



Forðafraeðistuðlar. Lekt og hárpípulíkan

Ómar Sigurðsson

Greinargerð Ómar-98-01

FORÐAFRÆÐISTUÐLAR

Lekt og hárpípulíkan

INNGANGUR

Verkefnið *Forðafræðistuðlar* nær til margra verkþátta sem fjalla um rannsóknir á íslensku gosbergi. Fyrir verkefnið hefur verið safnað um 400 bergsýnum úr rofnum eldstöðvum sem ættu að líkjast bergi í virkum jarðhitakerfum. Þá hafa rúmlega 80 sýni verið tekin úr Öskjuhlíð til sérstakra rannsókna og um 10 sýni úr kjarna sem boraður var úr holu ÖJ-1 á Ölkelduhálsi. Alls eru þetta um 500 sýni sem safnast hafa í tengslum við verkefnið. Stór hluti þessa sýnahóps hefur þegar farið í gegnum ýmsar rannsóknir svo sem efnagreiningu, þunnsneiðaathugun, berggreiningu, og eðlisfræðilegar mælingar. Þær eðlisfræðilegu mælingar sem gerðar eru á sýnunum eru almennar grunnmælingar á lekt, gropi og efnisþyngd auk sérhæfðari mælingar á varmaleiðni, rafleiðni, hljóðhraða og stærðardreifingu grops. Á árinu 1998 verður almennum grunnmælingum nær lokið fyrir þennan sýnahóp. Vísað er til skýrslna og greinargerða sem komið hafa út áður í tengslum við verkefnið um yfirlit rannsókna, fyrirliggjandi niðurstöður, og skilgreiningar á mælingum og hugtökum.

Í skýrslu sem fjallar um mælingar á bergsýnunum og kom út 1994 (Ómar Sigurðsson og Valgarður Stefánsson, 1994) er bent á sterka fylgni mælinga á lekt við hárpípulíkon. Hárpípulíkon eru ein gerð líkana sem notuð eru til að skýra og líkja eftir rennsli í gegnum bergsýnið. Í því líkani er gert ráð fyrir að líkja megi rennslisleiðinni við samsafn grannra pípna sem hlykkjast gegnum bergsýnið. Í sinni einföldustu mynd gerir líkanið ráð fyrir að pípunar hafi eitt op þar sem rennslið fer inn í bergið og annað op þar sem rennslið fer út úr berginu. Síðan eru til líkön af sama meidi sem taka tillit til flóknari rennslisleiða. Þessi líkön og fjöldi annarra leitast að því að finna ákveðið samband milli mælanlegra stærða og um leið að taka tillit til uppbyggingar bergsins. Miserfitt er að mæla hina ýmsu eðliseiginleika bergsins og er það að nokkru háð þekktari mælitækni. Þannig er hægt að mæla beint eða óbeint til dæmis hljóðhraða, rafviðnám og grop jarðlaga í borholu, en verra er að mæla lekt þeirra. Hins vegar með gefnu líkani mætti reikna lektina fyrir jarðlagið innan ákveðina skekkjumarka. Í þessari greinargerð er litið nánar á fylgni lektar við hárpípulíkon og þær stærðir sem þau byggja á.

LÍKÖN FYRIR LEKT OG GROÞ

Fjöldi líkana hefur verið gerður í tímans rás til að lýsa sambandi lektar við aðrar mælanlegar stærðir. Allflest líkönin tengja lektina við eðliseiginleikann grop, það er holrýmið í berginu, auk annarra eðlisþátta eftir því hvernig líkönin eru til orðin. Eitt af elstu líkönunum sem tengir saman lekt og grop var sett fram af Kozeny árið 1927 (S. J. Pirson, 1958), en það tengir saman lögmál Poiseuille um rennsli í pípu og lögmál Darcy um rennsli í gropnu efni. Að viðbættum rangalastuðli (tortuosity factor) sem tekur tillit þeirrar staðreyndar að rennslisleiðin gegnum bergsýnið er yfirleitt lengri en lengd sýnisins má skrifa þetta samband þannig:

$$k = \frac{D^2}{32(L_e/L)^2} \times \phi \quad (1)$$

Jafna 1 er almenn líking fyrir hárpípulíkan, þar sem k er lekt, D er meðalþvermál hárpípna (gropa), ϕ er grop og $(L_e/L)^2$ er rangalastuðull með L_e sem meðallengd rennislisleiðar á móti lengd sýnis (L). Hægt er að festa rangalastuðulinn í jöfnu 1 við eitthvert gildi án þess að valda mikilli skekkju í ákvörðun á lekt, til dæmis með áætlun út frá bergviðnámsstuðli (formation factor) samanber eftirfarandi líkingu;

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

þar sem bergviðnámsstuðullinn F er hlutfall rafviðnáma mettaðs bergs og mettnar vökvans. Þó ber að hafa í huga að rangalastuðull ákvarðaður út frá mælingum á gropi og rafviðnámi þarf ekki að vera sá sami og fyrir vökvarennslis því leiðir rafstraums og vökvarennslis þurfa ekki að vera þær sömu (C. David, 1993; Y. Bernabé, 1995). Gropið er hægt að ákvarða með ýmsum mælingum til dæmis með nifteindamælingu eða hljóðhraðamælingu. Hins vegar er erfitt að ákvarða rennislisþvermálið. Því hafa ýmsar útgáfur af jöfnu 1 sést þar sem þvermálshlutinn er skrifaður á ýmsa vegu til að tengja hann öðrum mælanlegum eiginleikum. Þar má einkum nefna hlutföll milli yfirborðsflatarmáls gropa á móti ýmsum rúmmálseiginleikum eins og rúmmáli sýnis, gropi, og efnisrúmmáli (grain volume).

Skýringar á breytunum í jöfnum 1 og 2 eru eftirfarandi:

D	Þvermál (m)
F	Bergviðnámsstuðull (R_o/R_w)
k	Lekt sýnis (m^2) ($1 \text{ Darcy} = 0,9865 \times 10^{-12} m^2 \approx (1 \mu m)^2$)
L	Lengd sýnis (m)
L_e	Meðallengd rennislisleiðar (m)
R_o	Rafviðnám 100% mettaðs bergs (Ωm)
R_w	Rafviðnám vökva sem mettar berg (Ωm)

Nýrri líkön sem tengja lekt við grop byggja á tví- og þrívíðum netum rennislisleiða. Algengt er að net rennislisleiða sé reglulegt þannig að bergmassinn er hafður þéttur og gerður úr reglulegum ferningum eða teningum. Meðfram þeim eru síðan misvíðar rásir, stundum með stærra holrými á tengipunktum þeirra. Þannig líkön henta eingöngu fyrir tölvuvinnslu og verður þá fyrst að vera til viðurkennt eða samþykkt hermílikan svo hægt sé að áætla lektina út frá mældum stærðum. Ekki verður fjallað neitt nánar um þessi líkön hér, en bent á að þau eru að mörgu leiti hliðstæð eldri hárpípulíkönum.

SAMBAND LEKTAR OG GROPS

Í umræðu um samband lektar og grops í skýrslu um mælingar á bergsýnunum frá 1994 (Ómar Sigurðsson og Valgarður Stefánsson, 1994) voru óþekktu stærðirnar í jöfnu 1 settar öðru megin við jafnaðarmerkið og þekktu stærðirnar hinum megin. Þegar þetta var svo teiknað á móti mældri gaslekt kom fram sterk fylgni sem sýndi að einföld hárpípulíkön gætu skýrt lekt í gosbergi og áætlað hana með sæmilegri nákvæmni ef hægt væri að meta þvermál grop-hálsa í berginu. Prófun á öðrum afbrigðum og líkönum leiddi ekki í ljós eins sterka fylgni við lekt. Þessi niðurstaða verður skoðuð nánar hér á eftir.

Ef frá eru talin bergsýnin frá Öskjuhlíð, sem safnað var til sérstakra mælinga, þá hafa 263 sýni farið í gegnum grunnmælingar á lekt, gropi og efnisþyngd. Af þeim reyndust 97 sýni hafa minni lekt en þurfti fyrir næmni mælitækjana það er minni en 0,001 mD ($1 \mu D$), en þar eru einnig talin með örfá sýni sem skemmdust áður en hægt var að mæla lekt í þeim. Mælingar eru því til fyrir 166 sýni núna. Fyrir árslok 1998 munu væntanlega bætast við mælingar fyrir flest þau sýni sem eftir eru. Mynd 1 sýnir mælda gaslekt (óleiðrétt fyrir Klinkenbergáhrifum) teiknaða á móti virku gropi fyrir öll 166 sýnin. Þau sýni sem höfðu gaslekt undir greiningarmörkum var gefin gaslektin 0,9 μD

og teiknuð þannig á mynd 1 til að sjá dreifingu þeirra með gropi. Af myndinni sést að flest sýnin sem eru með gaslekt undir greiningarmörkum eru með grop minna en 5%, nokkur eru með grop á bilinu 5-10%, en sýnin með herra grop en 10% reyndust vera þau sýni sem skemmdust í mælingu. Vissa fylgni má greina á mynd 1 milli lektar og grops en fylgnin er veik, sérstaklega fyrir grop minna en 20%. Einnig er eftirtektarvert við mynd 1 að með minnkandi gropi (<20%) þá virðist draga úr minnkun lektar. Þetta er öfugt við það sem mætti búast við, en það er að lekt minnkaði hraðar með minnkandi gropi þar til lekt yrði minni en greiningarmörk við eitthvert ákveðið grop. Hugsanlegt er að þannig hegðun kæmi fram ef athugað væri samspil vatnslektar og grops.

Eins og áður hefur verið sagt er hægt að áætla rangalastuðulinn og festa hann við eitthvert gildi án þess að valda óhóflegri skekkju á mati fyrir lekt eða rennslisþvermáli, samanber jöfnu 1. Algennt er að sjá gildi fyrir rangalastuðulinn á bilinu rúmlega 1 til 3 í greinum sem fjalla um rennslisleiðir í bergi (sjá t.d. C. David, 1993). Fyrir margar gerðir af sandsteini hefur fengist þokkaleg samsvörun milli reiknaðrar og mældrar lektar með rangalastuðulinn $(L_e/L)^2 = 1,73$ og er það gildi notað hér með jöfnu 1. Með því að umsnúa jöfnu 1 má reikna rennslisþvermál fyrir gefinn rangalastuðul og mælda lekt og grop. Hér var reiknað fyrir mælda gaslekt (óleiðrétt fyrir Klinkenbergáhrifum) og mælt virkt grop. Ástæður fyrir því vali eru aðallega að fleiri þannig mælingar eru fyrirliggjandi. Leiðrétting á gaslekt fyrir Klinkenbergáhrifum minnkar reiknað þvermál aðeins. Rétt er að velja virkt grop því það er sá hluti holrýmisisins sem er samtengdur og því opinn fyrir rennsli. Með þessum forsendum var rennslisþvermálið reiknað samkvæmt jöfnu 1. Myndir 2 til 8 sýna niðurstöður þeirra reikninga teiknaða á móti gropi og gaslekt. Á myndunum er einnig búið að skipta sýnunum í berggerðir. Sýnin sem voru með gaslekt undir greiningarmörkum eru ekki sýnd á myndum 2 til 8, en rennslisþvermál þeirra reiknast á bilinu 0,01-0,15 μm og er væntanlega nokkru minna, þar sem lektin fyrir flest þeirra sýna er minni en 0,9 μD sem hér var sett á þau.

Mynd 2 sýnir reiknað þvermál á móti virku gropi. Í reynd lítur mynd 2 eins út og mynd 1, nema á mynd 2 sést hvernig dreifingin er fyrir einstakar berggerðir. Þar sést að basalþraun dreifast um allt svið mælds grops og reiknaðs þvermáls. Einnig að móberg dreifist um mest allt sviðið, en gropið er herra en fyrir basalþraunin. Aðrar berggerðir hópast á þrengra bil. Líkt og fyrir lekt áður, er veik samsvörun milli reiknaðs þvermáls og mælds grops. Mynd 3 sýnir sama og mynd 2 nema nú er gropið á log-skala og fylgni við grop verður ekkert greinanlegri. Á mynd 4 er reiknað þvermál teiknað á móti reiknaðri efnisþyngd. Af myndinni er ekki hægt að greina neitt samband á milli þessara eiginleika. Þó virðist af myndinni sem reiknað þvermál fyrir súrt berg sé óháð efnisþunga. Einnig virðist vera tilhneiging að reiknað þvermál vaxi með efnisþunga fyrir basaltinnskot.

Á mynd 5 er reiknað þvermál teiknað á móti mældri gaslekt og kemur þar fram sterk fylgni milli þessara eiginleika. Fyrir þau sýni þar sem herma má rennslisleiðirnar um þau með hárpípulíkani, þá virðist lektin aðallega vera háð þvermáli rennslisleiðarinnar. Af mynd 5 sést að nokkur sýni sýna frávik frá hárpípulíkaninu og eru það sýni úr basalþraunum og basaltinnskotum. Sýni sem tilheyra berggerðunum móberg, súrt berg og setberg falla mjög vel að hárpípulíkaninu, óháð ummyndun í sýnunum. Mynd 6 sýnir sýni af berggerðinni basalþraunlög og eru þau nú greind upp í ummyndunarstig. Þá sést að þau sýni sem sýna frávik frá hárpípulíkaninu hafa ummyndunarstigin smektít/zeolítar og klórít/epidót. Eins var gert fyrir berggerðina basaltinnskot og er það sýnt á mynd 7. Þar sést að frávikid er aðallega fyrir ummyndunarstigin klórít/epidót og epidót/amfiból. Þegar þessi ummyndunarstig fyrir basalþraunlög og basaltinnskot eru tekin frá kemur fram mynd 8 og sést þar vel hversu sterk fylgni er milli þessara eiginleika.

Meðalþvermál hárpípna, sem stjórnar lekt fyrir þau 166 sýni sem hér eru til athugunar, reiknast á bilinu 0,03 - 80 μm og reiknast meðalþvermál í stærri hluta sýnana vera undir 1 μm . Ef gaslekt væri leiðrétt fyrir Klinkenbergáhrifum myndi það minnka reiknað meðalþvermál. Í rauninni verður það sem hér er kallað meðalþvermál hárpípna að meðalþvermáli fyrir grop-hálsana í berginu, það er þess hluta rennslisleiðarinnar sem tengir saman stærri holrýmin í berginu. Neðri mörk

bylgjulengdar fyrir sýnilegt ljós eru talin vera um 0,4-0,7 μm þannig að reiknað meðalþvermál rennslisleiða gegnum mörg sýnin er við og undir þeim mörkum. Öll sýnin sem höfðu lekt undir greiningarmörkum reiknast með rennslisþvermál undir þessum mörkum. Fyrir þessi sýni er því ógerningur að greina grop-hálsana í venjulegri smásjá. Nokkuð er um það að sýni með mikið grop hafi litla lekt þannig að það er vídd rennslisleiðana milli stóru holrúmma sem ræður rennslisgetu bergsins. Í nýlegri þunnsneiðaathugun á sýnum frá Öskjuhlíð kom í ljós að stóru holrýmin (blöðrunar) í sýnunum voru oft nær lokuð af gleri en minni holrýmin inn á milli kristalla voru opin fyrir rennsli (Guðmundur Ó. Friðleifsson og Elsa G. Vilmundardóttir, 1998).

Niðurstöður nýlegrar rannsóknar New England Research (NER) á átta sýnum, sem valin voru úr því safni sem búið var að fara í gegnum grunnmælingar, benda til að ráðandi rennslisleiðir í öllum átta sýnunum líkist pípum, en auk þess sýna nokkur sýnana rennslisleiðir sem hafa meiri sporöskjulögun (Joel Johnson og Greg N. Boitnott, 1998). Hlutfallið milli hringásanna í sporöskjunni getur verið allt að 1 á móti 100 en nær þó ekki að flokkast sem sprunga. Þvermál langás í sporöskju rennslisleiða í þessum átta sýnum reiknast hjá NER á bilinu 0,05-100 μm . Þetta er nær sama span og ofangreindir reikningar benda til. Þá benda niðurstöður NER til að þvermál grop-hálsanna hópist á frekar þröngt bil fyrir hvert sýni eða með öðrum orðum að vídd grop-hálsanna í hverju sýni er af svipaðri stærð. Sambærileg niðurstaða fékkst í mælingu á þvermálsdreifingu gropa fyrir sýni úr kjarna frá Ölkelduhálsi þegar dælt var inn í það kvikasilfri (Ivar Erdal, 1995). Önnur niðurstaða hjá NER er að lekt, hljóðhraði og bergviðnámsstuðull eru lítið háð álagsþrýstingi (confining pressure) á sýnið fyrir flest þessara átta sýna. Þetta styður að rennslisleiðirnar gegnum sýnin líkjast meir pípum en sprungum því samþjappanleiki sprungna eða sporöskju með mikinn mun milli hringásana er meiri en pípna. Við aukinn álagsþrýsting myndu sporöskjur eða sprungur þrengjast, en það hefði áhrif á fyrrnefndar stærðir og þær yrðu háðar álagsþrýstingnum.

Í nýlegri skýrslu (Ómar Sigurðsson, 1998) er sýnt að nota megi reynslusamband sem fundið var með mælingum á setbergi til að áætla vatnslekt út frá mældri gaslekt. Fyrirnefnt reynslusamband er fundið með því að tengja saman mælingar á lekt við mælingar á stærðardreifingu grops og hefur því samsvörun við hárpípulíkan. Einnig kom í ljós að lekt setbergsins var háð álagsþrýstingi og er hægt að láta breyturarnar í reynslusambandinu taka tillit til þess. Niðurstöður NER og sú fylgni sem hér er sýnd við hárpípulíkan bendir til að lekt í íslensku gosbergi sé ekki eins háð álagsþrýstingi og lekt í setbergi. Þannig virðist ekki þurfa að laga breyturarnar í fyrirnefndu reynslusambandi fyrir álagsþrýstingi. Breyturarnar ákvarðast þá út frá 1000 psia virkri spennu, en hún samsvarar því lágmarksálagi sem almennt er notað við mælingar á sýnunum. Niðurstöður skýrslunnar benda til að hægt sé að nota reynslusambandið til að áætla vatnslekt íslensks gosbergs út frá mælingum á gaslekt með svipuðum áreiðanleika og hægt er fyrir setlög. Niðurstöðurnar stangast ekki á við það sem hér hefur komið fram, en samkvæmt því virðist almennt ekki þurfa að laga breyturarnar í reynslusambandinu fyrir álagsþrýstingi, hvorki fyrir álagi sem sett er á sýni við mælingar né þegar mæliniðurstaða er tengd aðstæðum í jarðhitakerfi. Athugun á lekt fyrir mismikinn álagsþrýsting er þó enn stutt á veg komin fyrir íslenskt gosberg.

Þrátt fyrir að ekki sé mikil fylgni greinanleg milli lektar og þeirra eðlisþátta sem nú hafa verið mældir í sýnunum, þ.e. grop og eðlisþungi, þá var gerð tilraun til að reikna gaslekt út frá þessum eiginleikum. Til þess var notað forrit sem kallast GRACE, en það finnur kjör samsvörun (optimal correlation) milli háðrar breytu eins og lektar við safn óháðra breyta eins og grops og eðlisþunga (G. Xue o.fl., 1997). Þetta er gert með svokallaðri kennistærðarlausri vörpun (non-parametric transformation) háðrar og óháðra breyta. Kennistærðarlaus vörpun merkir að ekki er gert ráð fyrir neinni falllögum milli háðrar og óháðra breyta og varpanirnar eru eingöngu gerðar á grunni gagnarunanna. Samsvörunin 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 lögum eða öðrum athugnum ólíkt því sem svokölluð taugakerfi geta (neural networks). Mynd 9 sýnir niðurstöðuna

frá þannig reikningum eftir að margliða hefur verið felld að öllum varpföllunum. Margliðurnar sem notaðar voru við gerð myndar 9 eru eftirfarandi;

$$\text{den_Tr} = 6,3135d^4 - 58,686d^3 + 201,26d^2 - 300,94d + 164,85$$

$$\text{por_Tr} = -4,1961E-6 \phi^4 + 3,7358E-4 \phi^3 - 8,0234E-2 \phi^2 + 5,7667E-2 \phi - 4,8555E-1$$

$$\text{SumTr} = \text{den_Tr} + \text{por_Tr}$$

$$\ln_k = -5,2561E-1 (\text{SumTr})^2 + 4,6683 (\text{SumTr}) - 1,1644$$

þar sem d er eðlisþungi (g/cm^3), ϕ er grop (%) og \ln_k er náttúrulegur lygri af lekt (mD). Fylgnin sem kemur fram á mynd 9 er tiltölulega veik enda hér notaðir eðlisþættir sem áður hefur verið sýnt að lekt hafi litla fylgni við. Hins vegar má búast við að mælingar á rafleiðni í sýnunum bæti þessa fylgni verulega. Ástæður þess eru að sýnt hefur verið fram á mjög sterka fylgni milli lektar, bergviðnámsstuðuls og rennslisþvermáls í rennslislíkönunum sem hafa samsvörun við hárpípulíkön eins og hér hefur verið skoðað (Y. Bernabé, 1995).

NIÐURSTÖÐUR

Helstu niðurstöður sem draga má af þessari umfjöllun eru:

- Fyrir þau sýni af íslensku gosbergi þar sem grunnmælingar eru til, er fylgni lektar og grops veik, sérstaklega fyrir grop minna en 20%.
- Ekki er greinanleg fylgni milli lektar og efnisþunga.
- Sterk fylgni við lekt kemur fram fyrir hárpípulíkön. Fylgnin bendir til að lektin um bergið stjórnist af þvermáli grop-hálsa, þ.e. þeirra rása sem tengja saman stærri holrýmin.
- Meðalþvermál grop-hálsa eða rennslisleiða í sýnunum reiknast á bilinu 0,03 - 80 μm og reiknast þvermál í stórum hluta sýnanna undir 1 μm og jafnvel minna en bylgjulengd sýnilegs ljóss (0,4-0,7 μm).
- Nýlegar rannsóknir á mörgum eðlisþáttum í átta sýnum sem gerðar voru hjá NER sýna að flest þessara átta sýna eru lítið háð álagsþrýstingi. Það styður þá skoðun að rennslisleiðirnar í berginu nálgist að vera pípulaga. Ráðandi þvermál rennslisleiða í þessum átta sýnum reiknast á sama bili og fyrir allan sýna hópinn.

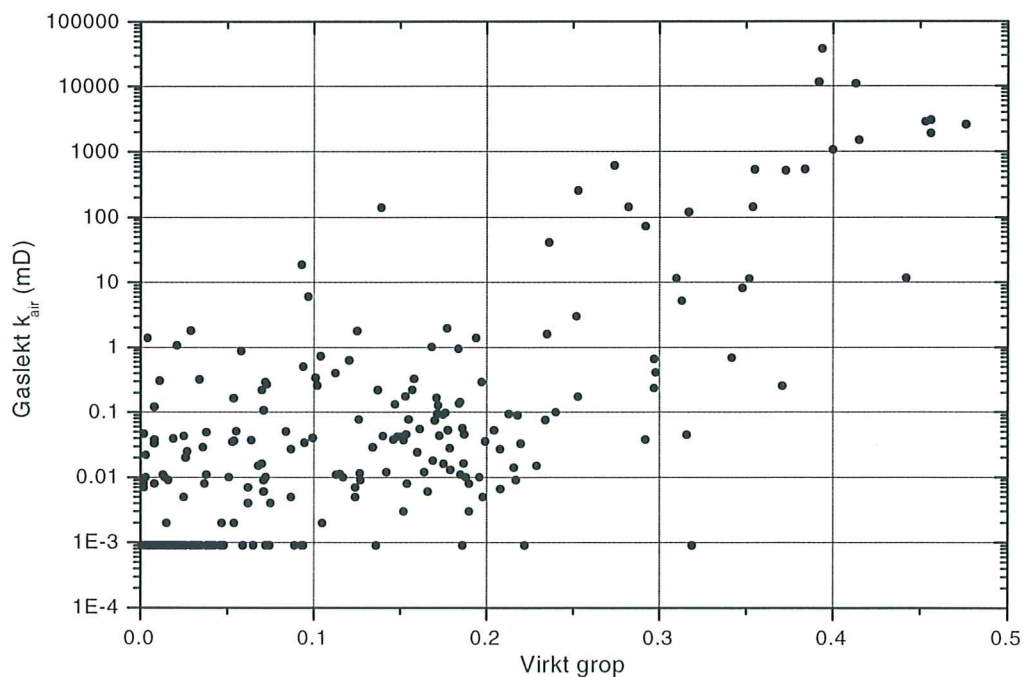
HEIMILDIR

1. Christian David, 1993: Geometry of flow paths for fluid transport in rocks. J. Geophys. Res., Vol. 98, No. B7, s 12267-12278.
2. Guðmundur Ómar Friðleifsson og Elsa G. Vilmundardóttir, 1998: Reservoir parameters TCP-project. A thin-section study of the Öskjuhlíð samples. Orkustofnun, GeoScience Division, OS-98041, 15 s.
3. Guoping Xue, Akhil Datta-Gupta, Peter Valkó and Tom Blasingame, 1997: Optimal transformations for multiple regression: Application to permeability estimation from well logs. SPE Formation Evaluation, June 1997, s 85-93.
4. Ivar Erdal, 1995: Capillary pressure measurement by mercury injection on core sample from Well ÖJ-1. In conventional and special core analysis for Orkustofnun. DGU Service report no. 59, 1995.
5. Joel Johnson and 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.

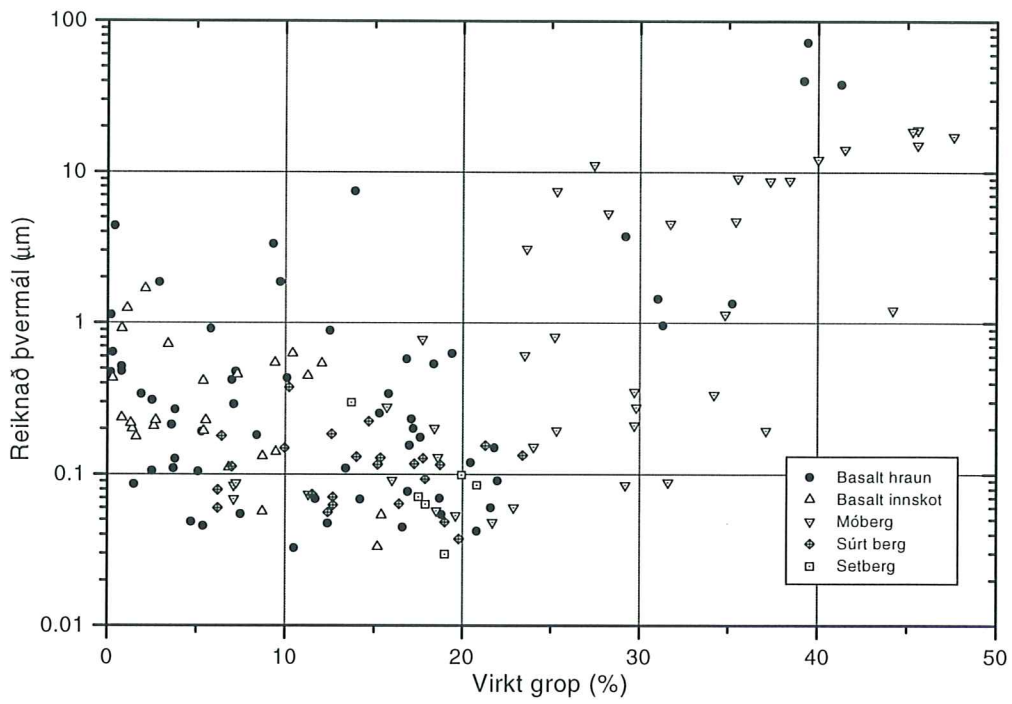
6. Ómar Sigurðsson og Valgarður Stefánsson, 1994: Forðafræðistuðlar. Mælingar á bergsýnum. Orkustofnun, OS-94049/JHD-28 B, 35 s.
7. Ómar Sigurðsson, 1998: Forðafræðistuðlar. Reynslusamband til að breyta mældri gaslekt í vatnslekt. Orkustofnun, OS-98065, 10 s.
8. S. J. Pirson, 1958: Oil reservoir engineering. McGraw - Hill Book Company, Inc. Sec. Ed., 735 s.
9. Yves Bernabé, 1995: The transport properties of networks of cracks and pores. J. Geophys. Res., Vol. 100, No. B3, s 4231-4241.

Reykjavík 3. Desember 1998

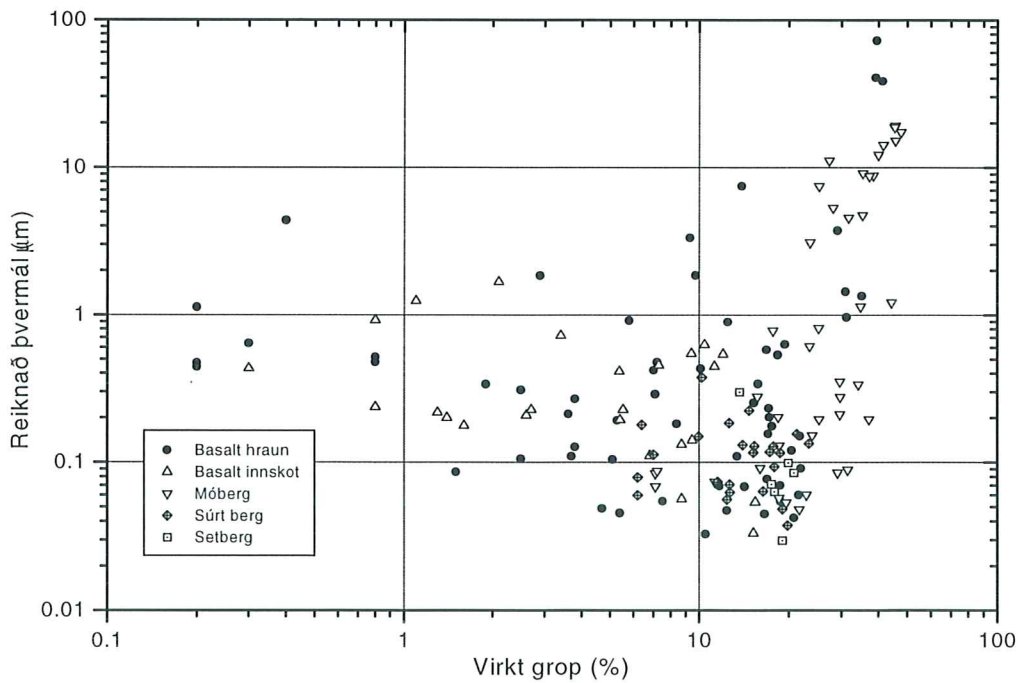
Ómar Sigurðsson



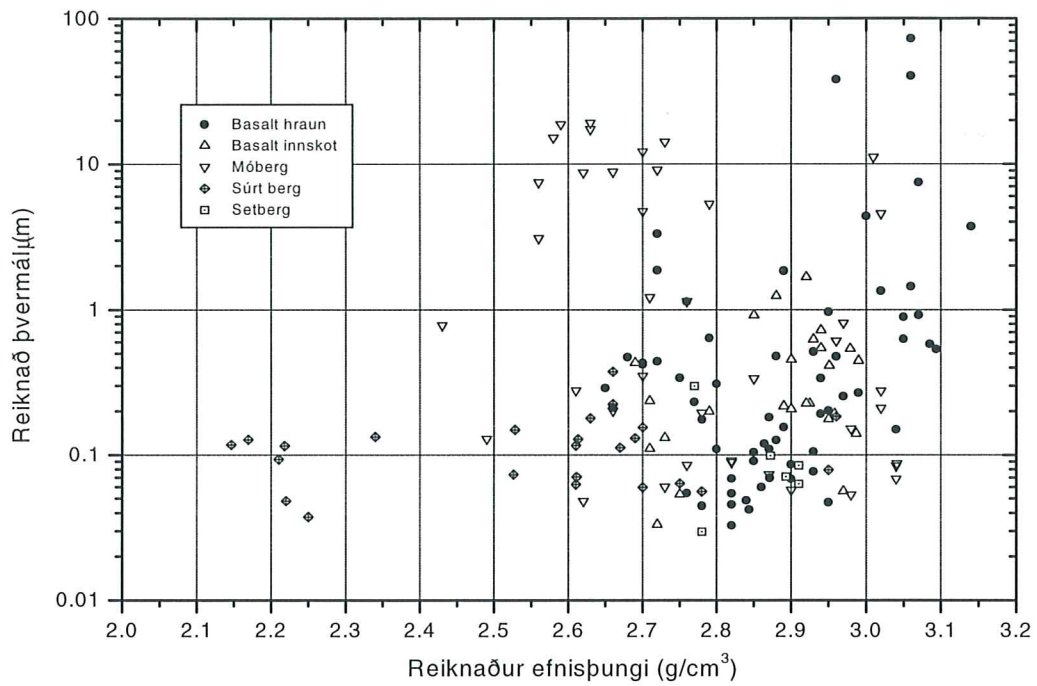
Mynd 1. Gaslekt, sem er óleiðrétt fyrir Klinkenbergáhrifum, á móti virku gropi fyrir 166 sýni. Sýni með gaslekt undir greiningarmörkum ($<0,001$ mD) (eða ómæld) var gefin gaslektin $0,0009$ mD og eru 97 sýni teiknuð þannig á myndina. Af þessum 97 sýnum reyndust 4 vera ómæld vegna skemmda og hafa þau grop hærra en $0,1$ (10%).



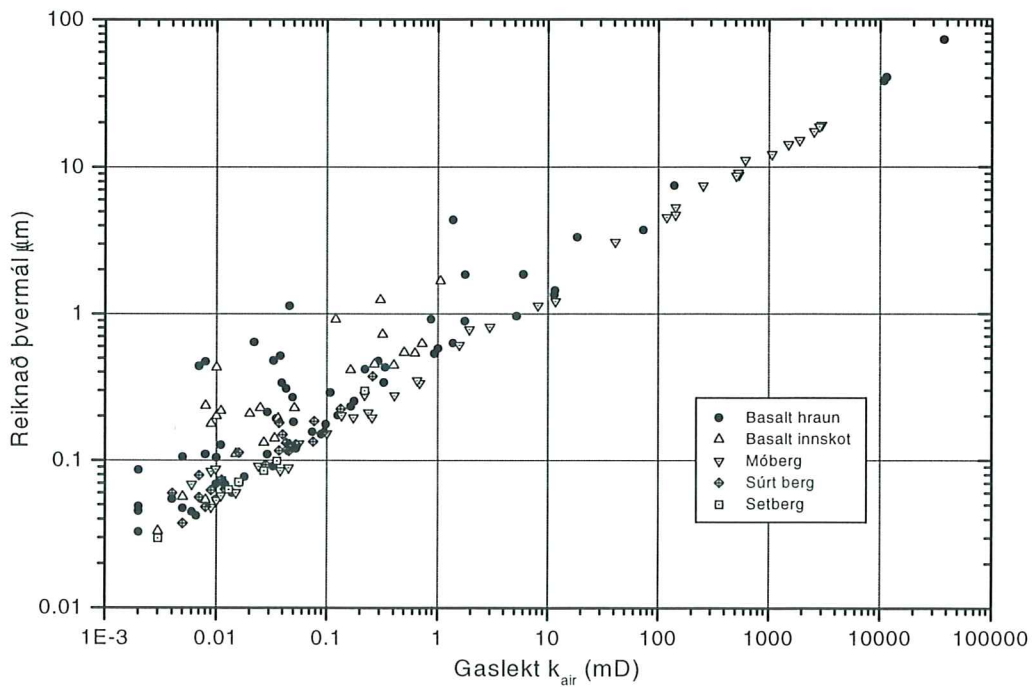
Mynd 2. Reiknað þvermál samkvæmt jöfnu 1 og dreifing þess með virku gropi. Dreifingin fyrir einstakar berggerðir kemur einnig fram.



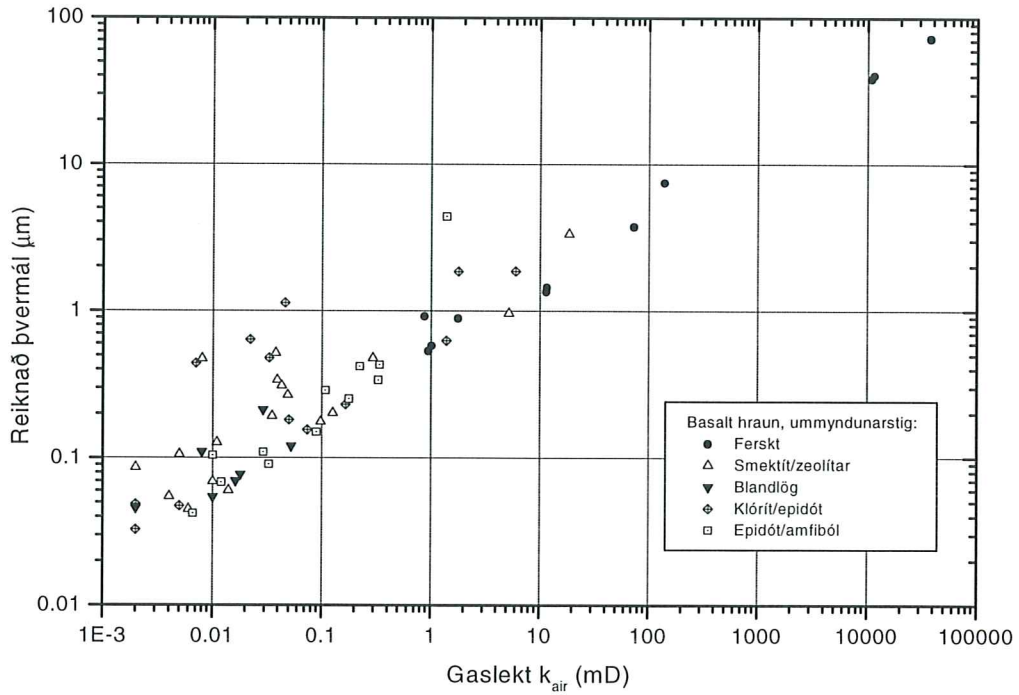
Mynd 3. Reiknað þvermál og dreifing þess með virku gropi. Sama og mynd 2 nema grop er hér á log-skala.



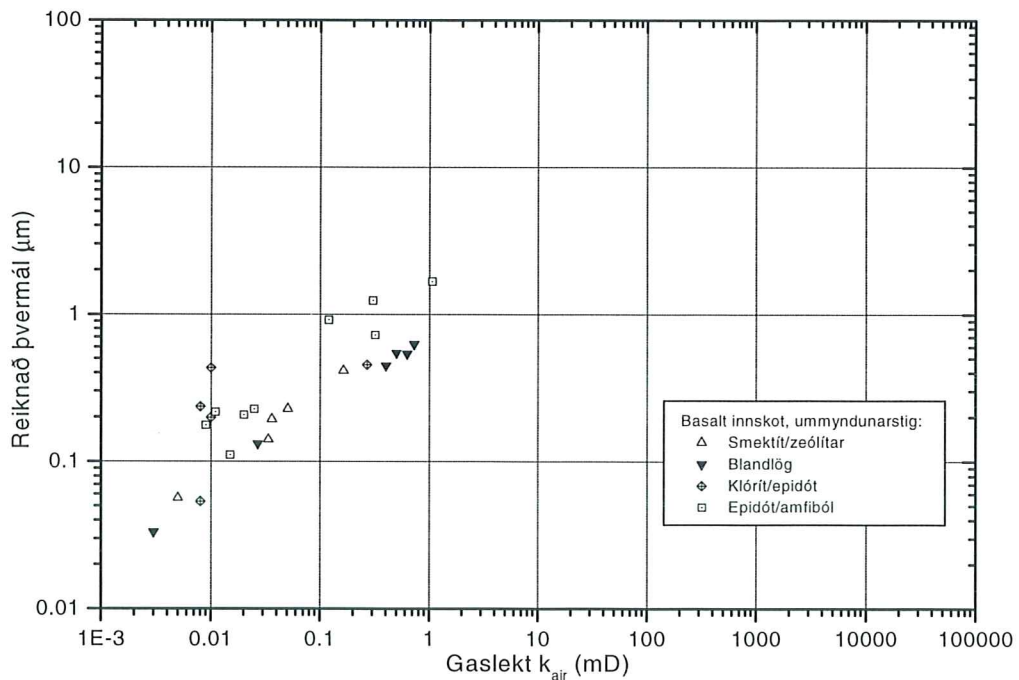
Mynd 4. Reiknað þvermál samkvæmt jöfnu 1 og dreifing þess með efnisþunga. Dreifingin fyrir einstakar berggerðir kemur fram.



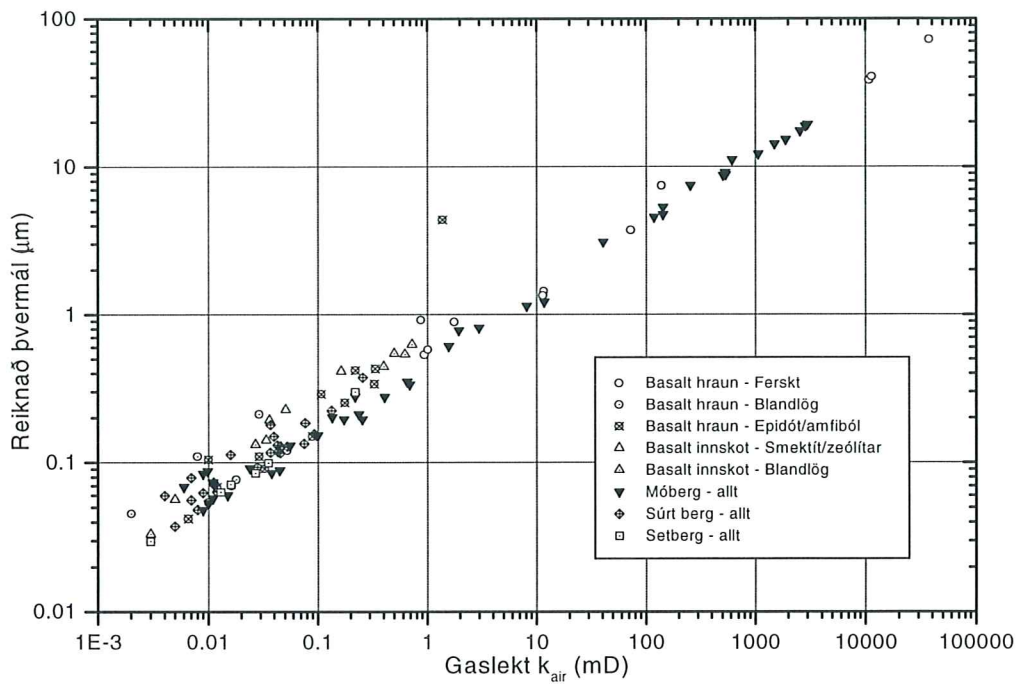
Mynd 5. Reiknað þvermál samkvæmt jöfnu 1 á móti mældri gaslekt og dreifing þess fyrir einstakar berggerðir. Gaslektin er óleiðrétt fyrir Klinkenbergáhrifum.



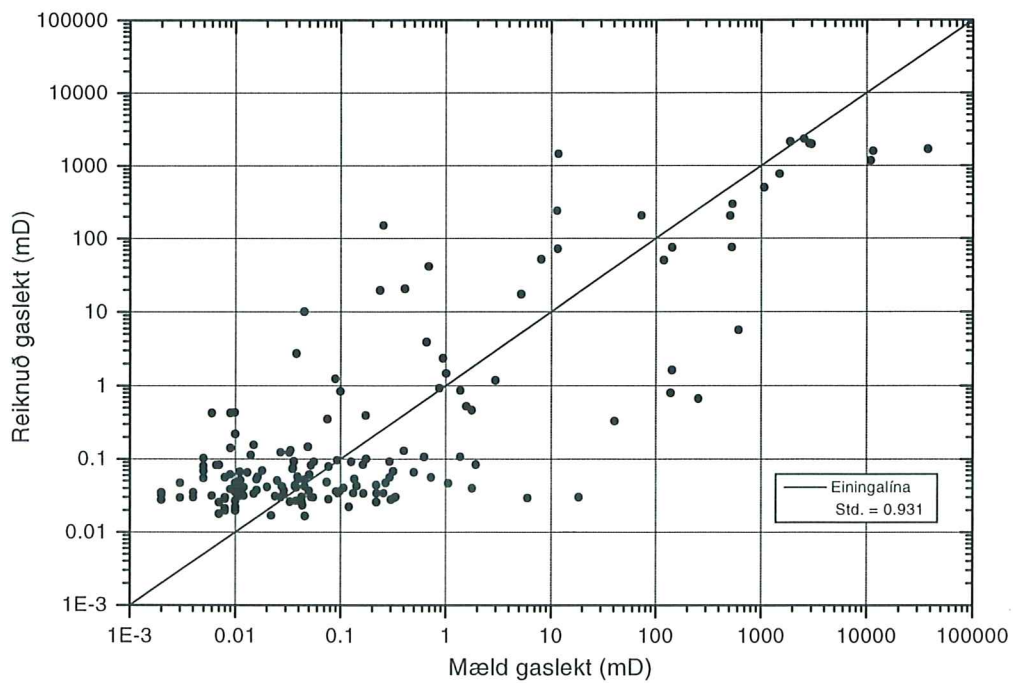
Mynd 6. Reiknað þvermál á móti gaslekt fyrir basalthraun sem skipt hefur verið upp eftir ummyndunarstigi sýnanna.



Mynd 7. Reiknað þvermál á móti gaslekt fyrir basaltinnskot sem skipt hefur verið upp eftir ummyndunarstigi sýnanna.



Mynd 8. Samband lektar og rennslisþvermáls fyrir öll sýni úr þeim flokki berggerðar og ummyndunarstigs sem sýna sterka fylgni við hárpípulíkan.



Mynd 9. Reiknuð gaslekt út frá mælingum á gropi og eðlisþunga á móti mældri gaslekt. Gefið er staðalfrávik á log-skala um einingalínuna.