



ORKUSTOFNUN
Jarðhitadeild

FORÐAFRÆÐISTUÐLAR

Mælingar á bergsýnum

Áfangaskýrsla um samvinnuverk Hitaveitu Reykjavíkur,
Hitaveitu Suðurnesja og Orkustofnunar

Ómar Sigurðsson og Valgarður Stefánsson

OS-94049/JHD-28 B

Desember 1994



ORKUSTOFNUN
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verknr. 720 105

FORÐAFRÆÐISTUÐLAR

Mælingar á bergsýnum

Áfangaskýrsla um samvinnuverk Hitaveitu Reykjavíkur,
Hitaveitu Suðurnesja og Orkustofnunar

Ómar Sigurðsson og Valgarður Stefánsson

OS-94049/JHD-28 B

Desember 1994

EFNISYFIRLIT

1. INNGANGUR
 2. FLOKKUN BERGSÝNA
 3. MÆLIÐFERÐIR
 - 3.1 Skilgreining á hugtökum
 - 3.2 Mælingar á gropi
 - 3.3 Mælingar á efnisþyngd
 - 3.4 Mælingar á lekt
 4. NIÐURSTÖÐUR MÆLINGA
 - 4.1 Grop
 - 4.2 Efnisþyngd
 - 4.3 Lekt
 - 4.4 Samband lektar og grops
 - 4.5 Samband efnisþyngdar og grops
 5. UMRÆÐA
 - 5.1 Munur á lekt mældri með gasi og lekt mældri með vatni
 - 5.2 Munur á setbergi og kristölluðu bergi
 - 5.3 Skekkjumörk mælinga og misleitni bergs
 6. HELSTU NIÐURSTÖÐUR
 7. FRAMHALD VERKEFNISINS
 8. HEIMILDIR
- VIÐAUKI

MYNDIR

1. Samband á milli virks grops og heildar grops
2. Munur á heildar gropi og virku gropi
3. Samband á milli reiknaðrar og raun-efnisþyngdar
4. Samband á milli Klinkenberg-lektar og óleiðréttrar lektar frá gasmælingu
5. Samband á milli lektar mældri með vatni og Klinkenberg-lektar
6. Dreifing lektar með gropi
7. Afleitt hlutfall stuðla við samanburð á lekt og gropi í setbergi
8. Óþekktar breytur í líkingum Kozeny við samanburð á lekt og gropi í setbergi
9. Óþekktar breytur í almennum hárpúlfkingum í samanburði á lekt og gropi
10. Dreifing efnisþyngdar með gropi fyrir öll sýni
11. Samband grops og efnisþyngdar basalhrauna
12. Samband grops og efnisþyngdar ferskra basalhrauna
13. Samband grops og efnisþyngdar basalhrauna með smektít-zeólíta ummyndun
14. Samband grops og efnisþyngdar basalhrauna með klórít-epidót-amfiból ummyndun
15. Samband grops og efnisþyngdar basaltinnskota
16. Samband grops og efnisþyngdar fyrir móberg
17. Samband grops og efnisþyngdar fyrir súrt berg

TÖFLUR

1. Samræmdur greiningastaðall bergsýna
2. Skilgreining hugtaka
3. Meðaltal og meðalfrávik grops
4. Dulið grop
5. Meðaltal og meðalfrávik efnisþyngdar
6. Efnisþyngd móbergs
7. Klinkenberg-lekt
8. Breytingar í lekt hraunlaga og túffs með ummyndunarstigi
9. Grop og efnisþyngd basalhrauna með mismunandi ummyndun
10. Hlutfall Klinkenberg og gas-lektar á móti lekt mældri með vatni
11. Mælingar á systurkjörnum

1. INNGANGUR

Í verkþættinum *Forðafræðistuðlar*, sem er hluti af verkefninu *Rannsókn jarðhita til raforkuvinnslu*, er safnað upplýsingum um eiginleika íslensks bergs. Ætlunin er að koma upp vísí að gagnabanka um eðliseiginleika íslensks bergs og hafa þeir fengið samheitið forðafræðistuðlar. Nú stendur yfir athugun á sýnum úr rofnum megineldstöðvum, þar sem gerðar eru mælingar og greiningar á mismunandi bergsýnum. Tilgangur verksins er margþættur, en í byrjun beinist athyglin einkum að því að fá fram hvaða áhrif ummyndun hefur á forðafræðilega eiginleika bergsins. Vinna við verkið fer fram í vinnuhóp, en auk höfunda hafa Ásgrímur Guðmundsson, Guðmundur Ómar Friðleifsson og Hjalti Franzson unnið að þessu verki. Þeir Ásgrímur, Guðmundur og Hjalti hafa unnið jarðfræðipátt verksins, sem spannar meðal annars söfnun og greiningu á bergsýnunum.

Gerðar hafa verið mælingar á 226 bergsýnum hjá Core Laboratories U.K. Ltd. í Aberdeen í Skotlandi. Eftirfarandi stærðir hafa verið mældar:

- Lekt, mæld með gasi (air permeability)
- Lekt, mæld með gasi og með Klinkenberg leiðréttingu (Klinkenberg permeability)
- Lekt, mæld með vatni (water permeability)
- Virkt grop (effective porosity)
- Heildar grop (total porosity)
- Reiknuð efnisþyngd (effective grain density)
- Raun efnisþyngd (total grain density)

Lektarmælingar með vatni hafa aðeins verið reyndar á hluta sýnanna, þar sem slíkar mælingar eru mun dýrari en lektarmælingar með gasi. Vonast var til að með því að lektarmæla hluta sýnanna bæði með vatni og gasi fengist marktækt reynslusamband milli þessarra tveggja mæliaðferða, þannig að nota mætti lektarmælingar með gasi til samanburðar við aðra forðafræðistuðla.

Nú hefur komið í ljós kerfisbundinn munur á lektarmælingum með gasi og lektarmælingum með vatni á þeim sýnum sem mæld hafa verið hjá Core Laboratories. Kallar það á sérstaka athugun á því hvað veldur þessu misræmi. Á meðan verið er að finna skýringu á misræminu verða ekki mæld fleiri sýni hjá Core Laboratories. Þessar aðstæður koma til með að tefja framvindu á þessum verkþætti. Hins vegar liggja nú fyrir mælingar á 226 bergsýnum, og ástæða er til að draga saman fyrirbyggjandi niðurstöður. Í þessari áfangaskýrslu er greint frá niðurstöðum mælinga á 226 bergsýnum.

2. FLOKKUN BERGSÝNA

Á sýnatökustað var boraður út kjarni úr berginu sem var einn þumlungur í þvermál. Yfirleitt voru teknir fjórir kjarnar á hverjum sýnatökustað þar sem ætlunin er að gera mismunandi mælingar og greiningar á hverju sýni. Sýnin voru flokkuð á staðnum samkvæmt samræmdum staðli, en greiningastaðall sýnanna er sýndur í töflu 1. Þessi greiningarlykill er sá sami og notaður hefur verið um langt árabil við greiningu á borsvarfi á Orkustofnun. Berggerðarflokkar eru 24, en ummyndunarstig 6 talsins. Alls eru því fyrir hendi 144 greiningarflokkar. Þeir Ásgrímur, Guðmundur, og Hjalti hafa nú í undirbúningi skýrslu með lýsingu á sýnatökustöðum, sýnatökunni og greiningu bergsýnanna.

Við frekari úrvinnslu verður bæði berggerð og ummyndunarstig ákvarðað nánar með þunnisneiðagreiningu og röntgengreiningu. Í þessari skýrslu er eingöngu stuðst við greiningu sem gerð var á sýnatökustað við sýnatökuna.

Tafla 1. Samræmdur greiningastaðall bergsýna

BERGGERÐ		UMMYNDUNARSTIG					
		Ferskt	Smektit- zedlitar	Blandlög	Klórít	Klórít- epidót	Epidót- amfiból
BASALT	<i>HRAUNLÖG</i>						
	Basaltkargi						
	Fínk.-meðalkornótt						
	Meðal-grófkornótt						
	Dílótt						
	<i>INNSKOT</i>						
	Fín-meðalkornótt gangaberg						
	Meðal-grófkornótt gangaberg						
	Dílótt gangaberg						
	Gabbró						
	<i>MÓBERG</i>						
	Bólstraberg						
	Móbergsbreksía						
	Túff						
	Set						
	ÍSÚRT BERG	Íslandít (andesít)					
Dasít							
Breksía							
Díórít							
SÚRT BERG	Líparít						
	Rhýólít						
	Ignimbrít						
	Túff						
	Granódíórít						
	Granófýr						
SETBERG	Rauð millilög						
	Annað set						

3. MÆLIAÐFERÐIR

Í þessum kafla verður fjallað nokkuð um skilgreiningar á hugtökum sem tengjast mælingum á eiginleikum bergsins og mæliaðferðunum lýst lauslega. Hjá Core Laboratories var notað gas við mælingarnar á lekt og gropi. Mælingarnar voru gerðar í sjálfvirku tæki (CMS-300), sem mælir 12-18 kjarnasýni af hringekju hvert á eftir öðru, en tölva skráir niðurstöður jafnóðum. Fyrir nokkur kjarnasýni var lekt mæld með söltum vökva og að lokum voru sýnin mulin til að ákvarða heildar grop.

3.1 Skilgreining á hugtökum

Til þess að auðvelda framsetningu efnis og gera lesendum lesturinn bærilegri er skilgreining helstu hugtaka gefin í töflu 2.

Tafla 2. Skilgreining hugtaka

Nafn	Enskt heiti	Tákn	Skilgreining
Lekt	Permeability	k	<i>Flatarmál holrýmis er stjórnar rennsli</i>
Grop	Porosity	ϕ	<i>Rúmmál holrýmis í bergi</i> <i>Rúmmál bergs</i>
Virkt grop	Effective porosity	ϕ_e	<i>Rúmmál samtengds holrýmis</i> <i>Rúmmál bergs</i>
Heildar grop	Total porosity	ϕ_t	<i>Rúmmál alls holrýmis</i> <i>Rúmmál bergs</i>
Eðlisþyngd	Density	ρ	<i>Massi</i> <i>Rúmmál</i>
Efnisþyngd	Grain density	ρ	<i>Eðlisþyngd bergs án holrýmis</i>
Reiknuð efnisþyngd	Effective grain density	ρ_e	<i>Massi</i> <i>Rúmmál bergs - virkt grop</i>
Raun efnisþyngd	Total grain density	ρ_t	<i>Massi</i> <i>Rúmmál bergs - Rúmmál alls holrýmis</i>

3.2 Mælingar á gropi

Mælingar á gropi (poruhlutfalli, porosity) með gasi byggir á hegðun gass og lögmáli Boyles. Gas hegðar sér þannig að það þenst út og fyllir það rúmmál sem er tiltækt. Lögmál Boyles segir að við fast hitastig sé þrýstingur gass (p) í öfugu hlutfalli við rúmmál þess (v) þ.e.:

$$v \propto \frac{1}{p} \text{ eða fyrir kjörgas } pv = \text{fasti}$$

Fyrir kjörgas gildir að þegar rúmmáli þess er breytt úr v_1 í v_2 þá breytist þrýstingur þess úr p_1 í p_2 samkvæmt:

$$P_1 v_1 = P_2 v_2$$

Í meginatriðum er mælingin framkvæmd þannig að hreinsað og þurrk kjarnasýnið er sett í kjarnahaldara og það lofttæmt. Síðan er kjarnahaldarinn tengdur við gaskút með þekktu rúmmáli og þrýstingi. Þrýstingur í kútnum er þó hafður það lágur að hann á ekki að opna holrými sem er lokað eða mynda sprungur í sýninu. Síðan er opnað fyrir krana og gasið (helíum) þennst inn í gropurnar (holrými kjarnans). Þegar jafnvægi er náð er nýr þrýstingur lesinn af tækinu og virkt rúmmál gropa reiknað. Þá er kjarninn tekinn úr tækinu og dýft í vökva sem bleytir hann ekki (kvikasilfur) og utanrúmmál kjarnans ákvarðað út frá rúmmáli vökvans sem kjarninn ryður frá sér. Með þessi tvö rúmmál þekkt er virkt grop (effective porosity) kjarnans ákvarðað;

$$v_2 = (p_1 v_1) / p_2$$

$$PV = v_2 - v_1$$

$$\phi_e = \frac{PV}{BV} \times 100 \quad (\%)$$

þar sem PV er rúmmál gropa (pore volume) og BV er utanrúmmál kjarnans (bulk volume). Virkt grop er því samkvæmt skilgreiningu hlutfallið milli samtengds holrýmis í bergi og heildar rúmmáls þess, oftast skráð sem prósentuhlutfall.

Með þessari mæliaðferð er eingöngu ákvarðað virkt grop kjarnans, þar sem eingöngu er mælt rúmmál opinna og samtengdra holrúma (gropa) í kjarnanum. Auk þeirra geta verið til staðar lokuð holrými. Til að ákvarða heildar grop (total porosity) kjarnans var hann því mulinn eftir að aðrar mælingar höfðu verið gerðar. Mylsnan er svo sett í vökva (kvikasilfur) og rúmmál hennar ákvarðað. Heildar grop er síðan reiknað samkvæmt;

$$\phi_t = \frac{(BV - GV)}{BV} \times 100 \quad (\%)$$

þar sem GV er rúmmál korna eða efnis (grain volume). Heildar grop er þannig samkvæmt skilgreiningu hlutfallið milli alls holrýmis í berginu og rúmmáls þess.

3.3 Mælingar á efnisþyngd

Ákvörðun á efnisþyngd bergsins, þ.e. eðlisþyngd fasta efnisins án holrýmisins, er að mestu fengin út frá afleiddum stærðum við ákvörðun á gropi. Áður en kjarnasýnið er sett í kjarnahaldarann til mælingar á gropi er það viktað og þurr þyngd þess ákvörðuð. Virk eða reiknuð efnisþyngd bergsins (effective grain density) er síðan fundinn þannig út frá virku gropi;

$$\rho_e = \frac{W}{(BV - PV)}$$

þar sem W er þurr þyngd kjarnans.

Heildarefnisþyngd eða raun-efnisþyngd bergsins er síðan ákvörðuð eftir að kjarninn hefur verið mulinn.

$$\rho_t = \frac{W}{GV}$$

Raun-efnisþyngd bergsins er því ávallt hærri eða jöfn reiknaðri efnisþyngd þess.

3.4 Mælingar á lekt

Mæling á gas-lekt kjarnasýnana var gerð í tæki, þar sem mælingin byggist á breytilegu streymi (unsteady state) gassins gegnum kjarnann. Lektarmæling með tækjum sem byggja á þessari aðferð er miklu fljótlegri og talin í flestum tilfellum eins nákvæm og mælingar gerðar með tækjum sem byggja á æstæðu ástandi (steady state). Að gerð svipar tækinu til tækja sem notað eru við mælingar á gropi og oftast er hægt að mæla bæði grop og lekt með sama tækinu. Þannig er það hjá Core Laboratories sem notar tæki er þeir hafa sjálfir hannað og smíðað (CMS-300). Í meginatriðum samanstendur tækið af gaskút með þekktu rúmmáli, nænum þrýstiskynjara og kjarnahaldara sem er opnanlegur út í andrúmsloftið. Mælingin fer þannig fram að gaskúturinn er hlaðinn gasi (helsum upp í 16,5 bar-g). Kjarninn er settur í kjarnahaldarann sem tengdur er kútnum og síðan er opnað fyrir gasstreymið úr kútnum gegnum kjarnann. Þrýstingurinn í gaskútnum er skráður af tölvu sem fall af tíma frá því kúturinn er opnaður. Á hverju augnabliki er þannig þekktur þrýstingurinn inn og út úr kjarnanum, og rennslið gegnum kjarnann er í réttu hlutfalli við þrýstifallið í gaskútnum á tímaeiningu. Lögmál Darcys er síðan notað til að reikna lektina út frá ofangreindum stærðum. Lögmál Darcys lýsir lygnstreymi (laminar flow) vökva gegnum gropið berg og má skrifa;

$$q = \frac{Ak}{\mu} \frac{dp}{dx}$$

þar sem q er rúmmálsrennsli vökvans, A er þverskurðar flatarmál, k er lekt bergs, μ er skriðseigja vökvans og dp/dx er þrýstifallið yfir kjarnann.

Þegar notað er gas til að mæla lekt í bergsýnum reynist oft nauðsynlegt að leiðrétta mælda lekt fyrir ýmsum skekkjuvöldum til að fá raunlekt sýnisins eða þá lekt sem myndi mælast ef í stað gass væri notaður vökvi við mælinguna. Einn þessara skekkjuvalda stafar af mjög mismunandi rennslisraða (slippage) gass um rennslisleiðir bergsýnisins. Áhrifa af völdum þessa fer að gæta í auknum mæli eftir því sem þverskurður rennslisleiða gegnum sýnið nálgast meðalsnerta (mean free path) gassins, en meðalsnerta gassins er háð sameindastærð þess og hreyfiorku. Þessi áhrif hafa verið kölluð "Klinkenberg-áhrif" og eru því háð þeirri gastegund sem notað er við mælinguna. Mæld lekt með gasi er því leiðrétt með hliðsjón af eftirfarandi jöfnu.

$$k = \frac{k_g}{1 + b/p_m}$$

Þar sem k_g er lekt sýnis samkvæmt mælingu með gasi, p_m er meðalþrýstingur yfir sýnið sem k_g er mælt við og b (Klinkenberg-stuðullinn) er tekinn sem fasti fyrir ákveðna gastegund og ákveðið berg. Af jöfnunni sést að þegar gaslekt er teiknuð á móti $1/p_m$ ætti að fást lína með hallann kb og skurðpunktinn k (þegar $p_m \rightarrow \infty$). Þannig er reiknað með að við háan meðalþrýsting sé meðalsnerta sameinda lítil og lekt mæld með gasi ætti þar að nálgast þá lekt sem mæld er með vökva. Í reynd er Klinkenberg-

stuðullinn (b) ekki fasti heldur háður ýmsum eiginleikum bergsins svo sem stærð gropa og stærðardreifingu hárfþna milli gropa. Þar sem lekt er að nokkru mæling á stærð rennslisleiða um bergið þá hefur verið sýnt fram á að Klinkenberg-stuðullinn (b) sé einnig fall af lektinni og hækki með minnkandi lekt, þar sem breytingar í rennslishraða verði hlutfallslega meiri fyrir þrengri rennslisleiðir (Amyx o.fl., 1960).

Annar helsti skekkjuvaldur sem kemur fyrir, þegar gas er notað til lektarmælinga, stafar af rennslishraða gassins gegnum bergsýnið. Vegna líftillar skriðseigju gasa verður rennslishraðinn gegnum bergsýnið oft það mikill að rennslíð breytist úr lygnstreymi í iðustreymi (turbulent flow). Þegar rennslíð breytist í iðustreymi gildir lögmál Darcys ekki lengur og taka verður tillit til verulega aukinna orkutapa rennslisins. Þetta er oftast gert með því að bæta leiðréttingarlið við lögmál Darcys sem lítur þá þannig út;

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\mu}{k} u + \beta \rho u^2$$

þar sem u er rennslishraðinn (q/A), ρ er eðlisþyngd vökvans (gassins) og β (beta) er iðustreymisstuðull. Þessi jafna er oft kennd við Forcheimer.

Eins og áður sagði sér tölva um að taka stöðuga skráningu meðan mæling er gerð í tækinu sem Core Laboratories notar. Með hliðsjón af ofangreindum jöfnum eru því Klinkenberg- og iðustreymisstuðlarnir reiknaðir jafnóðum og mæling leiðrétt samkvæmt því.

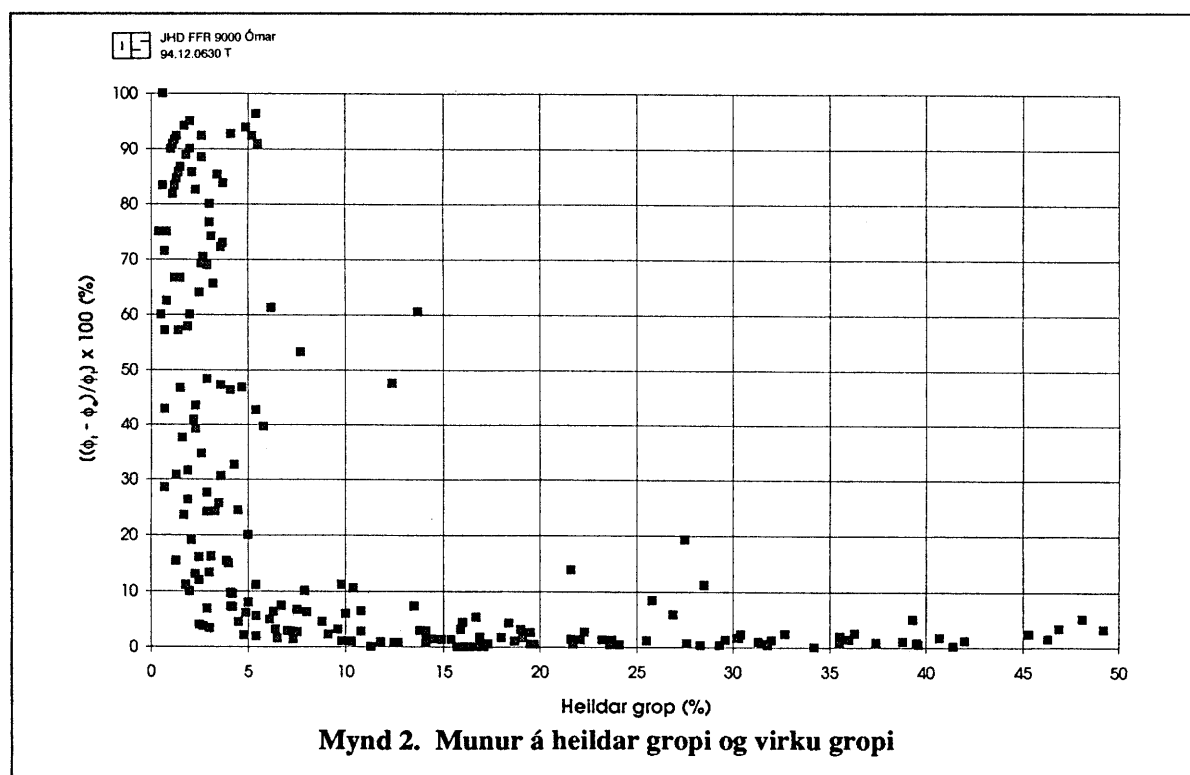
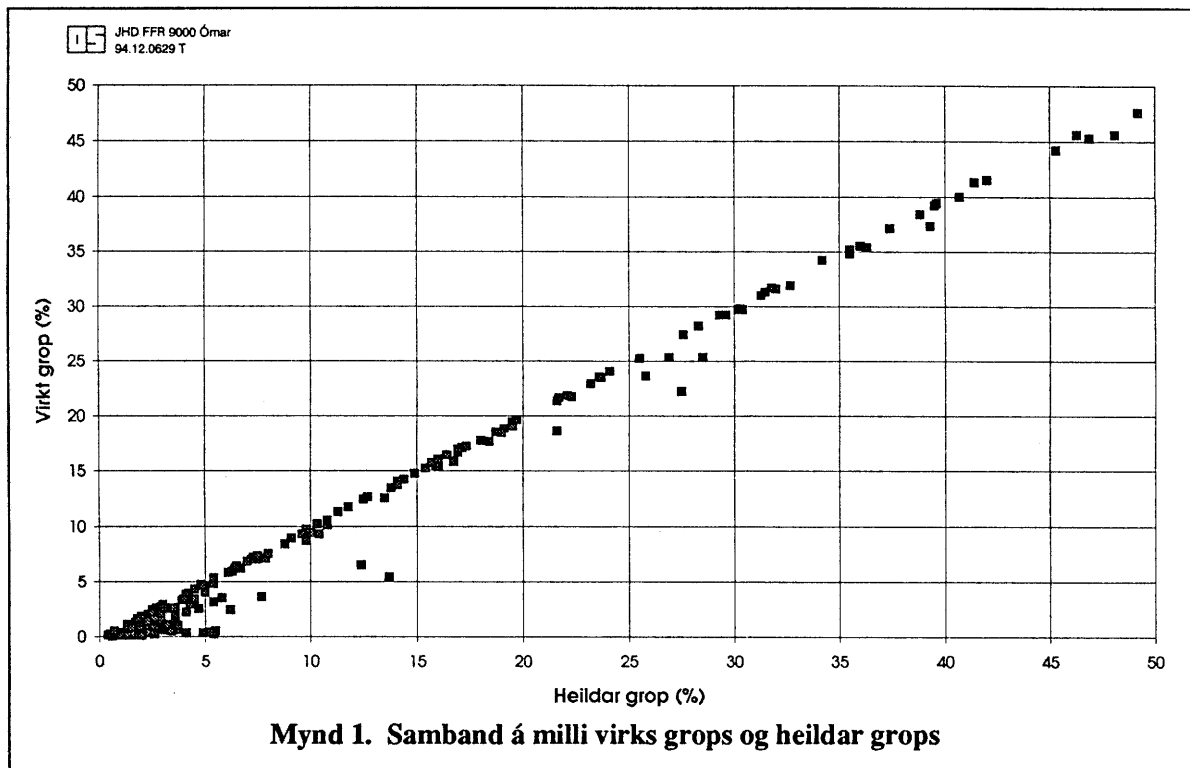
4. NIÐURSTÖÐUR MÆLINGA

Alls hafa 226 kjarnasýni verið send til mælinga hjá Core Laboratories í þremur skömmtum. Á öllum sýnunum voru gerðar grunnmælingar á gropi og lekt með gasi. Fyrir nokkur valin sýni voru gerðar lektarmælingar með söltum vökva (brine) og fyrir flest sýnin var ákvarðað heildar grop og raunefnisþyngd bergsins. Í þessum kafla verður greint nánar frá niðurstöðum þessara mælinga og skýrt frá fyrstu ályktunum sem má draga af þeim.

4.1 Grop

Fyrir allflest kjarnasýni sem þegar hafa verið mæld hefur virkt og heildar grop verið mælt. Dreifing grops er nokkuð jöfn yfir það svið sem það mælist, en virkt grop mælist á bilinu 0,1-47,6% og heildar grop á bilinu 0,4-49,2%. Eftirtektarvert er hve lítt munur er milli virks og heilar grops fyrir hvert einstakt sýni eins og sjá má á mynd 1. Þegar mælingarnar eru skoðaðar nánar kemur í ljós að hlutfallslegur munur virks og heildar grops í sýnum með heildar grop meira en 20% er almennt um og innan við 2% (mynd 2). Þegar heildar grop minnkar eykst þessi hlutfallsmunur, þó er munurinn almennt minni en 6% fyrir sýni með heildar grop 6-20%. Þegar heildar grop er orðið minna en 6% er orðin mikil dreifing í hlutfallslegum mun milli virks og heildar grops.

Tafla 3 sýnir meðalgrop og meðalfrávik gropgildanna fyrir fjórar aðalberggerðirnar. Engar mælingar hafa fram að þessu verið gerðar á ísúru bergi og mæld sýni af setbergi eru aðeins þrjú, þannig að einungis er hægt að beita tölfræði á fjórar berggerðir.



Grop móbergs er áberandi hærri en grop annarra berggerða. Að meðaltali er heildar grop þess um 30%, sem gerir þessa berggerð mjög mikilvæga frá forðafraðilegu sjónarmiði. Einnig er athyglisvert að meginhlutinn er virkt grop eða að meðaltali tæplega 28%.

Súrt berg hefur einnig tiltölulega hátt grop eða að meðaltali um 12%. Hins vegar er grop basalhrauna og basaltinnskota tiltölulega lágt og í báðum tilvikum er meðalfrávik gropgildanna hærra en meðalgildið.

Grop basalhrauna og basaltinnskota í töflu 3 er í samræmi við niðurstöður borholumælinga í IRDP holu á Reyðarfirði (Jónsson og Stefánsson, 1982), en þar reyndist meðalgrop hraunlaga vera 10,9% og meðalfrávik 8,3%. Fyrir basaltinnskot var meðalgrop í IRDP holunni 5,0%, og meðalfrávik einnig 5,0%.

Tafla 3. Meðaltal og meðalfrávik grops

	Virkt grop [%]			Heildar grop [%]		
	meðaltal	meðalfrávik	fjöldi sýna	meðaltal	meðalfrávik	fjöldi sýna
Basalhraun	7,13	9,46	108	8,09	9,14	108
Basaltinnskot	2,76	3,71	51	3,68	3,66	41
Móberg	27,79	10,72	44	29,69	10,08	42
Súrt berg	12,66	6,39	19	12,09	6,30	15

Til þess að meta dulið grop, en það er munurinn á virku gropi og heildar gropi, verður að takmarka samanburðinn við sýni þar sem gerðar hafa verið mælingar á bæði virku gropi og heildar gropi á sama sýninu. Í töflu 3 kemur t.d. fram að meðalgildið á virku gropi í súru bergi er hærra en meðalgildið á heildar gropi. Þetta stafar af því að fleiri gildi ganga inn í meðaltalið fyrir virka gropið en fyrir heildar gropið.

Í töflu 4 er meðaltal duliðs grops metið með því að bera saman meðaltal heildar grops og virks grops á sömu sýnum.

Tafla 4. Dulið grop

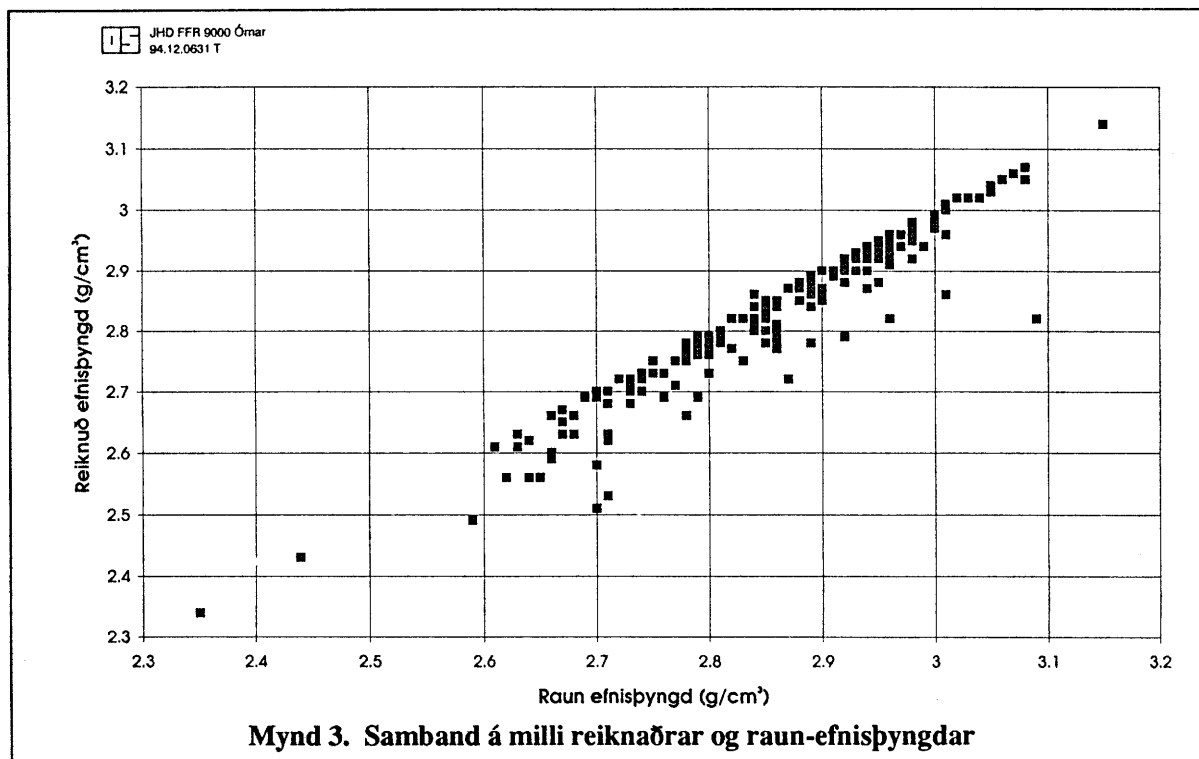
	$\langle \phi_t \rangle$ (%)	$\langle \phi_e \rangle$ (%)	$\langle \phi_t \rangle - \langle \phi_e \rangle$ (%)	$\frac{\langle \phi_t \rangle - \langle \phi_e \rangle}{\langle \phi_t \rangle}$
Basalhraun	8,09	7,13	0,96	0,12
Basaltinnskot	3,68	2,37	1,31	0,36
Móberg	29,69	28,78	0,91	0,03
Súrt berg	12,09	11,59	0,50	0,04

Fyrir allar fjórar meginberggerðirnar er munurinn á heildar gropi og virku gropi tiltölulega lítil eða um 1%. Hlutfallslega er þessi munur hærri fyrir basalhraun og innskot heldur en fyrir móberg og súrt berg. Þessar aðstæður styrkja stöðu móbergs og súrs bergs sem mikilvægustu berggerðir til vinnslu jarðhita.

4.2 Efnisþyngd

Heildar eða raun efnisþyngd bergsins í kjörnunum hefur mældst á bilinu 2,35-3,15 g/cm³, en er fyrir flest sýni á bilinu 2,60-3,07 g/cm³. Mynd 3 sýnir sambandið milli reiknaðrar og raun efnisþyngdar

bergsins. Dreifingin, sem kemur fram á myndinni, stafar fyrst og fremst af aðferðinni við ákvörðun efnisþyngdarinnar eins og áður var getið. Dreifingin stjórnast þannig af mismuninum í ákvörðun á virku og heildar gropi.



Tafla 5 sýnir meðaltal og meðalfrávik efnisþyngdar fyrir þær fjórar aðalberggerðir sem mælingar liggja fyrir á.

Tafla 5. Meðaltal og meðalfrávik efnisþyngdar

	Reiknuð efnisþyngd [g/cm^3]			Raun efnisþyngd [g/cm^3]		
	meðaltal	meðalfrávik	fjöldi sýna	meðaltal	meðalfrávik	fjöldi sýna
Basalthraun	2,86	0,11	108	2,89	0,11	108
Basaltinnskot	2,85	0,10	51	2,88	0,09	41
Móberg	2,75	0,19	44	2,78	0,14	42
Súrt berg	2,65	0,20	19	2,72	0,15	15

Miðað við dreifingu gildanna í töflu 5 er ekki tölfræðilegur munur á efnisþyngd berggerðanna. Hins vegar eru meðalgildin fyrir basalthraun og basaltinnskot hærri en samsvarandi meðaltöl fyrir móberg og súrt berg. Meðalfrávikin er stærra fyrir móberg og súrt berg en meðalfrávikin fyrir basalthraun og basaltinnskot.

Almennt séð ætti efnisþyngd að ákvarðast af efnasamsetningu bergsins. Þess vegna er þess vænst að efnisþyngd basalts, þ.e. hraun, innskot og móberg, sé sú sama, og að efnisþyngd súrs bergs sé lægri en efnisþyngd basalts. Þó gildin í töflu 5 séu ekki í andstöðu við þessi almennu sjónarmið veur það athygli að meðalefnisþyngd móbergs er lægri en samsvarandi meðaltöl fyrir hraun og innskot.

Í töflu 6 er efnisþyngd móbergs athuguð nánar með því að athuga meðaltal og meðalfrávik efnisþyngdar sérstaklega fyrir bólstraberg, móbergsbreksía, túff og set.

Tafla 6. Efnisþyngd móbergs

	Reiknuð efnisþyngd [g/cm^3]			Raun efnisþyngd [g/cm^3]		
	meðaltal	meðalfrávik	fjöldi sýna	meðaltal	meðalfrávik	fjöldi sýna
Bólstraberg	3,00	0,03	10	3,00	0,03	8
Móbergsbreksía	2,72	0,11	12	2,76	0,09	12
Túff	2,67	0,14	18	2,73	0,07	18
Set	2,53	0,08	4	2,60	0,11	4

Tafla 6 sýnir að efnisþyngd bólstrabergs er marktækt hærri en efnisþyngd hinna þriggja berggerðanna (móbergsbreksíu, túffs og sets). Einnig er efnisþyngd bólstrabergs í góðu samræmi við efnisþyngd basalhrauna og basaltinnskota. Þessar aðstæður kalla á frekari samburð á efnasamsetningu undirflokka basalts. Tafla 6 bendir til að berggerðirnar móbergsbreksía, túff og set séu mun misleitnari bergflokkar en aðrir undirflokkar basalts.

Efnisþyngd basalhrauna og basaltinnskota í töflu 5 er í góðu samræmi við niðurstöður borholumælinga í IRDP holu á Reyðarfirði (Jónsson og Stefánsson, 1982). Í IRDP holunni var meðalefnisþyngd hraunlaga $3,02 \text{ g/cm}^3$, en meðalfrávik $0,18 \text{ g/cm}^3$. Fyrir basaltinnskot var meðalefnisþyngd $3,04 \text{ g/cm}^3$ og meðalfrávik $0,16 \text{ g/cm}^3$.

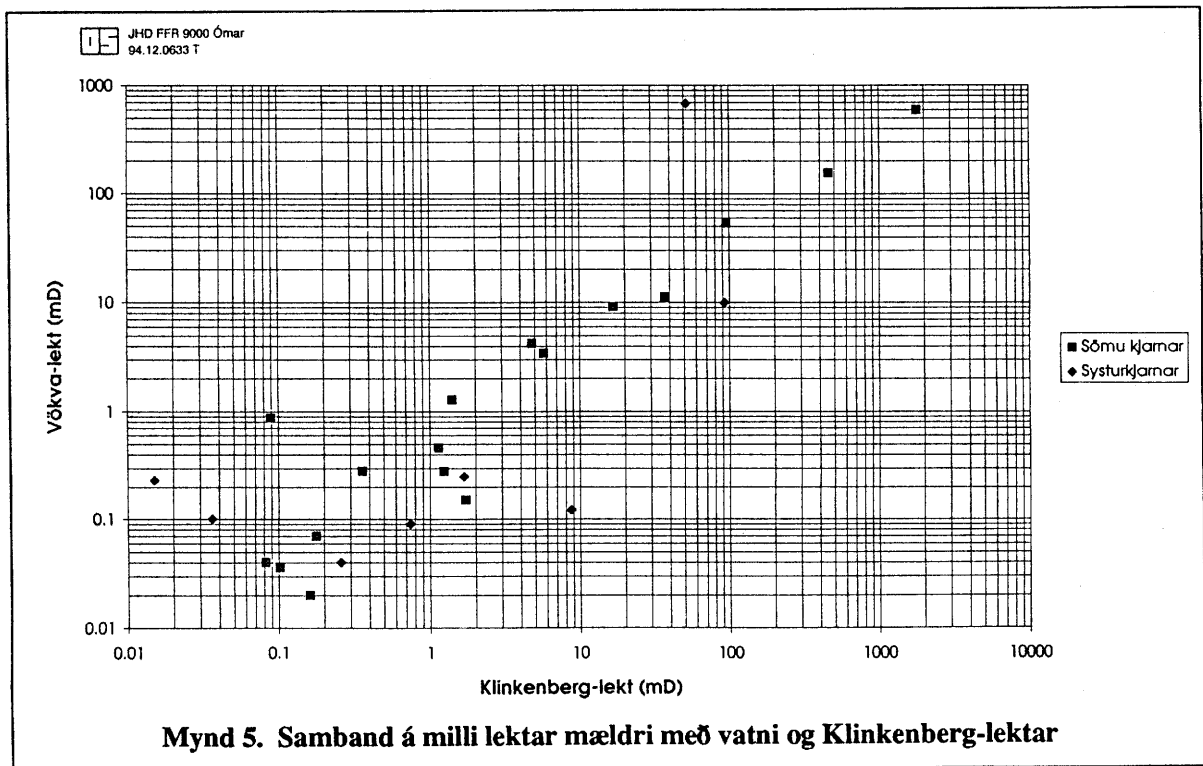
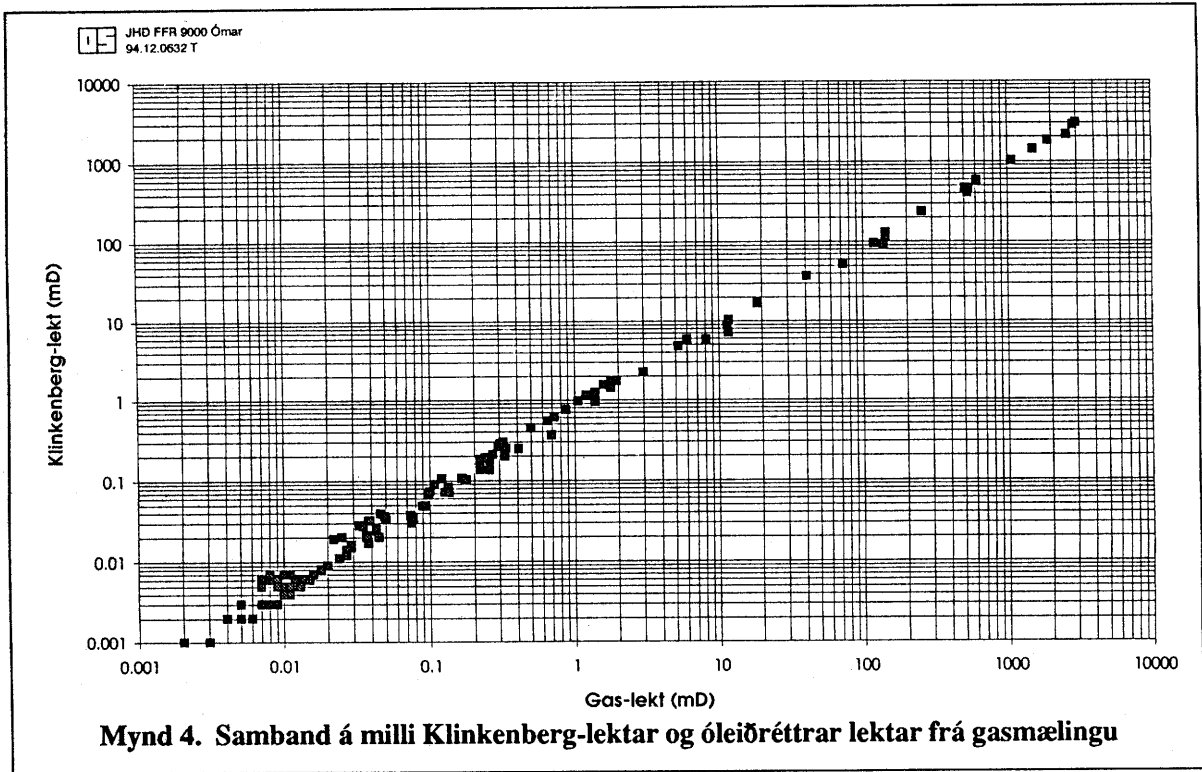
4.3 Lekt

Við venjulega mælingu á lekt er þröskuldur á næmni tækjanna sem notuð voru til mælinganna. Þannig geta tækin ekki ákvarðað lekt sýna sem er minni en $0,001 \text{ mD}$ (milli-Darcy = $9,87 \times 10^{-16} \text{ m}^2$) þegar gas er notað við mælinguna, og ekki lekt sem er minni en $0,01 \text{ mD}$ þegar vökvi er notaður. Af þeim 226 kjarnasýnum sem hafa verið send til mælinga voru 92 sýni með minni lekt en $0,001 \text{ mD}$.

Mynd 4 sýnir sambandið milli lektar mældri með gasi, annars vegar óleiðréttri og hins vegar leiðréttri samkvæmt jöfnu Klinkenbergs sem áður er getið. Af myndinni sést að fyrir lekt hærri en 1 mD er leiðréttingin lítil sem engin, en fyrir lægri lekt eykst leiðréttingin með minnkandi lekt. Það stafar af því að Klinkenberg-stuðullinn er ekki fasti heldur háður rennislíðunum um sýnið.

Eins og áður er getið ætti leiðrétt lekt mæld með gasi, þar sem tekið hefur verið tillit til sameindastærðar og hreyfiorku gassins, að samsvara lekt mældri með vökva. Jarðhitakerfi eru fyllt vatni og við nýtingu þeirra er orkan flutt úr kerfinu með vatninu sem tekið er úr því. Þekking á lekt bergsins og möguleika þess til að flytja vökva er því áhugaverð. Mælingar á lekt með vökva eru hins vegar mun tímafrekari og dýrari en samsvarandi mæling með gasi auk þess sem aðrir þættir koma þar inn. Leiðrétt gas lektarmæling hefði þannig ýmsa kosti ef samsvörun hennar við mælingu á lekt með vökva væri einhlít. Mynd 5 sýnir lekt mældra með vökva á móti leiðréttri lekt frá gasmælingu. Tiltölulega fá sýni hafa verið sett í vökva lektarmælingu og aðeins 28 þeirra verið með lekt hærri en $0,01 \text{ mD}$. Fyrir nokkur sýni var lektin mæld á svo kölluðum systurkjörnum, en þá hefur kjarnasýninu verið skipt í tvennt og lektin mæld með vökva á öðrum bútunum og með gasi á hinum. Þessi sýni eru aðgreind á mynd 5. Af mynd 5 sést að nokkur dreifing er í lekt ákvarðaðri með þessum tveim aðferðum og almennt er dreifingin meiri fyrir systurkjarnana. Kjarnarnir sem hafa verið sendir til mælinga hafa verið af stærðinni $2,5 \text{ cm}$ í þvermál og $3\text{-}5 \text{ cm}$ að lengd. Sú dreifing sem kemur fram á

myndinni getur því bent til mikillar misleitni í berggerð sýnanna. Ef það er raunin getur orðið erfitt að finna gott samband milli mæliaðferða og að yfirfæra mælda lekt kjarnasýna yfir á meðallekt viðkomandi jarðlags. Fyrstu niðurstöður virðast benda til sambands milli þessara aðferða þó ekki sé það einhlítt.



Meðaltal Klinkenberg-lektar breytist um margar stærðargráður á milli berggerða, en tafla 7 sýnir meðaltal og meðalfrávik Klinkenberg-lektar fyrir fjórar berggerðir. Þannig er lekt móbergs tveim stærðargráðum hærrí en lektin fyrir basalhraun. Lekt innskota er stærðargráðu lægri en lekt hrauna, en meðaltal lektar súrs bergs er tveim stærðargráðum lægri en lekt hrauna. Mjög óvíst er hins vegar hvort breytingar í lekt í töflu 7 eru tengdar mismunandi berggerð eða ummyndun bergsins. Ferskt berg virðist yfirleitt vera með hærri lekt en ummyndað berg. Tiltölulega mörg móbergssýni eru fersk, en sýni sem flokkast sem innskot og súrt berg eru flest mikið ummynduð.

Tafla 7. Klinkenberg-lekt

	Klinkenberg-lekt [mD]		
	meðaltal	meðalfrávik	fjöldi sýna
Basalhraun	3,75	14,67	52
Basaltinnskot	0,157	0,263	19
Móberg	367	772	40
Súrt berg	0,028	0,044	20

Fyrirliggjandi gögn leyfa varla að greina á milli þess hvort breyting í lekt tengist sterkar við ummyndunarstig eða við berggerð. Tafla 8 sýnir hvernig meðallekt hraunlaga og túffs breytist með ummyndunarstigi.

Tafla 8. Breytingar í lekt hraunlaga og túffs með ummyndunarstigi

	Meðaltal Klinkenberg-lektar [mD]	
	Basalt hraunlög	Túff
Ferskt	26,97 (5000)	1451
Smektt - zeólítar	1,227	135
Blandlög	0,007	0,338
Klórft	-	0,014
Klórft - epidót	0,788	-
Epidót - amfiból	0,209	-

Gögnin um lektarmælingar spanna sex stærðargráður. Það getur því verið tilviljunum háð hvaða meðalgildi fást fyrir hvern sýnahóp. Tvö fersk hraunlagasýni mældust með svo háa lekt að ekki náðist góð Klinkenberg leiðrétting fyrir þau sýni. Ef miðað er við óleiðréttu gas-lekt fyrir þessi sýni og þau gildi tekin með í viðkomandi meðaltal hækkar meðallekt ferskra hraunlaga úr 27 mD í 5000 mD.

Þó varlegt sé að draga víðtækar ályktanir út frá fyrirliggjandi lektargildum, virðast meðaltölin í töflum 7 og 8 leyfa eftirfarandi niðurstöðu:

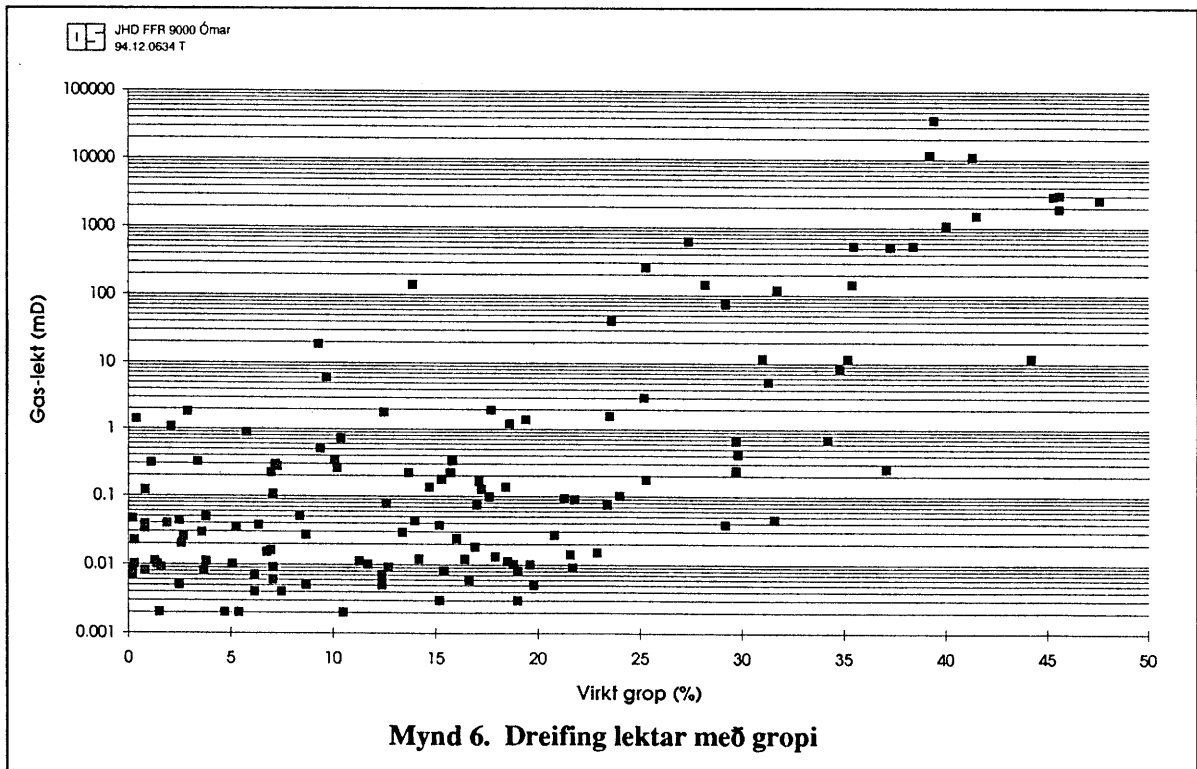
- Berggerðarflokkurinn móberg, þ.e. bólstraberg, móbergsbreksía, túff og set, virðist hafa hærri lekt en aðrar berggerðir.
- Ummyndað berg hefur lægri lekt en ferskt berg.

4.4 Samband lektar og grops

Alla síðustu öld hafa verið gerðar ýmsar rannsóknir á bergsýnum og reynt að finna sambönd milli mismunandi eðlisþátta bergsins. Líklega hafa athuganirnar mest beinst að samböndum milli grops, lektar og rafleiðni-eiginleika bergsins. Í fjölda greina og bóka hefur verið fjallað um reynslusambönd milli þessara eðlisþátta, þó nær eingöngu fyrir setberg og þá oftast tengt vinnslu olfu. Íslensk jarðhitakerfi eru hins vegar í gosbergi, en miklu færri rannsóknir á þessum þáttum hafa verið gerðar fyrir þannig berg.

Mynd 6 sýnir hvernig óleiðrétt lekt frá gasmælingu dreifist miðað við virkt grop. Fljótt á lítið virðist ekki vera mikið samband þarna á milli, þó merkja megi að lekt aukist með vaxandi gropi. Eins og áður sagði hefur í fræðigreinum mikið verið fjallað um sambönd milli lektar og grops. Algengt er að samböndin séu byggð kringum einfaldaða mynd af hárfpnum (capillary tubes) og hárfpukröftum, þar sem hárfpnum er ætlað að líkja eftir holrýminu og rennislíðiðunum um bergið. Þessi sambönd benda almennt til að lektin sé í beinu hlutfalli við gropið. Ef við lítum á sambönd sem hafa verið vinsælust í fræðigreinum má fyrst nefna samband sem kennt er við Kozeny og var sett fram 1927 (Pirson, 1958). Það má skrifa þannig:

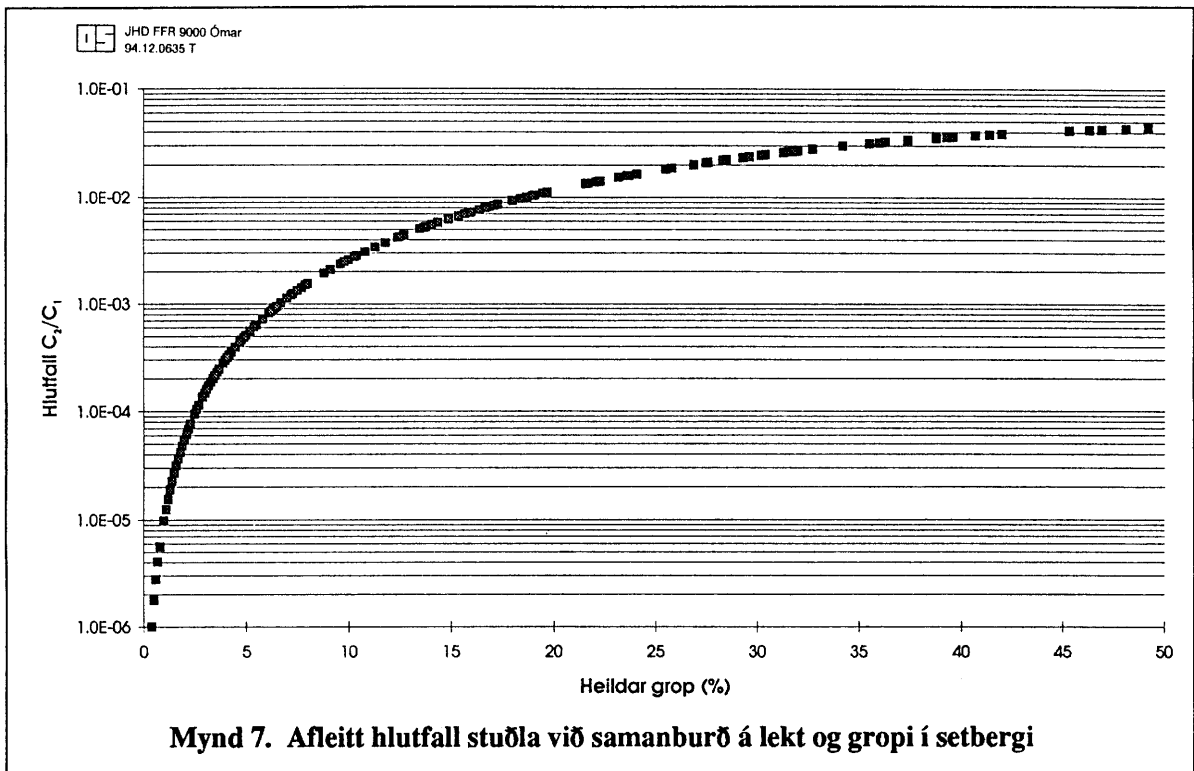
$$k = \frac{D_p^2}{C_1} \times \frac{\phi^3}{(1 - \phi)^2}$$



Annað nýlegra samband kennt við Rumpf og Gupte var sett fram 1971 (Dullien, 1992) og má skrifa það þannig:

$$k = \frac{D_p^2}{C_2} \times \phi^{5.5}$$

Hér er D_p meðalþvermál korna miðað við yfirborðsflatarmál þeirra og C eru fastar. Þessi sambönd reikna með að hægt sé að lýsa rennsli um efnið sem falli af rennslisviðnámi og Reynolds-tölu, sem með samsvörun við lögmál Darcys gefur ofangreindar líkingar fyrir lekt þegar Reynolds-talan er minni en 1. Mörg fleiri sambönd af svipuðum toga hafa verið sett fram og öll stefna að því að finna hentugt fall fyrir grop og viðeigandi fasta til að lýsa mældum gildum. Bent hefur verið á að samkvæmt athugunum Rumpf og Gupte muni ekki vera hægt að finna eitt ákveðið samband milli grops og lektar, þar sem gildið á fastanum C sé háð stærðardreifingu korna, gerð grop-fallsins auk þess sem fastinn og grop-fallið séu háð lögun korna og þökkun auk fleiri þátta. Mynd 7 sýnir hlutfallið milli fastanna í ofangreindum líkingum. Myndin sýnir vel hegðun grop-fallanna og að fastarnir eru í reynd langt frá því að vera fastar, þó þeir geti nálgast stöðugt gildi fyrir grop hærra en 30%, en mörg þannig sambanda hafa verið prófuð á sviðinu þar fyrir ofan. Annað er að fyrir fast og samlímt berg liggur ekki fyrir hvernig ákvarða skuli meðalþvermál korna í því. Þar vantar því einn þáttinn enn. Hægt er að ákvarða meðalþvermál korna á ýmsa vegu fyrir ósamlímt efni og eru til reynslusambönd sem tengja saman lekt, þvermál korna og þökkun þeirra. Séu þau notuð til að skoða ofangreindar líkingar betur kemur í ljós að þeim fer ekki að bera vel saman fyrr en við grop hærra en 38%. Þetta er mun hærra grop en almennt gerist í þeim vökvakerfum sem við höfum áhuga á þó nokkur kjarnasýnana mælist með grop á þessu bili.



Aðrar líkingar tengja lekt og grop saman með því að líkja holrýminu í berginu við hárpur. Ein þannig líking er kennd við Carman og Kozeny og má skrifa þannig;

$$k = \frac{1}{k_0(L_e/L)^2 S_0^2} \times \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2}$$

þar sem $(L_e/L)^2$ mætti kalla rangalastuðul (tortuosity factor) en L_e er meðallengd rennislisleiðar og k_0 er stuðull háður lögun hennar (shape factor). Svo er S_0 yfirborðsflatarmál korna í einingarrúmmáli bergs.

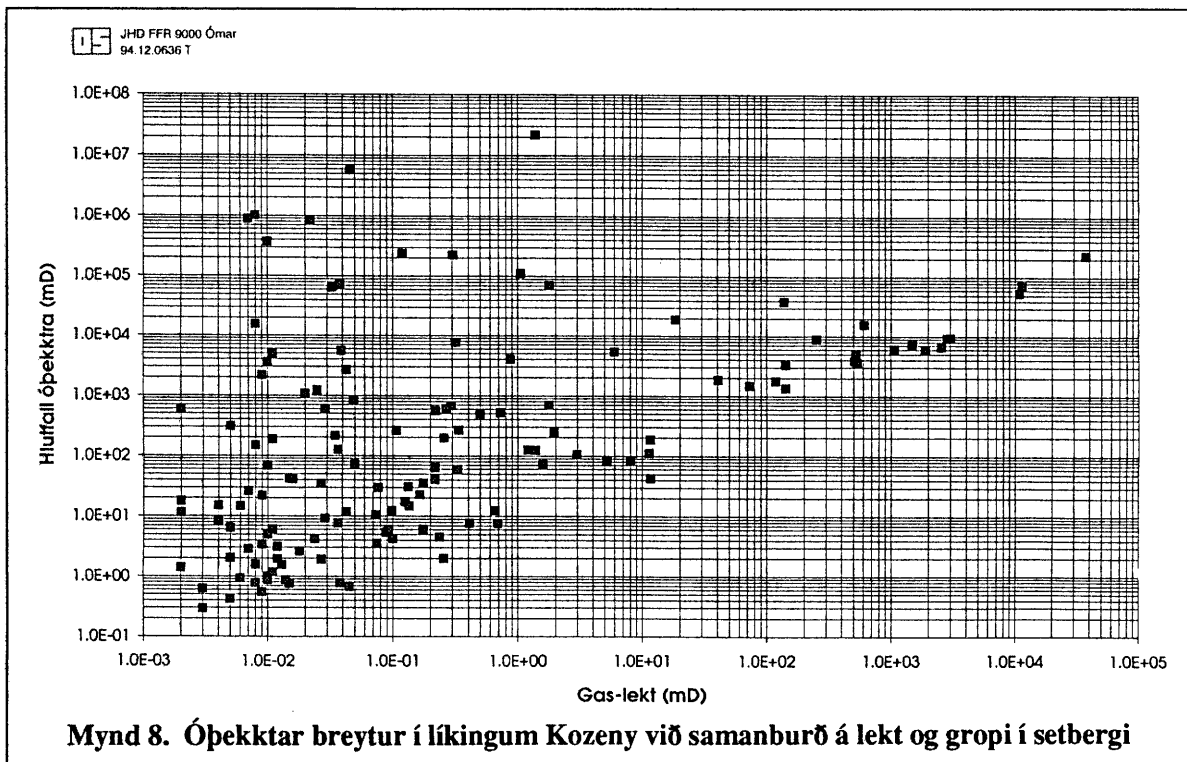
Almennt líta líkingar fyrir lekt sem byggja á hárfpulkönum þannig út;

$$k = \frac{D^2}{32(L_e/L)^2} \times \phi$$

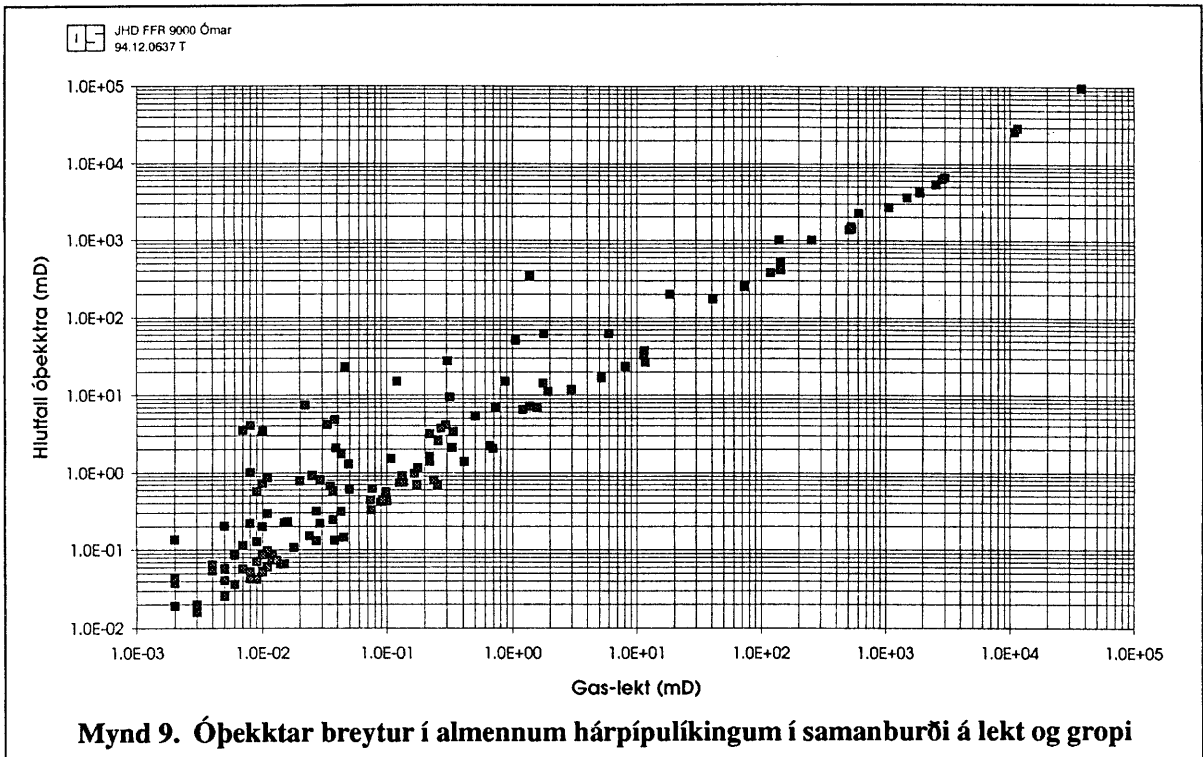
þar sem D er meðalþvermál hárfpa (gropa). Fyrir margar gerðir af sandsteini hefur fengist þokkaleg samsvörun milli reiknaðrar og mældrar lektar með $(L_e/L)^2 = 1,725$ og D ákvarðað út frá mælingum á smásjármynd. Samskonar reynslusamband milli lektar og grops fékkst fyrir sandstein með hliðsjón af mælingum á hárfpukröftum og lítur þannig út (Dullien, 1992);

$$k = \frac{(D_b/3,5)^2}{32} \times \phi \times 10^3 \quad (\text{mD})$$

þar sem D_b er kallað gegnumstreymisþvermál (breakthrough diameter) og fengið frá mælingum á hárfpukröftum.

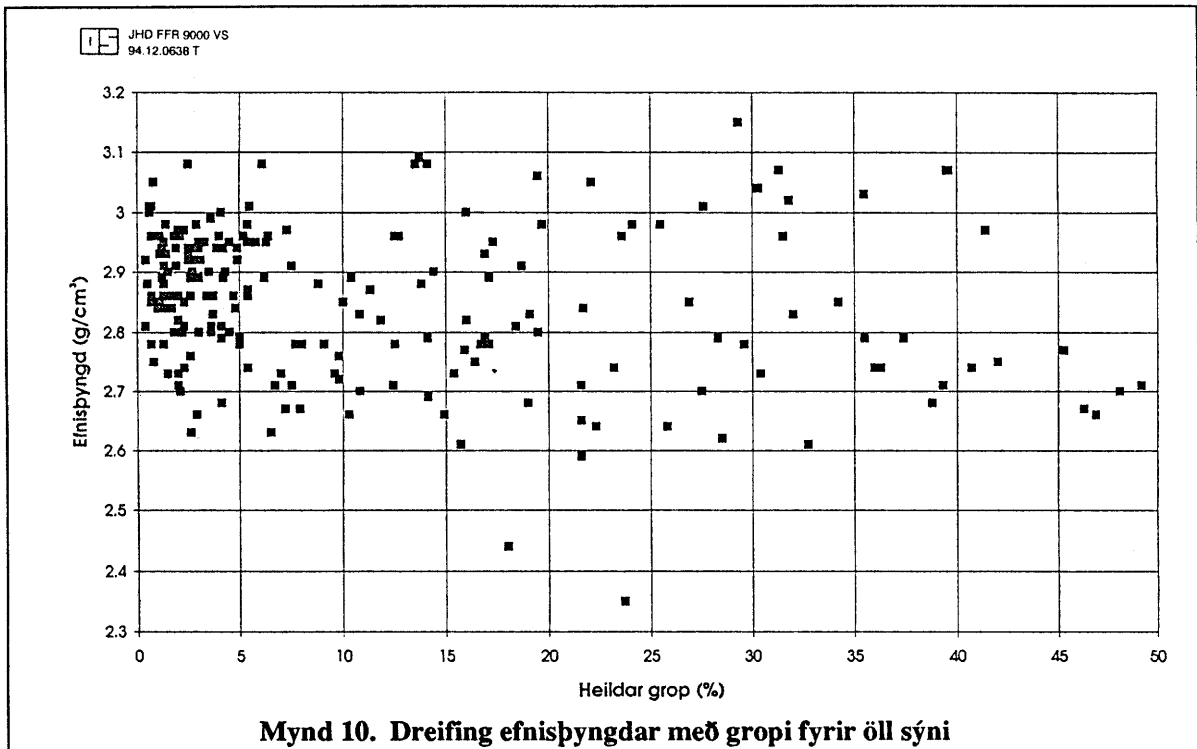


Ljóst er af ofangreindum líkingum fyrir reynslusambönd milli lektar og grops að minnst eina breytu vantar í fyrirliggjandi gögn svo hægt sé að nota þau til áætlunar á lekt. Sú breyta sem hægt væri að nálgast með mælingum á kjörnunum er þvermál gropa. Án þess að hafa hugmynd um það verður erfitt að minnka dreifinguna sem kemur fram á mynd af lekt á móti gropi. Á myndum 8 og 9 hefur gropfallinu í nokkrum fyrrnefndum líkingum verið deilt í lektina frá gasmælingunum, en það samsvarar því að óþekktu breytunnar væru þekktar og lektin hefði verið reiknuð. Myndirnar benda til að mögulega meigi finna samband milli lektar og grops og virðist þar sérstaklega áhugaverðar líkingar almennra hárpípulkana.

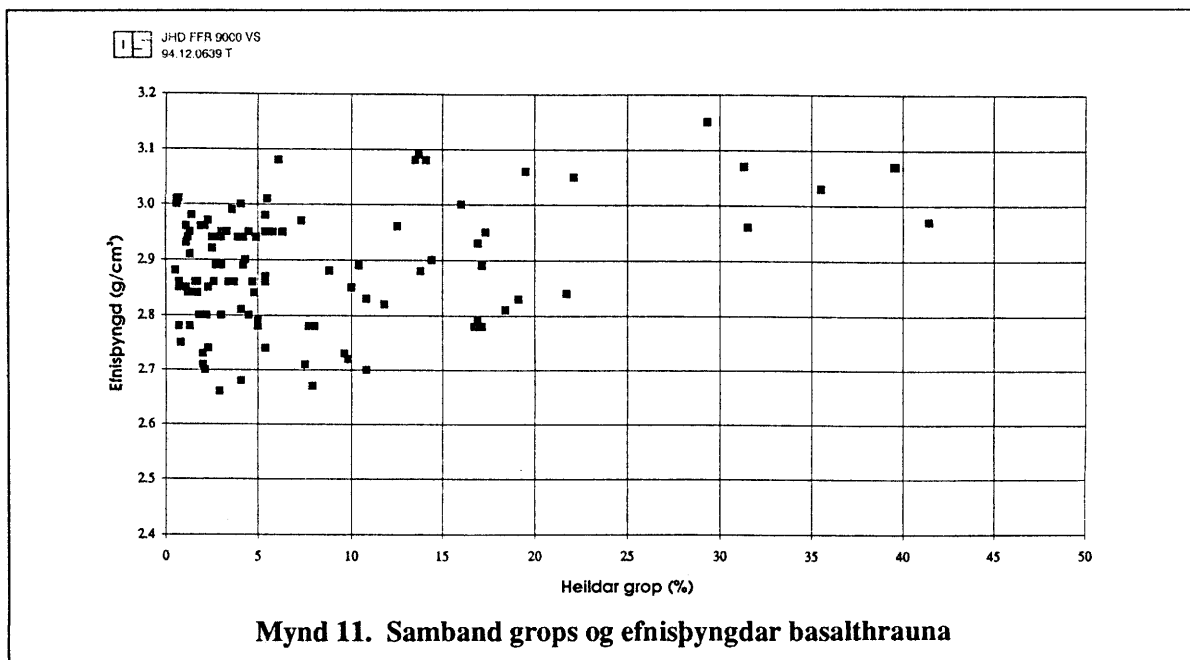


4.5 Samband efnisþyngdar og grops

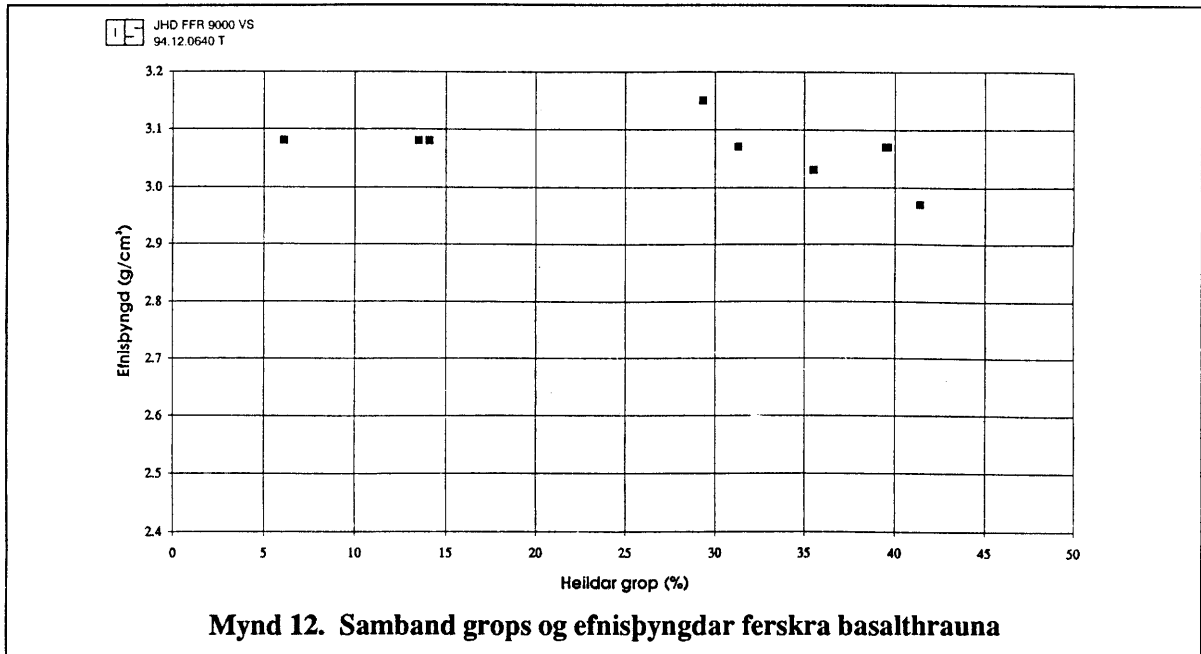
Mynd 10 sýnir hvernig raun-efnisþyngd (eðlisþyngd) bergsins dreifist með heildar gropi. Samkvæmt myndinni virðist ekkert samband vera milli efnisþyngdar bergsins og grops þess. Þannig er dreifing milli þungra og léttara bergtegunda nokkuð jöfn yfir allt grop-sviðið. Ef eingöngu er litið á sýni með lága lekt (<0,01 mD) fæst að algengast er að grop þeirra sýna sé minna en 6% og efnisþyngdin er á bilinu 2,7-3,0 g/cm³. Þetta er þó ekki algilt því nokkur láglektar sýni hafa allt að 35% grop.



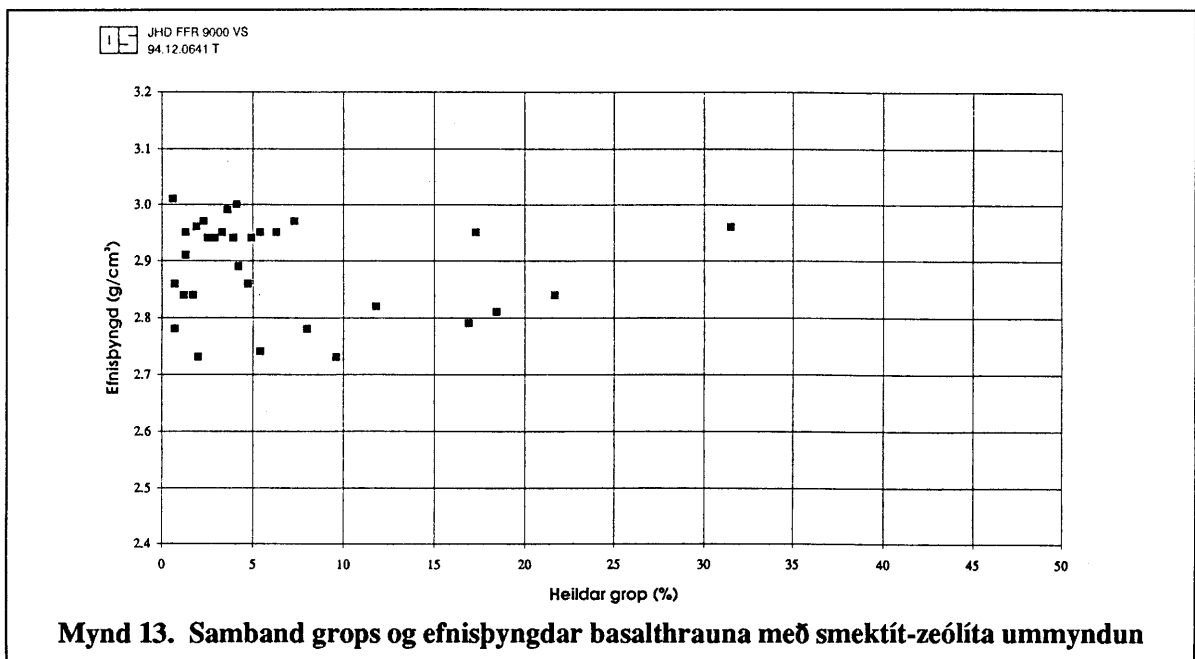
Mynd 11 sýnir samband á milli grops og efnisþyngdar fyrir basalhraun. Að meðaltali er efnisþyngd sýnanna 2,9 g/cm³, eins og fram kemur í töflu 5. Það er athyglisvert að fyrir hátt grop er efnisþyngdin um og yfir 3,0 g/cm³, en lágu eðlisþyngdargildin tengjast einkum sýnum með lágt grop. Meðalgrop basalhrauna er 8% eins og kemur fram í töflu 3.



Hér vaknar spurning hvort ummyndun hefur áhrif á efnisþyngd basalþrauna. Til þess að athuga það mál nánar voru þrjú ummyndunarstig skoðuð nánar. Fyrsti ummyndunarflokkurinn eru fersk sýni, annar hópurinn eru sýni á fyrsta ummyndunarstigi (smektít-zeólítar) og þriðji hópurinn eru sýni á mjög háu ummyndunarstigi (klórít-epidót og epidót-amfiból). Mynd 12 sýnir samband á milli grops og efnisþyngdar fyrir ferska basalþraun. Þó fjöldi sýna sé aðeins 9 í þessu úrtaki kemur greinilega fram að efnisþyngd þessara sýna er um eða yfir 3 g/cm^3 , og breytist ekki með gropi bergsins.

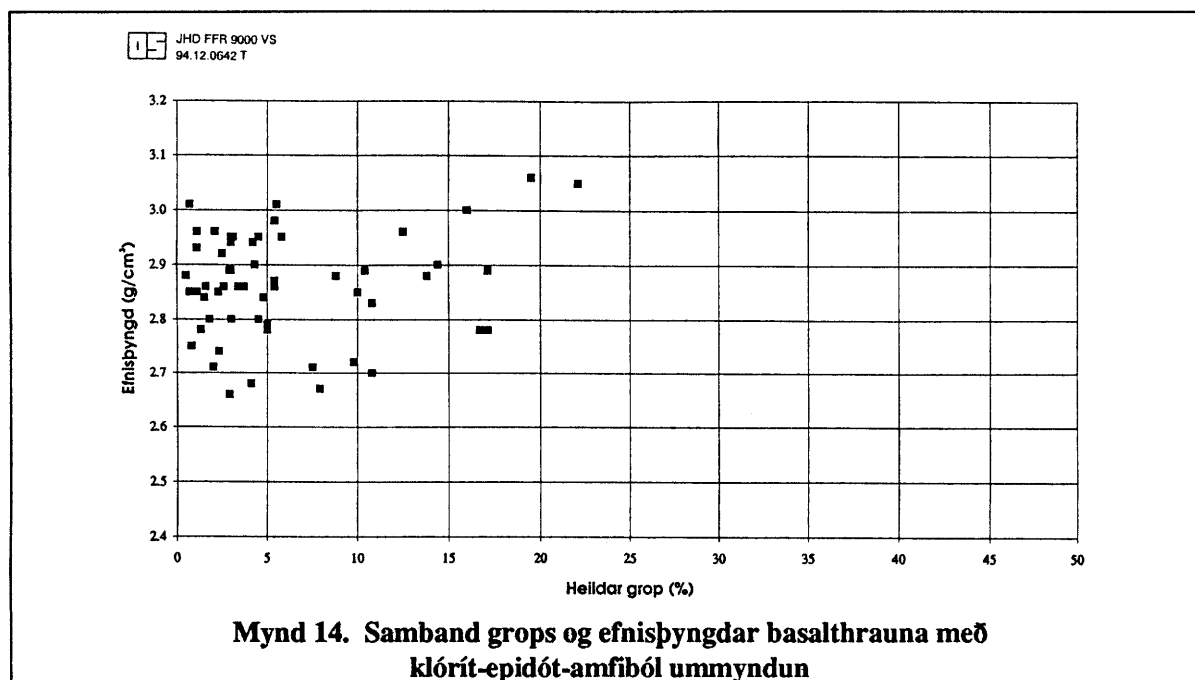


Mynd 13 sýnir sambandið á milli grops og efnisþyngdar fyrir basalþraun með smektít-zeólíta ummyndun. Í þessu tilviki er efnisþyngdin áberandi lægri en fyrir ferska bergið og tiltölulega mörg sýni eru með grop lægra en 10%.



Á mynd 14 er svo sambandið á milli grops og efnisþyngdar fyrir basalþraun á háu ummyndunarstigi. Myndir 13 og 14 eru nokkuð svipaðar, a.m.k. í samanburði við mynd 12. Báðar myndirnar sýna að

bæði efnisþyngd og grop eru lægri fyrir ummynduðu sýnin heldur en samsvarandi gildi fyrir ferskt berg. Áhrifin koma sterkar fram fyrir hátt ummyndunarstig en fyrir fyrsta ummyndunarstigið. Hins vegar virðist breytingin frá fersku bergi yfir í smektít-zeólíta ummyndun tiltölulega meiri en breytingin frá smektít-zeólítum yfir í klórít-epidót-amfiból ummyndun.



Munurinn sem fram kemur á myndum 12, 13 og 14 kemur einnig fram í meðalgildum fyrir sýni með mismunandi ummyndunarstig eins og kemur fram í töflu 9. Hins vegar er dreifingin í mæligildum það mikil að ekki er hægt að tala um marktækan mun frá tölfræðilegu sjónarmiði.

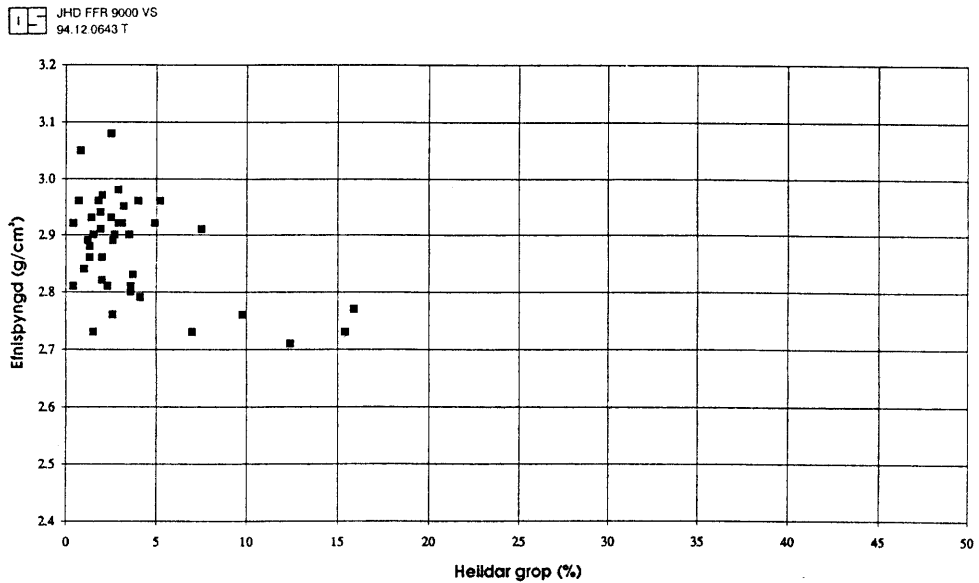
Ekki er hægt með góðu móti að vinna gögnin nánar á þessu stigi málsins, en reynt verður að fá skýrari mynd af þessum hlutum þegar meiri gögn liggja fyrir. Fjöldi sýna fyrir aðrar berggerðir en basaltraun leyfa ekki tölfræðilega meðhöndlun á sama hátt og hér er gert fyrir basaltraun.

Tafla 9. Grop og efnisþyngd basaltrauna með mismunandi ummyndun

	Grop [%]			Efnisþyngd [g/cm ³]		
	meðaltal	meðal-frávik	n	meðaltal	meðal-frávik	n
Basaltraun, öll sýni	8,09	9,15	108	2,89	0,11	108
Fersk basaltraun	27,81	13,22	9	3,07	0,05	9
Basaltraun með smektít-zeólíta ummyndun	6,69	7,31	31	2,89	0,08	31
Basaltraun með klórít-epidót-amfiból ummyndun	6,13	5,44	56	2,86	0,10	56

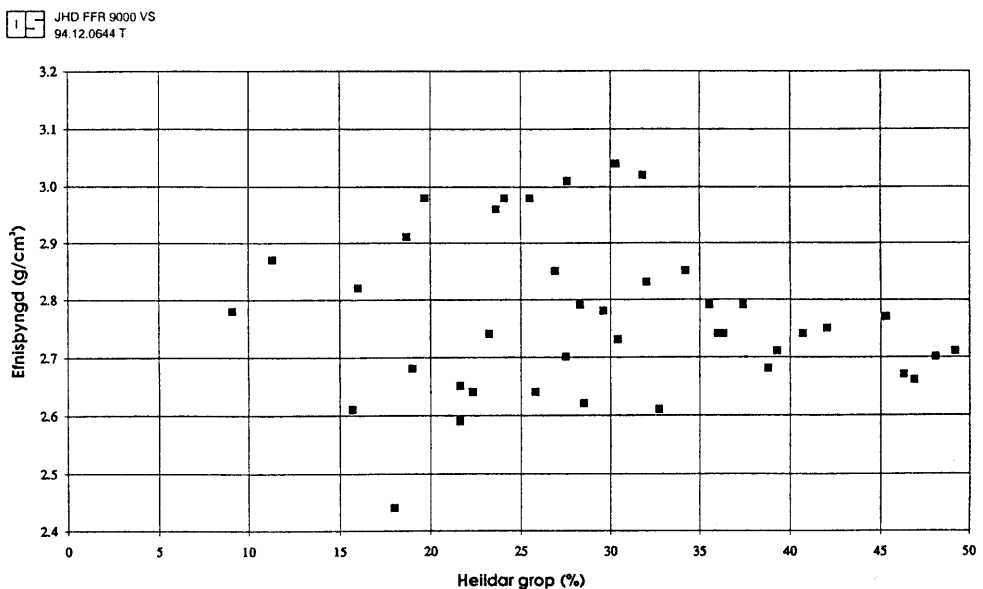
Á myndum 15 til 17 er sýnt samband grops og efnisþyngdar fyrir aðrar aðalberggerðir, þ.e. basaltinnskot, móberg og súrt berg. Mynd 15 sýnir þetta samband fyrir basaltinnskot. Öll þessi 41 sýni eru ummynduð að meira eða minna leiti, eða með öðrum orðum að á mynd 15 eru engin gildi fyrir fersk innkot. Með hliðsjón af þeim breytingum sem sjást á milli mynda 12 og 13 má ætla að

ummyndun hafi svipuð áhrif á gangaberg eins og á hraun. Í töflu 5 kemur fram að meðalefnisþyngd innskota er sú sama og meðalefnisþyngd hraunlaga. Í framhaldi þessarar athugana er þörf á mælingum á ferskum gangabergssýnum til þess að bera saman áhrif ummyndunar í gangabergi við samsvarandi áhrif í hraunlögum.



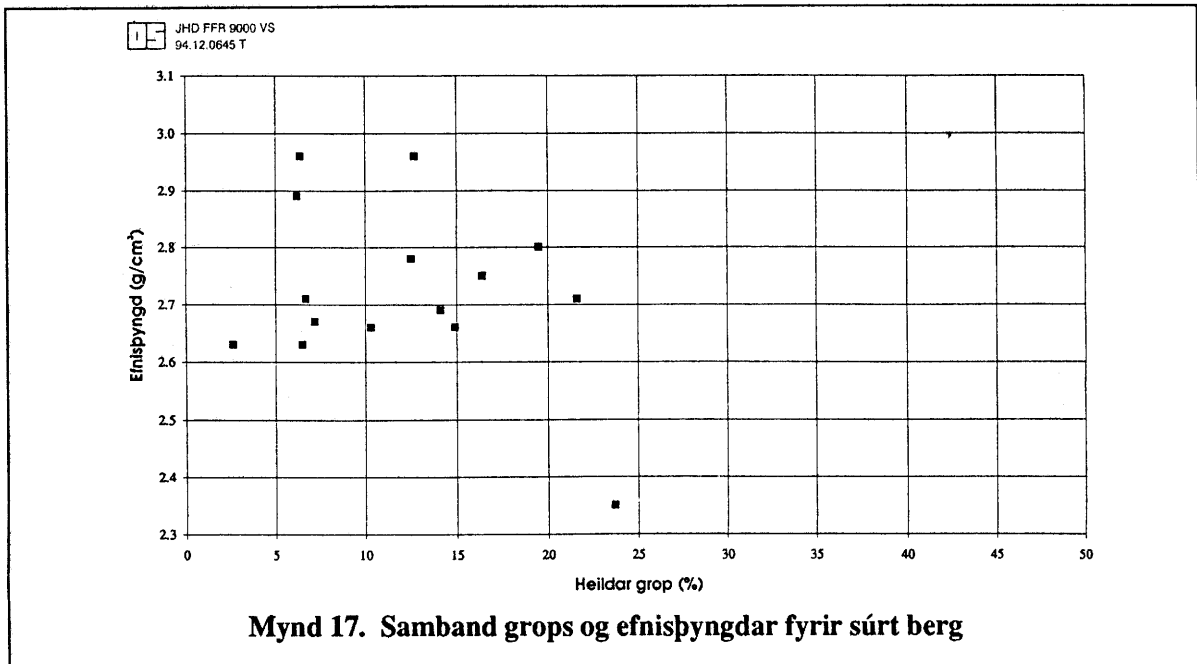
Mynd 15. Samband grops og efnisþyngdar basaltinnskota

Mynd 16 sýnir samband grops og efnisþyngdar fyrir móberg. Í þessu tilviki er það bólstrabergið sem er með hæsta efnisþyngd eins og kemur fram í töflu 6. Að vísu eru öll bólstrabergssýnin á mynd 16 einnig fersk, þannig að ekki er hægt að greina á milli áhrifa vegna berggerðar og áhrifa vegna ummyndunar. Það þýðir líka að munurinn á efnisþyngd sem fram kemur í töflu 6 er að hluta til vegna mismunandi ummyndunarstigs sýna í mismunandi berggerðarflokkum.



Mynd 16. Samband grops og efnisþyngdar fyrir móberg

Að síðustu er svo mynd 17, sem sýnir samband grops og efnisþyngdar fyrir súrt berg. Öll þessi 15 sýni eru að meira eða minna leiti ummynduð. Gögnin um súrt berg eru enn sem komið er of takmörkuð til þess að hægt sé að draga ályktanir um áhrif ummyndunar á efnisþyngd.



Ætla má að um 95% af íslensku bergi sé basalt, en aðeins um 5% sé súrt og ísúrt. Miðað við þá skiptingu ætti verkþátturinn *Forðafræðistuðlar* að beina athyglinni einkum að basalti. Það hefur einnig verið gert að vissu marki. Fjöldi mælinga á basaltsýnum er 204 en fjöldi mælinga á öðrum bergtegundum er 22. Hins vegar virðast súr jarðlög oft skipta miklu máli við vinnslu jarðhita, og í þessari skýrslu kemur fram að grop í móbergi og súru bergi er marktækt hærri en í öðrum berggerðum. Það er því talið eðlilegt að fjöldi sýna af súru bergi sé hlutfallslega nokkru hærri en almenn rúmmálshlutföll milli basalts og súrs bergs.

5. UMRÆÐA

5.1 Munur á lekt mældri með gasi og lekt mældri með vatni

Svo sem kemur fram á mynd 5 er allmikil dreifing á mæligildum þegar Klinkenberg-lekt er borin saman við lekt mælda með vatni. Sérstaklega á þetta við um þau sýni þar sem lekt er mæld með gasi á öðrum hluta sýnisins, en með vatni á hinum hluta þess (systurkjarni). Í flestum tilvikum eru lektargildin frá gas mælingunni hærri en lektargildin þar sem vatn er notað við mælingarnar. Nú er lekt efniseiginleiki, þannig að það á ekki að skipta máli hvaða vökvi eða gastegund er notuð við mælingarnar. Mælingarnar eiga að gefa að Klinkenberg-lekt sé sama og lekt mæld með vatni, innan skekkjumarka mæliaðferðar.

Ef mælingar eru gerðar á systurkjörnum kemur misleitni bergsins inn sem skekkjuvaldur, sem virkar trúlega í báðar áttir, þannig að dreifing mæligilda verður meiri en ella. Ef þessum mæliniðurstöðum er sleppt ætti dreifing mæligilda að vera minni og því auðveldara að sjá hvort mælingar gefa sama gildi á lekt hvort sem notað er vatn eða gas við mælingarnar.

Core Laboratories gefa ekki upp skekkjumörk í lektarmælingum sínum, þannig að fyrirfram er ekki vitað hvort dreifing mæligilda á mynd 5 er vegna tilviljunarkenndra skekkja í mælingum eða af öðrum ástæðum. Sú aðferð sem notuð er hér til þess að athuga mæliniðurstöður nánar er að mynda hlutfallið Klinkenberg-lekt á móti lekt mældri með vatni fyrir hvert sýni. Þetta hlutfall ætti að dreifast samhverft um gildið einn, ef það gildir að Klinkenberg-lekt gefi sama lektargildi, innan skekkjumarka, og lekt mæld með varni. Þessi samanburður er sýndur í töflu 10.

Að meðaltali reynast Klinkenberg lektargildin vera tæplega þrisvar sinnum hærri en lektargildi mæld með vatni. Það sem skiptir þó mestu máli er það að meðalfrávik gildanna er af mjög svipaðri stærð, eða að gildið einn er ekki innan marka meðalfráviksins. Tölfræðilega séð er því fyrir hendi kerfisbundinn munur á lektarmælingum gerðum með gasi (bæði með og án Klinkenberg leiðréttingar).

Tafla 10. Hlutfall Klinkenberg- og gas-lektar á móti lekt mældri með vatni

	meðaltal	meðalfrávik	fjöldi sýna
Hlutfallið á milli Klinkenberg lektargildis og lektargildis mældu með vatni	2,90	2,87	17
Hlutfallið á milli lektargildis mældu með gasi og lektargildis mældu með vatni	3,80	3,44	18

Þar sem systursýni eru ekki tekin með í töflu 10 er ekki vitað hvað veldur þessum mun á niðurstöðum mælinga. Til þess að fá fram hvort þessi munur tengist rannsóknarstofunni eða mæliaðferðum, sem notaðar eru, verða sömu sýnin send til mismunandi rannsóknastofa til mælinga. Ætlunin er að senda sýni, sem hafa verið mæld hjá Core Laboratories til DGU í Danmörku og síðan til Terra Tec í USA.

Benda má á að dæmi eru um að í þéttu bergi eins og kalksteini gefi mælingar á lekt í kjarnasýnum lágmarkslekt bergsins, en meðallekt bergsins geti verið tveim til þrem stærðargráðum meiri. Ástæðan er að í þannig bergi er mest lekt í afmörkuðum sprungum og samtengdum stórum holrúmum, en þetta kemur sjaldnast fram í smá-kjarnasýnum.

Fyrir berg sem inniheldur leirsteindir getur vatn, sem notað er til mælinga á lekt bergs, verið virkt með tilliti til umbreytanleika leirsteindanna. Þannig getur upptaka vatns í leirsteindirnar valdið því að þær bólgnu og breyta þá lögun holrýma í berginu. Þetta getur haft áhrif til minnkunar á ákvarðaðri lekt og valdið því að verulegur munur er milli lektar mældri með gasi og vatni. Reynt er að koma í veg fyrir að þetta gerist með því að nota saltvatn við mælingar á vökva-lekt, en ef styrkur saltupplausnarinnar er ekki nægur geta leirsteindirnar tekið til sín vatn.

Oft er reynt að líkja eftir vökva í viðkomandi kerfi þegar vökva-lekt er mæld til að finna samband milli lektar mældri með vökva og gasi. Sambönd milli gas-lektar og vökva-lektar þannig ákvörðuð sýna oft töluverðan mismun milli lektargilda ákvarðað með þessum tveim mæliaðferðum.

5.2 Munur á setbergi og kristölluðu bergi

Miklar athuganir og tilraunir hafa verið gerðar á setbergi í tilraunastofum, en tiltölulega fáar mælingar hafa verið gerðar á kristölluðu bergi. Sú skoðun hefur verið nokkuð almenn að ekki mætti yfirfæra lögmál og reynslusambönd sem fundist hafa fyrir setberg yfir á kristallað berg. Eftir því sem mælingum og athugunum fjölga á kristölluðu bergi virðist þróunin vera sú að það sé fleira sameiginlegt með þessum berggerðum en það sem skilur þær að. Í þessari skýrslu kemur til dæmis fram að meginhluti grops í íslensku bergi er virkt grop, þ.e. að holrýmið í berginu er samtengt. Einnig kemur hér fram að meðalgrop móbergs og súrs bergs skiptir tugum prósentu. Þessi einkenni á súru bergi og móbergi gera þessar berggerðir að mörgu leyti mjög svipaðar því setbergi sem olfa er unnin úr

og mikil þekking er á. Basalt hraun og innskot hafa vissulega lægra grop en móberg og súrt berg. Hins vegar liggur það ekki beinlínis fyrir að samband á milli eðlisþátta þeirra sé annað en það samband sem gildir fyrir móberg og súrt berg.

Það sem virðist gera forðafraðilega eiginleika íslensks bergs frábrugðna því sem birt hefur verið um forðafraðilega eiginleika setbergs er ummyndun íslenska bergsins. Í þessari skýrslu er bent á nokkur atriði þar sem ummyndunin hefur áhrif á eðliseiginleika bergsins. Lektin í ummynduðu bergi virðist vera lægri en lekt í fersku bergi. Grop virðist vera lægra í ummynduðu bergi en í fersku bergi. Efnisþyngd virðist vera lægri fyrir ummyndað berg en fyrir ferskt berg. Fyrirliggjandi gögn leyfa ekki nánari lýsingu á þessum áhrifum, en frekari gagnasöfnun og úrvinnsla mun beinast að því að greiða úr þessum atriðum.

5.3 Skekkjumörk mælinga og misleitni bergs

Þar sem lítið er vitað um skekkjumörk í mælingum Core Laboratories, var rannsóknarstofan látin mæla allar stærðir nema heildar grop og raun efnisþyngd á 9 systurkjörnum, þ.e. sama kjarna skipt í tvo hluta og mælingar gerðar á báðum hlutum. Ef bergið er mjög einsleitt er munurinn á mæligildum mælikvarði á skekkjumörk mæliaðferðar. Ef bergið er hins vegar mjög misleitt getur munurinn á mæligildum verið frekar mælikvarði á misleitni bergsins frekar en á nákvæmni mæliaðferðar. Tafla 11 sýnir niðurstöður þessara mælinga.

Tafla 11. Mælingar á systurkjörnum

Sýni	$\langle \phi_e \rangle$ [%]	$\frac{\Delta \phi}{\langle \phi_e \rangle}$	$\langle \rho_e \rangle$ g/cm ³	$\frac{\Delta \rho}{\langle \rho_e \rangle}$	$\langle k_o \rangle$ [mD]	$\frac{\Delta k_o}{\langle k_o \rangle}$	$\langle k_K \rangle$ [mD]	$\frac{\Delta k_K}{\langle k_K \rangle}$
H-88	19,4	0,041	2,235	0,013	0,0065	0,46	0,0025	0,4
H-97	1,35	0,222	2,86	0,0	-	-	-	-
H-130	13,95	0,179	2,61	0,0	0,023	1,217	0,0115	1,478
H-131	4,0	0,1	2,915	0,003	-	-	-	-
E-3	0,3	0,0	2,875	0,003	-	-	-	-
E-13	6,1	0,852	2,92	0,034	-	-	-	-
E-28	9,9	0,101	2,935	0,003	0,6115	0,371	0,5245	0,303
S-22	19,35	0,15	2,91	0,0	0,020	0,7	0,0085	0,823
S-33	7,1	0,0	3,04	0,0	0,0075	0,4	0,0035	0,857
meðaltal		0,183		0,006		0,62		0,77

Hlutfallslegur munur á mæligildum systurkjarna er mjög mismunandi eftir því hvaða stærð er verið að mæla. Minnstur er munurinn á ákvörðun á efnisþyngd, en þar er hlutfallsmunurinn að meðaltali 0,6%. Þetta þýðir að bergið er einsleitt með tilliti til efnisþyngdar og að skekkjumörk í ákvörðun á efnisþyngd eru lítil. Mestur er munurinn á mæligildum systurkjarna fyrir lektarmælingarnar. Þar er hlutfallsmunurinn að meðaltali 77%. Þennan mun má skýra með víðum skekkjumörkum í mæliaðferð og/eða með því að bergið sé mjög misleitt með tilliti til lektar. Á milli þessara jaðarvika er ákvörðun á gropi, en þar reynist hlutfallsmunurinn vera að meðaltali 18%. Hér gildir það sama og fyrir lektarmælingar að ekki er vitað að hve miklu leiti munurinn á mæligildum systurkjarna stafar af víðum skekkjumörkum og að hve miklu leyti af misleitni bergsins.

Niðurstöður í töflu 11 benda til að misleitni bergs geti verið mismunandi eftir því hvaða eðliseiginleika bergsins er miðað við. Frá forðafræðilegu sjónarmiði gæti það þýtt að nota þyrfti mismunandi misleitnidreifingu fyrir mismunandi forðafræðistuðla í einu og sama berginu. Við þetta bætist svo að uppi eru kenningar um að lekt sé ekki bara efniseiginleiki, heldur sé lekt einnig háð þeim lengdarskala sem mæling er gerð á (sjá t.d. Clauser, 1992). Áformað er að athuga misleitni bergs nánar í náinni framtíð. Koma þar til athuganir á því hvernig stærð sýnis hefur áhrif á mæld gildi forðafræðistuðla eins og nánar er vikið að í kafla 7.

6. HELSTU NIÐURSTÖÐUR

Í þessari áfangaskýrslu eru birtar niðurstöður mælinga á 226 bergsýnum. Mældar stærðir eru: virkt grop, heildar grop, reiknuð efnisþyngd, raun-efnisþyngd, óleiðrétt lekt mæld með gasi, Klinkenberg-leiðrétt lekt mæld með gasi og lekt mæld með vatni. Sýnum til mælinga var safnað skipulega úr rofnum megineldstöðvum, þannig að sýnin spanni helstu berggerðir og helstu ummyndunarstig íslensks bergs. Samræmdur greiningalykill var notaður við sýnatöku. Í þessum greiningarlykli eru 24 berggerðarflokkar og 6 stig ummyndunar.

Alls hefur verið safnað um 500 sýnum úr rofnum megineldstöðvum, en mælingar hafa einungis verið gerðar á um helming sýnanna. Þess vegna eru fyrirliggjandi niðurstöður flokkaðar sem bráðabirgðarniðurstöður. Einnig er í þessari skýrslu einungis stuðst við greiningu bergs sem gerð var á sýnatökustað, en nánari greining á hverju sýni verður gerð með þunnsneiðagreiningu, efnagreiningu og röntgengreiningu. Helstu bráðabirgðarniðurstöður eru þessar:

- Komið hefur fram kerfisbundinn munur á lektargildum mældum með vatni og lektargildum mældum með gasi. Á meðan unnið er að því að leita skýringa á þessu misræmi verður gert hlé á mælingum á lekt.
- Mjög lítt munur er á virku gropi og heildar gropi í íslensku bergi.
- Móberg og súrt berg hafa hátt grop, að meðaltali 30 og 12%, en basalthraun og basaltinnkot hafa að meðaltali 8 og 3% grop.
- Að meðaltali eru basalthraun og basaltinnkot með hærri efnisþyngd en móberg og súrt berg.
- Ummyndað berg hefur lægri efnisþyngd en ferskt berg.
- Ummyndað berg hefur lægra grop en ferskt berg.
- Ummyndað berg hefur lægri lekt en ferskt berg.
- Móberg hefur að meðaltali hærri lekt en aðrar berggerðir.
- Hlutfallslegur munur á mæligildum á systurkjörnum er að meðaltali 0,6% fyrir efnisþyngdarmælingar, 18% fyrir ákvörðun á gropi og 77% fyrir ákvörðun á lekt.
- Munur á mæligildum systurkjarna getur þýtt að mismunandi misleitnidreifing í bergi gildi fyrir mismunandi forðafræðistuðla.

7. FRAMHALD VERKEFNIS

Áætlað er að halda áfram úrvinnslu þeirra gagna, sem nú liggja fyrir og ljúka við mælingar á fyrirliggjandi bergsýnum þegar gengið hefur verið úr skugga um af hverju misræmi hefur komið fram í lektarmælingum. Í þeim tilgangi verður athugað með að mæla lekt með olfu í stað saltvatns til að kanna hvort saltvatnið sé virkt gagnvart leirsteindum í berginu. Reynt verður að mæla þvermál gropa í þunnsneiðum af sýnum sem hafa haft lekt yfir 0,001 mD. Meðalþvermál gropa í sýni verður reiknað og kannað hvort það hjálpi til að finna samband milli lektar og grops. Úrvinnslu efnagreininga verður fram haldið, og verða efnagreiningar auknar ef þurfa þykir. Nánari greining á berggerðum sýna og

ummyndun verður gerð með röntgen- og þunnsneiðagreiningu.

Annað skref í frekari úrvinnslu gagna er að tengja mælingar á bergsýnum við borholumælingar. Verður þar fyrst um að ræða að bera saman mælingar á gropi í borkjörnum og ákvörðun á gropi út frá nifteindadreifingu í bergi. Mismunandi niðurstöður koma fram með þessum tveim mæliaðferðum vegna þess að mælingarnar taka yfir misstórt rúmmál. Við mælingar á borkjörnum er stærð sýnis um 1 cm^3 , en það rúmmál sem er næmt fyrir mælingum með nifteindum er um 1 m^3 . Næsta skref í stærðarskala fyrir mælingar á gropi eru hljóðhraðamælingar, sem ná yfir nokkra tugi eða hundruð metra. Tilraunir á því sviði eru hafnar undir sérstökum verkþætti (verk 720-108 VSP-forðafræðistuðlar) í raforkuverkefninu (Rannsókn jarðhita til raforkuvinnslu). Til þess að styrkja betur ákvörðun á gropi í borholumælingum er reiknað með því að kaupa borholumælitæki sem mælir hljóðhraða í borholuveggjum (sonic log). Með tilkomu slíks tækis fengist önnur óháð mæling á gropi í borholum, þar sem stærð sýnis er svipað og í nifteindamælingum (1 m^3). Slíkar aðstæður mundu auka verulega áreiðanleika borholumælinga auk þess sem tenging við VSP hljóðhraðamælingar yrði mun auðveldari.

Samhliða því sem úrvinnsla mælinga á bergsýnum verður fram haldið verður gerð sérstök athugun á áreiðanleika nifteindamælinga og samanburður gerður við þær mælingar á gropi borkjarna, sem þegar liggja fyrir. Búast má við að endurtaka verði margar borholumælingar til þess að fá sem nákvæmastar ákvarðanir á gropi. Einnig verður athugaður sérstaklega möguleiki á því að fá aðgang að gömlum kjarnaholum til borholumælinga og aðgang að kjarna úr þeim til mælinga á rannsóknastofu. Ef ekki reynist auðvelt að safna gögnum á þennan hátt verður athugað með möguleika á því að fá aðrar rannsóknarboranir (t.d. hitastigulsboranir) boraðar sem kjarnaholur. Kjarnataka í háhitaholum er sérstakur verkþáttur innan raforkuverkefnis (verk 720-106).

8. HEIMILDIR

- Clauser, Ch., 1992 : Permeability of crystalline rocks. EOS, Vol. 73, No. 21, May 26.
- Core Laboratories, 1993-4: Core analysis reports I, II and III. Core Laboratories, Advanced Technology Centre, Aberdeen, UK.
- F. A. L. Dullien, 1992: Porous Media. Fluid transport and pore structure. Academic Press, Inc. Sec. Ed., 574 s.
- J.W. Amyx, D.M. Bass jr., og R.L. Whiting, 1960: Petroleum reservoir engineering. Physical properties. McGraw - Hill Book Company, Inc. 610 s.
- Jónsson, G. og Stefánsson, V., 1982: Density and porosity logging in the IRDP hole, Iceland. Journ. Geophys. Res., Vol. 87 (B8): 6619-6630.
- S.J. Pirson, 1958: Oil reservoir engineering. McGraw - Hill Book Company, Inc. Sec. Ed., 735 s.

VIÐAUKI

Tafla um mæliniðurstöður

Sýni númer	Gas lekt (mD)	Klinken- berg lekt (mD)	Vatns lekt (mD)	Virkt grop (%)	Heildar grop (%)	Reiknuð efnis- þyngd (g/cm ³)	Raun efnis- þyngd (g/cm ³)	Athugasemdir
EP-3i				0,3		2,87		
EP-3ii				0,3		2,88		
EP-13i	0,005	0,003		8,7		2,97		
EP-13ii				3,5		2,87		
EP-28i	0,725	0,604		10,4		2,93		Vatns-lekt < 0,01
EP-28ii	0,498	0,445		9,4		2,94		Vatns-lekt < 0,01
G-1	0,004	0,002		6,2	6,7	2,70	2,71	
G-2	0,107	0,089	0,869	7,1	7,9	2,65	2,67	Sprungu opnaðist í lektarmælingu
G-3				0,6	3,7	2,77	2,86	Gas-lekt < 0,001
G-4				3,9	4,2	2,93	2,94	
G-5	1,38	0,942		19,4	19,5	3,05	3,06	
G-6				0,5	5,5	2,86	3,01	
G-7				3,1	5,4	2,92	2,98	
G-8	0,165	0,106		17,1	17,1	2,77	2,78	
G-9				4,3	4,5	2,94	2,95	
G-10				2,0	2,3	2,73	2,74	
G-11	0,133	0,082	0,04	14,7	14,9	2,66	2,66	
G-12	0,011	0,004		18,5	18,7	2,90	2,91	Vatns-lekt < 0,01
G-13	0,69	0,361	0,28	34,2	34,2	2,85	2,85	
G-14	0,075	0,03		23,4	23,7	2,34	2,35	
G-15				0,3	2,1	2,91	2,96	
G-16	0,089	0,048		21,8	22,1	3,04	3,05	
G-17				0,2	1,1	2,90	2,93	
G-18				0,2	1,3	2,75	2,78	
G-19				9,4	10,0	2,83	2,85	
G-20	0,01	0,005		5,1	5,4	2,85	2,86	
G-21				0,4	2,3	2,80	2,85	
G-22	0,176	0,102	0,036	15,3	16,0	2,97	3,00	
G-24				18,6	21,6	2,56	2,65	Kjarni skemmdist
G-25	0,009	0,006		21,7	22,3	2,62	2,64	Vatns-lekt < 0,01
G-26	0,01	0,004		18,8	19,1	2,82	2,83	
G-27	0,029	0,015	0,23	3,6	7,7	2,66	2,78	Systurkjarni
G-28	0,006	0,002		16,6	16,9	2,78	2,79	
G-29				0,4	1,2	2,82	2,84	
G-30				0,2	0,7	2,76	2,78	
G-31	0,008	0,006		0,2	2,0	2,68	2,73	
G-32				1,3	1,7	2,85	2,86	
G-33				2,6	2,7	2,88	2,89	
G-34	0,008	0,007	0,001	3,7	4,1	2,80	2,81	
G-35				0,1	1,2	2,90	2,94	
G-36	0,002	0,001		5,4	13,7	2,82	3,09	
G-37	0,018	0,008		16,9	16,9	2,93	2,93	
G-38				0,6	1,4	2,95	2,98	
G-39	0,016	0,007		7,0	7,2	2,67	2,67	
G-40				0,3	0,8	3,03	3,05	
G-41	0,318	0,298		3,4	4,0	2,94	2,96	
G-42				0,9	1,3	2,84	2,86	
G-43				2,1	2,9	2,96	2,98	

Sýni númer	Gas lekt (mD)	Klinken- berg lekt (mD)	Vatns lekt (mD)	Virkt grop (%)	Heildar grop (%)	Reiknuð efnis- þyngd (g/cm ³)	Raun efnis- þyngd (g/cm ³)	Athugasemdir
G-44				1,4	1,9	2,93	2,94	
G-45				0,2	1,4	2,90	2,93	
G-46				0,2	1,2	2,87	2,89	
G-47	0,12	0,105		0,8	2,7	2,85	2,90	
G-48				1,8	2,0	2,96	2,97	
G-49	0,303	0,285		1,1	3,2	2,88	2,95	
G-50				0,2	1,5	2,86	2,90	
G-51	0,015	0,006		6,8	7,0	2,71	2,73	
G-52	1,06	0,961		2,1	2,5	2,92	2,93	
G-53	0,007	0,005		6,2	6,4	2,95	2,96	
G-54				0,4	5,2	2,82	2,96	
G-55	0,008	0,003		0,8	1,5	2,71	2,73	
G-56	0,01	0,004		1,4	2,3	2,79	2,81	
G-57				2,5	3,6	2,78	2,81	
G-58				8,9	9,1	2,77	2,78	
G-59				0,1	0,4	2,91	2,92	
G-60				0,2	2,0	2,77	2,82	
G-61				1,0	3,6	2,73	2,80	
G-62				1,0	3,7	2,75	2,83	
G-63				1,7	2,6	2,61	2,63	
G-64				0,3	4,9	2,79	2,92	
G-65				0,1	0,4	2,79	2,81	Kjarni skemmdist
G-66				0,8	2,0	2,68	2,71	
G-67				0,2	0,7	2,84	2,85	
G-68				0,5	1,5	2,81	2,84	
G-69				0,2	0,5	2,88	2,88	
H-1	0,029	0,016		13,4	13,8	2,87	2,88	
H-2				2,6	3,5	2,87	2,90	
H-3	0,012	0,006		14,2	14,4	2,90	2,90	
H-4	0,025	0,02		2,7	2,9	2,92	2,92	
H-5	0,328	0,199		15,8	16,7	2,75	2,78	
H-6	0,011	0,004		1,3	1,9	2,89	2,91	
H-7	0,336	0,249		10,1	10,8	2,70	2,70	
H-8	0,02	0,009		2,6	3,1	2,90	2,92	
H-9				2,9	4,3	2,86	2,90	
H-10	0,22	0,136		7,0	7,5	2,70	2,71	
H-11				0,1	1,1	2,92	2,96	
H-13	1,38	1,24	0,278	0,4	0,7	3,00	3,01	
H-14				2,2	2,5	3,07	3,08	Vatns-lekt < 0,01
H-15	0,009	0,003		1,6	1,8	2,95	2,96	
H-16				0,5	0,7	2,96	2,96	
H-17				0,6	3,0	2,88	2,95	Sprungu opnaðist
H-18				0,7	3,0	2,87	2,94	
H-19				3,4	4,5	2,77	2,80	
H-20	0,007	0,006		0,2	5,4	2,72	2,87	
H-21				4,6	5,0	2,77	2,78	Sprungu opnaðist
H-22	1,79	1,68	0,25	2,9	3,0	2,89	2,89	Systurkjarni
H-23	0,074	0,037		17,0	17,1	2,89	2,89	

Sýni númer	Gas lekt (mD)	Klinken- berg lekt (mD)	Vatns lekt (mD)	Virkt grop (%)	Heildar grop (%)	Reiknuð efnis- þyngd (g/cm ³)	Raun efnis- þyngd (g/cm ³)	Athugasemdir
H-24	0,033	0,028		0,8	3,1	2,88	2,95	
H-25	0,05	0,033		8,4	8,8	2,87	2,88	
H-26	0,022	0,019		0,3	2,6	2,79	2,86	
H-27	0,003	0,001		19,0	19,5	2,78	2,80	Vatns-lekt < 0,01
H-28				9,3	10,4	2,86	2,89	
H-29				3,5	5,8	2,88	2,95	
H-31				0,1	2,0	2,81	2,86	
H-33				0,2	0,8	2,73	2,75	
H-34				0,2	1,1	2,82	2,85	
H-35				0,1	1,3	2,85	2,88	
H-36				0,1	1,0	2,82	2,84	
H-37				0,5	3,4	2,78	2,86	
H-38	0,269	0,207		7,3	7,5	2,90	2,91	
H-39				0,8	2,6	2,84	2,89	Kjarni skemmdist
H-40				2,2	2,9	2,87	2,89	
H-41	0,002	0,001		4,7	4,8	2,84	2,84	
H-42				4,0	5,0	2,76	2,79	
H-43				2,6	3,0	2,79	2,80	
H-44	0,046	0,039		0,2	1,8	2,76	2,80	
H-45	6,0	5,81		9,7	9,8	2,72	2,72	
H-46				2,2	4,1	2,63	2,68	
H-47				0,9	2,9	2,60	2,66	Kjarni skemmdist
H-48	0,002	0,001		10,5	10,8	2,82	2,83	
H-49				0,9	2,5	2,88	2,92	
H-50				1,0	1,6	2,84	2,86	
H-51	0,257	0,178	0,07	10,2	10,3	2,66	2,66	
H-52	0,01	0,004		0,3	4,1	2,69	2,79	
H-53	0,005	0,002		12,4	12,5	2,95	2,96	
H-54				2,4	6,2	2,78	2,89	Kjarni skemmdist
H-55	0,077	0,034		12,6	12,7	2,96	2,96	Vatns-lekt < 0,01
H-56	0,043	0,024		14,0	14,1	2,69	2,69	Vatns-lekt < 0,01
H-57	0,037	0,021		6,4	6,5	2,63	2,63	Vatns-lekt < 0,01
H-58	0,038	0,032		0,8	1,9	2,93	2,96	
H-59	5,2	4,81	4,238	31,3	31,5	2,95	2,96	Skemmdist við hreinsun
H-60	0,011	0,007		3,8	4,2	2,88	2,89	
H-61				0,1	1,3	2,92	2,95	
H-62	0,002	0,001		1,5	2,9	2,90	2,94	
H-63				0,3	0,7	2,85	2,86	
H-64				0,1	1,7	2,80	2,84	
H-65	0,219	0,161	0,02	13,7	14,1	2,77	2,79	
H-66	1,94	1,72	0,15	17,7	18,0	2,43	2,44	
H-67				22,2	27,5	2,51	2,70	Kjarni skemmdist
H-68				5,9	6,3	2,94	2,95	
H-69				4,8	5,4	2,72	2,74	Kjarni skemmdist
H-70	18,5	16,7	9,075	9,3	9,6	2,72	2,73	
H-71	0,049	0,036	0,1	3,8	4,1	2,99	3,00	Systurkjarni
H-72				3,3	3,9	2,92	2,94	

Sýni númer	Gas lekt (mD)	Klinken- berg lekt (mD)	Vatns lekt (mD)	Virkt grop (%)	Heildar grop (%)	Reiknuð efnis- þyngd (g/cm ³)	Raun efnis- þyngd (g/cm ³)	Athugasemdir
H-73	0,039	0,032		1,9	3,6	2,94	2,99	
H-74				2,4	2,5	2,94	2,94	
H-75				1,1	1,3	2,90	2,91	
H-76				1,3	2,3	2,94	2,97	
H-77	0,005	0,003		2,5	3,3	2,93	2,95	
H-78	0,035	0,027		5,3	5,4	2,94	2,95	
H-79	0,293	0,26	0,04	7,2	7,3	2,96	2,97	Systurkjarni
H-80				4,6	4,9	2,93	2,94	
H-88i	0,005	0,002		19,8		2,25		
H-88ii	0,008	0,003		19,0		2,22		
H-97i				1,5		2,86		
H-97ii				1,2		2,86		
H-130i	0,009	0,003		12,7		2,61		
H-130ii	0,037	0,02		15,2		2,61		Vatns-lekt < 0,01
H-131i				3,8		2,91		
H-131ii				4,2		2,92		
HG-1	1,2	1,14	0,46	18,6	21,6	2,49	2,59	
HG-2				0,0	0,6	2,96	3,01	
HG-3	0,255	0,134		37,1	37,4	2,78	2,79	
HG-4				1,3	2,2	2,78	2,80	
HG-5	0,655	0,543		29,7	30,4	2,70	2,73	
HG-6	0,027	0,014		8,7	9,8	2,73	2,76	
HG-7	0,003	0,001		15,2	15,4	2,72	2,73	Vatns-lekt < 0,01
HG-8	0,015	0,006		22,9	23,2	2,73	2,74	
HG-9				6,5	12,4	2,53	2,71	
HG-10				1,7	2,1	2,69	2,70	
HG-11	528,	405,		35,5	36,0	2,72	2,74	
HG-12	510,	461,		37,3	39,3	2,62	2,71	
HG-13	143,	115,		35,4	36,3	2,70	2,74	
HG-14				0,1	0,6	2,98	3,00	
HG-15	0,008	0,003		15,4	15,9	2,75	2,77	
HG-16	0,038	0,017		29,2	29,6	2,76	2,78	Vatns-lekt < 0,01
HG-17				0,2	2,6	2,69	2,76	
HG-18	0,045	0,02		31,6	32,0	2,82	2,83	Vatns-lekt < 0,01
KH-1	8,09	5,78	3,43	34,8	35,5	2,76	2,79	
KH-2	0,004	0,002		7,5	8,0	2,76	2,78	
KH-3	0,174	0,102		25,3	26,9	2,78	2,85	
KH-4	0,007	0,003		12,4	12,5	2,78	2,78	
KH-5	0,012	0,005		16,4	16,4	2,75	2,75	Vatns-lekt < 0,01
KH-6	0,093	0,049		21,3	21,6	2,70	2,71	
KH-7	0,219	0,181		15,7	15,7	2,61	2,61	
KH-8	0,024	0,011		16,0	16,0	2,82	2,82	
KH-9	0,126	0,071		17,2	17,3	2,95	2,95	
KH-10	0,014	0,006		21,6	21,7	2,86	2,84	Vatns-lekt < 0,01
KH-11				31,9	32,7	2,24	2,61	Kjarni skemmdist
KH-12	0,043	0,025		2,5	4,7	2,80	2,86	
KH-13	0,011	0,005		11,3	11,3	2,87	2,87	
KH-14	0,098	0,067		17,6	18,4	2,78	2,81	

Sýni númer	Gas lekt (mD)	Klinken- berg lekt (mD)	Vatns lekt (mD)	Virkt grop (%)	Heildar grop (%)	Reiknuð efnis- þyngd (g/cm ³)	Raun efnis- þyngd (g/cm ³)	Athugasemdir
KH-15	0,01	0,007		11,7	11,8	2,82	2,82	
KH-16	0,135	0,071		18,4	19,0	2,66	2,68	
R-1	0,871	0,746	0,09	5,8	6,1	3,07	3,08	Systurkjarni
R-2	1,77	1,41	1,273	12,5	13,5	3,05	3,08	
R-3	72,9	52,1	685,	29,2	29,3	3,14	3,15	Systurkjarni
R-4	10887,		305,	41,3	41,4	2,96	2,97	Systurkjarni
R-5	11455,			39,2	39,5	3,06	3,07	
R-6	11,4	8,72	0,12	35,2	35,5	3,02	3,03	Systurkjarni
R-7								Kjarni ónýtur
R-8	254,	237,		25,3	28,5	2,56	2,62	
R-9	40,8	36,9	11,17	23,6	25,8	2,56	2,64	
R-10	1894,	1791,	594,19	45,6	48,1	2,58	2,70	
R-11	139,	92,3	9,97	13,9	14,1	3,07	3,08	Systurkjarni
R-12	11,6	7,08		31,0	31,3	3,06	3,07	
R-13	3000,	3000,		45,6	46,3	2,63	2,67	Gas-lekt > 3000,
R-14	2564,	2121,		47,6	49,2	2,63	2,71	
R-15	536,	457,	154,67	38,4	38,8	2,66	2,68	
R-16	2853,	2804,		45,3	46,9	2,59	2,66	
R-17	37567,		4918,	39,4	39,6	3,06	3,07	
R-18	611,	578,		27,4	27,6	3,01	3,01	
R-19	11,7	10,4		44,2	45,3	2,71	2,77	
R-20	1,58	1,54		23,5	23,6	2,96	2,96	
R-21	2,98	2,22		25,2	25,5	2,97	2,98	
R-22	119,	95,3	53,51	31,7	31,8	3,02	3,02	
R-23	0,409	0,246		29,8	30,3	3,02	3,04	
R-24	0,237	0,19		29,7	30,2	3,02	3,04	
R-25	0,1	0,073		24,0	24,1	2,98	2,98	
R-26	1066,	1024,		40,0	40,7	2,70	2,74	
R-27	1496,	1409,		41,5	42,0	2,73	2,75	
R-28	143,	128,		28,2	28,3	2,79	2,79	
R-29	0,01	0,004		19,6	19,7	2,98	2,98	Vatns-lekt < 0,01
S-22i	0,013	0,005		17,9		2,91		
S-22ii	0,027	0,012		20,8		2,91		Vatns-lekt < 0,01
S-33i	0,006	0,002		7,1		3,04		
S-33ii	0,009	0,005		7,1		3,04		