



ORKUSTOFNUN

RANNSÓKNASVIÐ – Reykjavík, Akureyri

Forðafraeðistuðlar

Eðliseiginleikar bergsýna

**Staða mælinga og úrvinnslu þeirra
árið 2000**

Ómar Sigurðsson

Unnið fyrir Auðlindadeild Orkustofnunar

2001

OS-2001/026

ORKUSTOFNUN

Rannsóknasvið

Verknr. 8-720105

Ómar Sigurðsson

Forðafraeðistuðlar Eðliseiginleikar bergsýna

Staða mælinga og úrvinnslu þeirra árið 2000

Unnið fyrir Auðlindadeild Orkustofnunar

OS-2001/026

Apríl 2001

Orkustofnun - Rannsóknasvið

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

Akureyri: Háskólinn á Akureyri, Sólborg v. Norðurslóð, 600 Ak.

Sími 463 0957 – Fax 463 0999

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

Skýrsla nr: OS-2001/026	Dags: Apríl 2001	Dreifing: <input checked="" type="checkbox"/> Opin <input type="checkbox"/> Lokuð til
Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill: Forðafræðistuðlar - Eðliseiginleikar bergsýna Staða mælinga og úrvinnsla þeirra árið 2000		Upplag: 30
		Fjöldi síðna: 21
Höfundar: Ómar Sigurðsson		Verkefnisstjóri: Ómar Sigurðsson
Gerð skýrslu / Verkstig:		Verknúmer: 8-720105
Unnið fyrir: Auðlindadeild Orkustofnunar		
Samvinnuaðilar:		
Útdráttur: <p>Gerð er grein fyrir stöðu rannsókna á eðliseiginleikum bergsýna í verkþættinum Forðafræðistuðlar í lok árs 2000. Sá þáttur beinist að könnun á innri gerð jarðhitakerfa, einkum forðafræðilegum eiginleikum bergsins með tilliti til ummyndunar og annarra mælanlegra eiginleika. Fyrirliggjandi niðurstöður sýna að lítil munur er á milli virks og heildargrops þannig að nær allt holrými bergsins er opið fyrir gegnumflæði. Hárpípulíkan virðist henta til að lýsa og meta lekt bergsins. Þvermál grophálsa virðist ráðandi um lektina. Kerfisbundinn munur milli mældrar gaslektar og vatnslektar er talinn tengdur mæliaðferðinni og eiginleikum rennslisins á bergsýnið. Ekki er enn fyrir hendi nothæft samband til að áætla lekt gosbergsins út frá öðrum mælingum á bergsýnunum. Ljóst er þó að lekt bergsins sýnir fylgni við rafviðnám þess. Þekking á sýnasafninu nálgast ört sambærilega þekkingu fyrir setberg. Unnið er að mælingum á varmaleiðni og rafviðnámi fyrir afmarkaða hópa sýna í samvinnu við erlenda aðila. Einnig er unnið að samanburði á mælingum á kjarnabút úr borholu við niðurstöður borholumælinga.</p>		
Lykilorð: Forðafræði, sýnataka, bergsýni, eðliseiginleikar, lekt, grop, rennsli		ISBN-númer:
		Undirskrift verkefnisstjóra:
		Yfirfarið af: PI

EFNISYFIRLIT

1. INNGANGUR	5
2. BERGSÝNI	5
3. MÆLINGAR Á BERGSÝNUM	7
4. ELÐRI NIÐURSTÖÐUR MÆLINGA	8
5. NÝRRI ATHUGANIR	13
5.1. Fylgni lektar við aðrar mælingar	14
5.2. Rennsliseiningar	15
5.3. Aðrar athuganir	19
6. NIÐURSTÖÐUR OG FRAMHALD	20
7. HEIMILDIR	22

TÖFLUR

Tafla 1. Skipting bergsýna milli berggerða og ummyndunarstigs	5
Tafla 2. Mælingar gerðar á bergsýnunum	6

MYNDIR

Mynd 1. Helstu sýnatökustaðir bergsýna fyrir Forðafræðistuðalásafnið	6
Mynd 2. Mæld gas- og vatnslekt fyrir 45 sýni ásamt nokkrum kennilínum	8
Mynd 3. Reiknuð vatnslekt allra sýna út frá mældri gaslekt fyrir hlutfallið borin saman (ϕ_E/ϕ_T) = 1 og við melda vatnslekt fyrir öll sýnin	8
Mynd 4. Óþekktar breytur í líkingu Kozeny-Carman fyrir samband lektar og grops 10	
Mynd 5. Óþekktar breytur í hárpípulíkingu fyrir samband lektar og grops	10
Mynd 6. Reiknað þvermál grophálsa samkvæmt hárpípulíkani teiknað móti mældri gaslekt og dreifing þess fyrir einstakar berggerði	11
Mynd 7. Röðuð kjörvörpun mælinga á gropi eins og notuð er með forritinu GRACE og byggir á ACE-reikniriti	13
Mynd 8. RQI (lekt) teiknað á móti ϕ_z (gropi) fyrir sýnasafnið. Sýndar eru	

einingalínur fyrir mögulegar rennsliseiningar	
14	
Mynd 9. Súlurit sem sýnir fjölda eða tíðni tilvika fyrir FZI-vísinn	14
Mynd 10. Líkindaferill FZI-vísinsins fyrir sýnasafnið. Nálga má ferilinn með fimm eða fleirum bítum beinnar línu	16
Mynd 11. Dreifing gaslektar með virku gropi. Settir eru inn fimm ferlar semsam- svara nálgun við líkindaferil FZI og sýndir eru sem einingalínur á mynd 7	16
Mynd 12. Reiknuð þvermál grophálsa samkvæmt hárpípulíkani og samkvæmt reynslusambandi frá mælingum á metnun bergsýnis er kvikasílfri var þrýst inn í það	18

1. INNGANGUR

Á árinu 1992 hófst yfirgripsmikið verkefni sem kallað var *Rannsókn jarðhita til raforku-vinnslu* og komu að því verkefni auk Orkustofnunar stærstu orkuveitur landsins, Orku-veita Reykjavíkur (þá Hitaveita Reykjavíkur), Hitaveita Suðurnesja og Landsvirkjun. Þetta stóra verkefni skiptist í marga verkþætti og kallaðist einn þeirra *Forðafræðistuðlar*. Sá verkþáttur beindi athyglinni einkum að innri gerð jarðhitakerfa og þá sérstaklega að forðafræðilegum eiginleikum bergsins með tilliti til ummyndunar og annarra mælanlegra eiginleika. Til að nálgast vandamálið varð að afla bergsýna úr jarðhitakerfum og gera á þeim skipulagðar rannsóknir. Lítið er til af bergkjörnum frá borunum jarðhitaholna og er ástæðan líklega sú að flóknari búnað þarf til kjarnatöku en venjulegrar borunar og verktími lengist, sem gerir kjarnatökuna dýra. Því var brugðið á það ráð að safna berg-sýnum úr rofnum megineldstöðvum, en talið er að eiginleika þess bergs megi heimfæra á eiginleika samskonar bergs í virkum jarðhitakerfum.

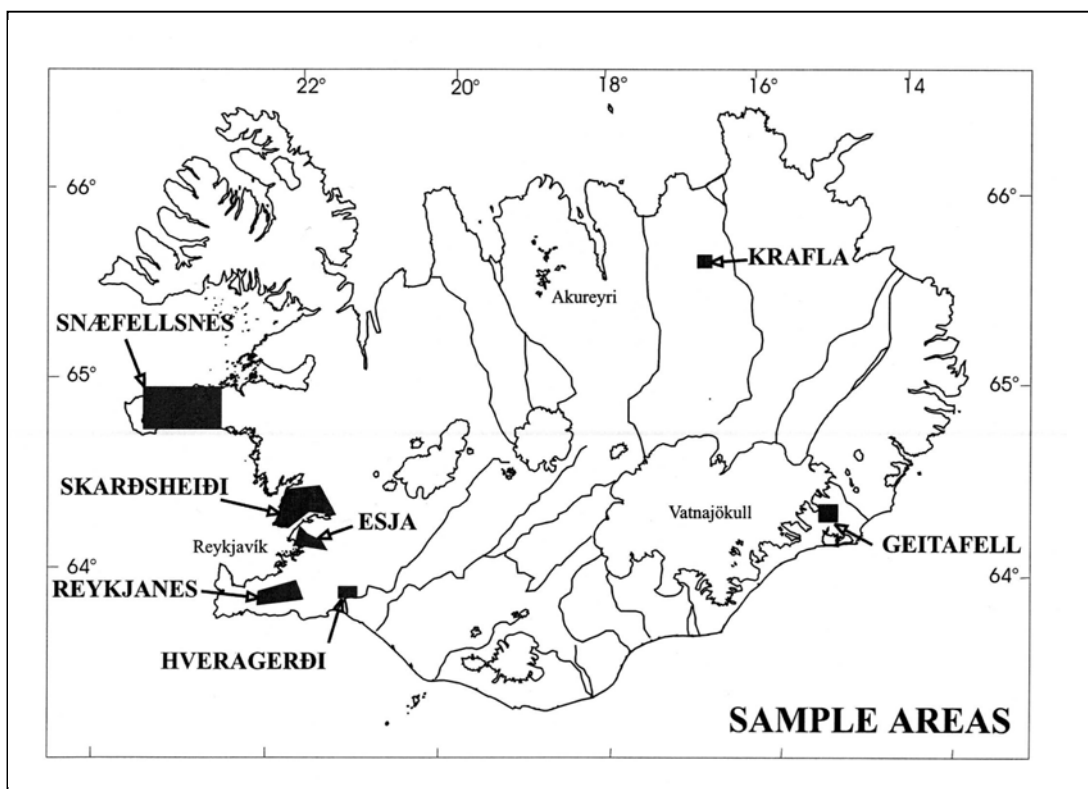
Á árinu 1993 var safnað yfir 400 bergsýnum úr rofnum megineldstöðvum og kulnuðum jarðhitakerfum og gerðar margvíslegar rannsóknir og athuganir á þeim (Ásgrímur Guðmundsson o.fl., 1995; Ómar Sigurðsson og Valgarður Stefánsson, 1994). Á árinu 1997 breyttist innra skipulag Orkustofnunar og varð verkþátturinn *Forðafræðistuðlar* þá að sérstöku verkefni. Sama ár var safnað um 100 bergsýnum til viðbótar úr einu hraunlagi í Öskjuhlíð í tengslum við samvinnuverkefni um *varmaleiðni* sem hófst árið áður. Auk Orkustofnunar tóku þátt í því Jarðfræðistofnun Danmerkur (DGU), Tækniháskólinn í Gautaborg, Svíþjóð og Rogalands rannsóknarstofnunin í Noregi. Þátttaka í þessu samvinnuverkefni breyttist á árinu 1999 er Jarðfræðistofnun Noregs kom inn í stað Tækniháskólans í Gautaborg og rannsóknarstofnun Rogalands.

Strax og bergsýni höfðu safnast hófust rannsóknir og mælingar á þeim. Flestar mælingarnar þarf að gera í mjög sérhæfðum mælitækjum, sem ekki eru til á Íslandi, og því hafa sýnin verið send í hópum til erlendra rannsóknastofa á undanförunum árum. Eins hafa sýni verið send til efnagreininga hjá erlendum rannsóknarstofum. Á síðastliðnum 6 árum hefur um helmingur bergsýnanna verið efnagreindur og grunnmælingar á lekt og gropi verið gerðar á flestum sýnanna. Auk þess hafa mörg sýni farið í gegnum enn sérhæfðari mælingar eins og á varmaleiðni, rafleiðni og hljóðhraða. Í síðari köflum þessarar skýrslu verður fjallað nær eingöngu um mælingar á eðliseiginleikum bergsýnanna og niðurstöður dregnar af þeim mælingum. Ekki verður fjallað um bergfræðilega eiginleika sýnanna umfram það sem tengist beint mælingum á þeim né um efnafræði þeirra, heldur vísað til skýrslna verkefnisins (Hjalti Franzon o.fl., 1997; Guðmundur Ó. Friðleifsson og Elsa G. Vilmundardóttir, 1998; og Hjalti Franzon, 1999).

2. BERGSÝNI

Í upphafi verkefnisins var safnað 403 bergsýnum aðallega úr rofnum megineldstöðvum og kulnuðum jarðhitakerfum. Tökustaðir þessara sýna eru sýndir á mynd 1 og þeim er lýst í skýrslunni “Forðafræðistuðlar. Söfnun sýna” (Ásgrímur Guðmundsson o.fl., 1995)

ásamt lýsingu og sjóngreiningu sýnanna. Hvert sýni samanstóð af minnst fjórum kjarna-bútum sem boraðir voru úr litlu rúmmáli bergs (<1 dm³). Sýnin voru greind til berg-gerðar og ummyndunarstigs á sýnatökustað og sú flokkun síðan lagfærð eftir efna- greiningu og þunn-sneiðaathugun á þeim. Ennfremur var búinn til ákveðinn staðall (kódi) fyrir flokkunina á sýnunum í berggerðir og ummyndunarstig.



Mynd 1. Helstu sýnatökustaðir bergsýna fyrir Forðafræðistuðalásafnið

Á árinu 1997 var svo safnað um 104 sýnum úr einu fersku hraunlagi í Öskjuhlíð. Þeim sýnum var sérstaklega safnað til rannsókna á varmaleiðni og var því leitast við að safna einsleitum sýnum svo breytileiki í berggerðinni hefði sem minnst áhrif á mælingar. Tafla 1 sýnir hvernig bergsýni í sýnasafni Forðafræðistuðla-verksins skiptist á berggerðir og ummyndunarstig.

Eins og stendur eru rúmlega 500 bergsýni til í sýnasafninu, en auk þeirra eru til nokkur sýni úr kjörnum sem teknir voru við borun jarðhitaholna. Þar má nefna sýni úr hitastigulsholum í Sandabotnaskarði við Kröflu, sýni úr holu NJ-17 á Nesjavöllum (Ómar Sigurðsson o.fl., 1988) og sýni úr holu ÖJ-1 á Ölkelduhálsi (Hjalti Franzson og Helga Tulinius, 1999). Þunn-sneiðar hafa verið gerðar af allflestum sýnanna og þunn-sneiðalýsing fyrir stóran hluta þeirra (taldar úr almenna safninu 229 sneiðar og 83 frá Öskjuhlíð). Þunn-sneiðalýsingin skiptist í punkttalningu (200 punktar) á steindum og holrými og svo lýsingu á berggerð, ummyndun, röðun steinda, yfirprentun og öðru.

Tafla 1. Skipting bergsýna milli berggerða og ummyndunarstigs.

Berggerð	Ummyndunarstig						
	Ferskt	Smektít-Zeólítar	Blandlög	Klórít	Klórít-Epidót	Epidót-Amfiból	Samtals
Basalt							
Hraunlög	122	44	22	2	42	36	268
Móberg	30	21	8	3	6	1	69
Innskot		24	12	6	30	36	108
Ísúrt berg		5			2	2	9
Súrt berg		25			11	12	48
Setberg	2	3			1	1	7
Samtals	154	122	42	11	92	88	509

Í þunnsneiðaathuguninni er gerður greinarmunur á frumsteindum og afleiddum steindum, og steindum sem fallið hafa út í sprungur og gropur. Einnig er gerður greinarmunur á hvort holrými eru blöðrur, sprungur eða rými milli steinda. Efnagreind hafa verið 257 sýni úr hópnum, þar af 222 af basalti og 35 af öðrum berggerðum. Frumathugun hefur verið gerð á sambandi ummyndunar við efnisþyngd og lekt (Hjalti Franzson o.fl., 1997) og á efnaflutningi í berginu (Hjalti Franzson, 1999).

3. MÆLINGAR Á BERGSÝNUM

Þær mælingar sem gerðar hafa verið á bergsýnunum kalla flestar á sérhæfð mælitæki sem ekki eru til hérlendis og hafa bergsýnin því frá upphafi verið send í hópum til erlendra rannsóknastofa til mælinga. Í fyrstu voru bergsýnin send til Core Laboratories í Skotlandi, en síðustu ár aðallega til Jarðfræðistofnunar Danmerkur og Grænlands (Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse (GEUS)) þar sem góð samvinna hefur myndast. Á þessum tveim stöðum hafa svokallaðar grunnmælingar verið gerðar á bergsýnunum, en það eru mælingar á gaslekt, vatnslekt, virku og heildar gropi, reiknaðri og raun efnisþyngd. Um skilgreiningar á hugtökum og lýsingu á mæliaðferðum er vísað til skýrslu verksins “Forðafræðistuðlar. Mælingar á bergsýnum” (Ómar Sigurðsson og Valgarður Stefánsson, 1994). All flest bergsýnin hafa verið send í grunnmælingu á bergeiginleikum og hafa þau skipts um það bil til helminga á fyrrnefndar rannsóknastofur. Grunnmælingarnar eru ódýrustu mælingarnar sem gerðar eru á sýnunum og hækkar kostnaður við mælingu 5 til 10 falt þegar farið er í sérhæfðari og flóknari mælingar. Gróft yfirlit um stöðu mælinga á bergsýnunum er gefið í töflu 2.

Auk grunnmælinga hafa sérhæfðari mælingar verið gerðar á mörgum bergsýnanna. Þær mælingar hafa dreifst á fleiri rannsóknarstofur og má þar nefna Tækniháskólann í Gautaborg, Svíþjóð, Norges Geotekniske Institutt í Noregi og New England Research í Bandaríkjunum. Eins og sjá má af töflu 2 hefur áhugi fyrir ákveðnum upplýsingum og

samvinna sem tekist hefur við erlendu rannsóknastofurnar ráðið miklu um þær sérhæfðu mælingar sem þegar hafa verið gerðar. Áhugi hefur verið fyrir frekari upplýsingar um rafleiðni og varmaleiðni í berginu meðan áhugi frá erlendum samstarfsaðilum hefur verið fyrir upplýsingum um hljóðhraða í berginu. Á árinu 2000 er ætlunin að fjölga mælingum á rafleiðni og varmaleiðni auk þess sem leitað verður að rannsóknastofu til að gera mælingar á gropgerðinni.

Tafla 2. Mælingar gerðar á bergsýnunum.

Gerð mælingar	Enskt heiti	Fjöldi mældur	Mettað sýni	Þurrt sýni
Gaslekt	Air or gas permeability	411		411
Vatnslekt	Water or brine permeability	85	85	
Virkt grop	Effective porosity	483		483
Heildar grop	Total porosity	216		
Reiknuð efnisþyngd	Effective grain density	483		483
Raun efnisþyngd	Total grain density	216		
Rafviðnám	Resistivity	50	50	
Varmaleiðni	Thermal conductivity	59	2	57
Hljóðhraði Vp	Acoustic velocity Vp	108	10	98
Hljóðhraði Vs	Acoustic velocity Vs	31	10	21

Rafviðnám hefur verið mælt í um 40 bergsýnum til viðbótar þeim sem talin eru í töflu 2, en ekki sett þar inn því niðurstöðurnar hafa ekki verið færðar í gagnasafn fyrir sýnin. Þá hafa ákveðnar mælingar verið endurteknar af mismunandi rannsóknastofum á nokkrum sýnanna til samanburðar, en þær eru ekki taldar með í töflu 2. Gaslekt hefur verið mæld í fleiri sýnum en kemur fram í töflu 2, en hefur þá verið undir greiningarmörkum án þess að getið sé um það í gagnasafninu.

4. ELDRI NIÐURSTÖÐUR MÆLINGA

Í fyrri skýrslu um yfirlit mælinga á kjarnasýnunum (Ómar Sigurðsson og Valgarður Stefánsson, 1994) voru tekin saman nokkur meðaltöl fyrir þá eiginleika er þá höfðu verið mældir. Síðan þá hafa engin sýni verið mulin til að mæla heildargrop og raun efnisþyngd. Hlutföll sem varða heildargrop, mismun milli virks og heildar grops, raunefnisþyngd og mismun við reiknaða efnisþyngd hafa því lítið sem ekkert breytst frá því sem þar er birt. Að sinni verða meðaltöl fyrir virkt grop, reiknaða efnisþyngd og Klinkenberg leiðrétt lekt ekki uppfærð hér þó fjöldi mælinga á þessum eiginleikum hafi aukist.

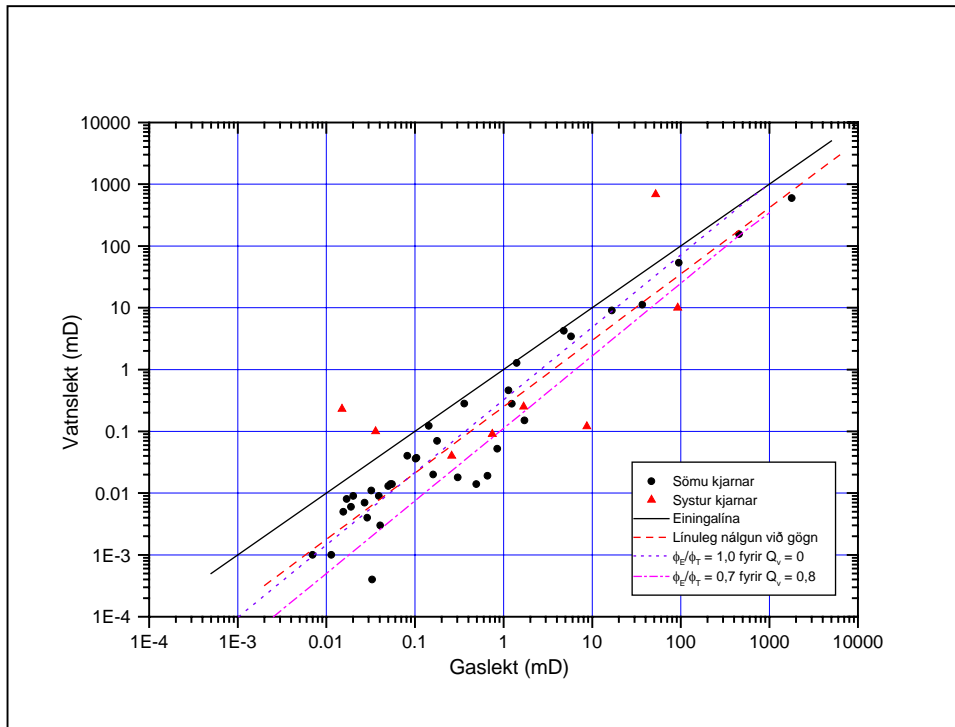
Kerfisbundinn munur kom fram milli lektarmælinga með gasi (bæði með og án Klinkenberg leiðréttingar) og lektarmælinga með vatni. Mældist gaslektin almennt 3-4 sinnum meiri en vatnslektin. Meðan athugað var hvort þessi kerfisbundni munur

tengdist rannsóknarstofunni eða mæliaðferðunum varð nokkurt hlé á mælingum nema nokkur sýni voru send á báðar rannsóknastofurnar CoreLab og GEUS. Báðar rannsóknarstofur gáfu nær sömu niðurstöður fyrir gas- og vatnslekt og var munurinn innan skekkjumarka mæliaðferðarinnar. Munurinn milli mældrar gaslektar og vatnslektar hlaut því að liggja í mæliaðferðinni eða eiginleikum bergsins.

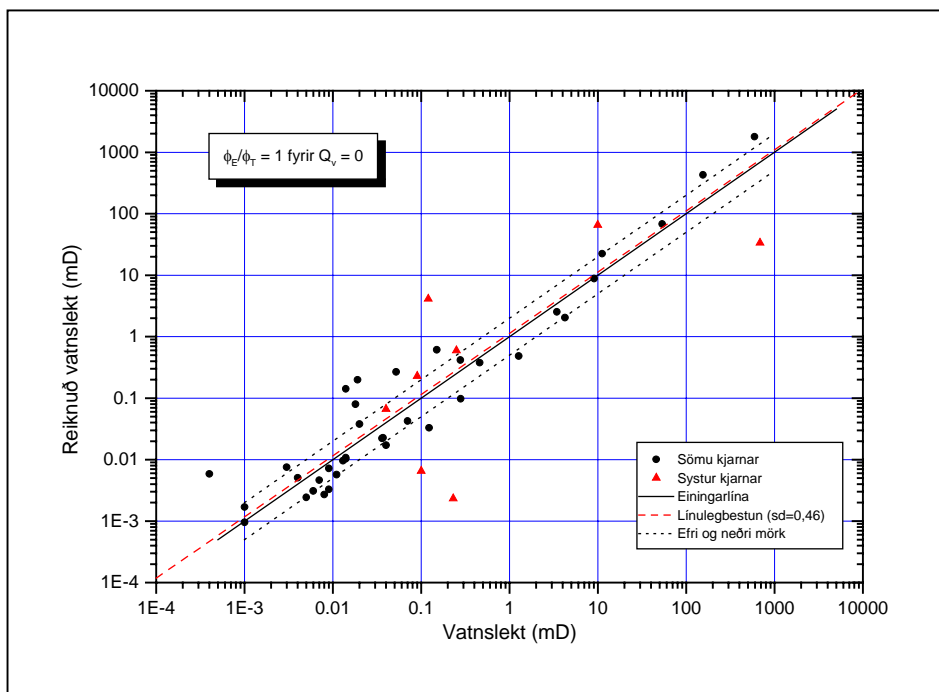
Lekt er venjulega talin til eðliseiginleika bergsins og því ættu mælingar á lekt með mismunandi renni (fluid) að gefa sambærilegar niðurstöður og mismunurinn aðallega að vera háður skekkjum í mæliaðferðunum. Kennisetningar gera ráð fyrir að svo sé, en í raun geta niðurstöður mælinga verið mjög mismunandi eftir því hvaða renni er notað við mælinguna. Ástæður fyrir því geta verið margvíslegar og ein algeng skýring er að vatn sé tekið upp af leirsteindum í sýnunum sem bólgna og minnka, stífla eða þrengja þannig rennslisleiðirnar gegnum bergsýnið. Önnur skýring er að meiri rennslishraði gass gegn-um bergsýnið geti aukið opningu rennslisleiðirnar og þannig haft áhrif á mælinguna. Við mælingu er reynt að koma í veg fyrir þetta með því að nota saltvatn svo leir nái síður að taka til sín vatnssameind og rennslishraði gass er takmarkaður með minni mismunaprýstingi yfir bergsýnið. Lítið hefur verið fjallað um mismun milli mælinga á lekt með mismunandi renni í fræðiritum þó líklegt sé að hann sé nokkuð algengur og því komu fyrrnefndar niðurstöður nokkuð á óvart í fyrstu.

Fyrir bergsýnin í sýnasafni Forðafræðistuðla-verksins er álitid nú að mismun í mældri gas- og vatnslekt megi fyrst og fremst rekja til mæliaðferðanna. Gaslektarmælingin er gerð á þurru bergsýni, en vatnsmælingin á mettuðu sýni. Meðan sýnið er þurrt eru allar glufur og rennslisleiðir opnar fyrir rennsli. Þegar sýnið hefur verið vatnsmettað myndast hins vegar óhreyfanleg vatnsfilma á veggjum holrýmana vegna yfirborðskrafta sem ásamt hárpípukröftum þrengja rennslisleiðir eða takmarka rennsli um hluta bergsýnisins. Vegna eiginleika rennslisleiðanna gegnum bergsýnin í sýnasafninu, sem vikið verður að síðar, virðist lektarmælingin háðari renninu en búast mætti við (Ómar Sigurðsson o.fl., 2000).

Við leit fundust fræðigreinar þar sem minnst er á mismun í lektarmælingum gerðum með gasi og vökva (I. Juhasz, 1986; S. Priishilm o.fl., 1987; X. D. Jing o.fl., 1992). Í einni þeirra var fjallað um þennan mun fyrir sýni úr setlögum Norðursjós og útbúið reynslusamband til að breyta mældri gaslekt í samsvarandi vökvalekt (I. Juhasz, 1986). Þetta reynslusamband innifelur fyrrgreindar hugmyndir um mismun á eiginleikum rennslisleiðar eftir því hvort sýnið er þurrt eða mettað saltvökva. Reynslusambandið var prófað fyrir mælingar á bergsýnum úr sýnasafninu og bentu fyrstu niðurstöður til að nota mætti reynslusambandið til að umbreyta mældri gaslekt yfir í samsvarandi vatnslekt innan sömu skekkjumarka og fengust fyrir setsýnin sem reynslusambandið var útbúið fyrir (Ómar Sigurðsson, 1998a). Mynd 2 sýnir dæmi um þetta, en til að beita reynslu-sambandinu til fullnustu þarf að hafa mat á leirvísinum Q_v (shaliness factor). Leirvísirinn er nokkurns konar mælikvarði á virkni leirsteinda í bergsýninu gagnvart lekt. Ef leirsteindirnar eru óvirkar er leirvísirinn núll og allt virkt holrými því nýtt fyrir rennsli gegnum bergsýnið ($\phi_e = \phi_T$). Hins vegar ef leirsteindirnar eru virkar og valda þrengingum í rennslisleiðunum er leirvísirinn jákvæður og holrýmið minnkar sem er nýtilegt fyrir rennsli. Fyrir þann sýnahóp sem reynslusambandið var kannað á og sést á mynd 2, þá féllu um 2/3 hlutar hópsins innan skekkjumarka fyrir leirvísi jafnt og núll (mynd 3), en fyrir um 1/3 hluta hópsins geta leirsteindir haft áhrif á vatnslektina.



Mynd 2. Mæld gas- og vatnslekt fyrir 45 sýni ásamt nokkrum kennilínum.



Mynd 3. Reiknuð vatnslekt allra sýna út frá mældri gaslekt fyrir hlutfallið $(\phi_E/\phi_T) = 1$ og borin saman við melda vatnslekt fyrir öll sýnin.

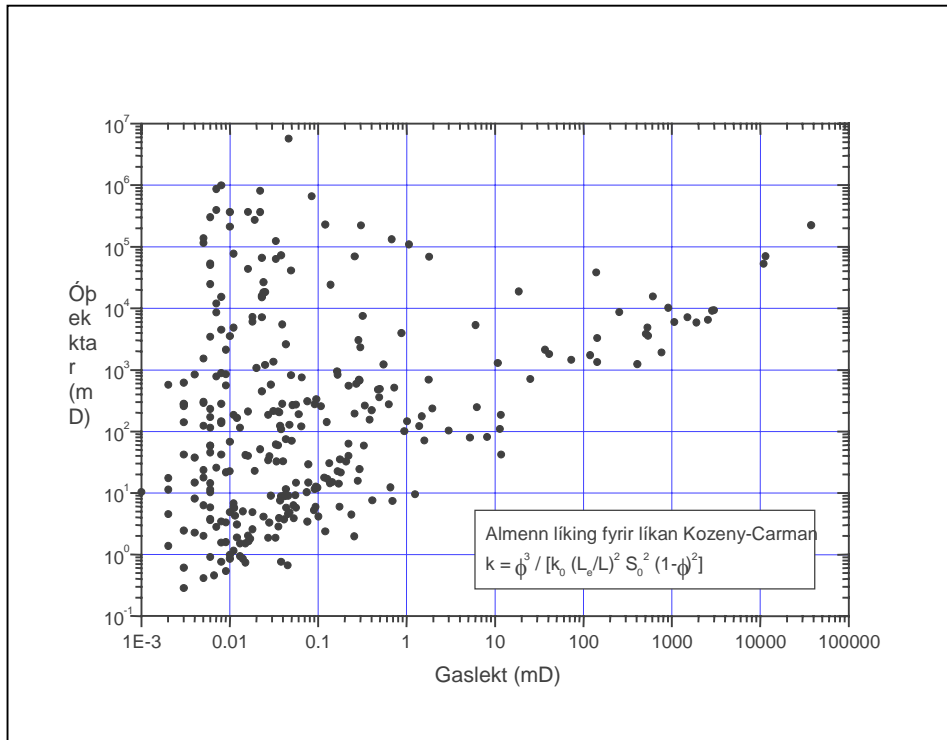
Samband lektar við aðra mælda eðliseiginleika var einnig kannað. Ekki var greinanlegt samband við efnisþyngd, en vísbendingar um samband við grop. Algennt er að sjá í fræðiritum tilraunir til að finna líkan milli lektar og grops þannig að áætla megi lektina út frá mældu gropi. Flest þessara líkana byggja á einfaldaðri rúmlögun holrýmisins og algennt að grunnurinn að þeim sé fenginn með því að tengja saman lögmál Poiseuille, sem lýsir meðalrennsli í pípum, og lögmál Darcy fyrir rennsli í gropnu efni. Þær líkingar sem þannig fást hafa verið skrifaðar á marga vegu, en algennt form þeirra er;

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

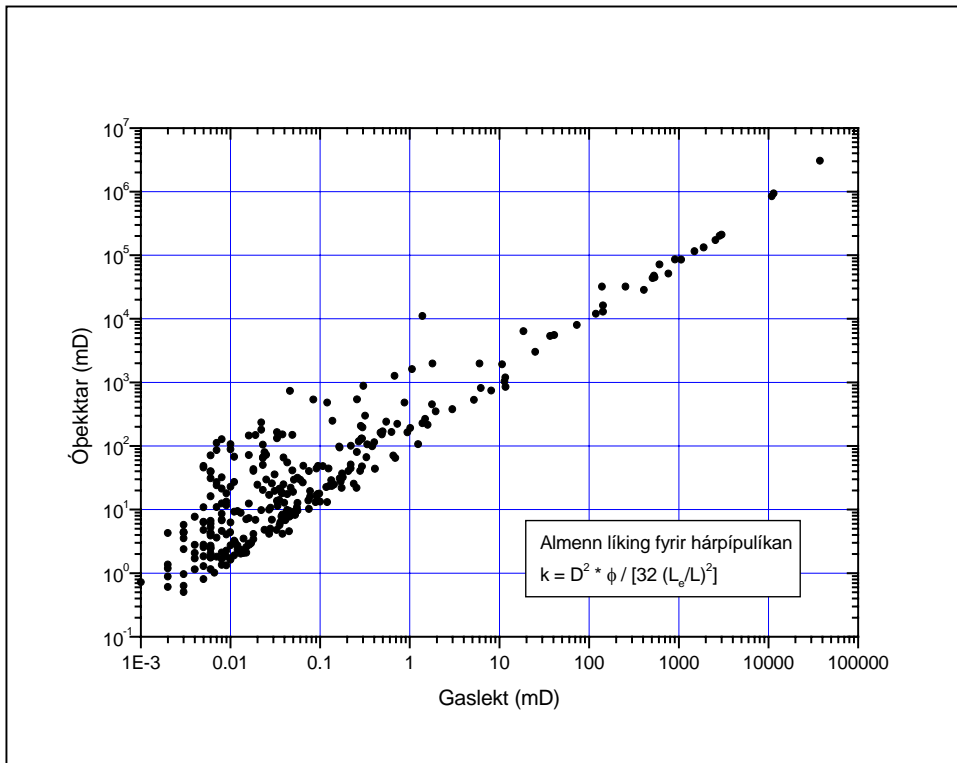
sem kennd er við Kozeny-Carman og

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

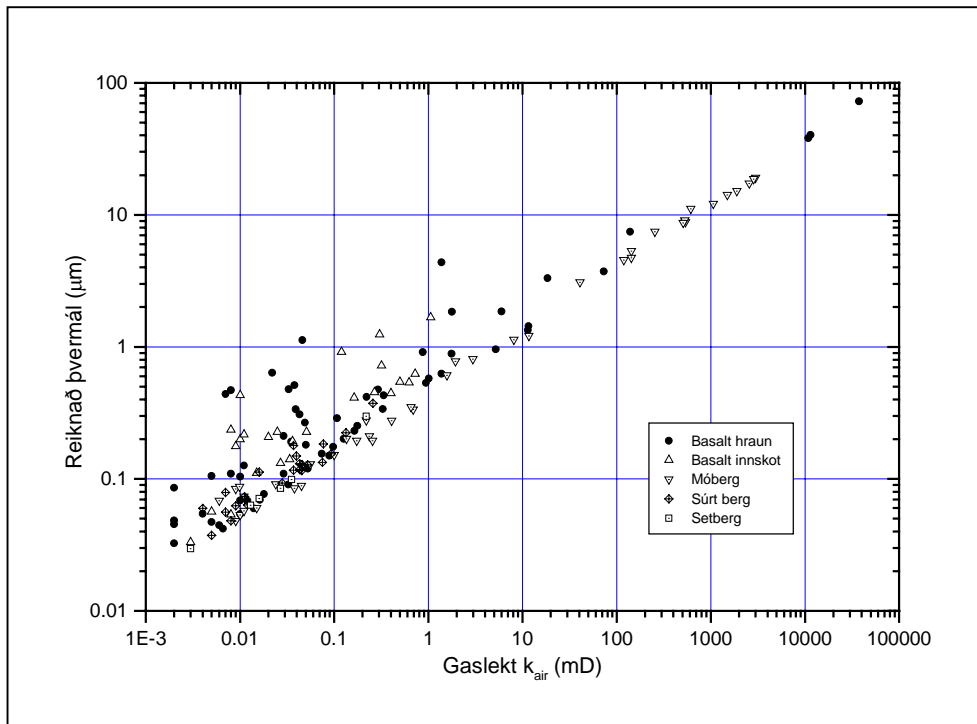
fyrir almennt líkan sem gert er úr samsafni hárpípna (J. R. Hearst og P. H. Nelson, 1985). Stærðirnar í líkingunum að ofan eru lekt (k), grop (ϕ), raunlengd rennslisleiðar (L_e), lengd sýnis (L), meðalþvermál hárpípna (D), stuðull háður lögun rennslisleiðar (shape factor, k_o) og hlutfall yfirborðsflatarmáls holrýmis og rúmmáls bergmassa (S_o). Myndir 4 og 5 sýna hvernig mælingar fyrir basalt falla að þessum líkönum. Af myndunum má ráða að mælingar á sýnahópnum sýna enga eða mjög litla fylgni við Kozeny-Carman líkanið, en útfærsla af því er oft notuð fyrir setberg. Hins vegar eru vísbendingar um sterka fylgni við hárpípulíkanið (Ómar Sigurðsson og Valgarður Stefánsson, 2000). Þær fáu mælingar sem gerðar hafa verið á gerð rennslisleiðanna um bergsýni styrkja þá hugmynd að líkja megi þeim við hárpípur (Joel Johnson og Greg N. Boitnott, 1998). Hlutfallið $(L_e/L)^2$ hefur verið kallað rangalastuðull (tortuosity factor), en með því að festa hann við gildið 1,73 sem er nokkuð algennt gildi fyrir sandstein, þá hefur meðalþvermál rennslisleiðar eða ráðandi þvermál grophálsa verið reiknað (Ómar Sigurðsson, 1998b). Þannig reiknað reyndist meðalþvermál grophálsa eða rennslisleiða vera á bilinu 0,03-80 μm (mynd 6) og fyrir stóran hluta bergsýnanna undir 1 μm , jafnvel minna en bylgjulengd sýnilegs ljóss (0,4-0,7 μm). Mælingar á fáum sýnum, sem þó ættu að vera lýsandi fyrir allt grop-sviðið (0-49%), gefa meðalþvermálið á bilinu 0,05-100 μm .



Mynd 4. Óþekktar breytur í líkingu Kozeny-Carman fyrir samband lektar og grops.



Mynd 5. Óþekktar breytur í hárpúlíkingu fyrir samband lektar og grops.



Mynd 6. Reiknað þvermál grophálsa samkvæmt hárpípulíkani teiknað móti mældri gaslekt og dreifing þess fyrir einstakar berggerðir. Gaslektin er óleiðrétt fyrir Klinkenbergáhrifum og rangalastuðull er festur við gildið 1,73.

5. NÝRRIATHUGANIR

Sú mikla fylgni sem kom fram við hárpípulíkanið hefur ýtt undir áhuga á að athuga nánar hvaða viðbótarmælingar geti bætt niðurstöður þannig að hægt yrði spá um lekt út frá mælingum á öðrum eðliseiginleikum bergsins. Í því sambandi hefur verið horft til mælinga á rafviðnámi í bergsýnunum og hefur þegar nokkur fjöldi sýna verið mældur þannig (tafla 2). Mögulega má fá mat á rangalastuðlinum út úr þannig mælingu, samanber eftirfarandi líkingu;

$$\left(\frac{L_e}{L} \right)^2 = F^2 \phi^2$$

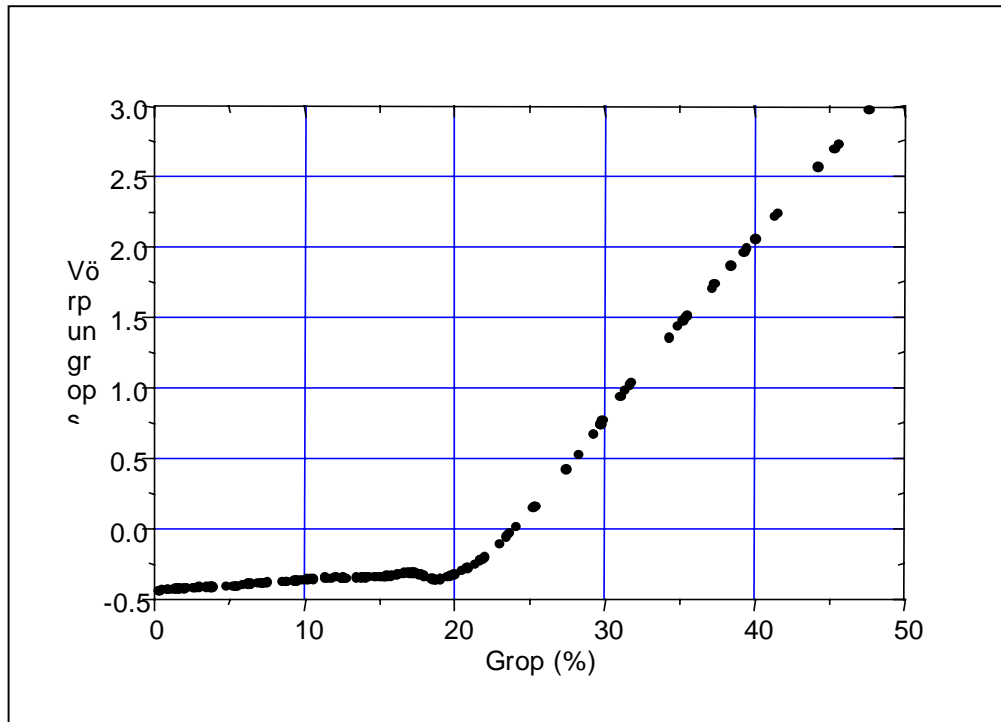
þar sem bergviðnámsstuðullinn (formation factor, F) er hlutfall rafviðnáma mettaðs bergs og mettunar vökvans, en aðrar stærðir sömu og áður. Hafa ber þó í huga að rangalastuðull ákvarðaður út frá mælingum á gropi og rafviðnámi þarf ekki að vera sá sami og fyrir vökvarennisli því leiðir rafstraums og vökvarennisli þurfa ekki að vera þær sömu (C. David, 1993; Y. Bernabé, 1995). Í borholu er hægt að ákvarða grop með ýmsum mælingum til dæmis nifteindamælingu eða hljóðhraðamælingu. Einnig er þar hægt að mæla rafviðnám bergs og holuvökva. Hins vegar er ekki ljóst hvernig rennisli-

Þvermálið yrði ákvarðað, en þá stærð vantar til að spá um lekt bergeininga út frá hárpípulíkingu. Hafa ber í huga að hér er átt við lekt í sjálfu berginu, en gæfni jarðhita-borholna ræðst oftast af lekt um sprungur sem borholan sker. Vatnsforði jarðhitakerfa er hins vegar miklu meiri í berginu heldur en sprungunum og lekt bergsins stjórnar þannig hvernig langtíma viðbrögð jarðhitakerfa eru vegna vinnslu jarðhita-vatnsins.

1.1. Fylgni lektar við aðrar mælingar

Þegar mæld gaslekt er teiknuð á móti mælingu á öðrum eðlisþætti er oft ekki greinanleg mikil fylgni milli þeirra þátta. Hins vegar ef beitt er forriti sem kallast GRACE til að finna kjör samsvörun (optimal correlation) milli háðrar breytu eins og lektar við safn óháðra breyta eins og grops, rafviðnáms og eðlisþunga kemur fylgnin betur fram. Forritið byggir á svokallaðri kennistærðarlausri vörpun (non-parametric transformation) háðrar og óháðra breyta (G. Xue o.fl., 1997). Kennistærðarlaus vörpun merkir að ekki er gert ráð fyrir neinni falllögun milli háðrar og óháðra breyta og varpanirnar eru eingöngu gerðar á grunni gagnarunanna. Samsvörun er síðan fundin með því að teikna vörpuðu háðu breytuna á móti summu varpaðra óháðra breyta. Sú samsvörun ætti þá að vera kjör samsvörun fyrir gögnin. Þannig vörpun getur stutt líkingar sem leiddar eru af eðlisfræðilegum lögmálum eða öðrum athugunum ólíkt því sem svokölluð taugakerfi geta (neural networks). Mynd 7 sýnir dæmi um þannig vörpun, en krafan þar er að háða breytan (lekt) sé einhallandi og vörpun óháðu breytunar sé röðuð. Af myndinni má ráða að mæld gaslekt hafi veika fylgni við grop þar til gropið er orðið 18-19%, en sterka fylgni eftir það. Hugsanlegt er að finna megi einhverja eðlisbreytingu í bergsýnunum sem verður þegar grop nálgast 20%. Út frá sömu hugmynd gæti hugsanlega einnig einhver breyting verið í bergsýnunum þegar efnisþungi fer yfir $2,8 \text{ g/cm}^3$. Bergsýnin hafa enn ekki verið athuguð með tilliti til þessa.

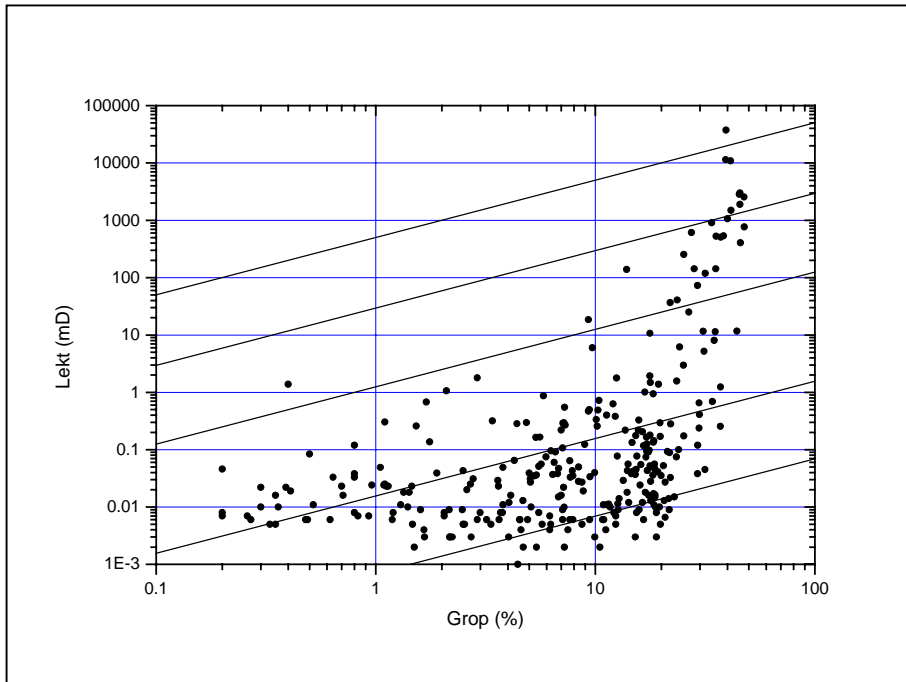
Sýnt hefur verið hvernig beita má ofangreindri aðferð til að áætla gaslekt út frá mælingum á gropi og efnisþunga (Ómar Sigurðsson, 1998b). Síðan hafa bætst í gagnasafnið nokkrar mælingar á rafviðnámi og var því kannað hvort þær mælingar gætu bætt áætlun á lektargildi. Fylgni lektar við efnisþunga er lítil ($<0,3$), við grop töluverð ($>0,75$) og við rafviðnám þó nokkur ($\sim 0,7$), en enn eru tiltölulega fáar þannig mælingar. Ef lektin er borin við allar þrjár óháðu breytur í einu verður fylgnin hærri ($\sim 0,85$), en þó ekki nægjanlega mikil til að hægt sé að spá með öryggi lekt út frá mælingu á gropi, rafviðnámi og efnisþunga. Einnig var kannað hvort bæta mætti fylgnina við lekt með því að nota eingöngu sýni með grop herra en 19%, en samanber mynd 7 ætti fylgni þar að vera betri. Eingöngu var þar hægt að nota grop og efnisþunga sem óháðar breytur og þó að fylgni við lekt batnaði var það ekki nægjanlega mikið til að verða nothæft til að spá fyrir um lekt.



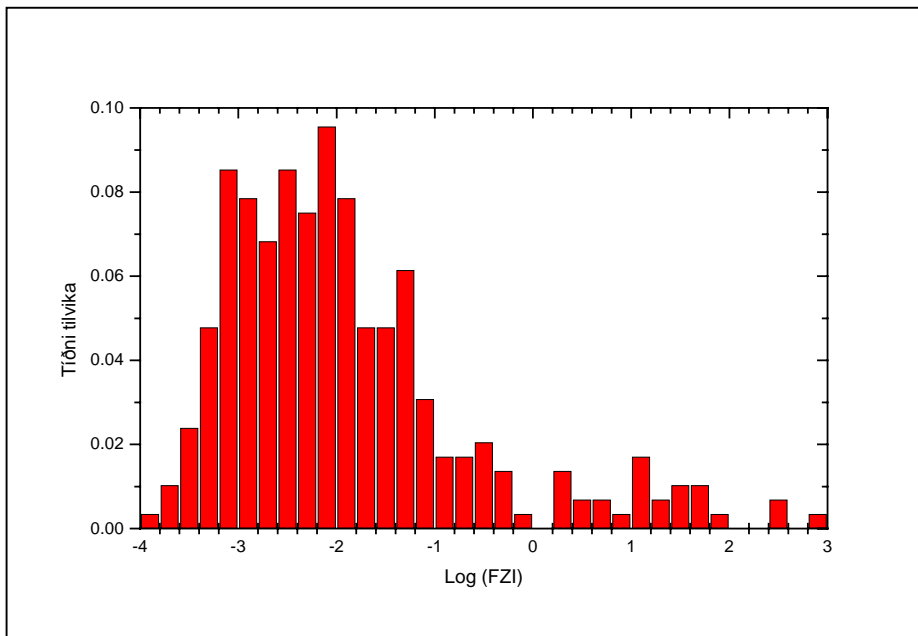
Mynd 7. Röðuð kjörvörpun mælinga á gropi eins og notuð er með forritinu GRACE og byggir á ACE-reikniriti.

1.2. Rennsliseiningar

Aðferð til að áætla lekt út frá öðrum upplýsingum og virðist notuð í auknum mæli byggir á því að flokka saman berg með sambærilega rennsliseiginleika fyrir renni, þar sem vísað er til hvers flokks sem rennsliseiningu (hydraulic flow unit) (M. Abbaszadeh o.fl., 1996). Rennsliseiningin þarf ekki að samsvara berggerð eða svokölluðum flæði-einingum bergs, eins og hraunlögum. Rennsliseining er forðaberg sem er samfelt og útbreitt í lárétta og lóðrétta stefnu með svipaða eiginleika gagnvart rennsli rennis. Eiginleikinn sem er ráðandi fyrir rennslið er gerð og lögun grophálsanna, sem getur síðan stjórnað af berggerðinni og ásýnd hennar (gerð, staðsetningu, kornastærð, lögun, samþjöppun, ummyndun o.fl.). Áður hefur verið sýnt hvernig mæld lekt hefur fylgni við líkan af holrýminu í berginu, hér hárpípulíkan, þannig að lektin er greinilega háð eiginleikum gropsins. Þáttun á þeim bergeiginleikum sem hafa áhrif á holrýmið (gropið) og hvernig það stjórnar lektinni er mikilvægt fyrir flokkun rennsliseininganna. Fyrir setberg er oftast stuðst við líkan Kozeny-Carman, en dæmi um slíka flokkun fyrir hárpípulíkan er sýnt á myndum 8 til 11.



Mynd 8. RQI (lekt) teiknað á móti ϕ_z (gropi) fyrir sýnasafnið. Sýndar eru einingalínur fyrir mögulegar rennsliseiningar.



Mynd 9. Súlurit sem sýnir fjölda eða tríðni tilvika fyrir FZI-vísinn.

Þáttun almennu líkingarinnar fyrir hárpípulíkan fyrir flokkun í rennsliseiningar má gera á eftirfarandi hátt (M. Abbaszadeh o.fl., 1996). Skilgreindur er rennslissvæðavísir (flow zone indicator, FZI) af stærðunum sem eru háðar jarðfræðieiginleikum efnisins;

$$FZI = \frac{D^2}{32 * \tau^2}$$

þar sem τ er hlutfallið (L_e/L) og D er meðalþvermál grophálsanna eða hárpípnana eins og áður. Þá er skilgreindur gæðastuðull forðabergsins (reservoir quality index, RQI) sem fyrir hárpípulíkanið er eingöngu lektin:

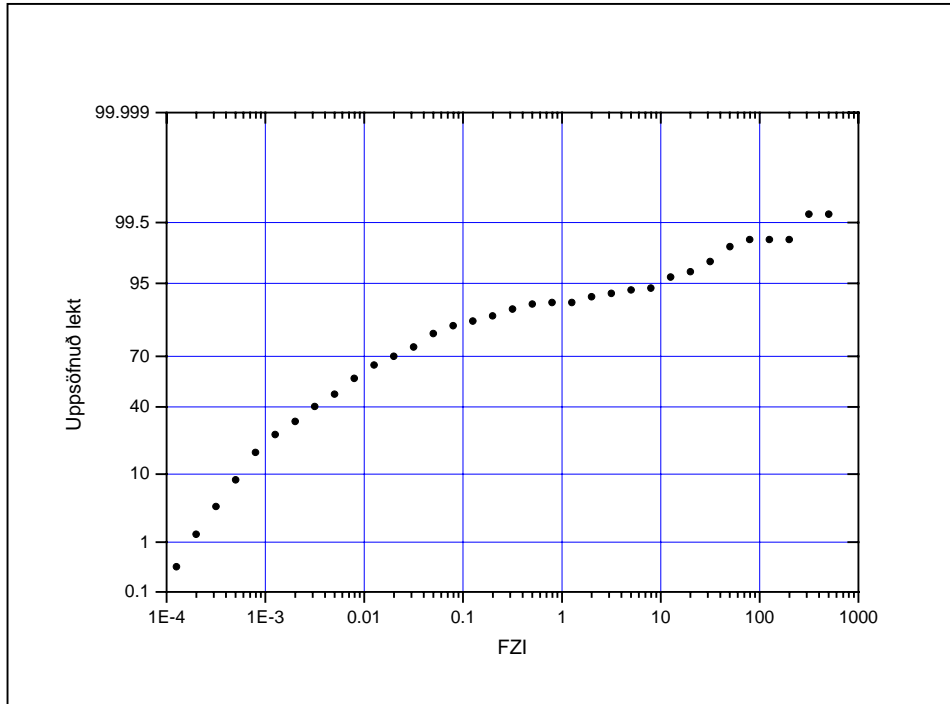
$$RQI = k$$

Með þessum skilgreiningum er hægt að skrifa hárpípulíkinguna svo;

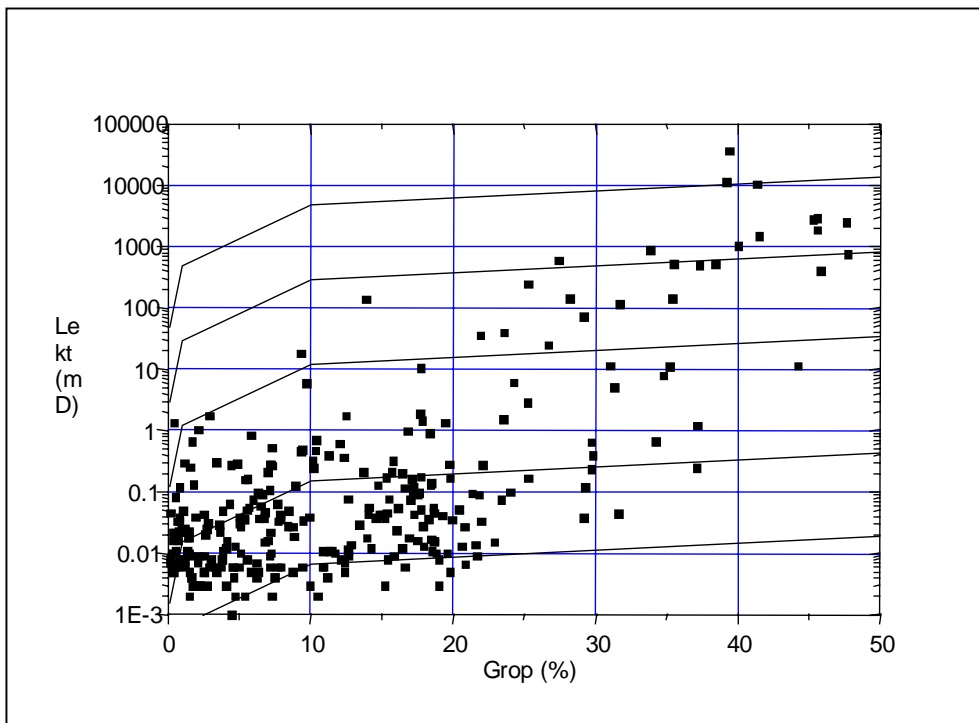
$$RQI = \phi_z * FZI$$

þar sem ϕ_z er svæðisgropfall, en fyrir hárpípulíkanið er það virkt grop. Vísirinn FZI er reiknaður samkvæmt líkingunni að ofan fyrir hvert sýni þar sem lekt og grop hefur verið mælt. Með því að teikna RQI á móti ϕ_z á log-log graf ætti að koma fram bein lína með hallanum einn (einingarlína) ef FZI væri fasti fyrir öll bergsýnin. Sýni með svipaðann FZI-vísi, en ekki endilega nákvæmlega sama, ættu að þéttast um ákveðna einingarlínu sem gæfi þá meðalgildi FZI-vísisins. Sýni með ólíka FZI-vísa ættu þá að þéttast um aðrar samsíða einingarlínur. Mynd 8 sýnir dæmi um svona graf fyrir bergsýnin úr sýnasafninu. Á mynd 8 kemur ekki fram greinileg þétting sýna um ákveðnar einingarlínur og er þetta eðlileg hegðun fyrir raunveruleg sýni. Því er gripið til ýmisa tölfræðilegra aðferða til að flokka sýnin saman í hópa. Ekki verður farið út í þær aðferðir hér, en sýnt dæmi hvernig þeim er beitt.

Fyrsta skrefið í skiptingu sýnanna í ákveðnar rennsliseiningar er gerð út frá myndrænni hegðun. Gera má ráð fyrir að FZI hafi log-normaldreifingu líkt og algengt er um lekt vegna þess hversu FZI er háður lektinni. Þannig er FZI-vísirinn talinn summa af mörgum log-normaldreifingum sem færðar eru sundur með því að teikna lygrann af FZI á súlurit. Þar ætti þá að koma fram einhver fjöldi (n) rennsliseininga með normaldreifingu. Mynd 9 er dæmi um þetta, en erfitt er að ákvarða einhvern ákveðinn fjölda rennsliseininga á henni. Hins vegar minnkar dreifingin í gögnunum og greining sýna í hópa verður auðveldari á líkinda-grafi (mynd 10), en það er tegrún á súluritinu á mynd 9. Á mynd 10 má nálgast ferilinn með 5 eða fleirum bútum beinnar línu. Hver línubútur samsvarar þá ákveðinni rennsliseiningu og skurður við aðliggjandi línubút afmarkar útmörk rennsliseiningarinnar. Ákvarða þarf meðalgildi FZI-vísisins innan hvers hóps, en það er skurðpunkturinn við ϕ_z á mynd 8. Á mynd 8 hafa verið færðir inn 5 hópar sem samsvara 5 mest áberandi línubútunum sem greina má á mynd 10. Sömu hópar eru svo settir inn á mynd 11 sem sýnir almennt dreifingu lektar með gropi. Af myndum 8 og 11 má ráða að með því að nota meðallektargildi fyrir hvern hóp eða rennsliseiningu þá verði hægt að áætla lektina með innan við einnar stærðargráðu skekkju.



Mynd 10. Líkindaferill FZI-vísisins fyrir sýnasafnið. Nálgá má ferilinn með fimm eða fleirum bútum beinnar línu.



Mynd 11. Dreifing gaslektar með virku gropi. Settir eru inn fimm ferlar sem samsvara nálgun við líkindaferil FZI og sýndir eru sem einingalínur á mynd 7.

Ekki verður haldið mikið meira áfram með þetta hér, en næsta skref er að útbúa gagnagrunn fyrir hverja rennsliseiningu þar sem fram koma einhvers konar meðalgildi þeirra eiginleika sem hafa verið mældir. Einnig algengustu upplýsingar um bergfræði sýnana innan einingarinnar. Loka skrefið er síðan að nota mælingar úr borholu og greiningu bergs til þess að velja þá rennsliseiningu sem uppfyllir flest þekktu skilyrðin. Síðan eru meðaltals eiginleikar rennsliseiningarinnar notaðir til að spá fyrir um lekt eða aðra eiginleika sem ekki voru mældir í holunni. Þegar frekari mælingar á rafviðnámi bergsýnanna liggja fyrir má segja að algengustu upplýsingar sem samsvara mælingum úr borholum liggji fyrir. Helstu upplýsingar í þannig einfölduðum gagnagrunni væru þá til og gagnagrunnurinn ætti þá að vera nothæfur til að spá gróft fyrir um lekt jarðlaga sem borhola sker.

5.3. Aðrar athuganir

Að ofan var fjallað um skiptingu bergs í rennsliseiningar til að spá um eða áætla lekt og jafnvel fleiri eiginleika í því. Hægt er að nálgast það á mismunandi vegu hvernig skiptingin í rennsliseiningar fer fram. Bent hefur verið á að lekt mældra bergsýna virðist í flestum tilfellum vera nálganleg með hárpúlíkani (mynd 5). Fyrir sýnasafnið eru tvær stærðir í hárpúlíkningunni óþekktar, en það eru þvermál grophálsa og rangalastuðullinn. Rangalastuðullinn má mögulega nálgast með mælingu á rafviðnámi, eins og áður er nefnt. Gera má ráð fyrir að rangalastuðullinn sé breytilegur milli bergsýna. Þannig bendir mynd 5 til að fyrir þau bergsýni sem sýna mest frávik frá hárpúlíkaninu á myndinni þá geti rangalastuðullinn ($(L_e/L)^2$ eða τ^2) verið allt að 25 sinnum stærri en rangalastuðullinn fyrir þau bergsýni sem minnst frávik sýna frá líkaninu. Þegar mat á rangalastuðli út frá fjölgandi mælingum á rafviðnámi liggja fyrir þá verður bara þvermál grophálsana óþekkt í líkingunni, en það er þó ráðandi fyrir áætlun lektar.

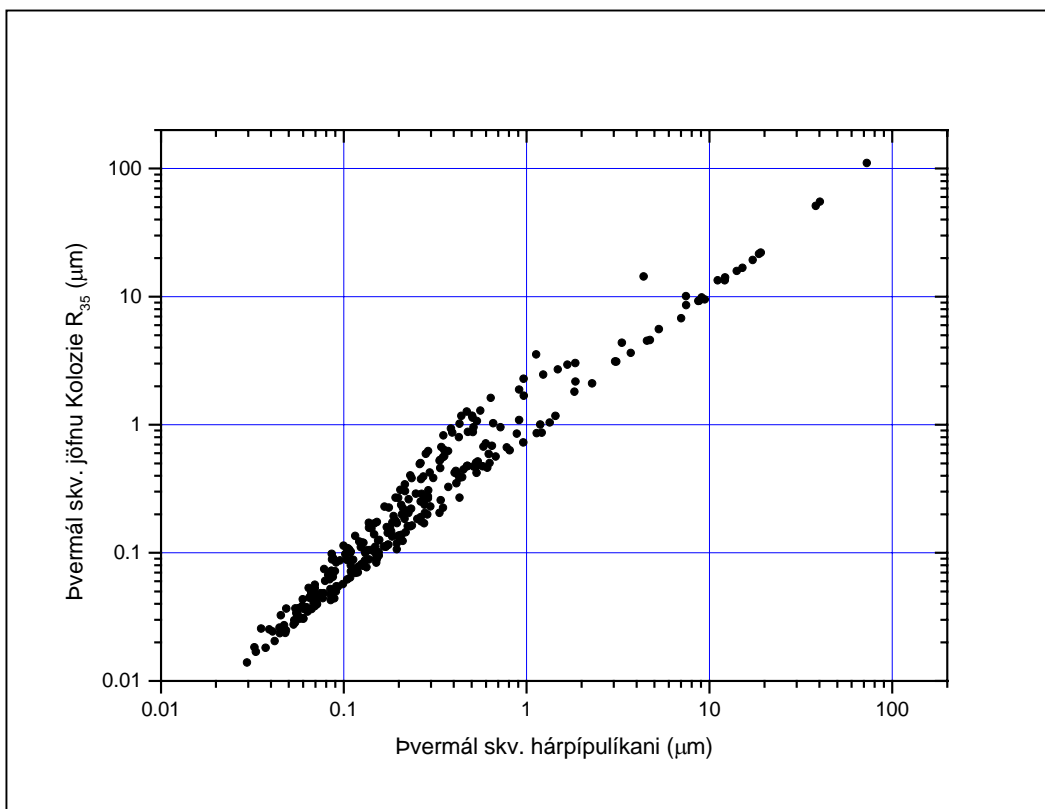
Þegar rangalastuðlar verða þekktir má reikna þvermál grophálsanna með hárpúlíkningunni, en meðan rangalastuðlar eru ekki þekktir má fara öfugt að. Til er reynslusamband fyrir þvermál grophálsa sem fundið var með mælingum er kvikasílfri var þrýsti inn í bergsýni. Reynslusambandið er ritað svo (J. C. Porras, 1998);

$$\text{Log}(R_{35}) = 0.732 + 0.588\text{Log}(k_{\text{air}}) - 0.864\text{Log}(\phi)$$

þar sem R_{35} er geisli (radius) gropháls fenginn úr gögnum um hárpúþrýsting þegar kvikasílfur mettar 35% gropsins. Með þvermálið reiknað samkvæmt ofangreindu reynslusambandi má áætla rangalastuðlana fyrir bergsýnin. Einnig mætti nota reiknað þvermál til flokkunar á bergsýnunum í rennsliseiningar og það yrði þá einn af eiginleikum rennsliseiningarinnar. Mynd 12 sýnir reiknað þvermál grophálsa frá hárpúlíkaninu og frá reynslusambandinu.

Ein af fyrstu áberandi niðurstöðunum úr mælingum bergsýnana í sýnasafni Forðafræðistuðla-verksins var hve lítill munur reyndist milli virks og heildar grops eða almennt minni en 2%. Þetta merkti að nær allt grop í berginu var opið og virkt fyrir rennslí. Sambærilegar niðurstöður hafa fengist úr mælingum á basaltsýnum teknum úr lítið veðruðum hraunlögum og gjall keilum frá Holocene og Pleistocene í Oregon Cascades í Bandaríkjunum (M. O. Saar and M. Manga, 1999). Grop þeirra sýna var á bilinu 10-75%. Hér getur því verið um nokkuð almennan eiginleika basalts að ræða sem gæti jafnframt gilt um fleira gosberg. M. O. Saar og M. Manga notuðu smásjármyndir til að

meta hlutfall yfirborðs gropa við rúmmál sýnis til að nota með líkingu Kozney-Carman. Þeir sáu að almennt munaði um og innan við 5% í mati á gropi frá myndunum og mældu gropi. Svipaður munur hefur einnig orðið við mat á gropi með talningu í þunnsneiðum undir smásjá í forðafræðisýnasafninu (Hjalti Franzson o.fl., 1997). Þeir komast líka að þeirri niðurstöðu að lektin stjórnað af þvermáli grophálsanna og telja það vera stærðargráðu minna en meðalþvermál blaðra í berginu.



Mynd 12. Reiknuð þvermál grophálsa samkvæmt hárpípulíkani og samkvæmt reynslusambandi frá mælingum á mettun bergsýnis er kvikasílfri var þrýst inn í það.

6. NIÐURSTÖÐUR OG FRAMHALD

Fyrirliggjandi niðurstöður mælinga á sýnasafni Forðafræðistuðla-verksins sýna eftirfarandi:

- Lítil munur er milli virks og heildar grops þannig að nær allt holrými bergsins er opið og virkt fyrir gegnumflæði. Svipaðar niðurstöður hafa birts um athuganir á basalti í Bandaríkjunum.
- Hárpípulíkan virðist henta til að lýsa og meta lekt bergsins. Þar virðist þvermál grophálsa vera ráðandi um lektina. Enn er ekki fundin aðferð til að áætla það með nægri nákvæmni svo unnt sé að nota það við mat á lekt.
- Kerfisbundinn munur milli mældrar gaslektar og vatnslektar er álitinn tengdur mæliaðferðinni og eiginleikum rennsisins, m.t.t. bergsýnisins. Reynslusamband

búið til fyrir setberg til að breyta mældri gaslekt í vatnslekt virðist hægt að nota með jafn góðum árangri fyrir gosberg sýnasafnsins.

- Ekki er enn fyrir hendi nothæft fræðilegtsamband né reynslusamband til að áætla lekt gosbergsins út frá öðrum fyrirbyggjandi mælingum á bergsýnunum. Þó er ljóst að lekt bergsins sýnir fylgni við rafviðnám þess. Frekari mælingar á rafviðnámi fyrir bergsýnin í sýnasafninu munu því væntanlega auka líkur á að þannig samband finnist.
- Nokkrar aðferðir eru kunnar hvað það varðar hvernig hægt er að flokka bergsýnin í sýnasafninu saman í ákveðna hópa þannig að hægt er að nota sýnasafnið til að áætla lekt eða aðra eiginleika. Skekkjumörk miðað við núverandi þekkingu á sýnasafninu fyrir þannig áætlun gætu verið um ein stærðargráða.

Þekking á sýnasafni Forðafræðistuðla-verksins nálgast ört sambærilega þekkingu fyrir setberg. Þegar sýnasafnið verður orðið nothæft til að áætla með minna en stærðargráðu skekkju eiginleika bergs, eins og lekt, út frá hefðbundnum mælingum í borholum þá verður það orðið jafnt erlendum söfnum fyrir setberg. Það mark ætti að nást innan ekki mjög langs tíma.

Í samvinnu við erlenda samstarfsaðila er unnið að mælingum á varmaleiðni og rafviðnámi fyrir afmarkaðan hóp sýna. Fyrstu niðurstöður mælinga á rafviðnámi úr almenna sýnasafninu sýna að rétt sé að fjölga þeim mælingum fyrir stærri hluta sýnasafnsins. Eins þarf að vinna úr og tengja þann fjölda mælinga, sem er lokið eða er verið að gera, á nær einsleitu hraunlagi úr Öskjuhlíð, við niðurstöður úr almenna sýnasafninu.

Unnið er að því að bæta skilning á niðurstöðum frá mælingum í borholum. Þannig hefur mæling á náttúrulegri gammageislun verið athuguð, svosem notkun hennar til að meta kísilinnihald bergs. Svipuð athugun er í gangi á mælingu á nifteindadeifingu og hljóðhraða til að meta grop bergsins. Einnig verður athugað hvað fá megi út úr túlkun viðnámsmælingar í borholu. Í framhaldinu þarf að gera sér grein fyrir hvernig niðurstöður borholumælinganna tengjast niðurstöðum mælinga á sama eiginleika í kjarnabút. Með þeirri vitneskju verða mælingarnar yfurfæranlegar.

7. HEIMILDIR

Ásgrímur Guðmundsson, Hjalti Franzson og Guðmundur Ómar Friðleifsson, 1995: Forðafræðistuðlar. Söfnun sýna. Orkustofnun, OS-95017/JHD-11 B, 72 s.

Christian David, 1993: Geometry of flow paths for fluid transport in rocks. *J. Geophys. Res.*, Vol. 98, No. B7: 12267-12278.

Guðmundur Ómar Friðleifsson og Elsa G. Vilmundardóttir, 1998: Reservoir Parameters TCP-Project. A thin-section study of the Öskjuhlíð samples. Orkustofnun, OS-98041, (á ensku) 15 s.

Guoping Xue, Akhil Datta-Gupta, Peter Valkó og Tom Blasingame, 1997: Optimal transformations for multiple regression: Application to permeability estimation from well logs. *SPE Formation Evaluation*, June 1997, s 85-93.

Hjalti Franzson, Guðmundur Ómar Friðleifsson, Ásgrímur Guðmundsson og Elsa G. Vilmundardóttir, 1997: Forðafræðistuðlar. Staða bergfræðirannsókna í lok 1997. Orkustofnun, OS-97077, 57 s.

Hjalti Franzson og Helga Tulinius, 1999: Rannsóknir á kjarna úr holu ÖJ-1, Ölkelduhálsi. Orkustofnun, OS-99024, 67 s.

Hjalti Franzson, 1999: Forðafræðistuðlar. Samspil ummyndunar og efnainnihalds í bergi. Orkustofnun, OS-99108, 31 s.

Istvan Juhasz, 1986: Conversion of routine air-permeability data into stressed brine-permeability data. *Transactions Tenth European Formation Evaluation Symposium*, April 1986, Aberdeen, UK., s Y.

Joel Johnson og Greg N. Boitnott, 1998: Velocity, permeability, resistivity and pore structure models of selected basalts from Iceland. *New England Research, Inc., Vermont, U.S.A.*, 95 s.

Joseph R. Hearst og Philip H. Nelson, 1985: Well logging for physical properties. *McGraw-Hill Book Company*, 571s.

Juan Carlos Porras, 1998: Determination of rock types from pore throat radius and bulk volume water, and their relations to lithofacies, Carito North Field, Eastern Venezuela Basin. *Transaction SPWLA Thirty-Ninth Annual Logging Symposium*, May 1998, Keystone, Colorado, U.S.A., s OO.

Maghsood Abbaszadeh, Hikari Fujii og Fujio Fujimoto, 1996: Permeability prediction by hydraulic flow units – Theory and applications. *SPE Formation Evaluation*, December 1996, s. 263-271.

Martin O. Saar og Michael Manga, 1999: Permeability-porosity relationship in vesicular basalts. *Geophysical Research Letters*, Vol 26, January 1999, pp 111-114.

Ómar Sigurðsson, Ásgrímur Guðmundsson og Hjálmar Eysteinnsson, 1988: Nesjavellir. Kjarnar úr holu NJ-17. Orkustofnun, OS-88010/JHD-05 B, 34 s.

Ómar Sigurðsson og Valgarður Stefánsson, 1994: Forðafræðistuðlar. Mælingar á bergsýnum. Orkustofnun, OS-94049/JHD-28 B, 35 s.

Ómar Sigurðsson, 1998a: Forðafræðistuðlar. Reynslusamband til að breyta mældri gaslekt í vatnslekt. Orkustofnun, OS-98065, 10 s.

Ómar Sigurðsson, 1998b: Forðafræðistuðlar. Lekt og hárpípulíkan. Greinargerð Orkustofnunar Ómar-1998/01, 10 s.

Ómar Sigurðsson, Ásgrímur Guðmundsson, Guðmundur Ó. Friðleifsson, Hjalti Franzson, Steinar Þ. Guðlaugsson og Valgarður Stefánsson, 2000: Database on igneous rock properties in Icelandic geothermal systems. Status and unexpected results. Proceedings of the World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan, s. 2881-2886.

Omar Sigurdsson og Valgardur Stefansson, 2000: Porosity structure of Icelandic basalt. Geophysics in the Baltic Region: Problems and Prospects for the New Millennium. Tallinn, Estonia, s 11, (to be published).

S. Priisholm, B. L. Nielsen og O. Haslund, 1987: Fines migration, blocking, and clay swelling of potential geothermal sandstone reservoirs, Denmark. SPE Formation Evaluation, June 1987, s 168-178.

X. D. Jing, J. S. Archer og T. S. Daltaban, 1992: Laboratory study of the electrical and hydraulic properties of rocks under simulated reservoir conditions. Marine and Petroleum Geology, Vol 9, April 1992, s 115-127.

Yves Bernabé, 1995: The transport properties of networks of cracks and pores. J. Geophys. Res., Vol. 100, No. B3, s 4231-4241.