

**ORKUSTOFNUN**

**Rannsóknasvið**

## **FORÐAFRÆÐISTUÐLAR**

**Reynslusamband til að breyta  
mældri gaslekt í vatnslekt**

**Ómar Sigurðsson**

**Unnið fyrir auðlindadeild Orkustofnunar**

**1998**

**OS-98065**





**ORKUSTOFNUN**  
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verknr. 8-720105

**Ómar Sigurðsson**

## **FORÐAFRÆÐISTUÐLAR**

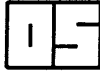
**Reynslusamband til að breyta  
mældri gaslekt í vatnslekt**

**Unnið fyrir auðlindadeild Orkustofnunar**

**OS-98065**

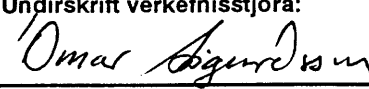
**Október 1998**

ORKUSTOFNUN: Kennitala 500269-5379 - Sími 569 6000 - Fax 5688896  
Netfang [os@os.is](mailto:os@os.is) - Heimasíða <http://www.os.is>

**ORKUSTOFNUN**

Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Lykilsíða

<b>Skýrsla nr.:</b> OS-98065	<b>Dags.:</b> Október 1998	<b>Dreifing:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Opin <input type="checkbox"/> Lokuð til
<b>Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill:</b> FORÐAFRÆÐISTUÐLAR Reynslusamband til að breyta mældri gaslekt í vatnslekt	<b>Upplag:</b> 25	
	<b>Fjöldi síðna:</b> 10	
<b>Höfundar:</b> Ómar Sigurðsson	<b>Verkefnisstjóri:</b> Ómar Sigurðsson	
<b>Gerð skýrslu / Verkstig:</b> Bergfræðirannsókn, áfangaskýrsla	<b>Verknúmer:</b> 720 105	
<b>Unnið fyrir:</b> Auðlindadeild Orkustofnunar		
<b>Samvinnuaðilar:</b> Samvinnuverk Orkustofnunar og Hitaveitu Reykjavíkur		
<b>Útdráttur:</b> Í skýrslunni er fjallað um mælingar á lekt bergsýna af íslensku bergi, og sérstaklega um mun sem fram kom í mælingum á lekt með gasi annars vegar og vatni hins vegar. Þetta er hluti af verkefninu 'Forðafræðistuðlar' sem m.a. felst í að mæla grop, lekt, varmaleiðni og eðlisþyngd í öllum íslenskum berggerðum við öll ummyndunarstig. Í tengslum við verkefnið var safnað um 500 bergsýnum til mælinga á hinum ýmsu eiginleikum, og fara rannsóknirnar að hluta til fram erlendis. Lekt er efniseiginleiki bergs og fræðilega séð ætti ekki að skipta máli hvaða vökvi eða gastegund er notuð við mælingar á henni, sbr. flest fræðirit um þetta efni. Raunin er hins vegar önnur og er gerð grein fyrir reynslusamböndum byggðum á mælanlegum eiginleikum bergs til að leiðrétta þetta misræmi. Þegar þeim er beitt á mælingar á íslensku gosbergi fæst samileg fylgni mældrar og reiknaðrar vatns-lektar. Athuganirnar benda til þess að mismunurinn sem fram kemur í lektarmælingum með vatni og gasi megi skýra sem eðlilega afleiðingu af gerð og uppbyggingu bergsins. Prófun á reynslusamböndunum bendir til að áætla megi vatns-lekt íslensks gosbergs út frá mælingum á gas-lekt með svipuðum áreiðanleika og fyrir setlög, að viðbætti mælingu á leirvísi.		
<b>Lykilorð:</b> Forðafræðistuðlar, gosberg, ummyndun, gaslekt, vatnslekt	<b>ISBN-númer:</b>	
	<b>Undirskrift verkefnisstjóra:</b> 	
	<b>Yfirfarið af:</b> VS	

## **EFNISYFIRLIT**

INNGANGUR	1
EFNISEIGINLEIKINN LEKT	1
REYNSLUSAMBAND TIL LEIÐRÉTTINGAR	2
LEKTARMÆLINGAR Á ÍSLENSKU GOSBERGI	3
NIÐURSTÖÐUR	8
HEIMILDIR	10

## **TÖFLUR**

1. Vatns-lekt mæld hjá CoreLab og DGU	4
---------------------------------------	---

## **MYNDIR**

1. Mæld gas- og vatnslekt fyrir 45 sýni	4
2. Hlutfall mældrar gas- og vatnslektar á móti gaslekt ásamt kennilínum frá mynd 1	5
3. Reiknuð vatnslekt allra sýna út frá mældri gaslekt fyrir hlutfallið = 1 borin saman við melda vatnslekt fyrir öll sýnin	6
4. Hlutfall reiknaðrar og mældrar vatnslektar á móti mældri vatnslekt	7
5. Reiknuð vatnslekt allra sýna út frá mældri gaslekt fyrir hlutfallið = 0,7 borin saman við melda vatnslekt fyrir öll sýnin	8
6. Hlutfall reiknaðrar og mældrar vatnslektar á móti mældri vatnslekt	9
7. Dreifing reiknaðrar vatnslektar á log-skala fyrir hlutföllin 1 og 0,7	9

## INNGANGUR

Undanfarin fimm ár hefur verið unnið að því að koma upp gagnabanka um eðliseiginleika íslensks bergs undir verkefnaheitinu *Forðafræðistuðlar*. Vinna og rannsóknir við verkefnið eru kostuð af Auðlindadeild Orkustofnunar með styrk frá Hitaveitu Reykjavíkur. Auk þess leggja erlendir samstarfsaðilar verkefninu lið á nokkrum sviðum. Í tengslum við þetta verkefni hefur um 500 bergsýnum verið safnað til að gera á þeim ýmsar mælingar. Á um 330 þessara bergsýna hafa verið gerðar grunnmælingar fyrir grop, lekt, og efnisþyngd. Önnur 130 sýni eru nú til mælinga á sömu eiginleikum hjá erlendri rannsóknarstofu. Hluti bergsýnanna hefur farið í sérhæfðari mælingar, eins og á varmaleiðni og hljóðhraða, og býður mælinga á raffleiðni. Þá hefur tæplega helmingur sýnanna farið í gegnum berg- og efnafræðirannsóknir. Yfirlit mælinga sem þegar er lokið og niðurstöður þeirra er að finna í skýrslunum “Forðafræðistuðlar. Mælingar á bergsýnum” eftir Ómar Sigurðsson og Valgarð Stefánsson og “Forðafræðistuðlar. Staða bergfræðirannsókna í lok 1997” eftir Hjalta Franzson o.fl.

Í þessari skýrslu verður eingöngu fjallað um mælingar á lekt bergsýnanna og sérstaklega þann mun sem kom fram í mælingum á lekt annars vegar með gasi og hins vegar með vatni. Í skýrslunni um mælingar á bergsýnunum (Ómar Sigurðsson og Valgarður Stefánsson, 1994) er bent á að marktækur munur er á lekt eftir því hvort mælingin er gerð með gasi eða vatni, en vísað er til þeirrar skýrslu um frekari lýsingar á mæliaðferðum og hugtökum. Þar sem lekt er efniseiginleiki bergs ætti fræðilega séð ekki að skipta máli hvaða vökvi eða gastegund eru notuð við mælingar á lekt, sama lektargildi ætti að fást innan skekkjumarka mæliaðferðarinnar. Þetta er einnig sú niðurstaða sem fæst við lestur flestra fræðirita um þetta efni. Samkvæmt þessu ætti lekt mæld með gasi, þar sem tekið hefur verið tillit til sameindastærðar og hreyfiorku gassins, að samsvara lekt mældri með vatni. Raunin er hins vegar önnur og verður nú litið nánar á það.

## EFNISEIGINLEIKINN LEKT

Mælingar á eðliseiginleikum bergs í rannsóknarstofu eru oftast gerðar á kjarna sem boraður hefur verið út úr stærra bergsýni. Stærð þessara kjarna er breytileg, en algengt er að þvermál þeirra sé um 25 mm (1 in) og lengdin 25-50 mm (1-2 in). Í umræðu um mælingar á kjörnum í fræðiritum og bókum síðustu ártugi ber mest á umfjöllun um bergsýni sem tekin hafa verið úr jarðlögum þar sem vænta mátti að olía eða jarðgas fyndist og er þá oftast um að ræða sýni úr setlögum. Til að rannsaka einstaka eðlisþætti bergsins og samband milli ákveðinna þátta þá hefur orðið algengt að velja sýni úr einsleitum jarðlögum. Þetta gerir það að verkum að hægt er að einangra betur þann eðliseiginleika sem verið er að skoða. Einsleitni og hreinleiki ákveðina jarðlaga (t.d. Berea sandsteins frá Bandaríkjunum) gerir það að verkum að bergsýni tekin úr því jarðlagi, þó ekki endilega á sama stað, gefa sambærilegar og endurtakanlegar niðurstöður hjá fjölda rannsækenda. Þetta ýtir enn frekar undir að þessi einsleitu jarðlög verða vinsælt rannsóknarefni og kenningar og fræði eru samin út frá niðurstöðum þeirra rannsókna. Bergsýni úr misleitum jarðlögum henta illa til almennra rannsókna og verða þannig útundan, þar sem staðbundinn breytileiki þeirra fær litla umræðu í tímans rás. Þannig má segja að mælingar, og kenningar byggðar á þeim, sem sýna að lekt mæld með gasi, og leiðrétt fyrir áhrifavöldum á þannig flæðiefni (Klinkenberg-áhrif, iðustreymi), sé sú sama og lekt mæld með vökva eigi fyrst og fremst við einsleitt og hreint efni. Niðurstöður þeirra athugana sýna jafnframt að lekt er efniseiginleiki.

Fyrir misleitt berg þarf lekt mæld með gasi alls ekki að gefa sömu niðurstöðu og lekt mæld með vökva. Hvort þessi staðreynd sé almenn vitneskja er óvíst því fáar fræðibækur um þessi efni minnst á hana. Hins vegar má finna umfjöllun um þessa staðreynd ef vel er leitað í fræðiritum (I. Juhasz 1986; S. Priisholm o.fl. 1987; X. D. Jing 1992). Ástæður fyrir mun milli mæliaðferða geta verið margvíslegar. Þar má nefna að þrýstingur á sýni er ekki nægilega mikill, en margir kjarnabútar þola ekki mjög háan þrýsting. Einnig getur sýnið sýnt ólíka hegðun eftir því hvort það

er þurrt eða blautt. Gasmæling er gerð á þurru sýni en vökvamæling eðlilega á blautu sýni. Ef sýnið inniheldur leirsteindir geta þær bundið vatn, gert það óhreifanlegt, þanist og minnkað þar með holrýmið sem var opið fyrir gasflæði. Einnig valda hárpípukraftar og bleyting steinda því að holrýmið minnkar sem opið er fyrir vökvarensli. Enn fleiri ástæður geta haft hér áhrif svo sem efnisfluttningur innan sýnisins (migration of fines). Allt þetta getur gert það að verkum að lekt mæld með vökva verður minni en lekt mæld með gasi.

## REYNSLUSAMBAND TIL LEIÐRÉTTINGAR

Í grein I. Juhasz frá 1986 eru tengd saman reynslusambönd eftir Swanson sem annars vegar lýsa sambandi gas-lektar við hámarkshlutfall kvikasilfursmettunar og hárpípuþrýstings, en þær stærðir fást úr mælingu á stærðardreifingu grops þegar kvikasilfri er þrýst inn í kjarnasýnið, og hins vegar sambandi vökva-lektar við sama hlutfall. Sambandið við gas-lekt er byggt á mælingum á um 320 kalk- og sandsteinssýnum úr rúmlega 70 jarðlögum. Á svipaðan hátt er sambandið við vökva-lekt byggt á mælingum á 56 kjarnasýnum frá 21 jarðlagi. Það samband lagaði Swanson síðar til að taka tillit til þrýstings á sýnið á grundvelli mælinga á 64 sýnum frá 34 jarðlögum. Í greininni eru þessi reynslusambönd tengd saman um sameiginlega þáttinn, það er hámarkshlutfalli kvikasilfursmettunar og hárpípuþrýstings.

Reynslusambönd Swanson (1981) líta þannig út;

$$k_g = 399 (S_K/P_c)_{\max}^{1,691} \quad \text{og} \quad k_b = 355 (S_K/P_c)_{\max}^{2,005} \quad (1)$$

og með síðari lagfæringum á reynslusambandinu fyrir vökva-lekt, þar sem tekið er tillit til spennuáhrifa á sýnið verður það:

$$k_b = a (S_K/P_c)_{\max}^c \quad (2)$$

I. Juhasz bætir svo við áhrifum vatns sem er bundið í leirsteindum í sýnunum, en það hefur áhrif á mælingar á kvikasilfursmettun með þrýstingi.

$$(S_K/P_c)_{\max}^* = (S_K/P_c)_{\max} (\phi_E/\phi_T)^{1,5} \quad (3)$$

Hann tengir síðan saman jöfnur 1 til 3 og kemur þá fram reynslusamband milli vökva-lektar og gas-lektar sem lítur þannig út:

$$k_b = A k_g^B (\phi_E/\phi_T)^C \quad (4)$$

Hámarkshlutfallið milli kvikasilfursmettunar og hárpípuþrýstings má finna auðveldlega með því að teikna mælingu á hárpípuþrýstingi með kvikasilfri á móti kvikasilfursmettun á log-log skala. Þá kemur fram kúrfa með gleiðbogalögun (hyperbola). Hámarkshlutfallið ætti þá að vera þar sem ímynduð lína undir 45° horni frá hnitmiðju sker gleiðbogann. Breyturnar A, B, og C í jöfnu 4 eru föll af þrýstingi og því hægt samkvæmt jöfnu 4 að breyta gas-lekt í vökva-lekt jafnvel fyrir aðstæður niðri í vökvakerfinu. Þetta er kostur því mæling á lekt með vökva er mun tímafrekari og dýrari en samsvarandi mæling með gasi, en þekking á lekt bergsins og möguleika þess til að flytja vatn við aðstæður í jarðhitakerfi er mjög áhugaverð. Breyturnar A, B, C, í jöfnu 4 eru gefnar sem:

$$A = a / 399^B \quad B = c / 1,691 \quad C = 1,5 c$$

Breyturnar a og c eru svo föll af virkri spennu (sjá jöfnu 2) og eru gefin veldisföll í grein I. Juhasz til að nálgast þær. Betri nálgun við sömu gögn fæst hins vegar með eftirfarandi jöfnum:

$$a = 355,6 + 8,939 * \exp(\sigma / 3822,7) \quad (5)$$

$$c = 2,58495 - 0,23754 * \ln(\sigma) + 0,0229 * \ln(\sigma)^2 \quad (6)$$

Hlutfallið ( $\phi_E/\phi_T$ ) inniheldur áhrif af seltu vökvans og leirs í berginu og er gefið þannig:

$$\phi_E/\phi_T = 1 - (0,6425 * S^{-0,5} + 0,22) * Q_V \quad (7)$$

Breyturnar í ofangreindum jöfnum tákna eftirfarandi:

$k_b$	Vökva-lekt (mD)
$k_g$	Gas-lekt leiðrétt fyrir Klinkenbergáhrifum (mD)
$\sigma$	Virk spenna sem sett er á kjarnasýnið meðan vökva-lekt er mæld (psia)
$\phi_T$	Heildargrop sem er virkt fyrir mælingu á gas-lekt
$\phi_E$	Virktgrop sem er fyrrnefnt heildargrop að frádregnu leirbundnu vatni o.fl.
$P_c$	Hárpípuþrýstingur (psia)
$Q_V$	Leirvísir (shaliness indicator) mælt í meq skiptanlegra katjóna í $\text{cm}^3$ holrýmis (grops). Leirvísinn er hægt að ákvarða á rannsóknarstofu en einnig er hægt að fá óbeint mat á honum frá borholumælingum (I. Juhasz, 1981)
$S$	Selta mettnarvökva við vökvamælingu (ígildi g/l NaCl)
$S_K$	Kvikasilfursmettun (rúmmálshlutfall)

Jafna 4 gildir fyrir gas-lekt minni en 160 mD. Fyrir gas-lekt á bilinu 160-660 mD verður leiðréttingin minna háð þrýstingi og breyturnar A, B, C eru reiknaðar eingöngu fyrir virka spennu 1000 psia, en það er þrýstingur sem algengur er við mælingar á rannsóknarstofu. Fyrir gas-lekt hærri en 660 mD einfaldast jafna 4 og verður:

$$k_b = k_g \left( \phi_E / \phi_T \right)^3 \quad (8)$$

Ofangreind reynslusambönd prófaði I. Juhasz (1986) síðan fyrir rúmlega 170 kjarnasýni úr 12 borholum í Norðursjónum og voru sýnin úr 6 sandsteinsjarðlögum. Samkvæmt þeim niðurstöðum ályktaði hann að ofangreind reynslusambönd væru góð og að stuðullinn fyrir mismun á reiknaðri og mældri vatns-lekt væri almennt minni en 2 (þ.e. staðalfrávik á log-log skala minna en 2). Hlutfallslega meiri skekkja gæti stafað af ónákvæmni í ákvörðun á  $Q_V$ , ónákvæmni í mælingunum á gas- og vatns-lekt ásamt einhverjum breytileika milli bergsýnanna.

## LEKTARMÆLINGAR Á ÍSLENSKU GOSBERGI

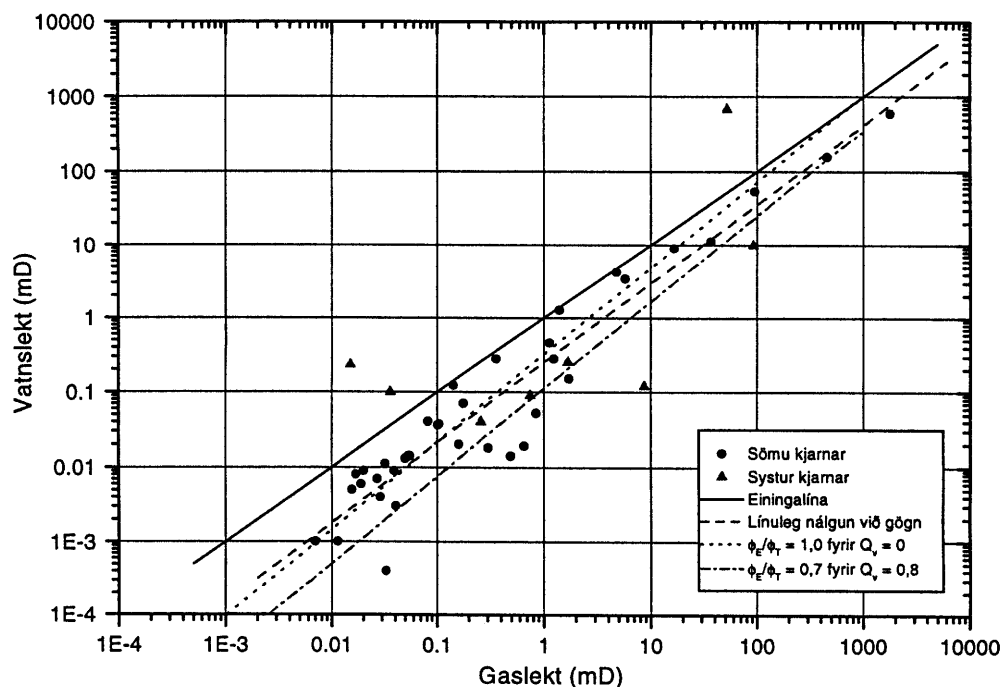
Gas-lekt hefur verið mæld fyrir um 330 kjarnasýni af íslensku gosbergi í tengslum við verkefnið *Forðafræðistuðlar*. Þar af hafa mælingar verið gerðar á tæplega 20 sýnum hjá tveim rannsóknarstofum sem eru Core Laboratories í Skotlandi og Danmarks Geologiske Undersøgelse í Danmörku. Það var gert til að kanna hvort niðurstöður mælinga væru háðar rannsóknarstofunni þar sem þær væru gerðar eða mæliaðferðunum. Mjög sambærilegar niðurstöður fengust frá báðum rannsóknarstofum, en nokkur dreifing var í lektarmælingum. Tafla 1 sýnir mælingar á fjórum sýnum þar sem vatns-lekt var mæld hjá báðum rannsóknarstofunum. Fyrir þessi fjögur sýni var vatns-lekt undir greiningarmörkum tækja hjá CoreLab, en þar fóru sýnin fyrst til mælinga. Til samanburðar er síðan reiknuð vatns-lekt út frá mældri gas-lekt. Alls hefur verið reynt að mæla vatns-lekt í rúmlega 60 sýnum. Þar af hefur gas- og vatnslektarmæling fengist á 45 sýnum, en 16 sýni höfðu vatnslekt sem var minni en þröskuldur fyrir næmni mælitækisins hjá CoreLab eða minni en 0,01 mD. Auk þessa eru nú til mælinga rúmlega 130 kjarnasýni og verður vatns-lekt mæld á einhverjum hluta þeirra. Mynd 1 sýnir mælda vatns-lekt teiknaða á móti mældri gas-lekt eftir að hafa verið leiðrétt fyrir Klinkenberg-áhrifum fyrir þessi 45 sýni. Doppurnar á mynd 1 merkja að gas-lekt og vatns-lekt eru mæld á sama kjarnasýninu. Þríhyrningarnir á sömu mynd merkja að mælingarnar á lekt eru gerðar á systurbútum. Þá er upprunalega kjarnasýninu skipt í tvennt og sitt



hvor mælingin gerð á sínum helmingnum fyrir sig. Fyrir misleit sýni veldur þetta meiri dreifingu í niðurstöðum. Ekki er gerð tilraun til að taka út sýni sem sýna óvenju mikið frávik, sem eiga í sumum tilvikum eðlilega skýringu.

**Tafla 1.** Vatns-lekt mæld hjá CoreLab og DGU.

Sýni	Gaslekt frá CoreLab (mD)	Vatnslekt frá CoreLab (mD)	Gaslekt frá DGU (mD)	Vatnslekt frá DGU (mD)	Reiknað frá CoreLab/DGU fyrir $(\phi_E/\phi_T)=1$ (mD)
E-28i	0,604	< 0,01	0,494	0,014	0,178 / 0,141
E-28ii	0,445	< 0,01	0,304	0,018	0,125 / 0,080
H-130ii	0,020	< 0,01	0,032	0,011	0,003 / 0,006
S-22ii	0,012	< 0,01	0,016	0,005	0,002 / 0,002

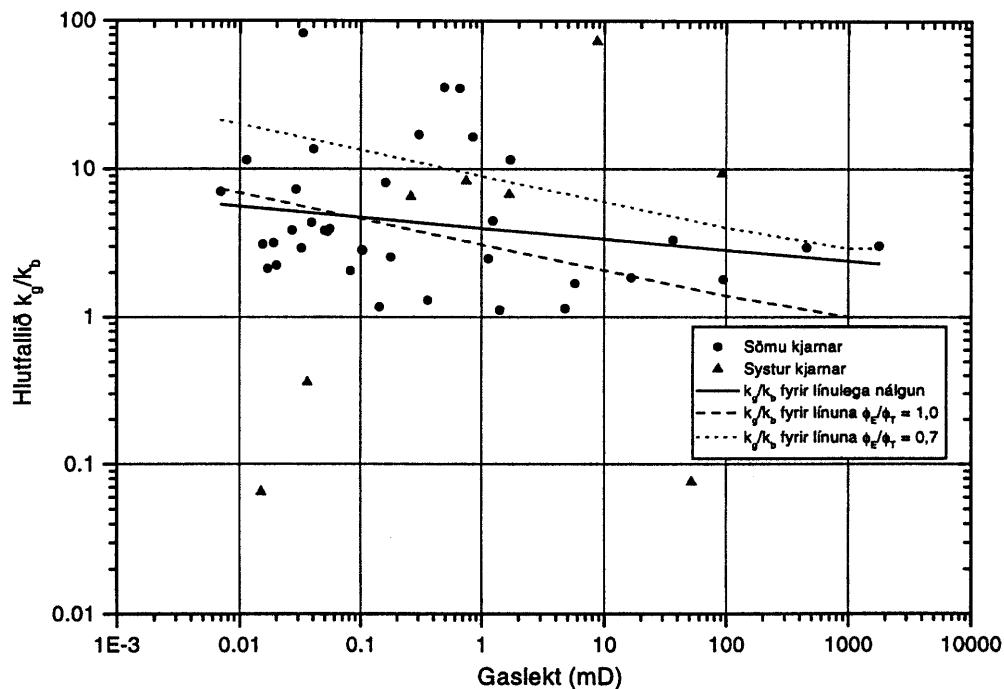


**Mynd 1.** Mæld gas- og vatnslekt fyrir 45 sýni.

Á mynd 1 eru einnig teiknaðar nokkrar kennilínur. Fyrst er að nefna einingalínuna, en ef einhlítt samband væri milli lektar mældri með gasi og vatni myndu mæliniðurstöður falla á og dreifa sér um þessa línu. Sú er ekki raunin heldur er vatns-lekt í flestum tilvikum minni en gas-lekt fyrir sama sýni. Á þetta hefur verið bent áður (Ómar Sigurðsson og Valgarður Stefánsson, 1994) og sýnt fram á að mismunurinn þar á milli hefði að meðaltali stuðulinn 2,9, þ.e. að vatns-lekt væri að meðaltali um þrisvar sinnum minni en gas-lekt fyrir sama sýni. Þessi mikli munur kom mönnum hér nokkuð á óvart og ekki fengust viðhlítandi skýringar frá rannsóknarstofunum sem gerðu mælingarnar. Meðan leitað var skýringa á þessum mismun var dregið úr mælingum á sýnunum því ekki var ljóst hvort gas-lekt væri marktæk stærð og lýsandi fyrir eiginleika bergsins eða hvort nauðsynlegt yrði að framkvæma mjög dýrar mælingar og mæla vatns-lekt í öllum sýnunum til að fá marktæk gildi fyrir þau. Þar var líka verið að hugsa um að fá marktæk gildi fyrir lekt sem samsvaraði lekt bergsins við raunaðstæður þess í jarðhitakerfi.

Næst er að nefna línu sem er fengin með línulegri bestun fyrir gögnin. Gögnin dreifa sér um þá línu og samsvarar línan þeirri úrvinnslu gagnanna sem áður hafði verið gerð og minnst er á hér á undan. Þá koma tvær línur reiknaðar samkvæmt reynslujöfnum 4 og 8 fyrir sitt hvort hlutfallið ( $\phi_E/\phi_T$ ) og gefnar aðstæður við mælingarnar á vatns-lekt. Fjallað verður nánar um þær síðar.

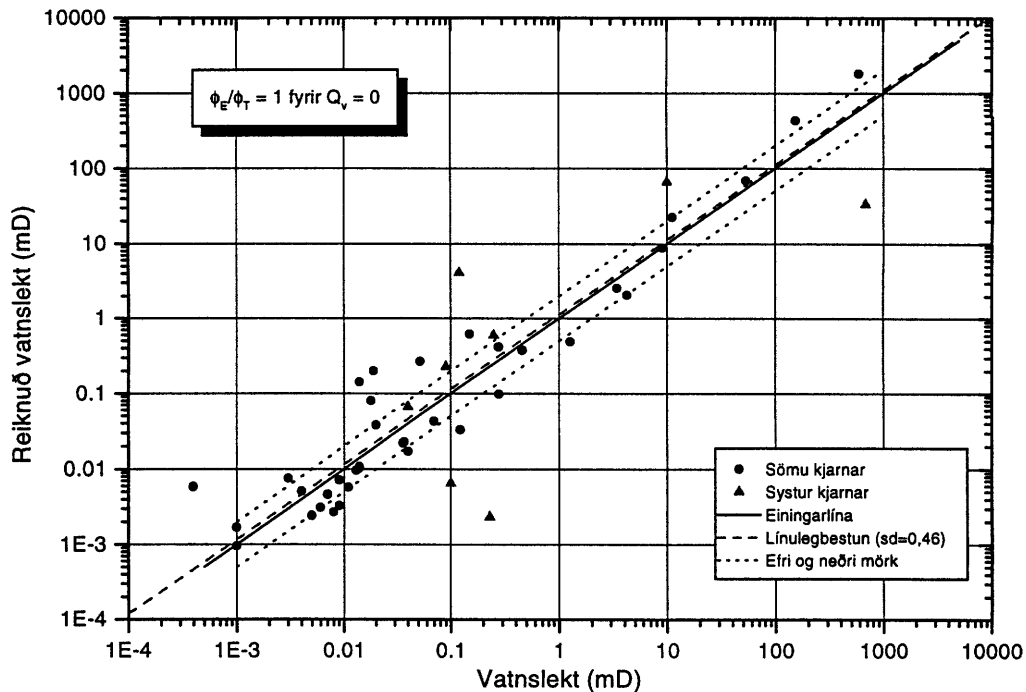
Mynd 2 sýnir svipaða hluti og mynd 1, nema þar er hlutfallið milli mældrar gas- og vatns-lektar teiknað á móti mældri gas-lekt. Fyrirnefndar línur eru einnig settar inn á mynd 2 þannig að hegðun þeirra kemur betur í ljós. Þar sést til dæmis að stuðull hlutfallslegs munar milli gas- og vatns-lektar vex úr rúmlega 2 fyrir háa lekt upp í rúmlega 5 fyrir mjög lága lekt, þegar gengið er út frá fylgninni milli þessara mælinga samkvæmt línulegri nálgun við gögnin. Svipað er að segja um hinar línurnar. Þá sést einnig að leiðréttingalínan fyrir hlutfallið ( $\phi_E/\phi_T$ ) = 1 fellur mjög nærri línu línulegrar bestunar fyrir gögnin fyrir lægri lektargildin. Leiðréttingalínan fyrir hlutfallið ( $\phi_E/\phi_T$ ) = 0,7 fellur hins vegar betur að sýnunum með mestri lekt, en nokkuð verr að sýnunum með litla lekt.



Mynd 2. Hlutfall mældrar gas- og vatnslektar á móti gaslekt ásamt kennilínum frá mynd 1.

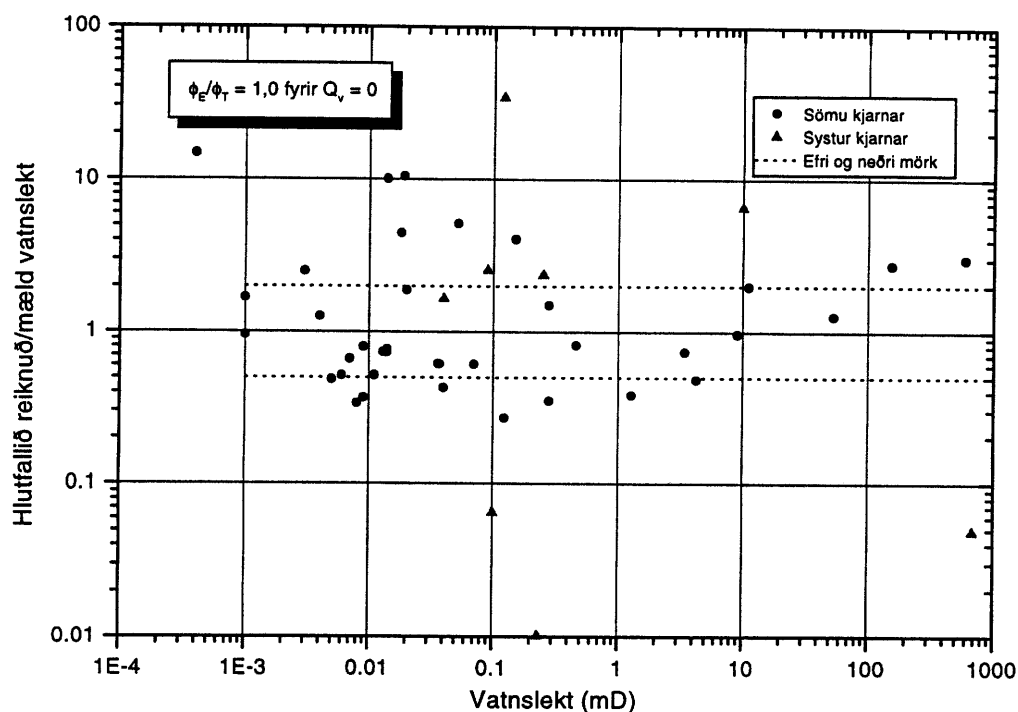
Við mælingar á vatnslekt var settur 400 psig (27,6 bar) þrýstingur utan á kjarnasýnið. Þetta er nauðsynlegt til að halda þéttihulsu að kjarnanum og til að verja hann skemmdum af þrýstingnum frá vökvunum sem er látinn renna í gegnum hann. Vökvinn sem notaður var við mælingarnar var saltblandað vatn með eftirfarandi söltum; 60% NaCl, 20% KCl og 20% CaCl, og samsvaraði styrkleiki þeirra 17153 ppm NaCl (17,153 g/l). Breyturnar a, c og A, B, C eru reiknaðar út fyrir þrýsting 415 psia. Fyrir svokallað hreint sýni, þ.e. sýni sem inniheldur nær engar leirsteindir, verður  $Q_v = 0$  í jöfnu 7 og hlutfallið ( $\phi_E/\phi_T$ ) = 1. Innihaldi sýnið leirsteindir verður  $Q_v > 0$ , selta vökvans kemur þá einnig inn og verður hlutfallið ( $\phi_E/\phi_T$ ) < 1. Stærðin  $Q_v$  hefur ekki verið mæld fyrir þau sýni sem hér eru notuð, en möguleiki er að mæla hana samhliða vatns-lektarmælingum sem gerðar verða í framtíðinni. Af myndum 1 og 2 sést að leiðréttingalínan fyrir hreint sýni fellur nærri línulegri bestun fyrir gögnin. Því var vatns-lekt reiknuð fyrir öll sýnin frá mældri gas-lekt samkvæmt þeim stuðlum. Einnig var athugað hvaða leiðréttingalína félli að sýnunum með mestri

lekt, en það eru sýni R-15 ( $k_b = 154,7$  mD) og R-10 ( $k_b = 594,2$  mD) sem flokkuð eru sem ferskt móbergstúff frá Helgafelli á Reykjanesskaga. Í ljós kom að leiðrétting með hlutfallið  $(\phi_E/\phi_T) = 0,7$  ( $Q_V = 0,8$  meq/cc) féll best að þeim mælingum. Vatns-lekt var því einnig reiknuð fyrir öll sýnin samkvæmt þeim stuðlum. Þess má geta að dreifing grops hefur verið mæld í einu sýni frá Ölkelduhálsi með því að þrýsta kvikasilfri inn í það og fékkst hlutfallið  $(\phi_E/\phi_T) = 0,93$  fyrir það sýni (ÖJ-08-1). Mæld gas-lekt í sýninu (ÖJ-08-1) var 0,053 mD og mæld vatns-lekt 0,014 mD. Reiknuð vatns-lekt fyrir það sýni með ofangreindum stuðlum verður 0,0083 mD.



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

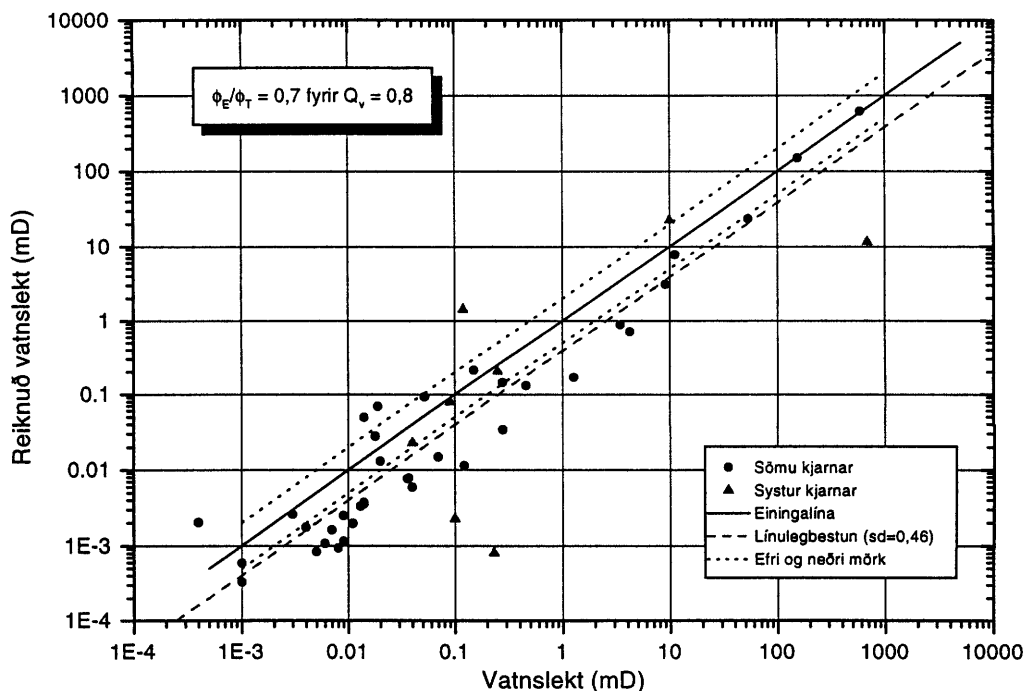
Mynd 3 sýnir samanburðinn á reiknaðri og mældri vatns-lekt samkvæmt jöfnum 4 og 8 og fyrir hlutfallið  $(\phi_E/\phi_T) = 1$ . Á myndinni er einnig sýnd línuleg bestun fyrir gögnin á myndinni ásamt efri og neðri mörkum þar sem hlutfallsmismunurinn milli reiknaðar og mældrar vatns-lektar er tveir. Af myndinni sést að reiknuð og mæld gildi dreifa sér nú um einingalínuna, samanber línulega bestun þeirra, sem sýnir að samband er milli reiknaðra og mældra gilda. Helmingur sýnana lendir innan gefinna skekkjumarka (skv. I. Juhasz, 1986) á mynd 3 og þriðjungur þeirra sýna sem eftir er liggur nærri skekkjumörkunum. Út af standa um 14 sýni af 45. Mynd 4 sýnir þetta sama en dreifing sýnana um einingalínuna sést betur (sjá einnig mynd 7). Samkvæmt jöfnum 4 og 8 er hægt að láta sýnin sem lenda fyrir ofan einingalínuna á mynd 3, en þau sýni eru fyrir neðan leiðréttingarlínuna fyrir hlutfallið  $(\phi_E/\phi_T) = 1$  á mynd 1, nálgast einingalínuna með því að minnka hlutfallið  $(\phi_E/\phi_T)$ . Þetta hlutfall minnkar ef allt holrými sem er opið fyrir gasflæði er ekki opið fyrir vökvaflæði. Prófað var hvert hlutfallið  $(\phi_E/\phi_T)$  þyrfti að vera svo sýnin með hæstu mælda vatns-lekt féllu við einingalínuna. Hlutfallið reyndist vera  $(\phi_E/\phi_T) = 0,7$  og var vatns-lekt reiknuð fyrir allan sýnahópinn með því hlutfalli. Mynd 5 sýnir þá niðurstöðu fyrir öll sýnin. Nokkur sýni sem áður voru við og rétt utan efri skekkjumarkanna á myndum 3 og 4 falla nú nærri einingalínunni. Það mætti túlka þannig að leirsteindir hafi áhrif á lektarmælinguna fyrir þau sýni. Mynd 6 sýnir svo betur dreifinguna um einingalínuna fyrir þetta tilvik. Sýni sem lenda við og utan efri skekkjumarkanna á myndum 5 og 6 mætti hugsanlega færa nær einingalínunni ef hlutfallið  $(\phi_E/\phi_T)$  væri minnkað frekar.



**Mynd 4.** Hlutfall reiknaðar og mældar vatnslektar á móti mældri vatnslekt. Einingalínan hefur hlutfallið einn. Brotalínurnar eru gefin skekkjumörk.

Hér hefur reikningum verið beitt á allt sýnasafnið fyrir bæði tilfellin sem hér eru reiknuð, en réttara hefði verið að beita reikningum í síðara tilfellinu aðeins á sýni sem voru við og utan efri skekkjumarka á myndum 3 og 4. Það voru hins vegar ekki forsendur fyrir því, þar sem ekki eru til mælingar á hlutfallinu ( $\phi_E/\phi_T$ ) fyrir sýnahópin, né mælingar á  $Q_v$  svo hægt væri að áætla hlutfallið. Ef til væru mælingar á öðrum hvorum þessara þátta væri jafna 4 reiknuð fyrir hvert einstakt sýni. Sú leiðrétting sem hér er kynnt með þessum reynslusamböndum nær ekki til þeirra sýna sem lenda utan neðri skekkjumarkanna á myndum 3 og 4. Fyrir þau sýni verður að leita annarra skýringa til að fá betra samræmi milli mældrar gas-lektar og vatns-lektar. Þarna er aðallega um að ræða þrjú systur sýni.

Á mynd 7 er sýnt hvernig reiknuð vatns-lekt dreifist fyrir allan sýnahópinn fyrir sitthvort hlutfallið ( $\phi_E/\phi_T$ ) sem notað var til reikninga. Bilin sem talin voru eru jafnstór á log-skala með miðju þar sem merkin koma á myndinni. Í aðalatriðum sýnir myndin það sama og áður er komið fram.

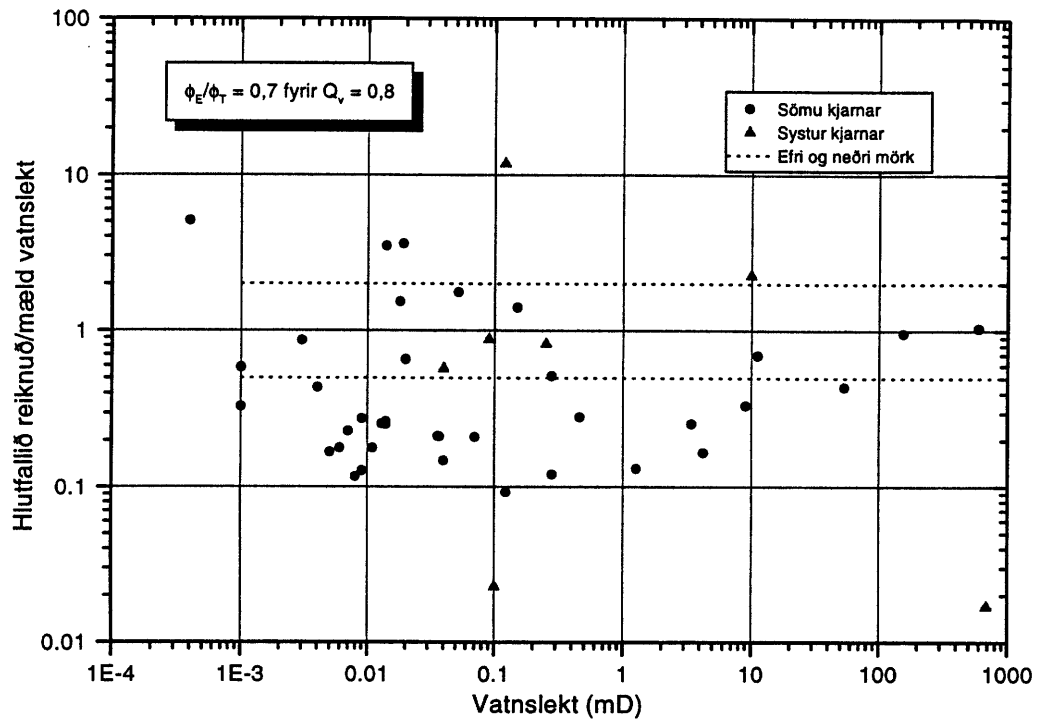


**Mynd 5.** Reiknuð vatnslekt allra sýna út frá mældri gaslekt fyrir hlutfallið  $(\phi_E/\phi_T) = 0,7$  borin saman við mældu vatnslekt fyrir öll sýnin.

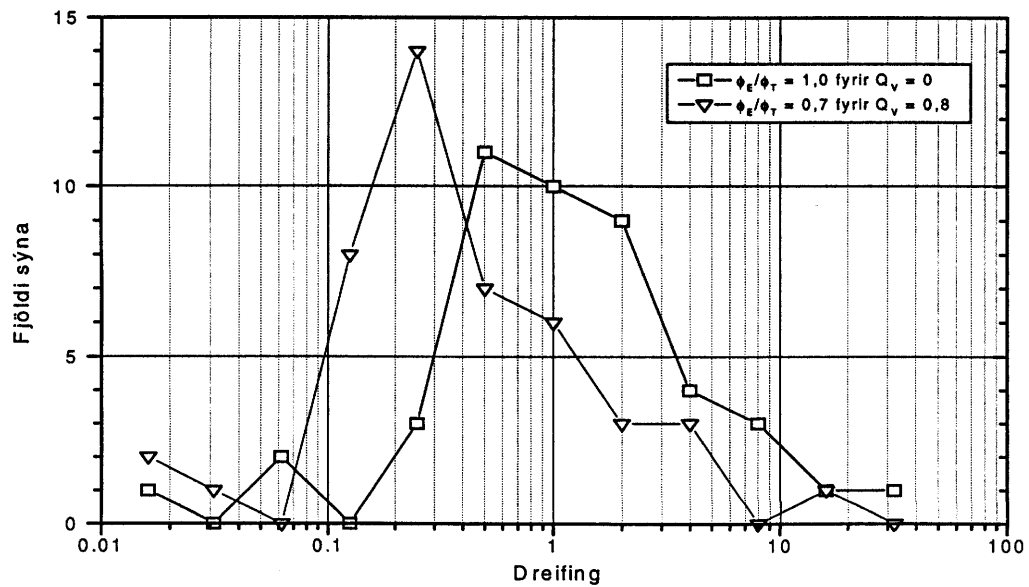
## NIÐURSTÖÐUR

Helstu niðurstöður sem draga má af þessari umfjöllun eru:

- Mismunur á lekt mældri með gasi og vökva er þekktur víða og virðist lítið á hann sem eðlilegan hlut. Lítið ber hins vegar á umfjöllun um þennan mismun í fræðiritum og bókum um rannsóknir á bergsýnum og ef minnst er á hann er hann oftast afgreiddur með einu orði án frekari skýringa, mислеitni. Einnig eru mjög fáar greinar sem fjalla um möguleika á að leiðrétta þennan mismun annað hvort með reynslusamböndum byggðum á rannsóknum eða strax við mælingu á sýninu með breyttum mæliaðferðum.
- Reynslusambönd byggð á mælanlegum eiginleikum bergs eru til sem taka á þeim mismun sem kemur fram milli mælinga á lekt með gasi og vökva. Þegar þeim er beitt á mælingar á íslensku gosbergi fæst sambærileg fylgni mældrar og reiknaðrar vatns-lektar eins og birt hefur verið fyrir mælingar á setlögum sem þau voru útbúin fyrir.
- Af þessari athugun bendir flest til þess að sá mismunur sem kemur fram í lektarmælingum með gasi og vatni eigi sér eðlilegar skýringar í gerð og uppbyggingu bergsins. Útkoma og eðli mæliaðferðarinnar er þannig háð gerð og uppbyggingu bergsins. Eiginleiki kjarnasýnisins eftir að það hefur verið þvegið og þurrkað fyrir gaslektarmælingu er því ólíkur eiginleika þess þegar það er blautt og yfirborðsspennur og hárpípukraftar halda hluta vatnsins kyrru.
- Í því sambandi er jafnvel bennt á að þvottur og þurrkun bergs sem inniheldur þráðkennt illít brjóti það niður og orsaki það að gas-lekt verði mun hærri en annars væri (I. Juhász, 1986).
- Prófun á fyrrnefndum reynslusamböndum, bendir til að áætla megi vatns-lekt íslensks gosbergs út frá mælingum á gas-lekt með svipuðum áreiðanleika og hægt er fyrir setlög. Aðeins þyrfti að bæta við mælingu á leirvísi fyrir sýnið.



**Mynd 6.** Hlutfall reiknaðar og mældrar vatnslektar á móti mældri vatnslekt. Einingalínan hefur hlutfallið einn. Þau sýni sem lenda innan gefina skekkjumarka uppfylla skilyrði þessarar leiðréttingar.



**Mynd 7.** Dreifing reiknaðar vatnslektar á log-skala fyrir umreikning með hlutfallið annars vegar  $(\phi_E/\phi_T) = 1,0$  og hins vegar  $(\phi_E/\phi_T) = 0,7$  fyrir öll sýnin.

## HEIMILDIR

1. B. F. Swanson, 1981: A simple correlation between permeabilities and mercury capillary pressures. *Journal of Petroleum Technology*, December 1981, s 2498-2504.
2. Hjalti Franzson, Guðmundur Ómar Friðleifsson, Ásgrímur Guðmundsson og Elsa G. Vilmundardóttir, 1997: Forðafræðistuðlar. Staða bergfræðirannsóknna í lok 1997. Orkustofnun Rannsóknarsvið, OS-97077, 57s.
3. Istvan Juhasz, 1981: Normalised  $Q_v$  - The key to shaly sand evaluation using the Waxman-Smits equation in the absence of core data. *Transactions SPWLA Twenty-Second Annual Logging Symposium*, Vol. I, June 1981, Mexico City, Mexico.
4. Istvan Juhasz, 1986: Conversion of routine air-permeability data into stressed brine-permeability data. *Transactions Tenth European Formation Evaluation Symposium*, April 1986, Aberdeen, UK.
5. Ómar Sigurðsson og Valgarður Stefánsson, 1994: Forðafræðistuðlar. Mælingar á bergsýnum. Orkustofnun, OS-94049/JHD-28 B, 35s.
6. S. Priisholm, B. L. Nielsen and O. Haslund, 1987: Fines migration, blocking, and clay swelling of potential geothermal sandstone reservoirs, Denmark. *SPE Formation Evaluation*, June 1987, pp 168-178.
7. X. D. Jing, J. S. Archer and 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, pp 115-127.