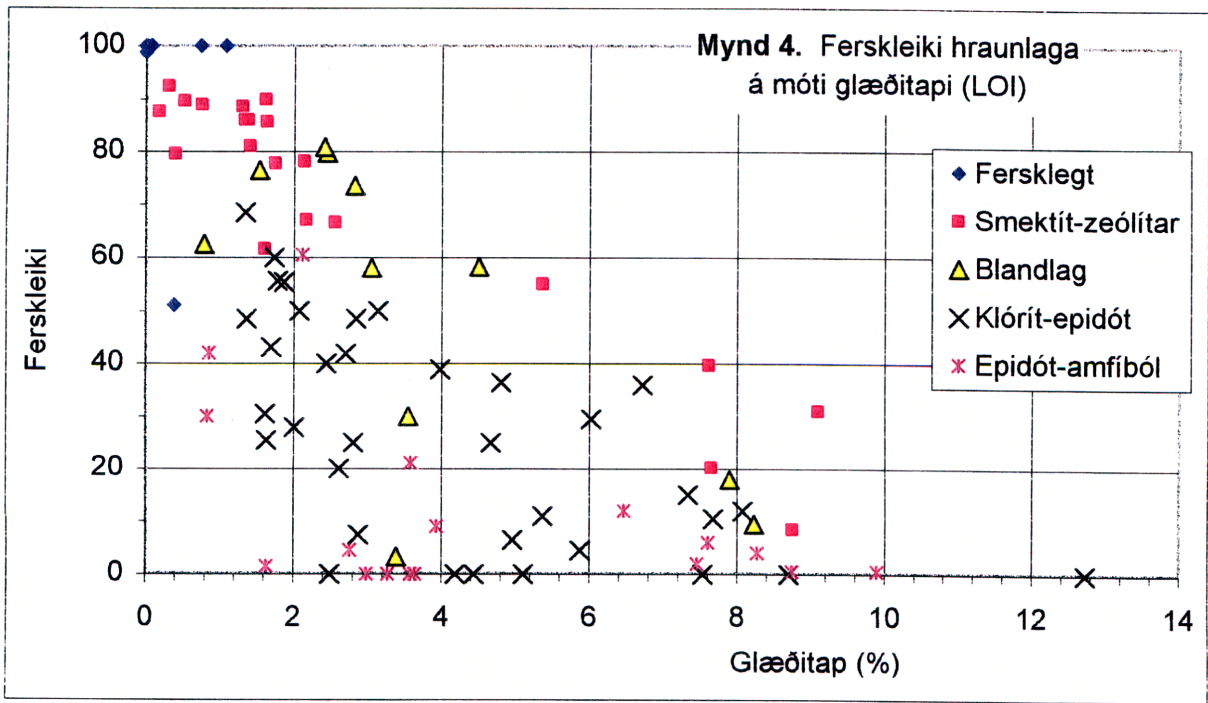
Einn þáttur í bergfræðilegri könnun á sýnunum var athugun á því hve stór hluti hvers sýnis (%) var óummyndaður (hlutfall bergs sem ekki hefur orðið fyrir ummyndun, á móti berginu sem ummyndast hefur ásamt útfellingum). Einnig var athugaður upprunalegur poruhluti í berginu **áður en** ummyndun kom til skjalanna. Á myndum 1, 2 og 3 er sýnd ummyndun basaltmóbergs, basalhraunlaga og basaltinnskota á móti blöðrufyllingum. Taka verður fram að vegna tímaskorts var ekki tekið tillit til þess holrýmis sem ófyllt var, en ófyllt holrými er einkum að finna í fersklegu bergi og í hluta sýna úr smektít-zeólítabeltinu, en í blandlags-, klórít-epidót- og epidót-amfíbólbeltinu er upprunalegt holrými að langmestu leyti fyllt samkvæmt þunnsneiðagreiningu. Í móbergi (mynd 1) sést að ummyndun er nær alger um leið og komið er niður í blandlagsbelti. Í hraunlögum (mynd 2) sést greinilegt samband á milli ummyndunar og poruhluta (blöðrufyllinga) innan hvers ummyndunarbeltis. Þannig eykst ummyndun áberandi við aukinn poruhluta. Ummyndun er mest í epidót-amfíbólbeltinu eins og vænta mátti. Basaltinnskot eru almennt heldur minna ummynduð en hraunlög. Sum hver hafa verið tiltölulega blöðrótt, sem kemur nokkuð á óvart. Svo virðist sem flest þeirra sem blöðróttust eru, séu mjóir gangar og sillur, sem hafa storknað á vart meira en kílómetra dýpi. Ummyndun bergsins virðist einnig aukast með auknum poruhluta, líkt og gerist í hraunlögum.



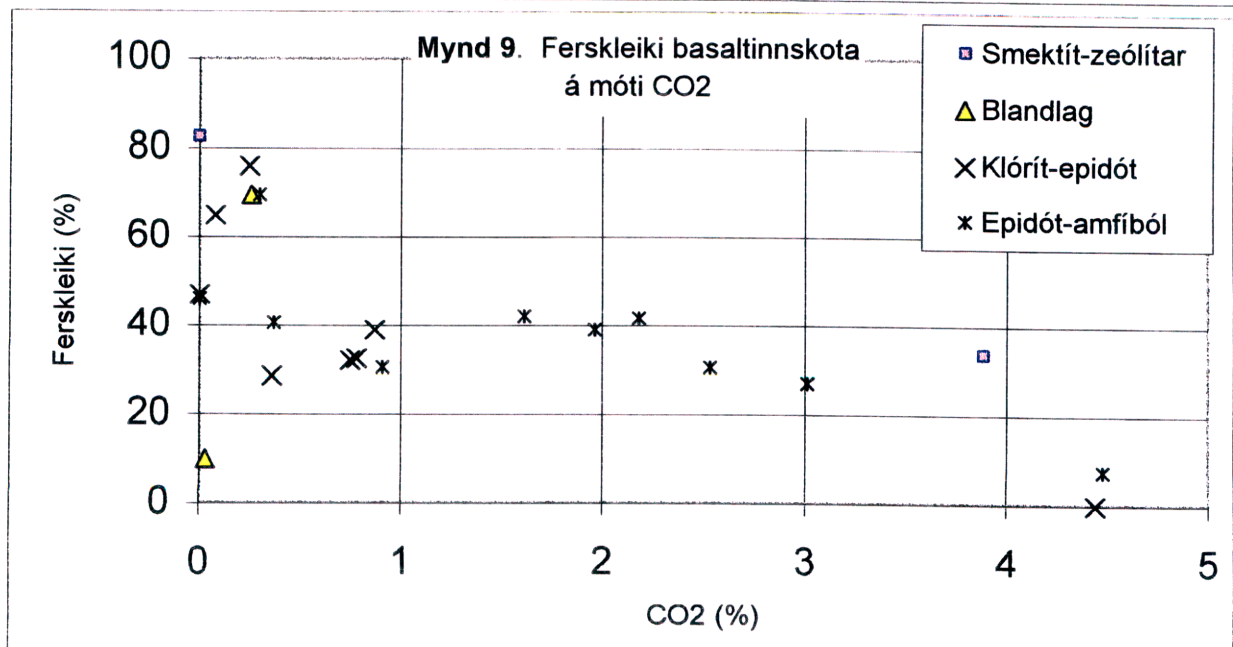
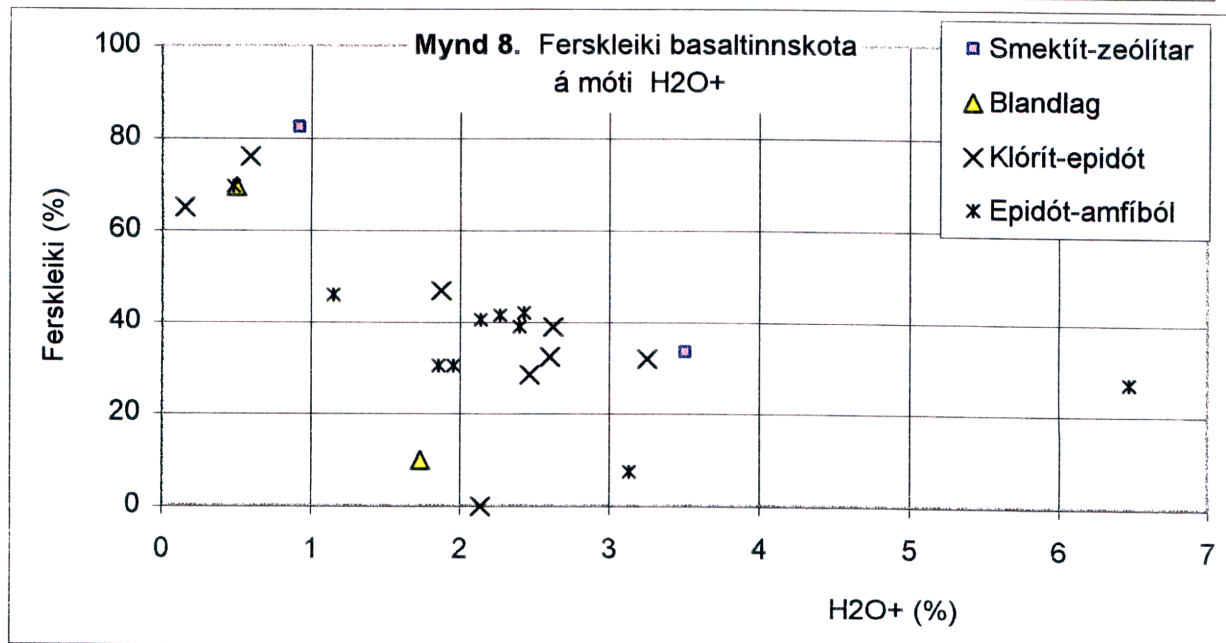
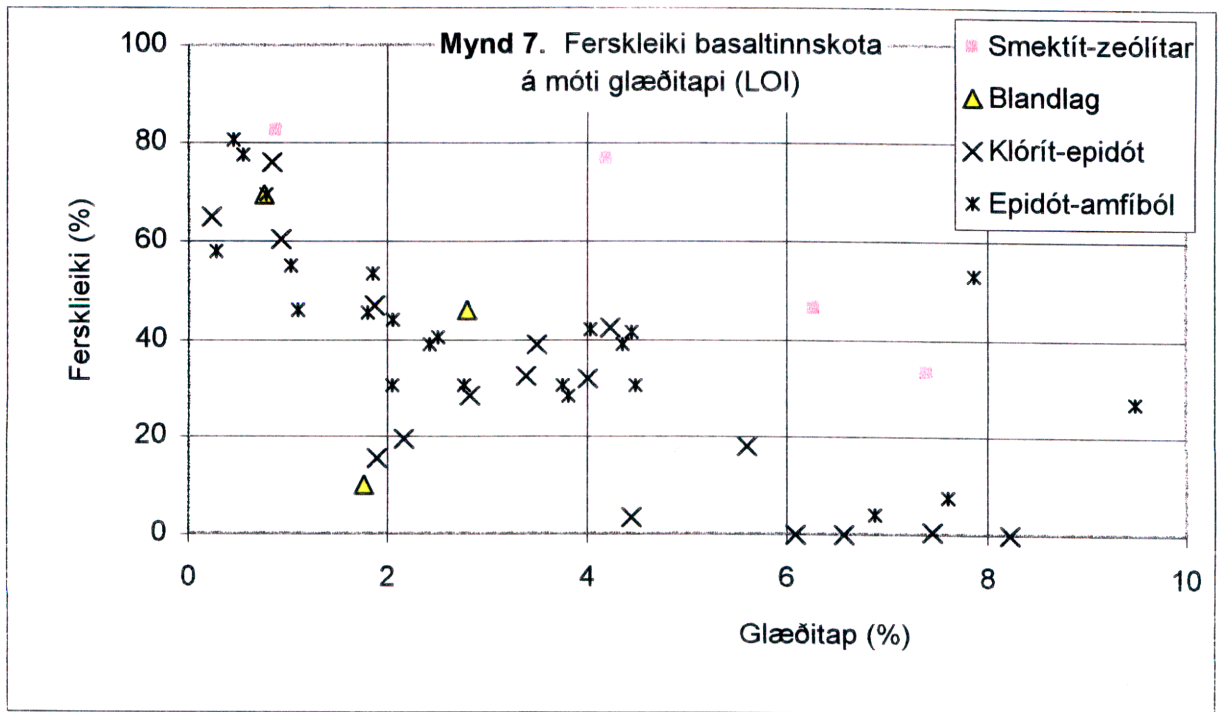
### 3. Glæðitap og ummyndun

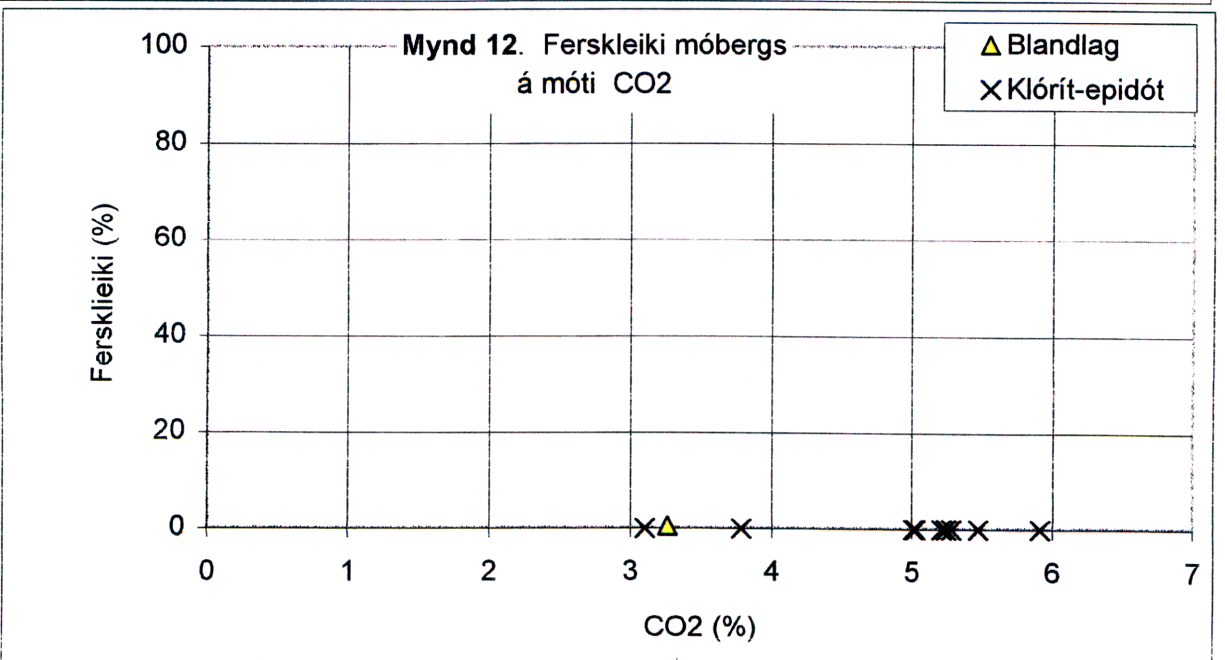
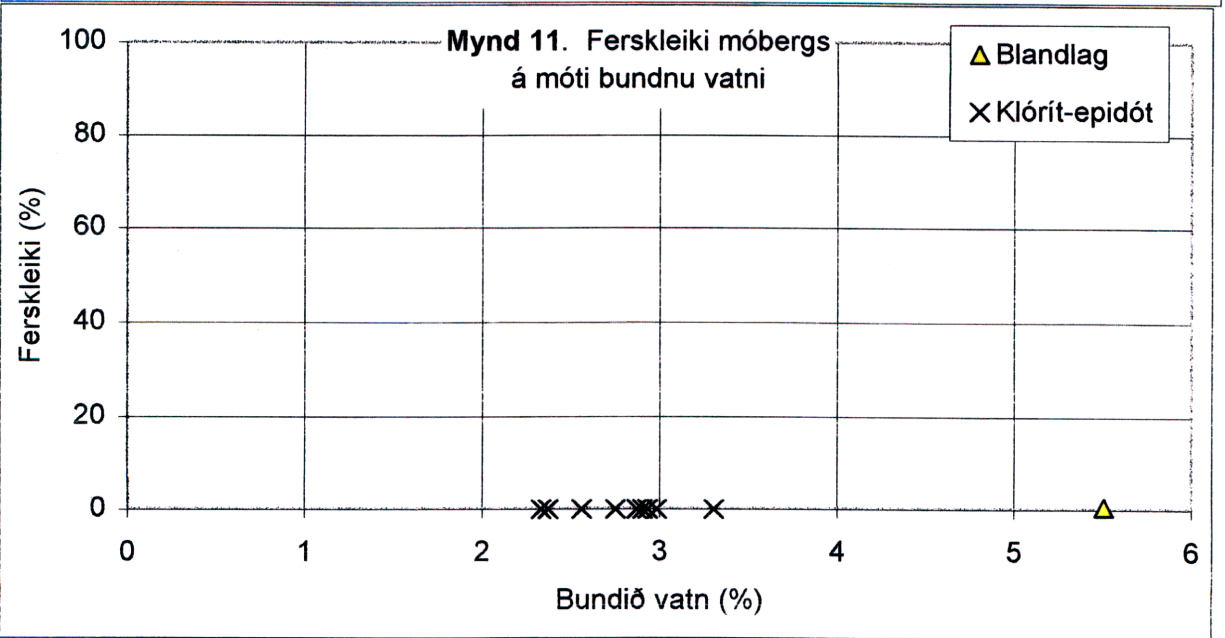
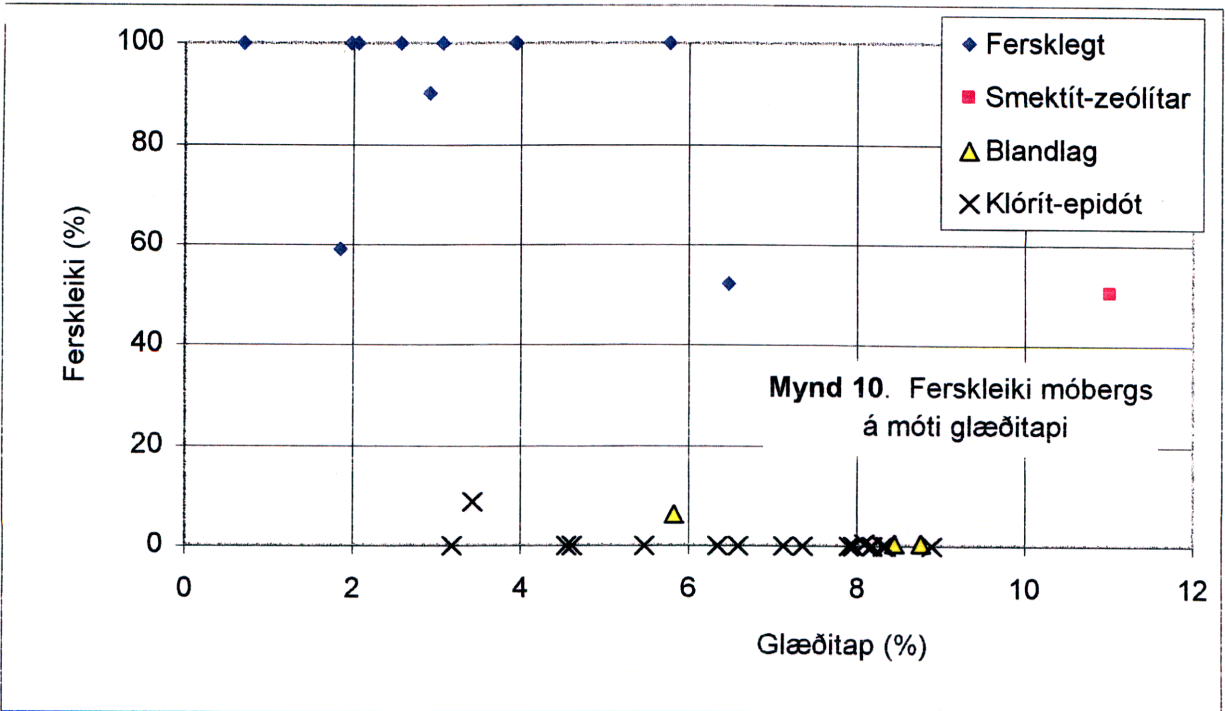
Glæðitap í efnagreiningu er þyngdartap sýnis við hitun þess upp í um 700°C. Glæðitapið eru öll rokgjörn efni, og í þeim sýnum sem hér um ræðir samanstendur það að mestu leyti af bundnu vatni ( $\text{H}_2\text{O}^+$ ) og  $\text{CO}_2$  sem geymist að mestu í kalsíti (sbr. Hjalti Franzson og Helga Tulinius 1999). Þessi efni eru hluti af ummyndun bergsins. Glæðitap, bundið vatn og  $\text{CO}_2$  eru sýnd í tengslum við ferskleika berg (þess hluta bergsins sem telst óummyndaður) á myndum 4-12. Glæðitap eykst með aukinni ummyndun, og á það við um hraunlög, innskot og móberg og svo innan hvers ummyndunarbeltis í þeim hópum. Umtalsvert glæðitap fannst í þeirri gerð móbergs sem er kallað gjóskutúff (í borholum hefur það verið kallað settúff). Athugað var magn  $\text{CO}_2$  og vatns í hluta sýnahópsins. Þar sést svipuð þróun og í glæðitapinu, þ.e. aukning á  $\text{CO}_2$  og  $\text{H}_2\text{O}$  með aukinni ummyndun. Sýnafjöldinn er fremur takmarkaður fyrir móbergið, þar sem eingögnu voru tiltæk nokkur sýni úr klórít-epidótbeltinu og aðeins eitt sýni úr blandlagsbelti. Athyglisvert er tiltölulega mikið magn  $\text{CO}_2$  í epidót-amfibólbeltinu fyrir hraunlög og innskot, en sambærileg sýni voru ekki til fyrir móberg. Í þeim borholum sem skera vel niður í epidót-amfibólbeltið í núverandi háhitakerfum (t.d. Krafla, Nesjavellir, Reykjanes) og hiti fer yfir um 280°C, hverfur kalsít nær alveg. Tiltölulega mikið magn  $\text{CO}_2$  (kalsíts) í bergi, í þessu ummyndunarbelti, bendir til að kalsít hafi fallið út eftir að jarðhitakerfin hafi tekið að kólna. Það gæti síðan bent til að sá poruhluti og sú lekt sem nú mælist í viðkomandi sýnum sé minni en hún hafi verið á þeim tíma sem epidót-amfibólbeltið myndaðist.

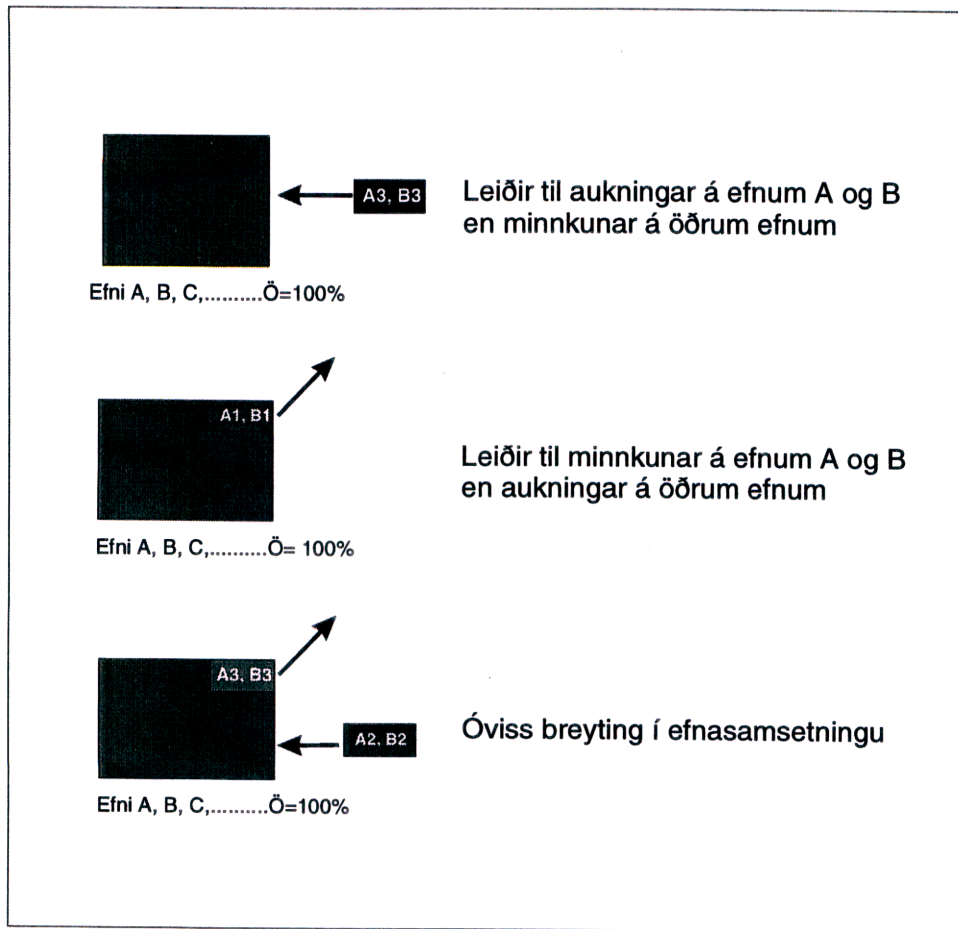




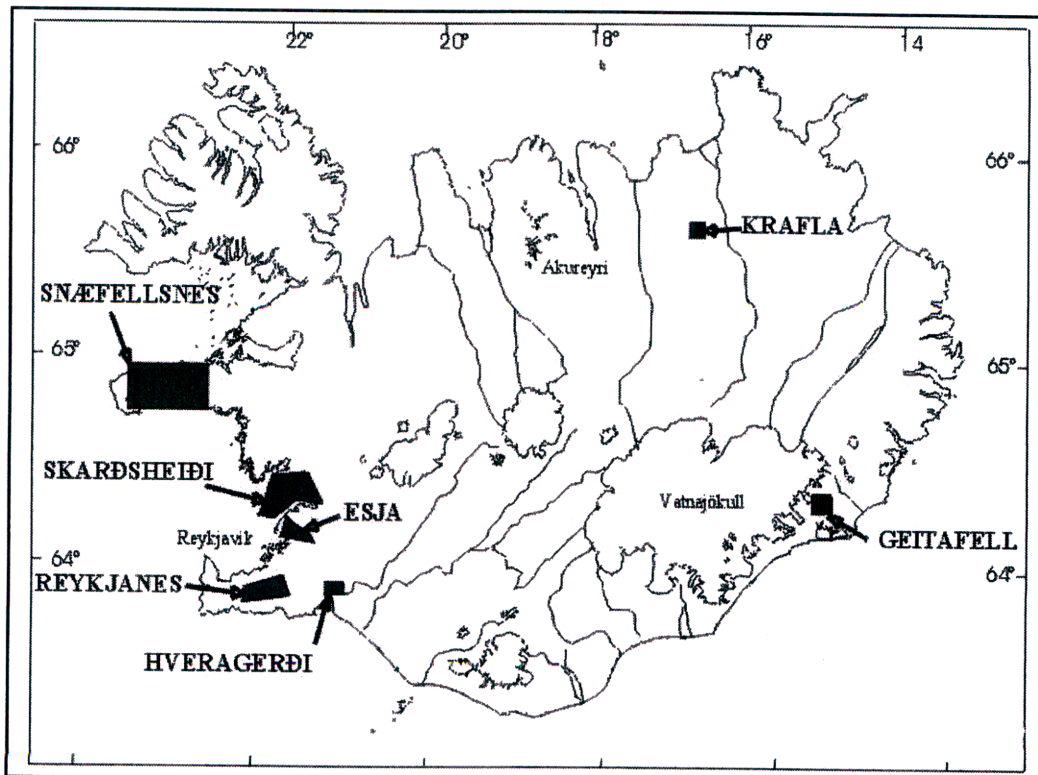








Mynd 13. Einfölduð skýringamynd sem sýnir hlutfallslegar breytingar á efnasamsetningu við efnaflutning



Mynd 14. Sýnasvæði í forðafræðiverkefni.



#### 4. Efnafraeði fersks og ummyndaðs bergs

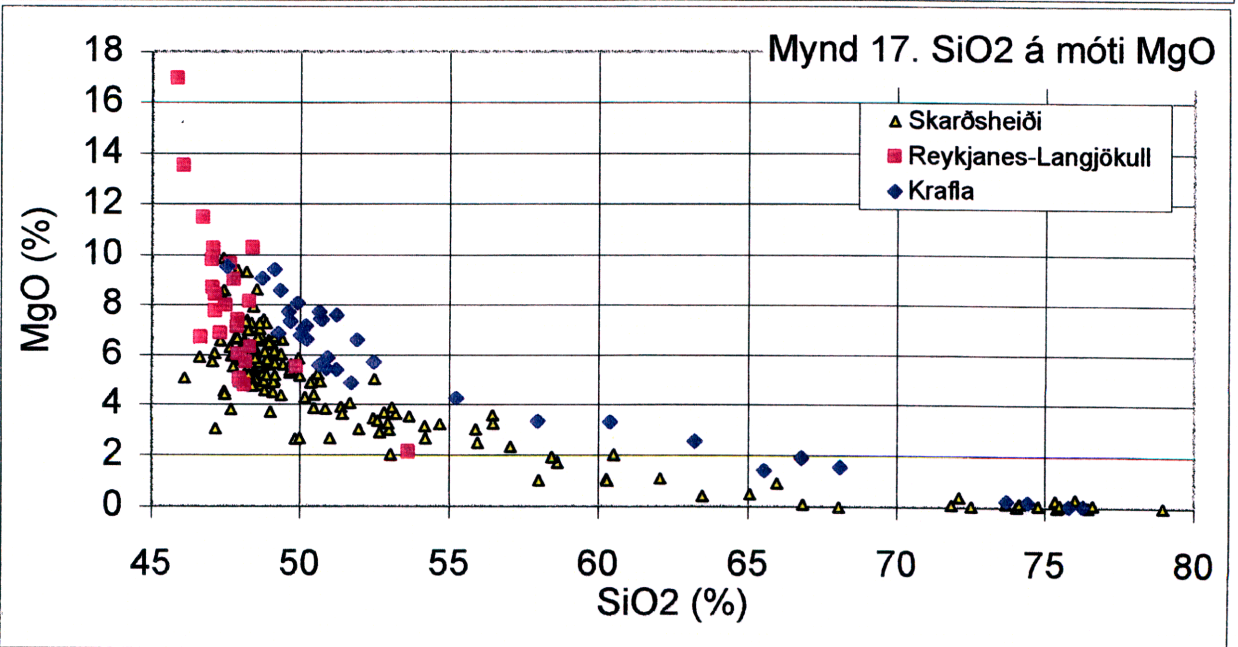
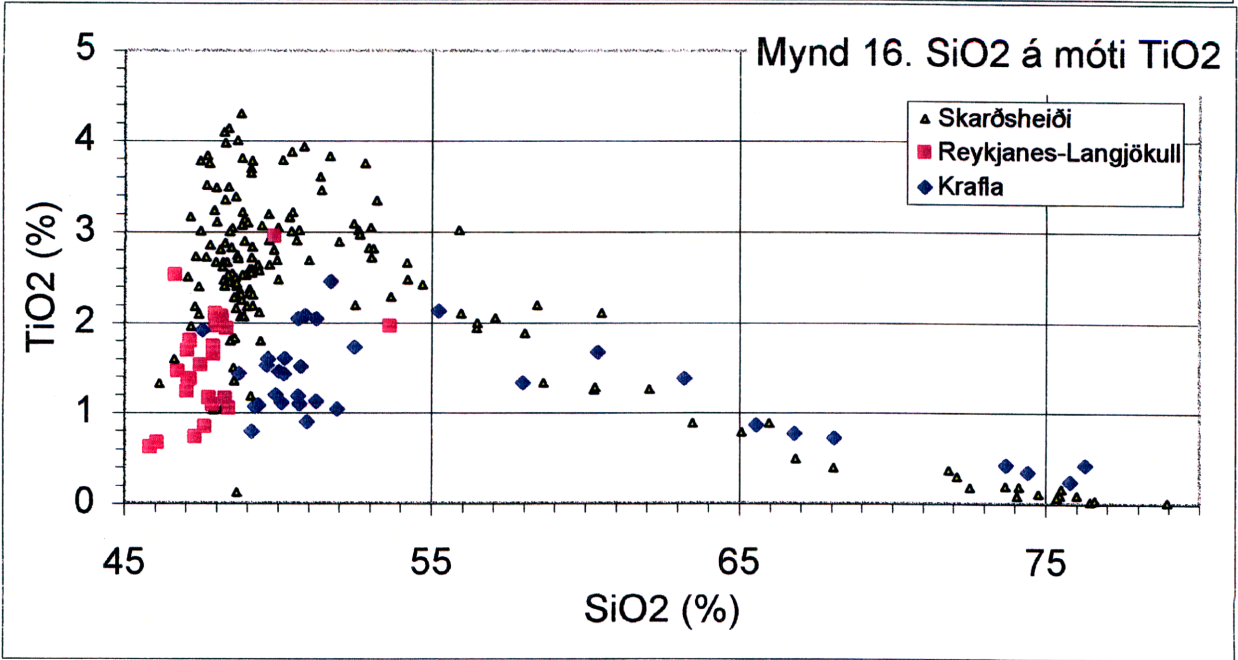
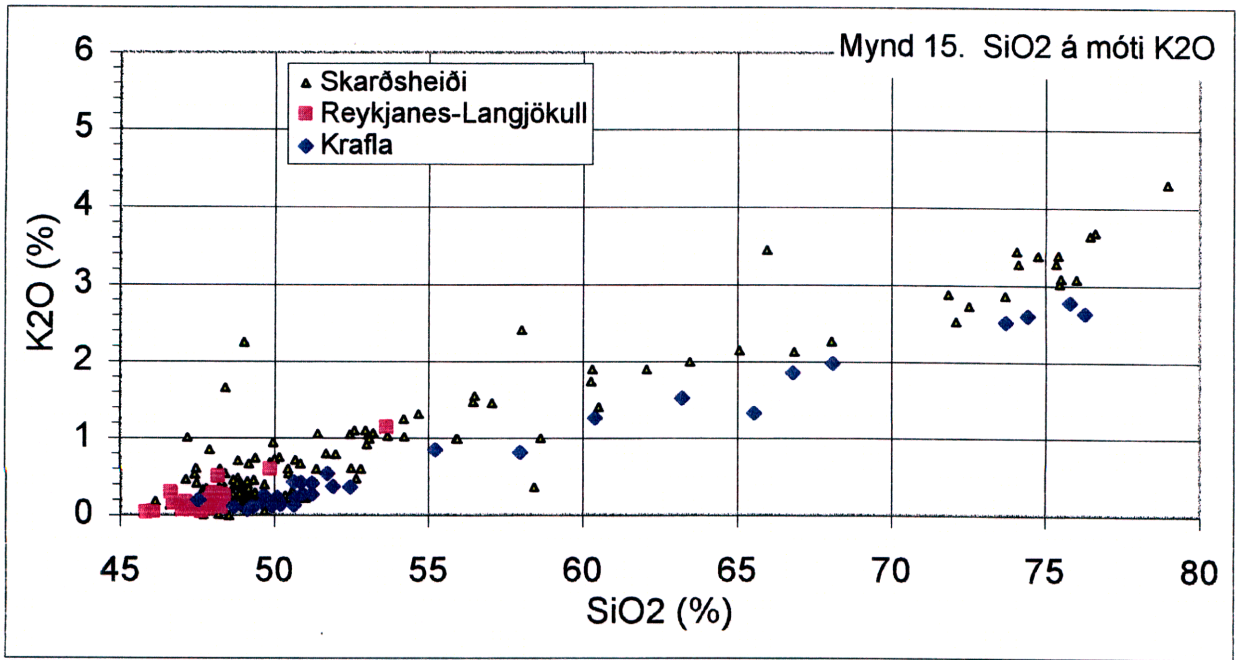
Rannsókn á efnaflutningum í bergi við jarðhitaummyndun er fremur flókin vísindi. Efnagreiningum er skipt í tvo hluta; annars vegar eru svonefnd aðalefni, sem reiknuð eru upp í 100% (þó án glæðitaps), og hins vegar eru snefilefni sem reiknuð eru í ppm. Á mynd 13 er á einfaldaðan hátt sýnt hvað vænta má að gerist í efnafræði bergs við ummyndun. Ef efni bætast við bergið leiðir það til að magn þeirra eykst, en hlutur annarra efna minnkar að sama skapi, vegna þess að efnagreiningin er reiknuð sem hlutfall (%). Ef efni eru fjarlægð úr berginu veldur það að sjálfsögðu minnkun í magni þeirra efna, en að sama skapi hlutfallslegri aukningu annarra efna. Ef ákveðin efni bæði bætast við og hverfa, er erfitt að gera sér grein fyrir þeim hlutfallslegu breytingum sem verða á öðrum efnum í sýninu.

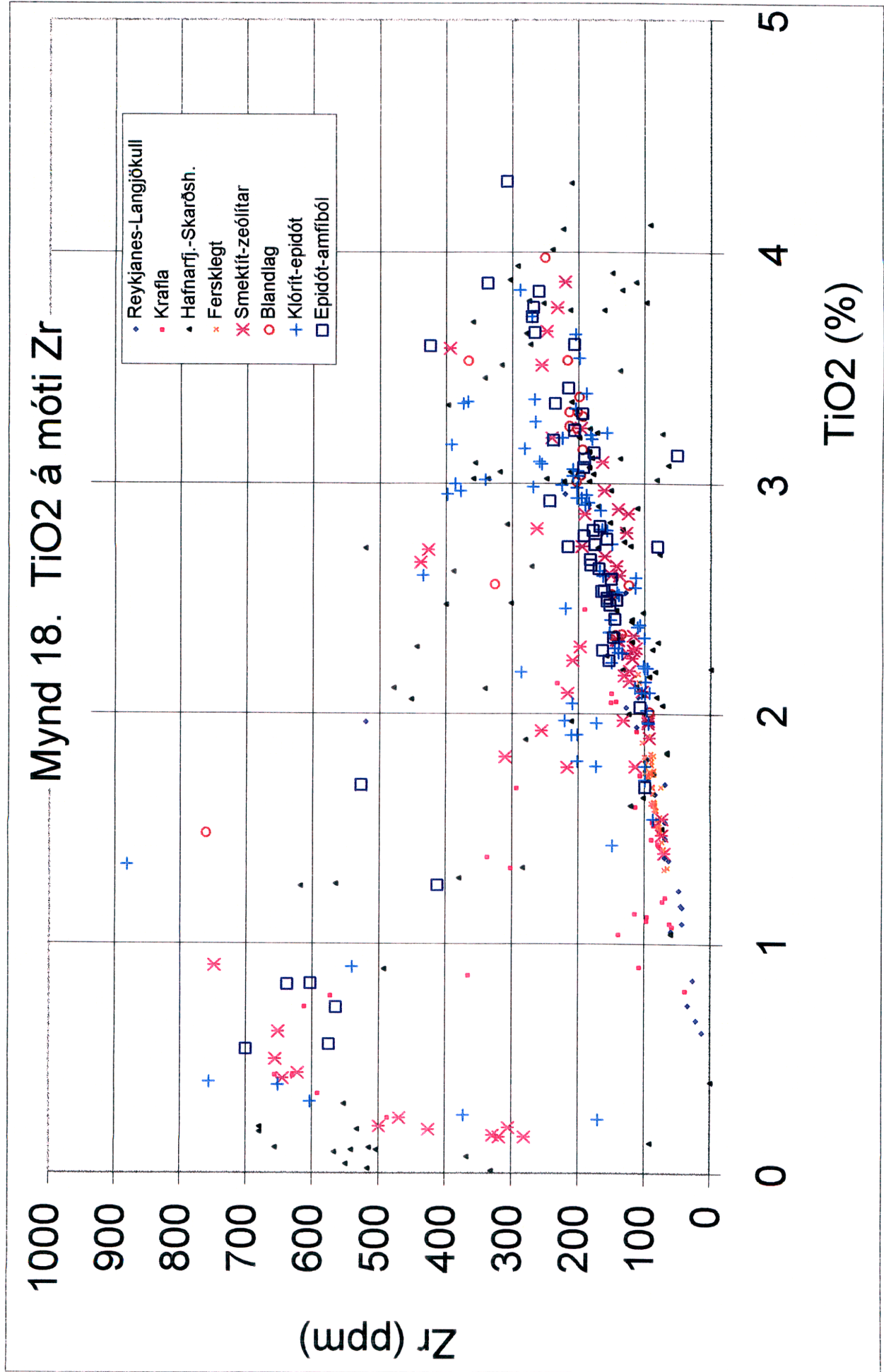
Í fersku bergi eru allar frumsteindir (og gler) í upprunalegu ástandi. Gefum okkur þá forsendu að bergið sé blöðrótt. Við ummyndun gerist í meginatriðum tvennt; frumsteindirnar taka að breyta sér í ummyndunarsteindir og við það verða efnaskipti. Í öðru lagi verður vart við útfellingar í holrými bergsins. Ef allar þessar breytingar gerast innan þess sýnis sem tekið er til efnagreiningar, sést engin breyting í efnasamsetningu bergsins. Sé aftur á móti flutningur á efninu bæði úr sýninu og að því, ætti að sjást breyting á efnasamsetningu. En breytingu er aðeins hægt að sjá með samanburði ummyndaðs sýnis við sambærilegt ferkt sýni, og það leiðir okkur að þeirri spurningu hvort unnt sé að finna sambærileg fersk sýni. Svarið er, eins og svo oft gerist í jarðfræði, ekki einhlýtt. Sýnasafnið í forðafræðistuðlaverkefningunni kemur frá mörgum stöðum, eins og sýnt er á mynd 14. Talið er að Krafla, Skarðsheiði, Esja, Geitafell, Hveragerði og Reykjanes fylgi svonefndri þóleiit-þróunarlínu, en sýnin á Snæfellsnesi fylgi annað hvort alkali eða þóleiitþróunarlínu. Snæfellsnessýnin skipta kannski ekki máli hér þar sem engin sýni hafa verið efnagreind þaðan enn sem komið er. Þróunarlína Skarðsheiðareldstöðvarinnar hefur verið skilgreind með fjölda efnagreininga, sem til eru á tölvutæku formi (Hjalti Franzson 1978), og svo hefur einnig verið gert í Kröflu (óbirt gögn frá Karli Grönvold og Hugh Nickolson) og á basalti úr Reykjanes-Langjökulsbeltinu (Sveinn Jakobsson, óbirt gögn). Efnafraeðigögn frá Geitfells-, Kjalarnes-, og Hveragerðis eldstöðvunum eru til, en ekki á tölvutæku formi.

Á myndum 15, 16 og 17 eru sýndar efnagreiningar frá Skarðsheiði, Reykjanes-Langjökulbeltinu og Kröflu, þar sem  $K_2O$ ,  $TiO_2$  og  $MgO$  eru sýnd á móti  $SiO_2$ . Töluverður munur er á þróunarlínum Skarðsheiðar og Kröflu, þar sem Kröflulínan virðist sýna lægri  $K_2O$  og  $TiO_2$  gildi, en hærri  $MgO$  gildi. Þróunarlína Reykjanes-Langjökuls beltisins virðist falla allvel að Skarðsheiðarlínu, þótt þau sýni sem hana einkenna séu að mestu leyti innan basaltsviðs. Þótt reynt hafi verið að safna sem ferskustu sýnum í þær efnagreiningar sem skilgreina Skarðsheiðarlínuna, þá verður að hafa í huga að berg eldstöðvarinnar eru innan ummyndunarbelta frá smektít-zeólítum niður í epidót-amfibólbelti. Nokkur gefa óvenju há  $K_2O$  gildi, og er líklegt að þær misfellur séu vegna ummyndunar. Ef horft er á myndirnar má sjá að töluverð breyting þarf að verða á efnasamsetningu sýnis til að það fari út fyrir meinta þróunarlínu og sýni á þann hátt að slíkir efnaflutningar hafi átt sér stað. Það eykur enn á óvissuna að gera verður ráð fyrir að bæði efnin sem sýnd eru á myndum 15-17 hafi breytst í efnasamsetningu. Þannig gætu óvenju há  $K_2O$  gildi fjögurra sýna á mynd 15 annað hvort bent til aukningar á  $K_2O$  í sýninu, eða til minnkunar á  $SiO_2$  í berginu, eða hvorutveggja.

Á mynd 18 eru sýnd Zr og  $\text{TiO}_2$  gildi úr sýnasöfnum frá Skarðsheiði, Kröflu og Reykjanesi. Inn á þá mynd eru einnig sett forðafræðisýnin, skipt niður eftir ummyndunarbeltum.  $\text{TiO}_2$  og Zr eru efni sem aðeins hverfa "með harmkvælum" úr bergi við ummyndun. Sjá má að þróunarlínur Skarðsheiðar og Kröflu eru nokkuð frábrugðnar hvor annarri þar sem sú fyrrnefnda sýnir mun hærri  $\text{TiO}_2$  og Zr gildi. Samanburður sýnir að ekki eru greinanlegir efnaflutningar þessara efna úr forðafræðisýnunum.

Niðurstöður af efnaflutningum með samanburði efnafræðigagna úr ferskum sýnum og sýnum úr forðafræðistuðlum eru óljósar, sem skýrist af því hve breiddin í bergefnasamsetningu eldstöðvanna sem sýnin koma frá er mikil. Einnig verður að gera ráð fyrir að hlutfall beggja efna sem borin eru saman, sbr. myndir 15-17, hafi orðið fyrir breytingum. Leita verður leiða til að þrengja upprunalegt efnasvið ummynduðu sýnanna til að gera samanburð við fersk sýni markvissari. Slíkt er mögulegt fyrir töluverðan hluta forðafræðisýnanna, með því að gera nánari bergfræðiathugun í þunnsneiðum.











lítið við efni x í sýninu. Hópur **b** sýnir að bergið tekur almennt til sín efni x sem bæði getur verið vegna útfellinganna og/eða að efnið hafi setst fyrir í ummyndun frumhluta bergsins. Lögun dreifingar hóps c sýnir einkenni brottflutnings efnis x úr berginu. Mynd 19 gefur einnig til kynna að því þrengra sem unnt er að afmarka berggerð efnafræðilega, því betur er unnt að gera sér grein fyrir efnaflutningum.

Magn útfellinga hefur verið metið með þunnsneiðatalningu í flestum þeim sýna sem þunnsneiðar eru til af. Á myndum 20-42 gefur að líta gröf sem sett eru upp á áðurnefndan hátt. Eingöngu eru tekin með bergsýni af basaltsamsetningu. Höfð var hliðsjón af þunnsneiðagreiningu í sumum þeirra sýna sem vafi lék á hvort væri af basalti eða eitthvað súrara bergi. Þær tengilínur sem sýndar eru á gröfunum gefa til kynna mesta og minnsta mögulega magni viðkomandi efnis innan basalts. Efnasvið basalts eins og það er merkt á viðkomandi myndum er í víðara lagi, og veldur breiddin í þróunarlínu Skarðsheiðar þar mestu.

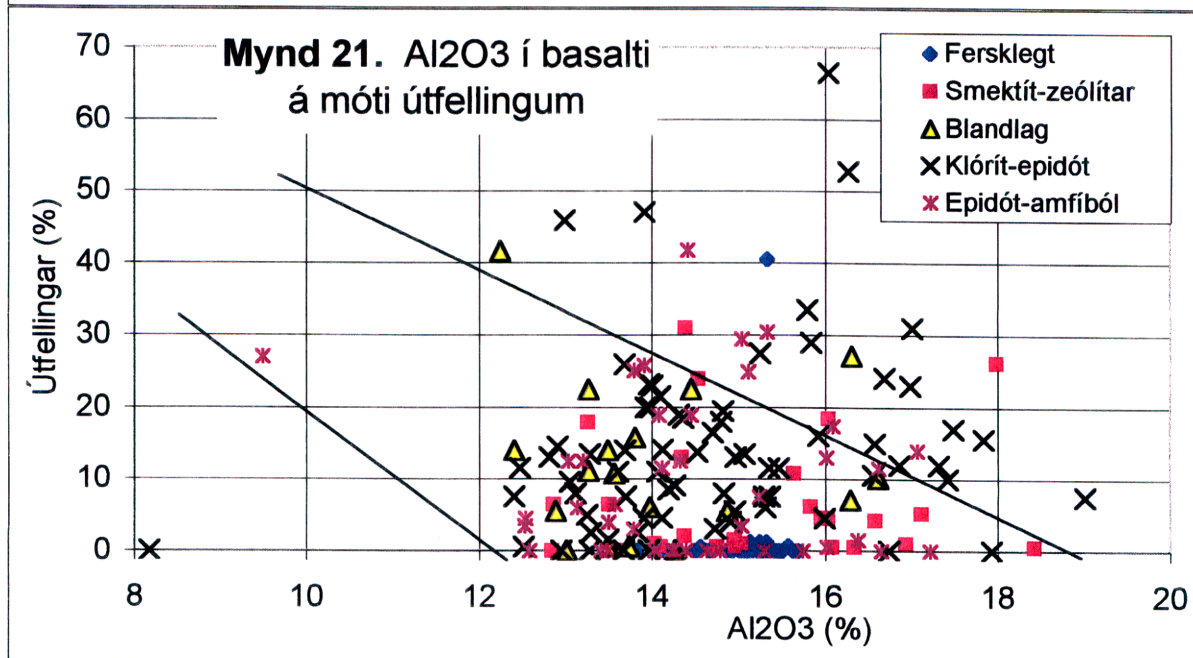
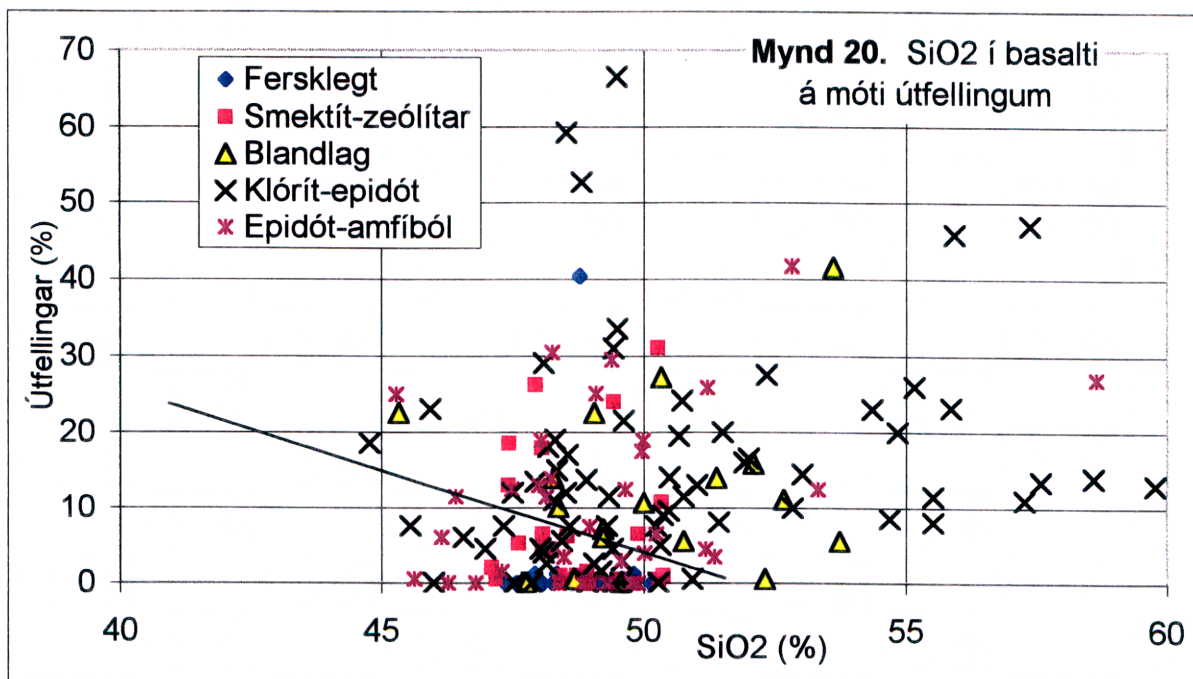
**Tafla 2.** Færsla efna við ummyndun, og efnasvið þróunarlínu basalts í eldstöðvunum í Skarðsheiði, Kröflu og Reykjanes-Langjökulsbeltinu. () og (()) tákna vísbendingar um efnaflutninga. Í töfluna vantar túlkun á Y, S og As, þar sem samanburð vantar við fersk sýni.

Efni	"Óbreytt"	Aukning	Minnkun	Efnadreifing í fersku bergi		
				Skarðsh.	Krafla	Reykjan-Langj.
SiO <sub>2</sub>		x		46-52	46-52	46-52
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		(x)		12,5-18	13,8-18,1	12,4-19,5
FeO		(x)	((x))	11,0-16	8,4-13,8	8,0-14
MgO	x			3,7-9,5	5,5-9,5	4,7-16
CaO	x	(x)	(x)	8,0-14	10,0-13,7	9,8-15
Na <sub>2</sub> O		x		1,8-3,5	1,7-2,5	1,2-2,7
K <sub>2</sub> O			x	0,01-1,0	0,1-0,43	0,03-0,6
TiO <sub>2</sub>	x		((x))	1,0-4	0,8-2,1	0,7-3
MnO	x	(x)	(x)	0,18-0,32	0,16-0,23	0,18-0,24
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	x			0,1-0,8	0,08-0,28	0,08-0,3
Zr	x			50-400	38-150	22-220
Zn	x	(x)		65-145	68-125	95-180
Cu	x	((x))		20-180	32-197	84-300
Rb	x			0,1-20	0-8,7	1,0-13
Sr	x			100-350	196-215	82-300
Nb	x?				3,0-15	4,0-24
Ga	x?					11,0-21
Ce	x			0-32	15-90	
V		(x)		218-396	182-397	
Pb	x	(x)		0-2	1,1-3,7	

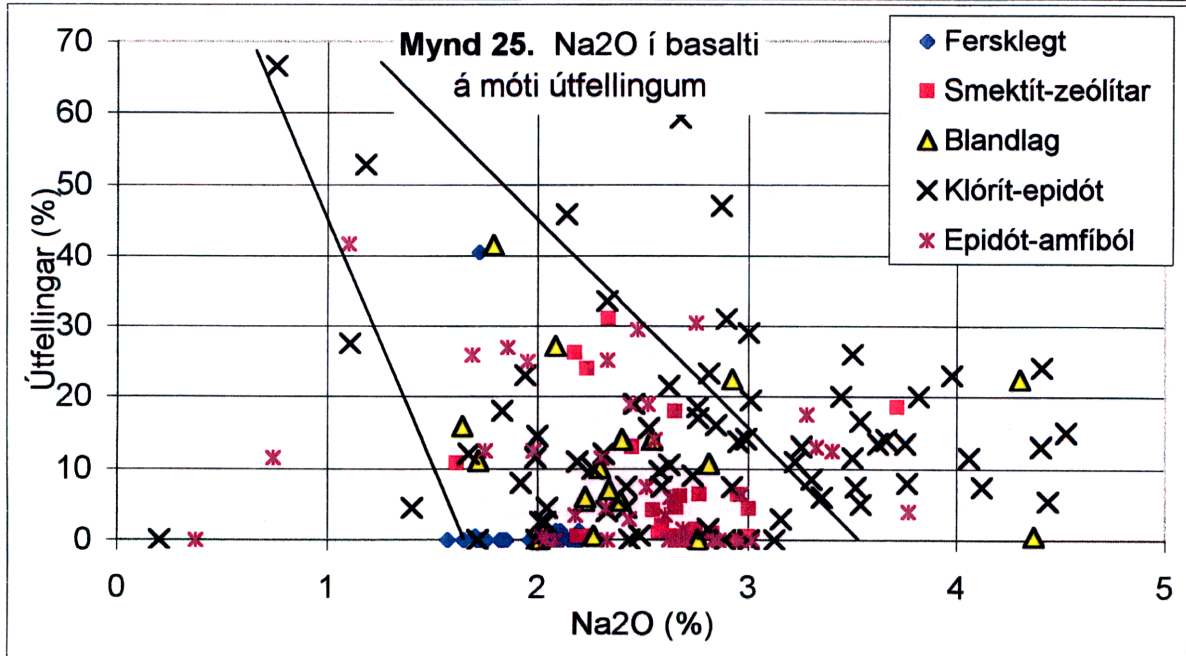
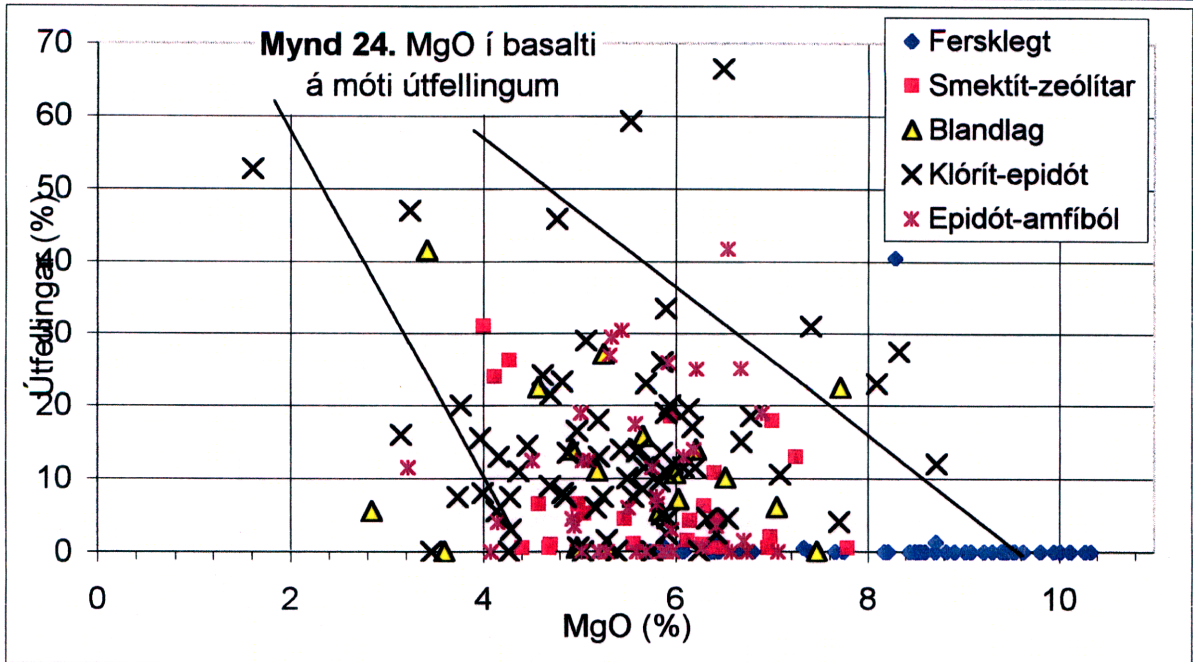
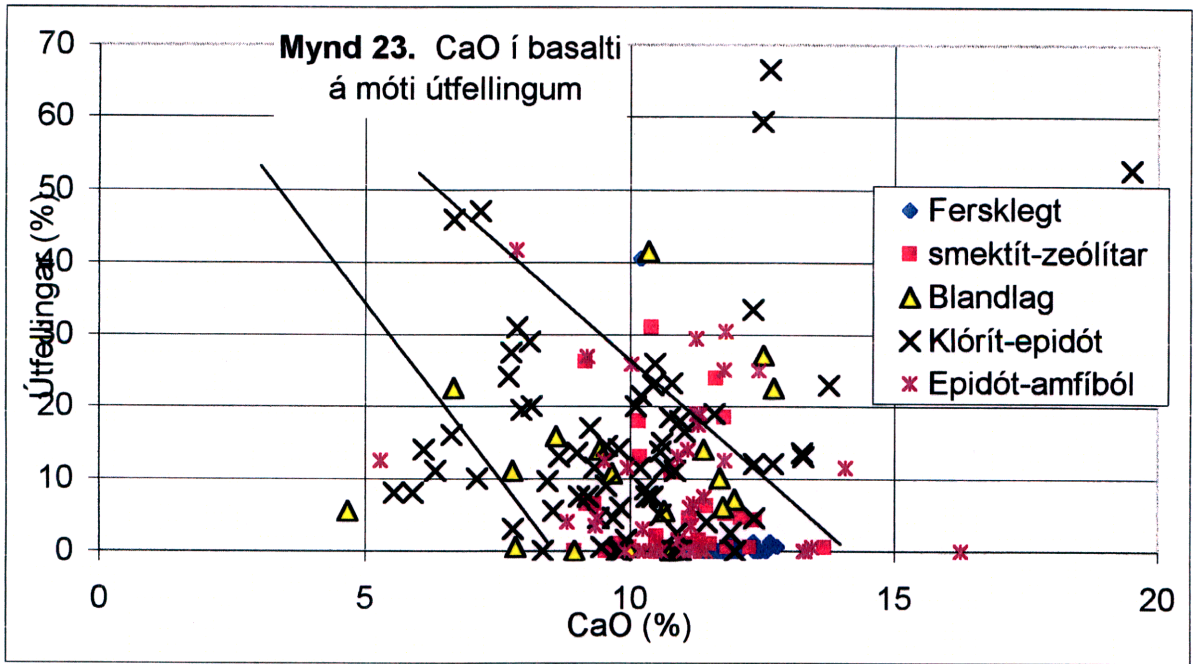
Meginefni bergs er ótvírætt kísill ( $\text{SiO}_2$ ), sem myndar um helming basalts. Mynd 20 sýnir dreifingu hans. Af henni má greinilega sjá að áberandi hluti sýnanna liggur ofan mesta mögulega gildis basaltsamsetningar, en það þýðir að þau bergsýni hafa auðgast m.t.t. þess efnis, sumhver umtalsvert. Dreifing sýnanna undir viðkomandi línu bendir einnig til kísilaukningar þar þó í minna mæli sé (sbr. hóp **b** á mynd 19). Ekki verður vart við kísilminnkun. Ef litið er til dreifingar sýna á grundvelli ummyndunarbelta sést að breidd efna og útfellinga virðist aukast með aukinni ummyndun, nema að sviðið virðist vera heldur minna í epidót-amfíbólbeltinu en í klórít-epidótbeltinu. Þessi tiltölulega áberandi kísilaukning í sýnum ætti að valda því að hlutfallslegt magn annarra efna minnkaði á samsvarandi hátt, þ.e. sýna tilhneigingu til minnkunar, sbr. mynd 13, en svo er almennt ekki.

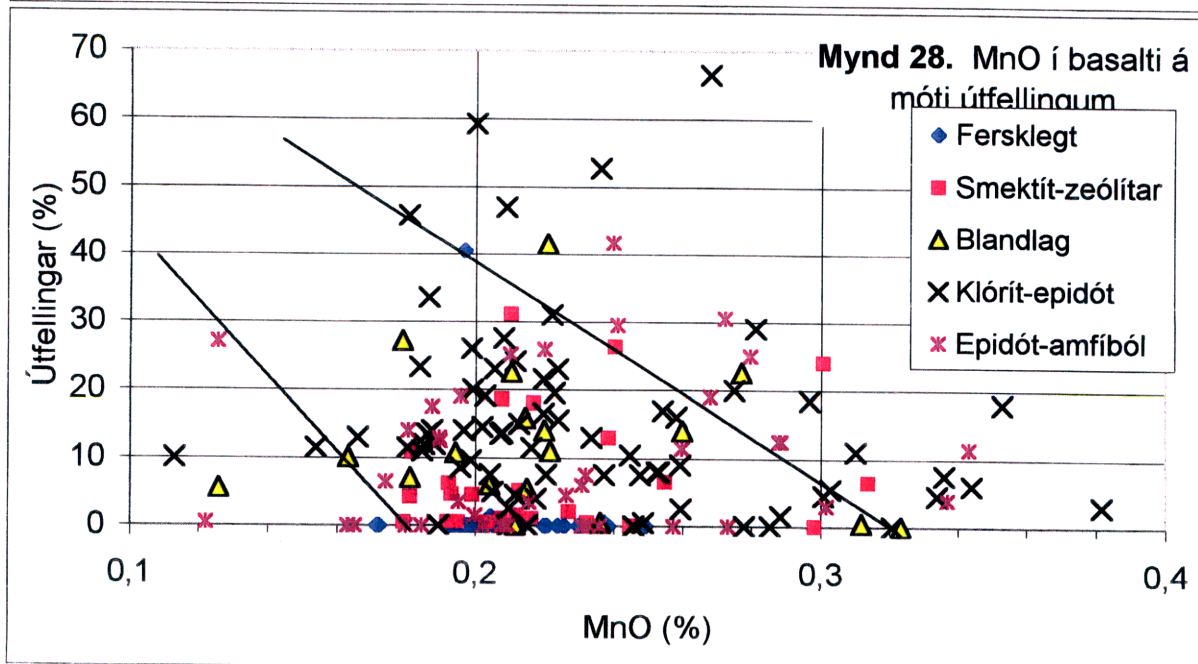
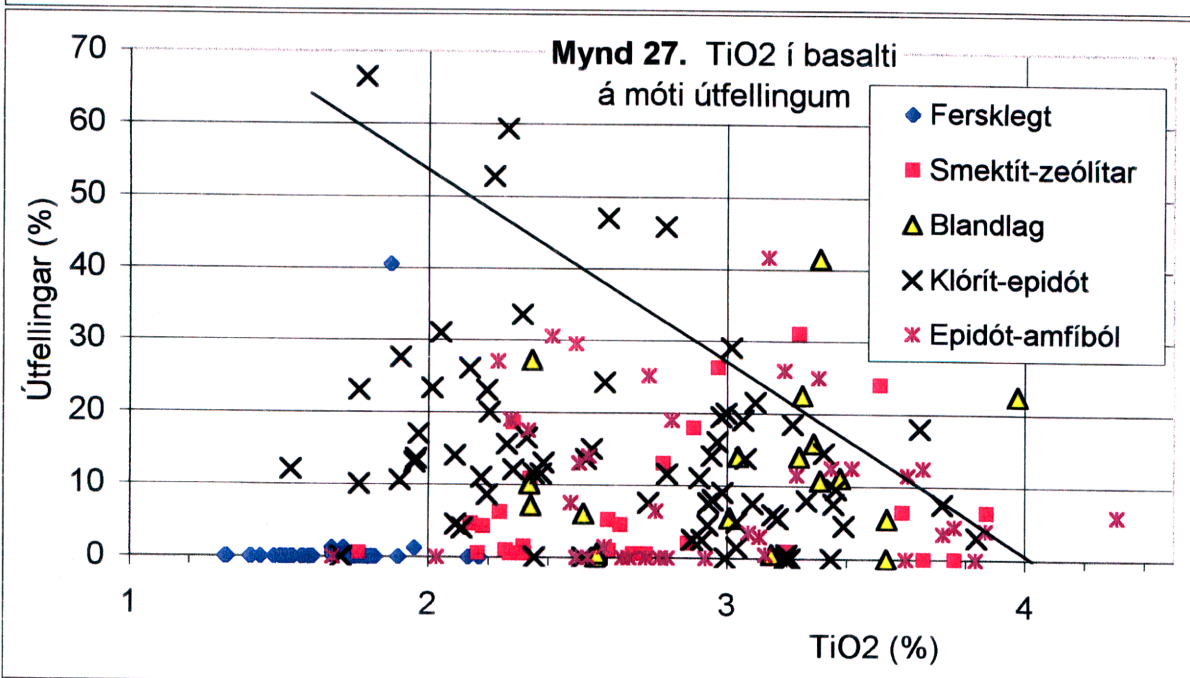
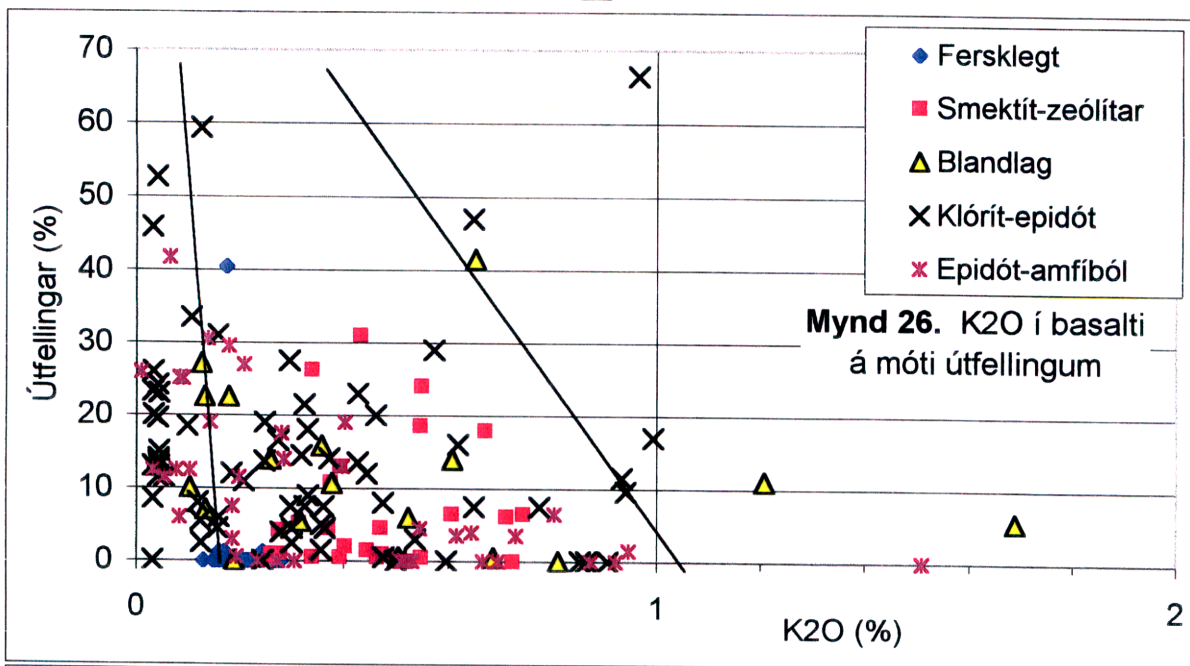
Í töflu 2 eru settar fram niðurstöður um hegðun efna á grundvelli mynda 20-42. Þau efni sem sýna sterkustu vísbendingar um aukningu við ummyndun eru  $\text{SiO}_2$  og  $\text{Na}_2\text{O}$ , en einnig virðist  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{Zn}$  og  $\text{Pb}$  aukast í hluta sýnanna.  $\text{K}_2\text{O}$  er eina efnið sem sýnir mjög ákveðna minnkun, sem jafnframt verður meiri við aukna ummyndun, og er mesta minnkunin í epidót-amfíból beltinu. Vísbendingar eru um minnkun í  $\text{CaO}$  og  $\text{MnO}$  í hluta sýnanna.

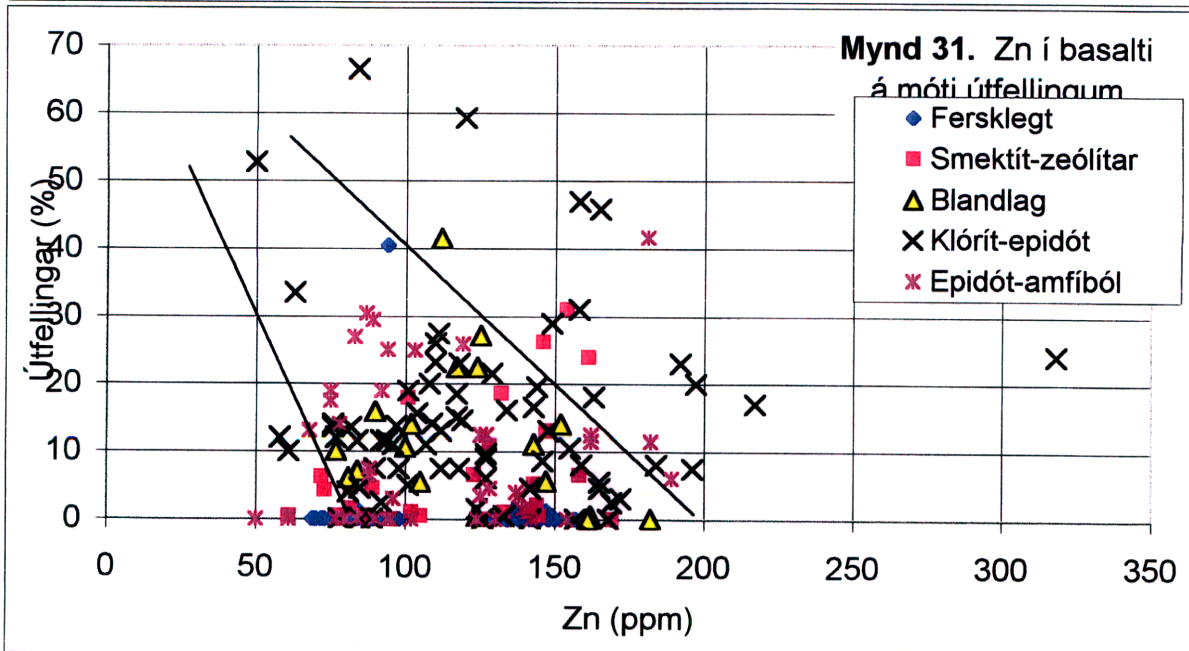
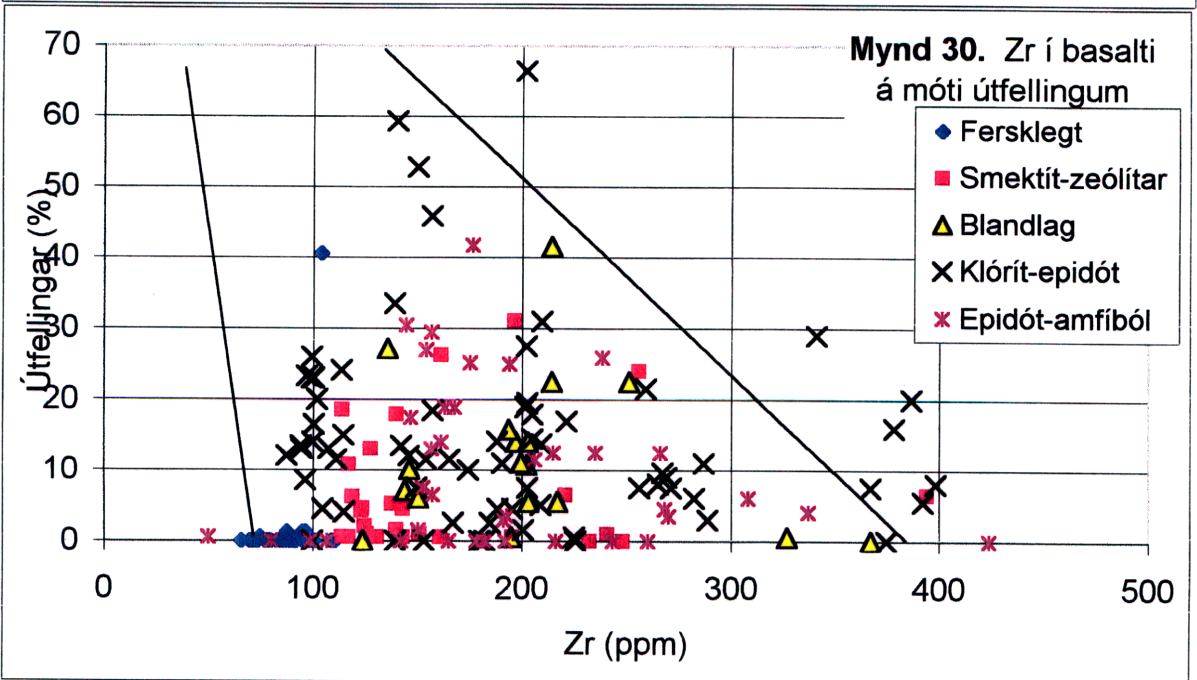
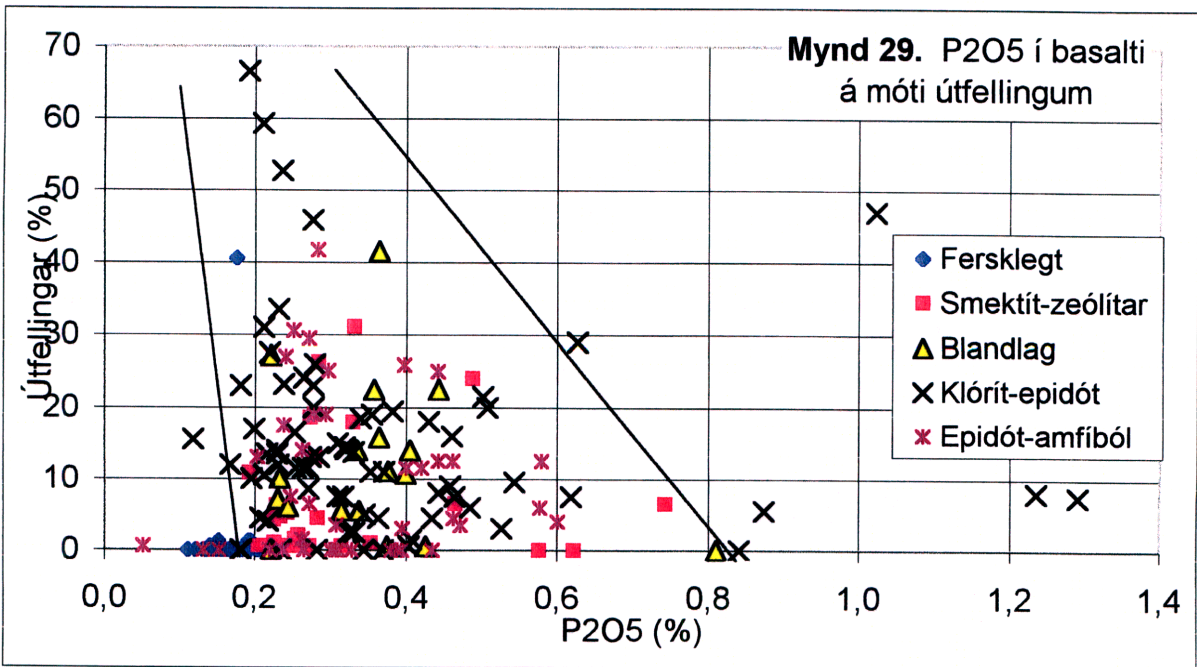
Klórít-epidót sýnin sýna mun meiri breytileika en önnur sýni ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Rb}$ ,  $\text{Ga}$ ,  $\text{Ce}$ ,  $\text{V}$ ), og sérstaklega er athyglisvert að breytileikinn er almennt mun meiri en innan epidót-amfíból beltisins. Þennan mun má ef til vill skýra sem mun á fjölda greininga þar sem mun fleiri greiningar tilheyra klórít-epidót hópnum en öðrum hópum (sbr. töflu 1). Þó er hallast að því að muninn megi einnig rekja til meiri breytileika í útfellingum innan þessa ummyndunarbeltis heldur en innan epidót-amfíbólbeltisins.



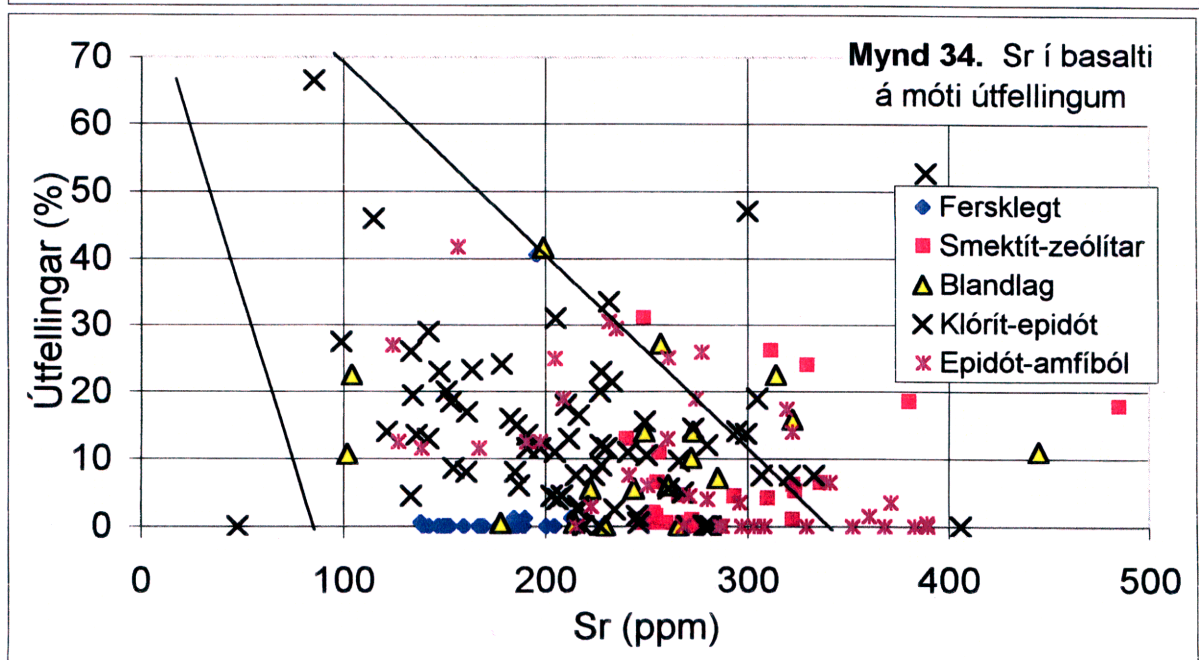
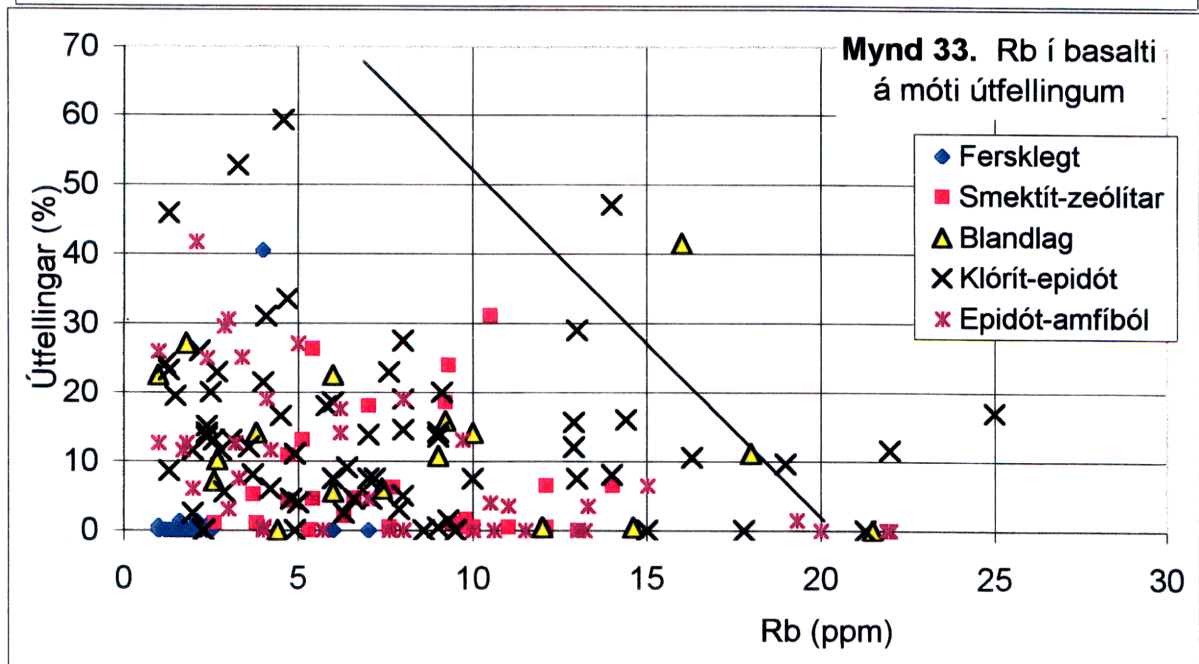
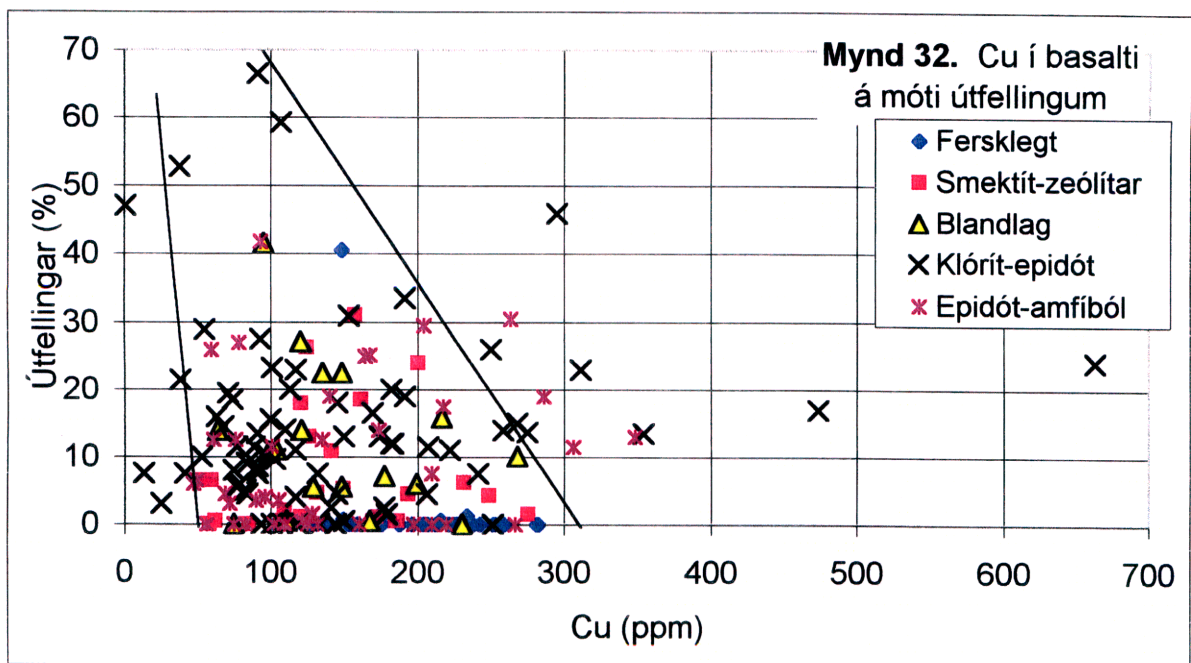


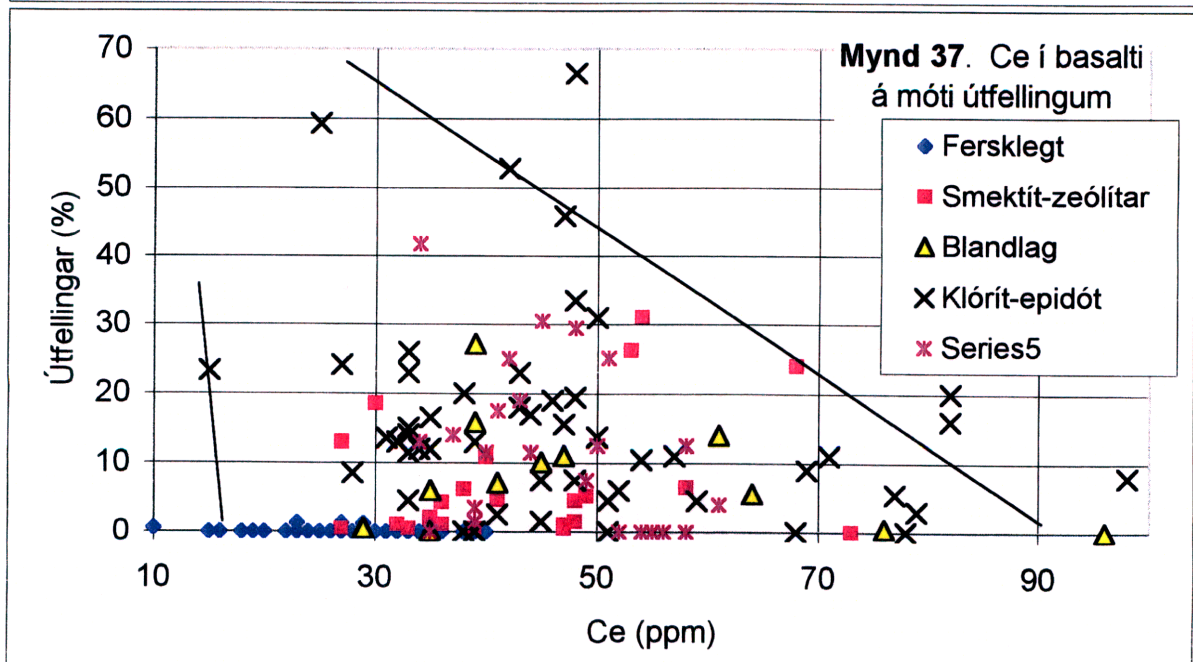
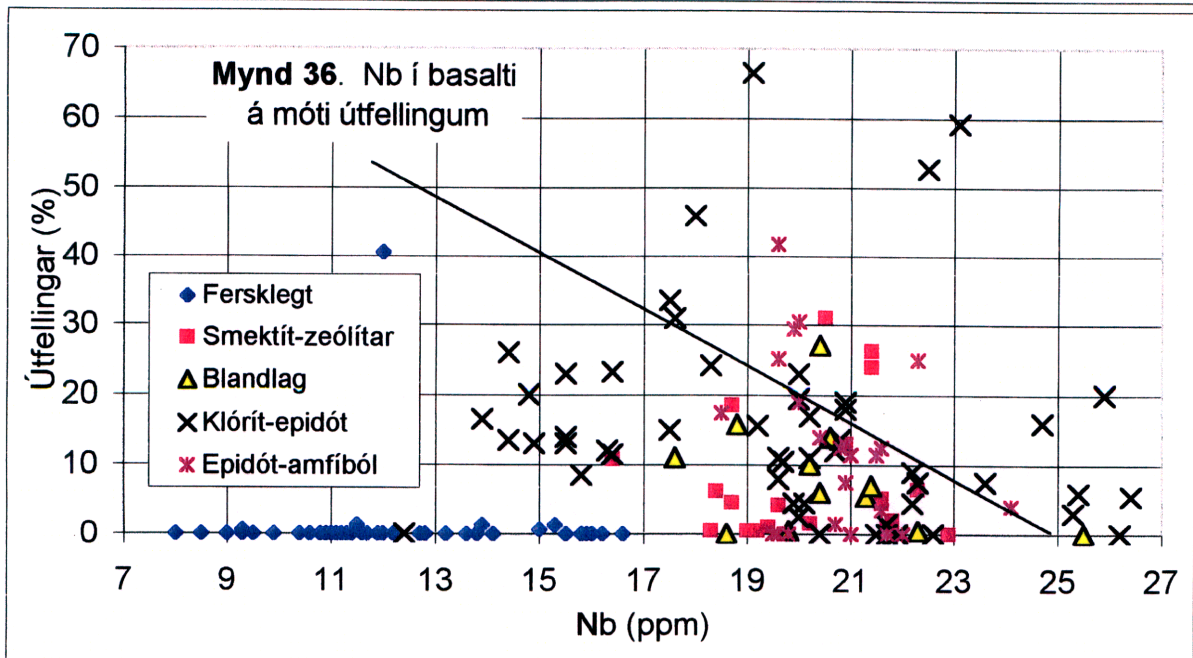
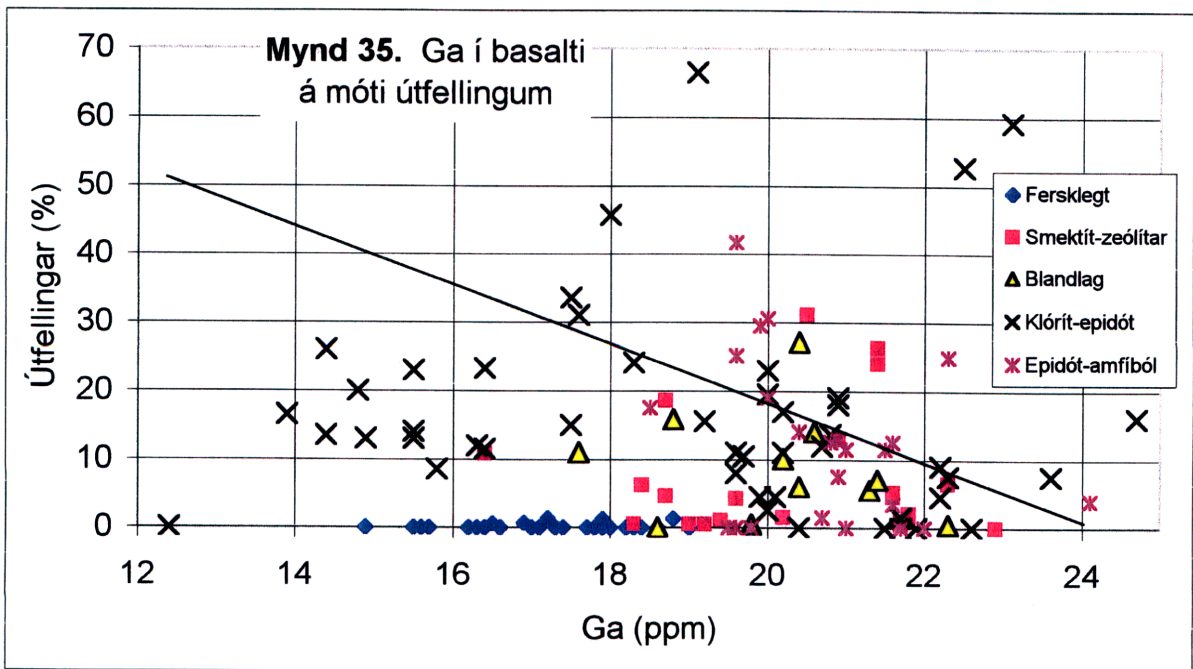




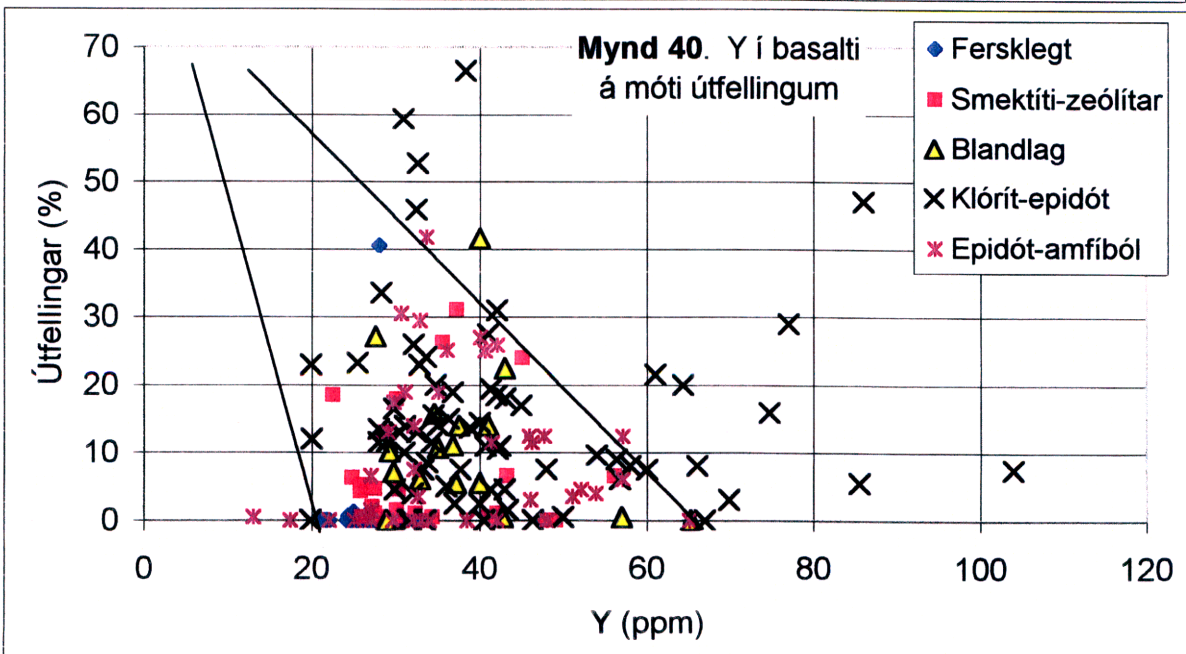
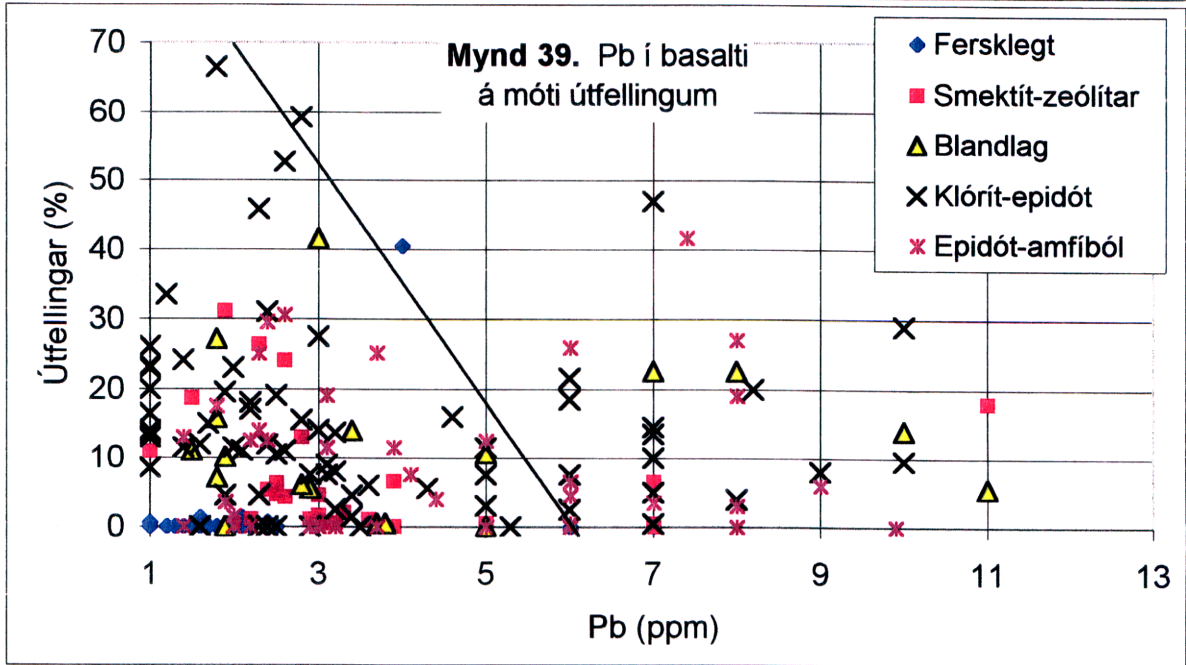
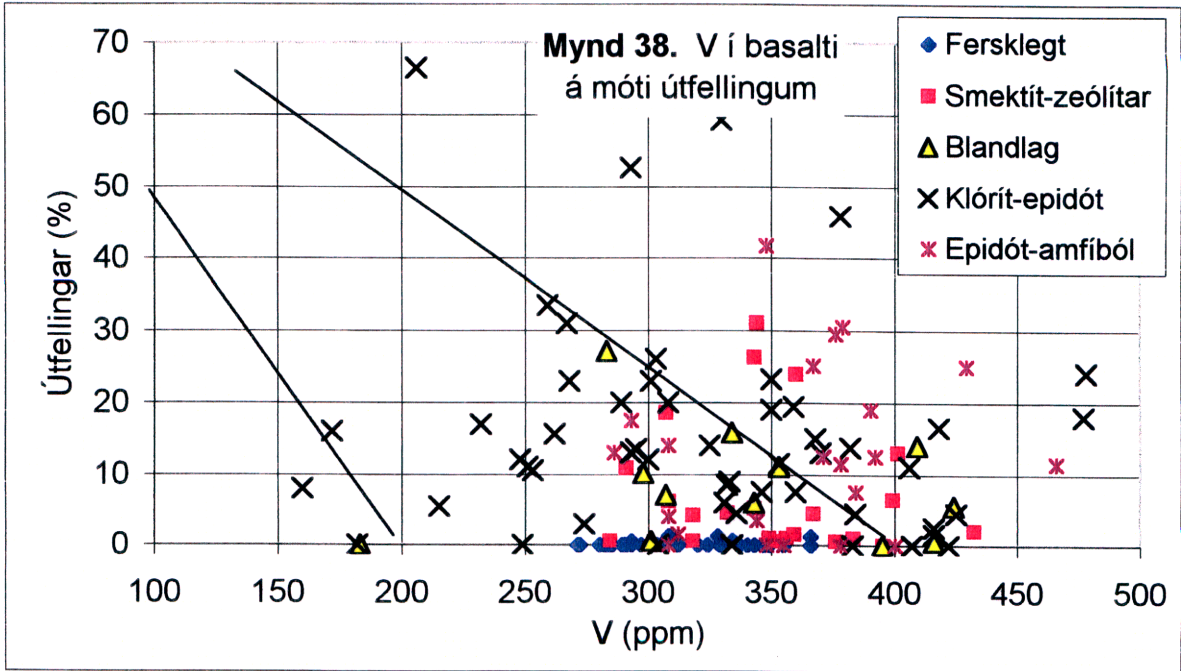


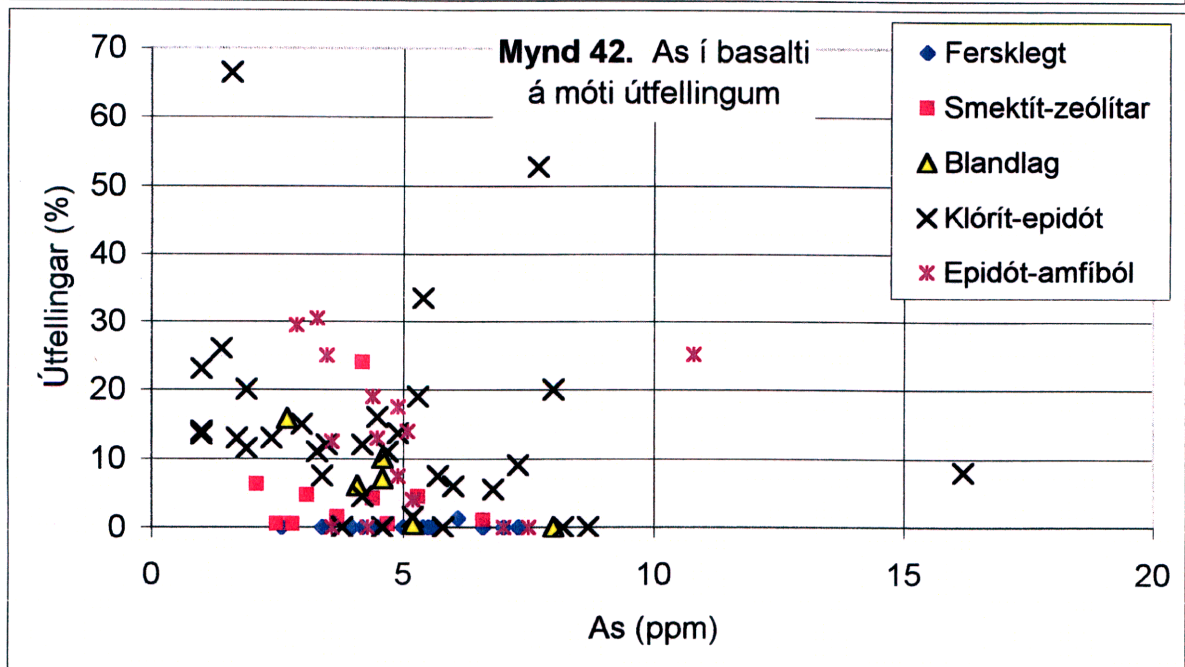
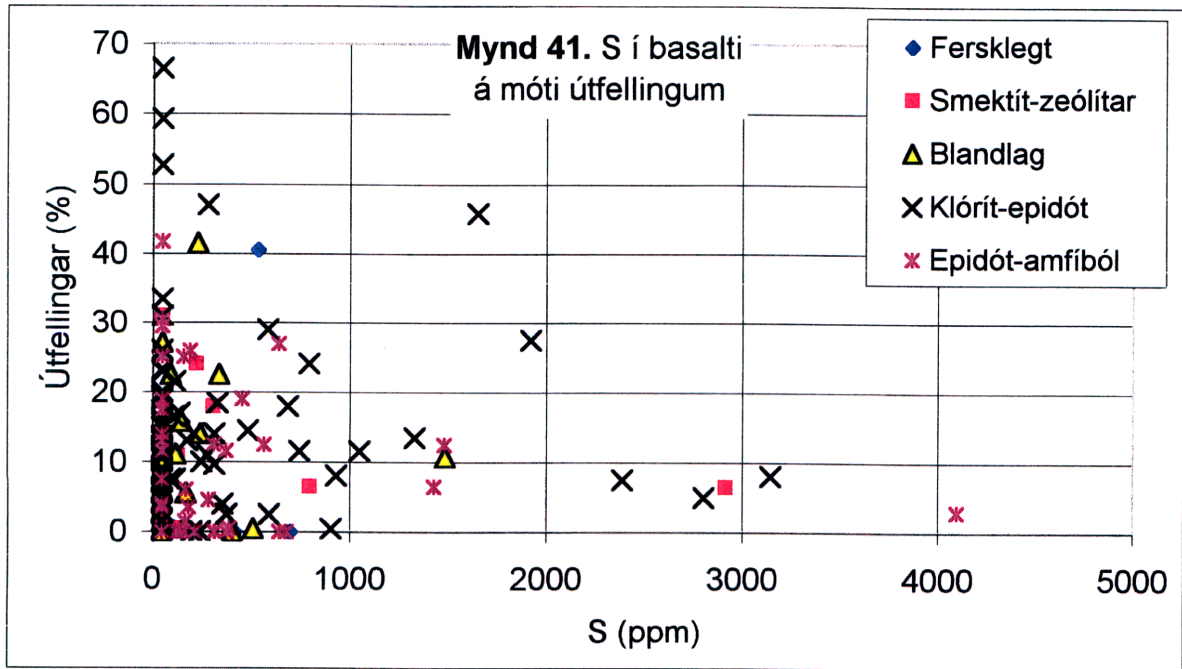












## 6. Frekari rannsóknir í efnafræði

Sú athugun, sem hér er gerð grein fyrir, telst vera fyrsta nálgun á mati á efnaflutningum í sýnunum úr vekefninu Forðafræðistuðlar. Athugunin hefur brugðið sæmilegu ljósi á hegðun rokgjarnra efna í ummyndun bergs, og gefið nokkrar góðar vísbendingar um efnaflutninga innan jarðhitakerfa. Það sem helst hefur háð slíku mati eru erfiðleikar við að tengja ummynduð sýni við sambærileg ferskleg sýni. Í því sambandi hefur verið sýnt fram á að þóleiút eldstöðvakerfin, sem forðafræðisýnin eru tekin úr, hafa nokkuð breytilega þróunarlínu, en það gerir slíkan samanburð erfiðari.

Líklegt er talið að unnt sé að fá betri mynd af efnaflutningi með því að:

- Sundurgreina sýnin samkvæmt einstökum eldstöðvakerfum. Í því sambandi væri áhugavert að koma tiltækum efnagreiningum úr þessum eldstöðvakerfum á tölvutækt form, svo sem frá Geitafelli og Esju.
- Kanna útfellingategundir með talningu í þunnisneiðum, til að meta nánar í hvaða hluta bergsins efnaflutningarnir hafa átt sér stað. Gera athugun á einstökum sýnum sem sýna áberandi frávik í efnastyrk.
- Meginhluti þessarar könnunar var einskorðaður við basalt. Svipaða könnun þyrfti að gera fyrir ísúrt og súrt berg.
- Líklegt er að efni eins og Zr ( $\text{TiO}_2$ , Zn) sé lítið hreyfanlegt í bergi við ummyndun og eru niðurstöður þessarar rannsóknar í samræmi við aðrar rannsóknir (t.d. Levi o.fl. 1982; Dickin og Jones 1983; Ferry 1985; Ridley 1994; sjá einnig töflu 4 í Hjalti Franzson o.fl. 1997). Það gefur þann möguleika að ef leiðrétt er fyrir minnkun Zr vegna útfellinga mætti nálgast upprunalegt magn Zr í bergsýnunum áður en útfellingar settust að í berginu. Á þann hátt væri hægt að miða við ákveðið efni í sýnunum, efni sem er óháð ummyndun. Með því að tengja Zr við þróunarlínu viðkomandi eldstöðvar, og teikna það síðan upp á móti öðrum efnum, væri unnt að gera sér betur grein fyrir hvort minnkun eða aukning hafi orðið á efnum í sýnum.
- Í þessari samantekt hefur komið í ljós misræmi í nokkrum bergsýnum á tengingu þeirra við ummyndunarbelti og berggerð. Bent er á nauðsyn þess að "master" gagnagrunnur sé færður í betra horf.

## 7. Helstu niðurstöður

Helstu niðurstöður þessarar rannsóknar eru :

- Ummyndun bergs eykst með hækkandi hita. Einnig eykst ummyndun í réttu hlutfalli við aukinn upprunalegan poruhluta.
- Glæðitap eykst í réttu hlutfalli við ummyndun bergs.  $\text{CO}_2$  og  $\text{H}_2\text{O}$ , sem eru meginhlutar glæðitapsins, aukast með aukinni ummyndun bergs. Tiltölulega hátt magn  $\text{CO}_2$  í bergi úr epidót-amfíból ummyndunarbeltinu bendir til að kalsít hafi fallið út á tíma kælingar jarðhitakerfis. Það gæti síðan bent til að poruhluti og lekt sem nú mælist í viðkomandi sýnum sé minni en þegar þau voru í umhverfi epidót-amfíból ummyndunarbeltisins.
- Samband einstakra efna og útfellingamagns í sýnum gefur til kynna efnaflutninga í jarðhitakerfi. Þannig er líklegt að aukning hafi orðið í  $\text{SiO}_2$  og  $\text{Na}_2\text{O}$ , en minnkun í  $\text{K}_2\text{O}$  með aukinni ummyndun. Þau efni sem sýna minnstu breytingar við ummyndun eru Zr,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  og jafnvel MgO. Önnur efni sýna fremur breytilega svörun við ummyndun.



## 8. Heimildir

- Ásgrímur Guðmundsson, Hjalti Franzson og Guðmundur Ómar Friðleifsson 1995. *Forðafræðistuðlar. Söfnun sýna*. Orkustofnun, OS-95017/JHD-11 B, 72 s.
- Dickin, A.P. og Jones N.W. 1983. Relative element mobility during hydrothermal alteration of the Basic Sill, Isle of Skye, N.W. Scotland. *Contrib. Mineral. Petrol.* 82: 147-153.
- Ferry, J.M. 1985. Hydrothermal alteration of Tertiary igneous rocks from the Isle of Skye, Northwest Scotland. I. Gabbros. *Contrib. Mineral. Petrol.* 91: 264-282.
- Hjalti Franzson 1978. *Structure and petrochemistry of the Hafnarfjall-Skarðsheiði central volcano and the surrounding basalt succession, W-Iceland*. Doktorsritgerð frá Edinborgarháskóla, 263 s.
- Hjalti Franzson, Guðmundur Ómar Friðleifsson, Ásgrímur Guðmundsson og Elsa G. Vilmundardóttir 1997. *Forðafræðistuðlar. Staða bergfræðirannsóknna í lok 1997*. Orkustofnun, OS-97077, 57 s.
- Hjalti Franzson 1998a. *Forðafræðistuðlar. Efnagreiningar á bergi 1997*. Orkustofnun, greinargerð, HF-98/03, 7 s.
- Hjalti Franzson 1998b. *Forðafræðistuðlar. Tengsl efnagreinds CO<sub>2</sub>, kalsíts og bundins vatns*. Orkustofnun, greinargerð, HF-98/04, 5 s.
- Hjalti Franzson 1998c. *Forðafræðistuðlar. Hugleiðingar um kalsít (og pýrít) í jarðhitakerfum*. Orkustofnun, greinargerð, HF-98/05, 6 s.
- Hjalti Franzson og Helga Túlinius 1999. *Rannsóknir á kjarna úr holu ÖJ-1, Ölkelduhálsi*. Orkustofnun, OS-99024, 67 s.
- Karl Grönvold 1999. Óbirtar efnagreiningar úr Kröflu úr doktorsritgerð Hugh Nickolson frá Edinborgarháskóla.
- Levi, B., Aguirre, L., og Nyström, J.O. 1982: Metamorphic gradients in burial metamorphosed vesicular lavas: Comparison of Basalt and spilite in Cretaceous basic flows from Central Chile. *Contrib. Mineral. Petrol.* 80:49-58
- Ómar Sigurðsson, Ásgrímur Guðmundsson, Guðmundur Ómar Friðleifsson, Hjalti Franzson, Steinar Þór Guðlaugsson og Valgarður Stefánsson 2000. *Rock database for the igneous Icelandic geothermal systems. Status and unexpected results*. Uppkast að grein fyrir WGC-2000, Japan
- Ridley, W.I., Perfit, M.R., Jonasson, I.R., og Smith, M.F. 1994. Hydrothermal alteration in oceanic ridge volcanics: A detailed study at the Galapagos Fossil Hydrothermal Fields. *Geochim. et Cosmochem. Acta*, 50: 1619-1631.

Sveinn Jakobsson 1999. Óbirtar efnagreiningar af fersku bergi af Reykjanes  
-Langjökulsbeltinu.