



**ORKUSTOFNUN**

**Auðlindadeild**

# **Rannsóknir á kjarna úr holu ÖJ-1, Ölkelduhálsi**

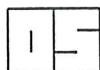
**Hjalti Franzson  
Helga Tulinius**

**Samvinnuverk Orkustofnunar og  
Orkuveitu Reykjavíkur**

**1999**

**OS-99024**





**ORKUSTOFNUN**  
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verknr. 3-720106

**Hjalti Franzson**  
**Helga Tulinius**

## **Rannsóknir á kjarna úr holu ÖJ-1 Ölkelduhálsi**

**Samvinnuverk Orkustofnunar og Orkuveitu Reykjavíkur**

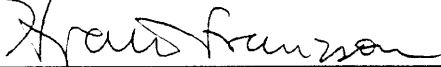
**OS-99024**

**Apríl 1999**

ISBN 9979-68-035-0

ORKUSTOFNUN: Kennitala 500269-5379 - Sími 569 6000 - Fax 568 8896  
Netfang os@os.is - Heimasíða <http://www.os.is>



<b>Skýrsla nr:</b> OS-OS-99024	<b>Dags:</b> Apríl 1999	<b>Dreifing:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Opin <input type="checkbox"/> Lokuð til
<b>Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill:</b> Rannsóknir á kjarna úr holu ÖJ-1, Ölkelduhálsi	<b>Upplag:</b> 40	
	<b>Fjöldi síðna:</b> 68	
<b>Höfundar:</b> Hjalti Franzson Helga Tulinius	<b>Verkefnisstjóri:</b> Hjalti Franzson	
<b>Gerð skýrslu / Verkstig:</b> Rannsókn borkjarna	<b>Verknúmer:</b> 3-720106	
<b>Unnið fyrir:</b>		
<b>Samvinnuaðilar:</b> Samvinnuverk Orkustofnunar og Orkuveitu Reykjavíkur		
<b>Útdráttur:</b> Í skýrslunni er gerð grein fyrir rannsóknum á kjarna af um 790 m dýpi í holu ÖJ-1 á Ölkelduhálsi. Holan, sem er 1035 m djúp, var boruð til að kanna háhitakerfið á svæðinu. Kjarninn var tekinn til að kanna forðafræðilega eiginleika bergsins og er hluti af verkefninu "Rannsókn jarðhita til raforkuvinnslu." Margvíslegar rannsóknir voru gerðar á kjarnanum, s.s. á bergfæði og ummyndun, bergefnafræði og forðafræðilegum eiginleikum (poruhluta, lekt, viðnámi o.fl.), og þessar athuganir bornar saman við jarðlagamælingar. Reynt er að túlka hin ýmsu gögn í heild. Hluti rannsóknarinnar var unninn af jarðfræði- og jarðtæknistofnunum í Danmörku og eru skýrslur þeirra birtar sem viðaukar. Samanburður á niðurstöðum mælinga á þessu kjarna og sýna í verkefninu "Forðafræðistuðlar" sýnir að um gott samræmi er að ræða. Helstu niðurstöður eru að öðru leyti þær að kjarninn er samkynja móberg sennilega þóleíft og ummyndun bergsins alger og það er alveg holufyllt. Efnasamsetning er töluvert breytileg. Náinn skyldleiki er á milli poruhluta og lektar. Efnagreining á poruvökva í kjarnanum er í litlu samræmi við efnafræði jarðhitavökvans í holunni og grunnvatns. Poruhlutamælingum á kjarna og nifteindamælingum í holunni ber vel saman.		
<b>Lykilorð:</b> Ölkelduháls, borhola, kjarni, mælingar, bergfræði, forðafræðistuðlar	<b>ISBN-númer:</b> 9979-68-035-0	
	<b>Undirskrift verkefnisstjóra:</b> 	
	<b>Yfirfarið af:</b> VS, PI	

## MYNDIR

1. Ölkelduhálskjarni. Sýnastaðir í eðlisfræðimælingum, efnagreiningum og þunnsneiðum	21
2. Ljósmynd af kjarna	22
3. Einfaldað jarðlagasnið, dreifing ummyndunarsteinda og ummyndunarbelti í holu ÖJ-1	23
4. Einfaldað jarðlagasnið, jarðlagamælingar og ummyndunarbelti	24
5. Samanburður á CO <sub>2</sub> við þunnsneiðaskoðun og efnagreiningar	25
6. Samband SiO <sub>2</sub> og Na <sub>2</sub> O. Samanburður sýna frá Hafnarfj.-Skarðsh. og Ölkelduhálskjarna	26
7. Samband SiO <sub>2</sub> og CaO. Samanburður sýna frá Hafnarfj.-Skarðsh. og Ölkelduhálskjarna	26
8. Samband SiO <sub>2</sub> og K <sub>2</sub> O. Samanburður sýna frá Hafnarfj.-Skarðsh. og Ölkelduhálskjarna	27
9. Samband SiO <sub>2</sub> og TiO <sub>2</sub> . Samanburður sýna frá Hafnarfj.-Skarðsh. og Ölkelduhálskjarna	27
10. Samanburður á virkum poruhluta og heildarporuhluta	28
11. Samband gaslektar og heildarporuhluta	28
12. Samband vökvalektar og heildarporuhluta	29
13. Samband virks poruhluta og viðnáms (R <sub>o</sub> )	29
14. Samband "formation factor" og poruhluta	30
15. Mismunur mælds heildarporuhluta og þunnsneiðaporuhluta sem fall af ummyndun	30
16. Samband gaslektar og ummyndunar	31
17. Reiknuð Klinkenberglekt sem fall af ummyndun	31
18. Samband vökvalektar og ummyndunar	32
19. Samband gaslektar og útfellinga	32
20. Samband vökvalektar og útfellinga	33
21. Samband virks poruhluta og útfellinga	33
22. Samband heildarefnisþyngdar og ummyndunar	34
23. Fjöldi pora sem fall af þvermáli pora	34
24. Samband mælds poruhluta og reiknaðs poruhluta út frá nifteindamælingu	35
25. Samband mælds poruhluta og reiknaðs poruhluta út frá síaðri nifteindamælingu	35

## TÖFLUR

1. Einkenni kjarnatökubúnaðar	6
2. Tímaþættir í kjarnaborun	6
3. Ummyndun, útfellingar í þunnsneiðum	8
4. Kalsít í bergi og samanburður við CO <sub>2</sub> í efnagreiningum	9
5. Efnagreiningar á kjarna	12
6. Mælingar á forðafræðieiginleikum kjarna	13
7. Efnagreining á poruvatni í kjarna og samanburður við borholuvökva og grunnvatn á Ölkelduhálsi	13
8. Samanburður á gaslekt, leiðréttri gaslekt & vatnslekt á milli Ölkelduháls og annarra alymmyndaðra íslenskra sýna	14

## ÁGRIP

Skýrslan fjallar um rannsóknir á kjarna sem tekinn var á um 790 m dýpi í holu ÖJ-1 á Ölkelduhálsi. Kjarninn er úr móbergi og tekinn innan klórít-epidót ummyndunarbeltis. Efna- og þunnarneiðagreining bendir til basaltsamsetningar. Breytileg efnasamsetning einstakra kjarnabúta bendir til að töluverðir efnaflutningar hafi orðið í berginu af völdum ummyndunar. Vatn bundið í ummyndunarsteindum bergsins er að meðaltali um 2,7% af berginu. Jákvæð tengsl eru á milli poruhluta annars vegar og gaslektar og vökvalektar hins vegar, en viðnám lækkar með auknum poruhluta. Gott samræmi er á milli gagna úr verkefninu um forðafræðistuðla og í Ölkelduhálskjarnanum. Mæling á tíðni og þvermáli pora bendi til að meðalþvermál sé minna en 0,1 mikrómetri og benda viðnámsmælingar á kjarnanum til sprungulektar. Þokkalegt samræmi er á milli reiknaðs poruhluta út frá nifteindamælingu og mælds poruhluta á kjarnasýnum.

## 1. INNGANGUR

Árið 1994-1995 lét Hitaveita Reykjavíkur bora holu ÖJ-1 á Ölkelduhálsi til að kanna eiginleika háhitakerfisins þar. Holan varð 1035 m djúp. Kjarni var tekinn á rúmlega 790 m dýpi til að kanna nánar forðafræðilega eiginleika bergsins í jarðhitakerfinu. Kjarnatakan og rannsóknir á kjarnanum er hluti af verkefni um rannsókn jarðhita til raforkuframleiðslu. Í þessari skýrslu er fjallað um margvíslegar rannsóknir á kjarnanum. Fyrst er tæpt á kjarnatökunni sjálfri og meginþáttum jarðfræðinar, en síðan fjallað um bergfræði og ummyndun, bergefnafræði, mælingar á ýmsum forðafræðilegum eiginleikum kjarnans (poruhluta, lekt, viðnámi o.fl) og samanburð þessara mælinga við jarðlagamælingar. Reynt hefur verið eftir fongum að túlka hinar ýmsu gerðir gagna í heild í ljósi forðafræðieiginleika bergsins.

## 2. KJARNATAKA OG JARÐFRÆÐI HOLU ÖJ-1

Samkvæmt verklýsingu um borverkið var áætlað að taka 2-3 borkjarna í vinnsluhluta holu ÖJ-1 (>783 m dýpi), en vegna mikils skoltaps í holunni rétt neðan vinnslufóðringar og hruns í botni reyndist ekki unnt að taka kjarna nema á einum stað, þ.e. á 794,5-798,4 m dýpi. Notað var rússneskt kjarnatökutæki og var með í för sérfræðingur frá fyrirtækinu sem framleiðir það til leiðbeiningar um notkun þess. Einkenni tækisins eru sýnd í töflu 1. Í töflu 2 eru sýndir helstu tímættir í kjarnaboruninni frá því að ákvörðun var tekin um kjarnatöku þar til venjubundin borun hófst á ný. Í heildina tók borun kjarnans 46,8 klst, eða tæpa tvo sólarhringa.

Kjarnarörið var um 5 m langt, eins og lýst er í töflu 1, og sverleiki kjarnans um 100 mm. Kjarninn sem upp kom reyndist vera um 2,2 m að lengd, sem samsvarar um 45% kjarnaheimtu. Lengd og afstaða einstakra kjarnabúta ásamt mælistöðum er sýnd á mynd 1 og á mynd 2 er ljósmynd af útliti kjarnans. Tekin voru 11 sýni af kjarnanum sem voru um 1" í þvermál og 1,5" að lengd (0,025 m x 0,037 m). Á þessum sýnum voru nokkrir eiginleikar bergsins mældir, svo sem lekt, poruhluti, eðlisþyngd og rafleiðni. Stuðst var við myndir af kjarnanum til að ákveða dýpið á bútonum. Einnig voru gerðar athuganir á stærð pora í kjarnanum og poruvatn efnagreint.

Tafla 1. Einkenni kjarnabúnaðar í holu ÖJ-1 á Ölkelduhálsi.

<b>Kjarnarör:</b>	
Tegund	UKR-185/100
Króna	212,7-295,3 mm
Lengd	5 m
Þvermál kjarna	100 mm
Gengjur	5 1/2 FH, API
<b>Kjarnakróna:</b>	
Tegund borkrónu	KRS 214,3/100S
Framleiðandi	NPP “Buramlas” (Rússl.)
Fjöldi karata framan á krónu	5-7 spc (stones per carat)
Fjöldi karata á hlið krónu	0,3-0,8 spc
Kjarnagrind	fingrigrind
Álag á borkrónu	6-9 tonn
Snúningshraði	60-100 sn/mín.
Skolmagn	18-24 l/s

Tafla 2. Tímaþættir í kjarnaborun.

<u>10. janúar 1995</u>	<u>Tími</u>
1. Borun hætt á 794,7 m dýpi	1:20
2. Hitamæling	3:00-5:00
3. Upptekt hefst	5:50
4. Upptekt borstanga lokið	8:30
5. Ruslakarfa sett niður	9:30
6. Safnað í körfu (“junk basket”)	16:00-16:30
7. Karfan komin til yfirborðs	19:30
8. Kjarnarör í snúningsborði	21:30
9. Niðursetning kjarnarörs hefst	22:30
<u>11. janúar 1995</u>	
10. Kjarnarör 4 m frá botni – skolun	2:55
11. Kjarnatöku lokið, 4,1 m boraðir	4:42
12. Kjarnarör komið upp	10:30
13. Lokið við frágang kjarna	11:30
14. Vatnsborðsmæling og eftirlit með holu	12:00
15. Kollar sprungumældir og niðursetning	
16. Borun hefst aftur á 798,8 m dýpi	24:00

Fimm sýni voru efnagreind í fyrstu og gerðar 6 þunnsneiðar til athugunar á bergfræði og ummyndun. Nokkurs misræmis gætti milli sýna sem tekin voru til mælinga og þeirra sýna sem efnagreind voru og þunnsneiðar gerðar af. Voru því send 9 sýni til viðbótar af þeim hlutum kjamans sem mældur var, og gerðar samsvarandi viðbótarþunnsneiðar.

Á mynd 3 er sýnt einfaldað jarðlagasnið af borholunni, vatnsæðar, dreifing ummyndunarsteinda og beltaskipting ummyndunar (Benedikt Steingrímsson o.fl. 1997). Samkvæmt því er kjarninn í efri hluta móbergsmyndunar sem nær niður á um 840 m dýpi og telst vera ein goseining. Kjarninn er í bergi sem er tæplega 500 m neðan við efri mörk klórít-epidót beltisins og gæti hugsanlega verið nærri efri mörkum epidót-amfiból beltisins. Vatnsæðar eru við kjarnatökustaðinn. Á mynd 4 er sýnt einfaldað jarðlagasnið og jarðlagamælingar í holunni. Þar sést meðal annars að kjarninn er tekinn í bergi með poruhluta 16-18% samkvæmt nifteindamælingum.

### 3. BERGFRÆÐIATHUGUN

Alls voru gerðar 17 þunnsneiðar af ýmsum stöðum í kjarnanum, og voru 11 þeirra af bergi sem næst þeim sýnum sem mæld voru (tafla 3 og mynd 1). Athugun þessara sneiða var með svipuðu sniði og í verkefninu um forðafræðistuðla (Hjalti Franzson o.fl. 1997). Athugaðar voru frumsteindir og gler ásamt ummyndun þeirra og síðan hvaða útfellingar greindust í holrými. Hluti af greiningunni var talning 200 punkta þar sem greint var á milli frumsteinda, ummyndaðra frumsteinda, hvort og hvað mikið sprungur og blöðrur væru fylltar útfellingum.

Flestar þunnsneiðarnar eru úr einni móbergsmyndun. Bergið er aðeins að hluta til kristallað, og ber mest á smáum feldspatkristöllum auk þess sem mótar fyrir líklegu magnetíti, en ekki sést pýroxen né ólivín svo öruggt sé. Áferð feldspatkristallanna og lega ("flow-kristöllun") bendir til að upprunaleg efnasamsetning bergsins sé þróað basalt, sennilega "kvars-normatívt" þóleiit, en ólíklegt að það sé enn þróaðra (basalt-andesít eða andesít). Bergið telst vera hlutkristallað túff eða breksia. Þunnsneiðagreiningin er í nokkurri þversögn við efnagreiningarnar, sem benda til að bergið sé ísúrt. Þunnsneiðagreiningin er hér talin áreiðanlegri í mati á upphaflegri berggerð.

Ummyndun móbergisins er að því er virðist algjör. *Plagióklas* hefur ummyndast yfir í Na-rikan feldspat (albit-oligóklas), en ekki er hægt að útiloka að einhver hluti geti verið K-rikur. Klórít ummyndun plagióklasans er einnig nokkur. *Gler* hefur að miklu leyti ummyndast yfir í klórít, en einnig sést nokkuð af sphen (titanít), sem líklega er bæði ummyndun á gleri og jafnvel magnetíti. Helstu *útfellingar* eru kvars, kalsít, klórít og epidót. Kalsít kemur bæði fyrir sem útfelling í holrými en einnig sem bergumyndun. Kalsítummyndun bergsins er einna mest áberandi við jaðra kalsítprungufyllinga.

Þrjár þunnsneiðar, úr kjörnum 1, 2, og 3 (mynd 1) sýna aðra berggerð en í öðrum kjarna. Í kjarna 1 var valin þunnsneið úr grófkorna bergi sem að öllum líkindum er hnyðlingur (xenólít). Það berg er dólérít-gabbró og hefur allsérstæða ummyndun, sem er um eða yfir 70% af berginu. Plagióklas er þar alveg horfinn yfir í albit og K-feldspat, meira en 60% af pýroxeninum hefur ummyndast í amfiból, klórít o.fl. steindir og um helmingurinn af magnetít-ilmenít hefur ummyndast í spen (titanít). Víða í berginu, sérstaklega í sprungum, er kraðak af amfiból, vollastoníti og granatútfellingum. Þessi ummyndun skýtur skökku við þá sem finnst í móberginu, og er sennilegt að þessi hnyðlingur sé ættaður mun dýpra úr berggrunninum, þar sem mikið ummyndað dólérít-gabbró ætti að finnast. Hinar tvær sneiðarnar eru úr fremur grófkorna ólivín-þóleiit bergi, þunnsneiðin úr kjarna 3 sýnir laumontít í blöðrum bergsins, en það er erfitt að skýra þar sem neðstu merki um zeólíta í holunni er um 400 m ofar.



Tafla 3. Ummyndun og útfellingar samkvæmt talningu í þunnsneiðum.

Kjarna- nafn	Frum- steind %	Ummynduð frumsteind %	Útfellingar í blöðrum %	Útfellingar í sprungum %	Ofylltar blöðrur %	Ofylltar sprungur %	Samtals %	Upprunalegt holrými %
1	0	85.5	13.5	1	0	0	100	14.5
5	0	75.5	24	0	0.5	0	100	24.5
6	0	83.5	12.5	4	0	0	100	16.5
6.2	0	87	8	5	0	0	100	13
7	0	80	5	15	0	0	100	20
7.1b	0	86.5	12.5	1	0	0	100	13.5
7.2b	0	88.5	11.5	0	0	0	100	11.5
8.2	0	86	14	0	0	0	100	14
10.1	0	80	20	0	0	0	100	20
10.2b	0	85	15	0	0	0	100	15
11	0	91	8	0.5	0.5	0	100	9
11.2b	0	87	13	0	0	0	100	13

Helstu atriði þunnsneiðatalningar eru sýnd í töflu 3. Bergummyndun í móberginu er alger, eins og áður sagði. Blöðrur mynda mestan hluta upprunalegs holrýmis og liggja á bilinu frá 9 upp í 24%, nema í kjarna 7 þar sem blöðrur eru aðeins 5%. Í þeirri þunnsneið eru sprungufyllingar um 15% af berginu. Þetta upprunalega holrými er fyllt af útfellingum, nema í kjörnum 5 og 7, þar sem það hefur ekki alveg fyllt. Í síðasta dálki töflu 3 er sýnt upprunanlegt heildarholrými bergsins, áður en það fylltist af útfellingum (skv. þunnsneiðagreiningu).

Í þunnsneiðaskoðun og talningu var litið kerfisbundið á ákveðna þætti. Ein forsendan fyrir að þora sjáist greinilega er að hún nái í gegnum sneiðina, en það þýðir jafnframt að verið er að tína til þorur sem eru >30 mikrómetrar í þvermál, en 30 mikrómetrar er þykkt sneidarinnar. Smærri þorur verða ekki greindar. Nokkrar þunnsneiðanna voru skoðaðar nánar og mátti víða greina örfín göt í berginu, auk þess að fjöldi mikrósprungna, sem afleiðing ummyndunar, kljúfa kristalla í berginu. Ef út í það er farið, er ekki útilokað að kleyfnifletir steinda eins og til dæmis kalsíts og leirsteinda geti átt hlut í þoruhluta bergsins. Nánar verður fjallað um samanburð þunnsneiðagreininga og mælinga á þoruhluta og lektar í kafla 7.

Sérstök greining var gerð á magni kalsíts ( $\text{CaCO}_3$ ) í berginu í tengslum við mat á hlut  $\text{CO}_2$  í berginu. Í töflu 4 er birt talning á kalsíti í þunnsneiðum, útreikningur á  $\text{CO}_2$  á grundvelli þeirrar talningar, en  $\text{CO}_2$  er um 44% af kalsíti. Einnig eru efnagreiningar á  $\text{CO}_2$  í hluta sýnanna birtar. Í síðasta dálki töflunnar er bundið vatn sem er mismunur á mældu glæðitapi og  $\text{CO}_2$ . Magn kalsíts er mjög breytilegt, eða frá nær engu upp í rúm 30% af berginu. Í einni þunnsneiðinni er kalsít um 77% af berginu, en sú sneið er aðallega sprungufylling og var valin til að kanna nánar steindasamsetninguna í fyllingunni og er því ekki einkennandi fyrir bergið. Á mynd 5 er  $\text{CO}_2$  mælt í efnagreiningu sett upp á móti  $\text{CO}_2$  mælt samkvæmt talningu á kalsíti. Oftast er gott samræmi þarna á milli nema í tveimur tilfellum þar sem mun meira kalsít er í þunnsneiðinni en mælist í efnagreiningunni. Misræmið í þeim síðarnefndu má líklegast skýra með því að kalsít sé misdreift í kjörnunum og að í þessar þunnsneiðar hafi valist berg sem í er tiltölulega meira kalsít en í þeim hluta sem efnagreindur var.

Tafla 4. Talning á kalsíti í þunnsneiðum, mat á CO<sub>2</sub>, og samanburður við glæðitap, CO<sub>2</sub> og bundið vatn í efnagreiningum.

Númer þunnsn.	Kjarni no.	Athugasemdir	Þunnsneiðatalning				Efnagreiningar			
			Fj. punkta í talningu	Berg %	Kalsít %	CO <sub>2</sub> %	Glæðitap %	CO <sub>2</sub> %	H <sub>2</sub> O+ %	
16219	1	Hlutkristallað móberg	1000	91.5	8.5	3.74				
16301	1	Mjög ummyndaður dðlerft-gabbró xenólít **	1000	98.1	1.9	0.84				
16302	2	Meðal-grófkorna mjög ummyndað og e-ð biðbrótt basalt	1000	96.5	3.1	1.36	6.58			
16303	3	Meðal-grófkorna ólívín þóleit með stílb/laumonítft æðum?!	1000	100	0	0.00				
16300	5	Hlutkristallað móberg.	1000	97.5	2.5	1.10				
16220	5	Meirihlutinn holu-/sprungufylling)	1000	23.2	76.7	33.75	4.54			
16222	6	Hlutkristallað móberg	1000	86.4	13.6	5.98	7.90			
16223	6.1	Hlutkristallað móberg	1000	82	18	7.92				
16417	6.2	Hlutkristallað móberg	1000	70.1	29.9	13.16	8.89		2.98	
16418	7	Hlutkristallað móberg	1000	65.7	34.3	15.09				
16419	7.1	Hlutkristallað móberg	1000	88.7	11.3	4.97	7.35		2.33	
16420	7.2	Hlutkristallað móberg	1000	69.9	30.1	13.24	8.17		2.93	
16421	8.1 b	Hlutkristallað móberg	1000	91.3	8.7	3.83				
16422	8.2	Hlutkristallað móberg	1000	86	14	6.16	5.47		2.37	
16423	9	Hlutkristallað móberg	1000	88.5	11.5	5.06	8.34		2.87	
16424	10.1 b	Hlutkristallað móberg	1000	86.4	13.6	5.98	7.96		2.75	
16425	10.2	Hlutkristallað móberg	1000	91.2	8.8	3.87	8.31		3.30	
16223	11	Hlutkristallað móberg	1000	90.5	9.5	4.18	7.12			
16426	11.1	Hlutkristallað móberg	1000	87.8	12.2	5.37	8.18		2.90	
16427	11.2	Hlutkristallað móberg	1000	91.3	8.7	3.83	6.34		2.56	
	14						4.86			

Tafla 4. Talning á kalsíti í þunnsneiðum, mat á CO<sub>2</sub>, og samanburður við glæðitap, CO<sub>2</sub> og bundið vatn í efnagreiningum.

\*\*Ummyndunin samanstendur meðal annars af grasserandi amfiból, völastoníti og granati. Bergið er >70% ummyndað. Xenólítinn endurspeglar mögulega berg og ummyndun neðar í berggrunnum.

#### 4 EFNAGREININGAR Á KJARNA

Efnagreiningum á bergi er skipt í tvennt, þar sem aðalefnin eru mæld sem oxíð í prósentum og snefilefnin í ppm. Í efnagreiningum, sérstaklega af ummynduðu bergi, bætist við glæðitap sem er afleiðing ummyndunarinnar og eru rokgjörn efni svo sem vatn, koldíoxíð, brennisteinn og fiur. Þeirra tveggja síðastnefndu gætir lítið. Tilgangur efnagreininganna var meðal annars að kanna efnaf lutninga sem orðið hafa vegna ummyndunarinnar. Til að svo sé hægt er fyrst reynt að nálgast upprunalegu samsetningu bergsins með því að taka úr augljósa ummyndunarþætti svo sem glæðitapið og síðan endurreikna aðalefni greiningarinnar upp í 100%. Þunnsneiðagreining gefur einnig, á grundvelli steindategunda og kristöllumar, ákveðnar vísbendingar um efnasamsetningu bergsins. T.d. er kísill langalgengasta efnið í berginu og getur þunnsneiðagreiningin gefið efri og neðri mörk kísilsins í upprunalega berginu, og er þá hægt að meta betur upprunlegu efnasamsetninguna. Í þriðja lagi er unnt að bera saman efnagreiningu bergsins við aðrar greiningar af svipuðu bergi sem ekki hafa orðið fyrir áhrifum ummyndunar. Á þann hátt er stundum unnt að sjá hvort efni hafi tapast úr berginu eða bætst við í bergið vegna efnaf lutninga. Í efnagreiningum bergs er járn oft annað hvort sýnt sem FeO (tvígilt), eða Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (þrígilt). Í fersku gosbergi er talið að hlutfall tví- og þrígilds járn sé um 0,25 (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+FeO=0,25).

Alls voru send 14 sýni úr kjarnanum til efnagreiningar í tveimur sendingum og eru greiningarnar sýndar í töflu 5-A og -B. Aðalefnin í efnagreiningunum hafa verið endurreiknuð án glæðitaps. Efni sem greind voru eru hliðstæð þeim greiningum sem gerðar hafa verið á sýnum í forðafræðiverkefninu (Ásgrímur Guðmundsson o.fl. 1995), nema að í síðari sendingunni var bætt við greiningum á CO<sub>2</sub> en greiningum á Cl sleppt. Eins og áður hefur verið getið er bergið talið að uppruna sama gosmyndun og ætti því að hafa haft sömu uppruna-efnasamsetningu. Þunnsneiðaaathugun og poruhlutamælingum sýna að miklir efnisflutningar hafi átt sér stað í berginu þar sem blöðrur og sprungur eru fylltar útfellingum, og bergið sjálft hefur nær algerlega skipt um steindasamfélag. Upprunalegar steindir eins og plagióklas, pýroxen og málmur hafa nánast alveg horfið og aðrar hafa komið í staðinn. Einnig virðast þó hafa myndast í berginu vegna upplausnar efna þar. Í næstneðstu línu töflu 5-A er sýnd meðalsamsetning bergsins, sem hefur verið endurreiknuð upp í 100% án glæðitaps. Snefilefnin sem eru um 0,1% af berginu eru sýnd í töflu 5-B. Kísill er mjög breytilegur í sýnunum, eða frá tæpum 48% upp í 60%, að meðaltali um 54% en það er innan sviðs basalt andesíts. Sá uppruni bergsins er ólíklegur. Þunnsneiðaskoðun leiðir í ljós að efnasamsetning er meira í ætt við þóleiit og hefur líklegast vart meira en um 50% SiO<sub>2</sub>. Aukningin í kísli er því talin vera vegna útfellinga kísilríkra steinda í berginu. Í neðsta dálki í töflu 5-A hafa aðalefnin verið endurreiknuð með tilliti til að SiO<sub>2</sub> hafi upprunalega verið 50%, og er það gert sem önnur nálgun á upprunalegri efnasamsetningu móbergsins.

Dreifing TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Nb, Y og Zr í sýnunum sýna hlutfallsega minnstu frávik, en mestu frávikin sjást í K<sub>2</sub>O, Cu, Zn og Rb. Athyglisverð er breyting á K<sub>2</sub>O frá 0,03 og allt upp í 0,29 eða um tíföld, og er frávikíð í Th a.m.k. 25%. Þessi efni gefa náttúrulega gammageislun og bendir þessi breytileiki til að ummyndun geti haft áhrif á náttúrulega gammamælingu í borholum. Jafnframt bendir það til að vörpun slíkrar mælingar yfir í jafngildi kísils (þ.e. berggreining) geti í sumum tilvikum orkað tvímælis. Magn SiO<sub>2</sub> er mjög breytilegt á milli sýna og getur munað allt að 13% í kísli. Hlutfall þrígilds á móti tvígildu járn er sýnt í síðasta dálki töflu 5-A, og er það allt frá 6 til 15 sinnum hærra en vænta má í fersku gosbergi. Líklega er ummyndun orsök þess, en einnig getur verið að oxun gosefna hafi orðið þegar móbergið verður til undir ísvatni jökulsins.

Á myndum 6 til 9 er gerður samanburður á nokkrum efnunum í Ölkelduhálssýnunum og samsvarandi efnunum í bergsýnum innan megineldstöðvarinnar í Hafnarfjalli og Skarðsheiði (Hjalti Franzson 1978). Þau síðarnefndu fylgja þóleiit þróunarlinu, eins og Hveragerðiseldstöðin (Ölkelduhál). Ef gengið er út frá því að kísilmagn í berginu hafi upprunalega verið um 50% falla önnur efni yfirleitt innan þess

sviðs sem efnagreiningar frá Hafnarfjall-Skarðsheiði liggja á, nema ef vera skyldi að natríum ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) í sumum tilfellum (mynd 6).  $\text{CaO}$  er mjög breytilegt, sem skýrist af breytilegu magni kalsíts ( $\text{CaCO}_3$ ) í berginu (mynd 7).  $\text{K}_2\text{O}$  er mjög lágt ef miðað er við basalt andesít en er í eðlilegu magni ef kísill er um 50% (mynd 8).  $\text{TiO}_2$  er á sama hátt í eðlilegu samhengi við 50%  $\text{SiO}_2$  (mynd 9). Flest sporefnið í kjarnanum falla innan marka þóleiðlínu Hafnarfjalls-Skarðsheiðar sýnanna, nema að gildið á Cu er hátt og Rb og Sr er óvenju lágt.

Bundið vatn í berginu (mismunur glæðitaps og  $\text{CO}_2$ ) var greint í níu sýnum. Slíkt vatn reyndist vera á bilinu 2,3-3,3%, og að meðaltali um 2,7%. Nánar verður fjallað um það atriði í kafla 9.

## 5. EÐLISFRÆÐILEGAR MÆLINGAR Á KJARNA

Fjöldi breytistærða hefur verið mældur í Ölkelduhálskjarnanum af Dönsku jarðtæknistofnuninni og Dönsku jarðfræðistofnuninni og eru skýrslur þeirra birtar sem viðaukar í þessari skýrslu. Mæligildin eru sýnd í töflu 6. Þessi gögn eru hér notuð aðallega til að kanna tengsl poruhluta og lektar við jarðfræðilega ásýnd bergsins og til að bera saman við jarðeðlisfræðilegar mælingar sem gerðar voru í borholunni. Á mynd 10 er sýnt samband virks poruhluta og heildarporuhluta, en virki poruhlutinn er að meðaltali um 1% lægra en heildarporuhlutinn. Þessi munur er svipaður og fannst í samanburði slíkra mæligilda fyrir kjarna í forðafræðistuðlum (Ómar Sigurðsson og Valgarður Stefánsson 1994). Sterk fylgni (0,81) er á milli gaslektar og mælds heildarporuhluta eins og sýnt er á mynd 11 og sama er að segja um fylgni á milli vökvalektar og heildarporuhluta (mynd 12) og er hún rúmlega 0,90.

Í kjarnanum var mælt viðnám  $r$  sem er viðnám kjarnans í ohm við  $S_w = 100\%$  og  $R_o(\Omega m)$ , sem er viðnám í 100% vökvafylltu sýni, reiknað út frá því. Á mynd 13 er sýnt  $\log(R_o)$  á móti virkum poruhluta. Berviðnámsstull (formation factor),  $F$  er hlutfallið milli viðnáms 100% vatnsmettaðs bergs ( $R_o(\Omega m)$ ) og viðnáms vökvans í berginu ( $R_w(\Omega m)$ ) og er einnig reiknaður út frá mælistærðum eða;

$$F = R_o / R_w = (1 / R_w) \times (r A / L)$$

Þar er  $A$  ( $\text{m}^2$ ) flatarmál sýnis og  $L$  (m) lengd þess. Samkvæmt Archy's lögmáli er samband bergviðnámsstuðuls og poruhluta;

$$F = a / \theta^m$$

Ef logarithminn af  $F$  er teiknað á móti logarithmanum af poruhluta fæst veldisvísirinn  $m$  (cementation factor) sem hallatala þeirrar línu (mynd 14), en hann segir til um hvort um sprungulekt geti verið að ræða eða ekki (Valgarður Stefánsson o.fl., 1982). Í Ölkelduhálskjörnunum er  $m = 1,1 \pm 0,11$  sem bendir til sprungulektar. Hins vegar ber að benda á það að fylgnistuðullinn er ekki mjög hár eða um 0,60 og sé punktinum með lægsta poruhlutann sleppt fæst  $m = 1,5 \pm 0,11$  og er fylgnin þá rúmlega 0,30.

Tafla 5. Efnagreiningar á kjarna. A – aðalefni, B – snefilefni.

A-Aðalefni																	
Kjarna- númer	SiO <sub>2</sub> %	TiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	MnO %	MgO %	CaO %	Na <sub>2</sub> O %	K <sub>2</sub> O %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	Samtals %	Glæðitap %	CO <sub>2</sub> %	H <sub>2</sub> O+ %	FeO %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +FeO
2,00	55,30	1,99	13,83	10,19	0,18	4,86	10,69	2,78	0,03	0,24	100,08	6,58			5,64	3,24	3,81
5,00	50,04	2,55	16,45	13,94	0,21	4,76	7,60	4,35	0,04	0,26	100,21	4,54			9,09	3,27	3,63
6,20	50,50	2,36	14,81	10,15	0,23	4,12	13,14	4,36	0,04	0,28	100,00	8,89	5,91	2,98	6,39	2,21	2,56
6,00	51,40	2,30	14,54	11,70	0,22	4,94	10,91	3,50	0,27	0,25	100,02	7,90			8,33	1,52	1,70
7,10	57,01	1,94	13,15	9,97	0,21	4,91	8,92	3,72	0,04	0,21	100,07	7,35	5,02	2,33	6,92	1,59	1,82
7,20	50,18	2,35	15,18	11,60	0,21	5,64	10,53	4,01	0,05	0,27	100,03	8,17	5,24	2,93	7,90	1,91	2,15
8,20	57,96	2,06	13,54	10,94	0,19	5,53	6,04	3,62	0,04	0,23	100,15	5,47	3,10	2,37	7,83	1,61	1,82
9,10	53,84	2,17	13,87	9,67	0,20	5,65	10,34	3,94	0,04	0,27	100,01	8,34	5,47	2,87	6,82	1,30	1,49
10,10	54,32	2,18	13,80	9,51	0,20	5,92	10,02	3,78	0,03	0,27	100,03	7,96	5,21	2,75	6,59	1,45	1,67
10,20	47,81	2,52	16,39	11,14	0,21	6,62	10,50	4,48	0,04	0,31	100,01	8,31	5,01	3,30	7,69	1,68	1,90
11,00	54,15	2,17	14,05	10,06	0,19	5,68	10,20	3,27	0,03	0,27	100,07	7,12	5,28	2,90	6,55	1,44	1,66
11,10	54,63	2,12	13,56	9,54	0,20	5,79	10,38	3,47	0,03	0,28	99,98	8,18	3,78	2,56	5,71	1,79	2,10
11,20	59,27	1,94	12,70	8,64	0,16	5,30	8,60	3,23	0,03	0,27	100,14	6,34	3,78	2,56	5,71	1,79	2,10
14,00	60,12	2,07	12,61	9,88	0,17	3,19	9,04	2,53	0,29	0,22	100,12	4,86			6,51	2,16	2,49
Meðalt.	54,04	2,20	14,18	10,49	0,20	5,21	9,78	3,65	0,07	0,26	100,07	7,14	4,89	2,78	7,02	1,97	2,25
SiO <sub>2</sub> leiðr.	50,00	2,40	15,40	11,40	0,22	5,67	10,53	4,02	0,08	0,28	100,00						
B-Snefilefni																	
Kjarna- númer	BaO ppm	Ce ppm	Cu ppm	V ppm	Zn ppm	Ga ppm	Nb ppm	Pb ppm	Rb ppm	Sr ppm	Th ppm	U ppm	Y ppm	Zr ppm	As ppm	Sb ppm	S ppm
2,00	143,00	15,00	101,00	350,00	110,00	16,40	13,50	<d/l	1,30	163,50	<d/l	<d/l	25,40	96,90			<d/l
5,00	195,00	27,00	663,00	478,00	318,00	18,30	15,40	1,40	1,20	178,20	2,20	<d/l	33,60	113,70			795,00
6,20	<d/l	39,00	174,00	370,00	148,00	14,90	15,50	1,00	3,10	211,50	<d/l	<d/l	32,60	107,60	2,40	<d/l	176,00
6,00	333,00	35,00	169,00	418,00	143,00	13,90	14,30	<d/l	4,50	216,40	1,30	<d/l	29,80	100,50			107,00
7,10	18,00	31,00	354,00	295,00	76,00	14,40	14,00	<d/l	2,40	136,20	<d/l	<d/l	28,00	94,20	<d/l	<d/l	<d/l
7,20	<d/l	33,00	207,00	353,00	94,00	16,40	15,20	1,40	2,80	197,20	<d/l	<d/l	34,30	111,10	1,90	<d/l	<d/l
8,20	<d/l	33,00	258,00	325,00	76,00	15,50	15,20	<d/l	2,40	121,50	<d/l	<d/l	31,10	99,70	<d/l	<d/l	208,00
9,10	23,00	43,00	311,00	301,00	192,00	15,50	14,90	<d/l	2,70	147,50	<d/l	<d/l	32,80	100,50	<d/l	<d/l	<d/l
10,10	<d/l	38,00	182,00	289,00	108,00	14,80	14,90	<d/l	2,50	150,80	<d/l	<d/l	34,70	102,10	1,90	<d/l	<d/l
10,20	<d/l	33,00	268,00	368,00	117,00	17,50	15,90	1,70	2,40	185,50	<d/l	<d/l	36,30	114,60	3,00	<d/l	<d/l
11,00	136,00	28,00	91,00	332,00	146,00	15,80	14,00	<d/l	1,30	154,30	<d/l	<d/l	33,70	96,30			<d/l
11,10	<d/l	32,00	250,00	303,00	110,00	14,40	14,30	<d/l	2,20	133,20	<d/l	<d/l	32,10	99,50	1,40	<d/l	<d/l
11,20	27,00	33,00	150,00	293,00	112,00	15,50	13,90	<d/l	2,60	142,10	<d/l	<d/l	30,50	94,70			<d/l
14,00	156,00	21,00	30,00	299,00	111,00	12,90	13,30	<d/l	7,70	160,80	<d/l	<d/l	34,80	92,80			986,00
Meðalt.	128,88	31,50	229,14	341,00	132,93	15,44	14,59	<1.375	2,79	164,19	<1.75	<d/l	32,12	101,73	<2.05		<454,4

Tafla 5. Efnagreiningar á kjarna. A- aðalefni, B- snefilefni

<d/l = neðan greiningamarka

Tafla 6. Mælingar á forðafræðilegum eiginleikum kjarna.

Kjarni	Númer	pverm. mm	Lengd mm	Virkur poruhluti %	Reiknuð efnisþyngd g/cm <sup>3</sup>	Heildar- poruhluti %	Raun efnisþyngd g/cm <sup>3</sup>	"Formation factor"	Gaslekt mD	Klinkenberg lekt mD	"Slip factor"	"Beta" 10 <sup>4</sup> mikrom.	"Alpha" 10 <sup>14</sup> /let	Vatnslekt mD	Mælt viðnám kOhm	Viðnám Ohmm
OJ-6	6.1	24.98	36.86	7.45	2.815	-	-	14.5				0	0	0	30.4	404.2
	6.2	24.96	36.95	14.6	2.802	14.87	2.814	12.5	0.038	0.017	78.2	0	0	0.008	26.3	348.3
OJ-7	7.1	25.1	30.25	14.85	2.769	14.75	2.769	8.86	0.042	0.029	26.9	16.2	15.4	0.004	15.1	247
	7.2	24.96	36.85	13.6	2.806	14.29	2.834	6.38						0.006	13.4	177.2
OJ-8	8.1	24.96	36.85	17.14	2.772	-	-	5.67	0.094	0.053	49.3	2.4	4.11	0.014	11.9	158
	8.2	25.01	36.9	15.03	2.788	16.05	2.823	6.93	0.042	0.019	74.1	0	0	0.006	14.5	193
OJ-9	9.1	25.08	30.05	16.14	2.77	16.38	2.78	5.84	0.055	0.027	65.2	4.34	3.77	0.007	9.9	162.8
OJ-10	10.1	25	36.95	15.48	2.781	16.27	2.808	6.15	0.077	0.055	25.5	4.82	8.52	0.014	12.9	171.4
	10.2	24.95	36.89	17.46	2.802	17.64	2.811	4.04	0.091	0.05	51.3	5.6	9.13	0.013	8.5	112.7
OJ-11	11.1	25	36.95	18.48	2.782	18.89	2.796	5.81	0.143	0.104	23.6	1.22	4.11	0.037	12.2	162.1
	11.2	25	36.87	19.73	2.786	20.44	2.812	5.68	0.293	0.143	66.3	0	0	0.123	11.9	158.4

Tafla 6. Mælingar á forðafræðilegum eiginleikum kjarna.

	Gropvatn úr kjarna mg/l	Jarðhitavatn úr borholu mg/kg	"Grunnvatn" við borstað mg/kg
Cl	279	155	
SO <sub>4</sub>	36	40,375	2,8
Na	213	162,25	6,6
K	58	17,35	0,9
Mg	14	0,0065	2,95
Ca	67	1,365	8,1

Tafla 7a. Efnagreining úr gropvatni kjarna og samanburður við meðaltal efnagreiningar á jarðhitavatni úr ÖJ-1 (Benedikt Steingrímsson o.fl. 1997) og volgu grunnvatni nærri borholunni (Gögn frá Einari Gunnlaugssyni, Hitaveitu Reykjavíkur).

	Bentonít borleðja (%)	Venjulegt Portland sement (%)
SiO <sub>2</sub>	58,8	26,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,2	4,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,8	3,2
CaO	0,4	55,5
MgO	2,6	2,8
Na <sub>2</sub> O	2,7	
K <sub>2</sub> O	0,8	
L.O.I.	6,5	
SO <sub>3</sub>		
Cl		<0.2

Tafla 7b. Efnagreining af Bentonít borleðju og venjulegu Portland sementi.

## 6. EFNAGREINING Á PORUVATNI

Danska jarðfræðistofnunin reyndi að ná poruvatni úr kjarnanum til efnagreiningar og mælinga á súrefnis- og vetnisisótópum. Einungis náðist um 1 ml af vökva svo sleppa varð mælingum á ísótópum. Í töflu 7-A er sýndur efnastyrkur Cl, SO<sub>4</sub>, Na, K, Mg og Ca í vökvanum ásamt samanburði við samsvarandi efnagreiningu jarðhitavökvans úr borholunni og af grunnvatni við borstað (samsvarar skolvatni borsins). Poruvökvinn er, að SO<sub>4</sub> undanskildu, mjög frábrugðinn jarðhitavökvanum og enn frábrugðnari skolvatninu. Cl er um tvöfalt hærra í poruvatninu, Na um þriðjungi hærra, K þrefalt hærra, Mg þremur stærðargráðum hærra og Ca um 50-falt hærra. Munurinn á poruvatninu og grunnvatninu er eins og áður sagði enn meiri og er eftirtektarvert að Mg, sem yfirleitt er miklu hærra í grunnvatni, er 5-falt hærra í poruvökvanum.

Cl var greint í nokkrum kjarnabútanna og reyndist það vera neðan næmni efnagreiningarinnar eða <100ppm. Kjarnatökustaðurinn var um 13 m neðan við steiptan fôðringarenda vinnslufôðringar. Í steypingu var notuð rúmlega 100% meira sement en þurfti til að fylla holuna utan fôðringar, en það þýðir að það sem umfram var hlýtur að hafa þrýst út í bergið og gæti áhrifa sementsins þess vegna gætt við kjarnatökustaðinn. Einnig var notað gel til að hreinsa botnfall í holunni áður en kjarnatökutækin voru sett í holuna. Bæði sement og borgel eru mjög hvarfgjörn efni sem leiðir til þess að vökvi sem tengist þessum efnum hlýtur að fá sérstaka efnasamsetningu frábrugðna efnasamsetningu jarðhitavatsins. Í töflu 7-B er sýnd efnasamsetning Portland sements og Bentonít borleðju. Báðar hafa meira en 2,6% af MgO og CaO í sementinu er yfir 55%. K<sub>2</sub>O er einnig umtalsvert í borleðjunni. Höfundum finnst því líklegasta skýringin á mjög óvanalegri efnasamsetningu poruvökvans vera sú að hann hafi mengast af völdum sements og/eða borleðju.

## 7. TENGLS PORUHLUTA, LEKTAR OG UMMYNDUNAR

Í verkefninu um forðafræðistuðla var gerður samanburður á poruhluta og lekt annars vegar og ummyndunar hins vegar (Hjalti Franzson o.fl.1997). Á myndum 15 til 17 eru niðurstöður sýndar ásamt þeim gildum sem mældust í Ölkelduhálssýnunum. Á mynd 15, þar sem sýndur er munurinn á þunnsneiðarporuhluta og mældum poruhluta ("hinn ósýnilegi poruhluti") á móti ummyndun. Myndin bendir til að mestur hluti poruhluta í berginu sé <30µm í þvermál. Þunnsneið er um 30 µm að þykkt og því sjást minni porur illa.

Á myndum 16 og 17 er sýnt samband gaslektar og leiðréttrar gaslektar (klinkenberg) annars vegar og ummyndunar hins vegar. Sýnin frá Ölkelduhálsi falla innan sömu marka og mælingar á öðrum sýnum. Lekt er fremur lítil í þessum sýnum ef eingöngu er miðað við fullummyndað berg annars staðar á landinu (Ómar Sigurðsson og Valgarður Stefánsson, 1994) eins og sýnt er í töflu 8. Hlutfall vatnslektar á móti leiðréttri gaslekt er 0,5 +/- 1,0 fyrir allt landið, en 0,4 +/- 1,0 í Ölkelduhálssýnum.

**Tafla 8.** Samanburður á gaslekt, leiðréttri gaslekt og vökvalekt á milli Ölkelduhálssýna og annarra íslenskra sýna úr verkefninu um forðafræðistuðla.

	Gaslekt (mD)	Leiðréttr gaslekt (mD)	Vatnslekt (mD)
Allt landið (1)	0,6 +/- 0,7	0,5 +/- 0,7	0,3 +/- 0,3
Ölkelduháls (2)	0,10 +/- 0,08	0,06 +/- 0,04	0,02 +/- 0,04
Hlutfall (1)/(2)	6 +/- 12	8 +/- 16	13 +/- 35

Gróflega má skipta kjarnaberginu upp í tvo hluta; móbergið sjálf og þær útfellingar sem sest hafa í upprunalegar (primerar) blöðrur og sprungur í berginu. Í því skyni að "staðsetja" porurnar og lektina í kjarnanum var gerður samanburður á gaslekt, vatnslekt og virkum poruhluta annars vegar og

hlutfalli útfellinga í holrými hins vegar (myndir 19, 20 og 21). Lítið samband er á milli útfellinga og lektar eða poruhluta, en gildin virðast þó heldur lækka með hækkandi magni útfellinga, sem gæti bent til að þær séu ívið þéttari en bergið.

Á mynd 22 er sýndur skyldleiki á milli heildarefnisþyngdar og ummyndunar á sýnum úr forðafræðistuðlaverkefnum. Svo virðist sem heildarefnisþyngd bergs minnki með aukinni ummyndun, sem er eðlilegt sé haft í huga að verið er að skipta út frumsteindum bergs sem hafa háa efnisþyngd fyrir ummyndunarsteindir sem hafa lægri efnisþyngd. Ölkelduhálssýnin, sem felld hafa verið inn í myndina, falla innan sömu marka og önnur sýni.

## 8. MÆLINGAR Á ÞVERMÁLI PORUHLUTA

Mælingar voru gerðar á þvermáli poruhluta í kjarna 8.1 hjá DGGU í Kaupmannahöfn (sjá viðauka 2) og eru niðurstöður þeirra mælinga settar fram á stöplariti á mynd 23. Þar kemur fram að mestur hluti poranna er frá um 0,001  $\mu\text{m}$  upp í rúma 0,1  $\mu\text{m}$ , með áberandi hápunkti gilda í 0,07-0,105  $\mu\text{m}$ . Þessar niðurstöður skýra af hverju hinn ósýnilegi poruhluti er svona hár í Ölkelduhálssýnunum, en í þunnsneiðagreiningu virðist bergið vera nær þétt, en sú greiningaaðferð sér vart minni porur en 20-30  $\mu\text{m}$  eins og áður hefur verið fjallað um. Þessar porur eru líklegast að miklu leyti í grunnmassanum sjálfum.

## 9. SAMANBURÐUR NIFTEINDAMÆLINGA, PORUHLUTA OG VATNSINNIHALDS

Holan var jarðlagamæld að borun lokinni og var mælt viðnám, nifteindir og náttúrulegt gamma auk hita og viddar. Á þeim kafla sem kjarninn var tekinn, var mælt mjög nákvæmlega og voru mæligildin tekin á 0,10 m fresti til að geta betur borið jarðlagamælingarnar saman við mælingarnar á kjarnanum.

Nifteindamælingar eru gerðar í borholum til að meta poruhluta í bergi. Nifteindaprópan sendir út nifteindir sem síðan ferðast um bergið næst borholunni, hægja á sér við það að rekast á atóm í berginu. Þessar hægjara nifteindir eru síðan mældar með nema á nifteindapróbunni. Nifteindirnar hægja mest á sér við að rekast á aðrar prótónur eða nifteindir. Vetriskjarninn hefur því mest að segja í því að hægja á nifteindunum og því er vatnsinnihald bergsins mælt með þessari aðferð. Vatnið er að mestu í porum í berginu og því er nifteindamæling aðalega mæling á poruhluta bergsins. En þar sem bergið er mikið ummyndað er töluvert af bundnu vatni í berginu og nemur nifteindaprópan það vatn líka.

Mynd 24 sýnir poruhluta í borholunni (heildregin lína) og virkan poruhluta á kjarnasýnunum (punktar). Virkur poruhluti var notaður, en ekki heildarporuhluti þó að nifteindamæling gefi heildarporuhluta. Þetta var gert vegna þess að fleiri gildi voru gefin upp fyrir virkan poruhluta, en mismunurinn er um eða yfir 1% í poruhluta, þar sem heildarporuhlutinn er hærri. Eins og sést á myndinni er mjög gott samræmi á milli þessara mælinga. Á mynd 25 er búið að sía borholumælinguna og sést þá enn betur hversu gott samræmið er. Frávikin í mælingunum er auðvelt að skýra með óvissu í dýpi og er mesta frávikid þar sem skápur er í holunni. Hann er það víður að viddarleiðréttingin er sennilega ekki góð.

Einn þáttur í efnagreiningu (tafla 5) var mæling á glæðitapi (LOI=Loss On Ignition), sem er þyngdarminnkun sýnis við hitun þess upp í allt að 700°C. Í fersku bergi er að mestu um bundið vatn að ræða, en þegar berg hefur orðið fyrir ummyndun koma til fleiri efni, svo sem CO<sub>2</sub>, S, F, og Cl. Glæðitapið mældist að meðaltali um 6,2% í 9 sýnum og er meðalfrávik tæplega 20%. Hlutfall CO<sub>2</sub> magn var mælt í 9 sýnum (tafla 5) og var það á bilinu frá um 3-6%. Brennisteinn og klór voru af



skornum skammti. Hluttur bundins vatns í þessum 9 sýnum er því um 2,3-3,3%, að meðaltali 2,78%. Þetta bundna vatn ætti því að bætast við mælingar á poruhluta á kjarnanum þegar hann er borinn saman við poruhluta reiknuðum út frá nifteindamælingunni.

Þar sem fjarlægðin á milli nifteindasendisins og nemans á própunni er 0,41 m nemur própan meðalporuhluta yfir þetta bil. Sýnin úr kjarnanum eru dreifð yfir aðeins um 1,35 m og er því nánast eins og einn punktur þegar borið er saman við nifteindamælinguna, sérstaklega þegar óvissa í dýpi er tekin með.

Meðaltal poruhluta í kjarnasýnunum er 15,5% +/- 3,2%. Vatnsinnihald ummyndunarinnar er 2,8% +/- 0,3%, heildarvatnsinnihald er því 18,2% +/- 3,5%. Ef meðaltal reiknaðs poruhluta út frá nifteindamælingunni er reiknaður yfir dýptarbilið sem kjarnarnir ná yfir, að viðbættu bili sitt hvoru megin, sem spannar hálfu fjarlægðina milli nema og sendis á nifteindaprópunni fæst að meðaltalið er 15,6% +/- 4,2%. Þessi meðalgildi á vatnsinnihaldi (poruhluta) eru á sama hátt innan skekkjumarka, en uppefin skekkjumörk á kjarnasýnunum, og þá sérstaklega á vatnsinnihaldi ummyndunarinnar, er sennilega of lág. Töluverð skekkja er í dýptarákvörðun, bæði kjarnasýnanna og eins á dýpi nifteindamælingarinnar, því ætti sennilega að hafa þennan glugga stærri sem meðaltalið er tekið fyrir. Ef hann er stækkaður minnkar enn meir munurinn á poruhluta milli kjarnamælinga og borholumælingar.

Þegar viðnám er mælt í borholum á Íslandi er notuð própa með þremur skautum; tveimur straumskautum og einu spennuskauti. Kapallinn virkar sem þriðja straumskaut, en hann er einangraður næst própunni. Á yfirborði er síðan annað spennuskaut. Straumur er sendur út um annað straumskautið á própunni og kaplinum og spennan mæld milli spennuskautsins á própunni og þeirrar á yfirborði. Annað straumskautið á própunni er í 16" fjarlægð frá spennuskautinu, en hitt í 64" fjarlægð. Talað er um 16" og 64" viðnám sem eru mæld með því að senda straum út um viðkomandi straumskaut.

Viðnám mælt í holunni og í kjarnabútum ber ekki vel saman (tafla 6). Mælt viðnám í borholunni er mun lægra (um 65  $\Omega$ m) en viðnám í kjarnabúتونum (112-404  $\Omega$ m). Hérna er notað viðnám mælt með 16" bili milli skauta, en þegar mælt er með 64" á milli skauta mælist viðnámið mun lægra. Margt bendir til þess að 64" viðnámið sé ekki rétt og er þar sennilega um að kenna lélegu jarðsambandi við spennuskautið á yfirborði þegar mælingarnar fóru fram. Þessar tölur eru miðað við mælt viðnám og hefur það ekki verið leiðrétt fyrir áhrifum holunnar. Ef mælt viðnám er leiðrétt fyrir borholuvökvanum, hækkar það oftast, þar sem viðnám borholuvökvans er að jafnaði lægra en viðnám bergsins í kring. Til þess að 16" viðnámið sýni eitthvað í líkingu við mælingarnar á kjarnabúتونum þarf viðnám borholuvökvans að vera langt innan við 1  $\Omega$ m, sem verður að teljast ólíklegt. Tekin voru sýni úr vatnsbólunni og við dæluholunnar, en blanda af þessu vatni var notað við borunina. Viðnám þessa vökva var um 50  $\Omega$ m (vatnsból) og 100  $\Omega$ m (dæluholur). Einnig voru tekin sýni af því vatni sem kom í blæstri holunnar. Fyrstu mælingar sýna 12  $\Omega$ m og fór síðan lækkingi með tíma. Af þessum mælingum má ætla að viðnám þess vökva sem var í holunni þegar mælt var hafi verið á milli 12  $\Omega$ m og 50  $\Omega$ m. Fyrir þetta gildi á viðnámi borholuvökvans er sama og engin leiðrétting á viðnámi bergsins. Viðnám vökvans sem notað var við mælingar á kjarnabúتونum var 27,8  $\Omega$ m.

## 10. HLJÓÐHRAÐI OG VARMALEIÐNI

Danska jarðfræðistofnunin mældi hljóðhraða og varmaleiðni á tveim sýnum (sjá viðauka 3) úr Ölkelduhálskjarnanum. Of fáar mælingar voru teknar af þessum stuðlum og frekar lítið er til af gögnum frá Íslandi til að bera saman við. Gerðar voru þrjár hljóðhraðamælingar á hverju sýni við 1MPa, 25 MPa og 100 MPa þrýsting, sem samsvarar 40 m, 100 m og 400 m dýpi við þann þéttleika sem er á sýnunum (um 2,5 g/cm<sup>3</sup>). Vp sem er hraði P bylgjunnar mældist á bilinu 3487 m/s upp í 3906 m/s sem er svipað og mælist í basalhraunlagastafla utan gosbeltisins. Varmaleiðnin mældist 2,77 W/m<sup>°K</sup> og 2,52 W/m<sup>°K</sup> sem er frekar hátt fyrir íslenskt basalt (Valgarður Stefánsson, 1993).

## 11. UMRÆÐA

Þetta verkefni er unnið að hluta til samhliða verkefninu um forðafræðistuðla, þar sem litlir kjarnar eru teknir á yfirborði innan gamalla rofinna jarðhitakerfa. Tilgangurinn er í raun sá sami, þ.e. að kanna forðafræðilega eiginleika bergs í jarðhitakerfum á Íslandi. Ekki var ljóst hvort aðstæður væru nákvæmlega þær sömu í sýnum teknum á yfirborði og í borholukjarna í virku háhitakerfi, og má nefna þar til nokkur atriði:

- Sýnin í fyrrnefnda safninu eru tekin á núverandi yfirborði, svo ekki er unnt að útiloka yfirborðsáhrif.
- Þau hafa öll, jafnvel þau sem náð hafa mestri ummyndun, endað sína tilveru í lághituummyndun og köldu grunnvatnsumhverfi.
- Tengslin við aðstæður í jarðhitakerfi eru ekki eins augljós og í borholukjarna teknum í virku jarðhitakerfi.
- Erfiðara er að tengja þau við eðlisfræðilegar mælingar í borholum.

Nauðsynlegt er að bera saman niðurstöður frá sýnum sem tekin eru á yfirborði við mælingar og athuganir á kjörnum, sem teknir eru úr virkum jarðhitakerfum, til að meta hversu vel yfirborðssýnin endurspeglar eiginleika bergsins úr virkum jarðhitakerfum. Forðafræðileg gögn úr borholukjörnum í virkum háhitakerfum er því miður enn takmarkaður, þar sem kostnaður við töku þeirra er ærinn.

Samanburður milli sýna í forðafræðistuðlaverkefninu og kjarnans í Ölkelduhálsi bendir til að hann falli vel að gögnum í forðafræðikjörnunum, svo sem í bergfræðiathugunum, poruhluta, vökva- og gaslekt. Taka skal þó fram að kjarninn spannar aðeins örlitinn hluta af þeim berggerðum og ummyndun, sem vænta má í jarðhitakerfum, svo biða verður frekari gagna úr fleiri borholukjörnum til að staðfesta gott alhliða samræmi.

Tiltölulega hár mældur poruhluti ásamt tíðnikúrfu yfir stærð poranna setur nokkuð þröngar skorður á hvar leita eigi að glufum í berginu. Samband "formation factor" og poruhluta bendir til að poruhlutinn sé aðallega tengdur sprungum. Ef svo háttar til, er líklegt að "porumar" séu sprungur eða kleyfnifletir í steindum eða skil á milli einstakra steinda. Í rannsókn á þvermáli pora sem Danska jarðtæknistofnunin gerði er það gefið að porumar séu hringlaga. Ef um sprungur eru að ræða er vidd sprungunnar líklega mörgum stærðargráðum minni en hæð hennar. Þessi poruhluti er talinn tengjast meira ummyndun en frumeinkennum fersks bergs, þótt játa verði að slík skoðun sé sett fram meira af tilfinningu en sterkum rökum.

Efnafræði "poruvökvans" olli vonbrigðum þar sem augljós mengun frá borleðju og sementi virðist hafa átt sér stað. Þetta mætti verða lærdómur fyrir næstu tilraun til að taka poruvatn úr borkjarna, þ.e. að vera ekki nærri föðurrörsenda, til að koma í veg fyrir mengun frá sementi. Mjög líklegt er að poruvökvi í bergi með hárrí lekt sé sá sami og vökvinn sem kemur úr borholunni og því líkandi til að fátt nýtt komi úr slíkri efnarannsókn. Æskilegra væri að taka kjarnann fjarri lekum jarðlögum, til að ná til vökva sem væntanlega væri eldri en sá sem tilheyrir jarðhitakerfinu í dag. Þetta væri sérlega

áhugavert í jarðhitakerfi Ölkelduháls þar sem jarðhitavökvinn sem nú rennur úr holunni er talinn endurspegla mjög "nýlegar" breytingar í hita og þrýstingi í kerfinu.

## 12. HELSTU NIÐURSTÖÐUR

- Kjarninn sem náðist í borholunni á Ölkelduhálsi er úr samkynja móbergsmyndun af líklegri þóleiðsamsetningu. Ummyndun bergsins er alger og er nær alveg holufyllt samkvæmt þunnsneiðagreiningu.
- Efnagreiningar, sem benda til upprunalegrar basaltsamsetningar móbergsins, sýna töluvert breytilega efnasamsetningu innan móbergsins, meðal annars er aukning á  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  og Cu, en minnkun í Rb og Sr. Þessi breytileiki stafar líklegast af efnaflutningum samfara ummyndun bergsins.
- Mælingar á forðafræðilegum eiginleikum bergsins sýna náinn skyldleika milli poruhluta og lektar. Mæling sem gerð var af Dönsku Jarðfræðistofnuninni sýna að þvermál pora í berginu er 0.1  $\mu\text{m}$  eða minni, en gæta verður þess að lögum poranna líkjast meira sprungum. Samræmi er við niðurstöður úr þunnsneiðagreiningu og samanburði gaslektar og vökvalektar. Gögn benda til að poruhluti geti verið ívið meiri í berginu sjálfu, heldur en í útfellingum sem eru í blöðrum og sprungum.
- Efnagreining á poruvökva í kjarnanum er í litlu samræmi við efnafræði jarðhitavökvans í Ölkelduhálsholunni og grunnvatns. Líklegasta skýringin er að poruvökvinn hafi orðið fyrir mengun frá boruninni (borleðju og sementi).
- Mælingar á poruhluta, lekt og ummyndun í kjarnanum ber vel saman við samsvarandi mælingar sem gerðar voru í verkefninu um forðafræðistuðla.
- Poruhlutamælinga á kjarna og nifteindamælingar í holunni ber vel saman, en eðlisviðnám kjarnans mælist hærra en viðnám mælt í holunni.

## ÞAKKARORÐ

Höfundar þakka Valgarði Stefánssyni fyrir góðar ráðleggingar og vandlega yfirlestra á skýrsluhandriti á ýmsum stigum þess.

### 13. HEIMILDIR

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

Ásgrímur Guðmundsson, Benedikt Steingrímsson, Dagbjartur Sigursteinsson, Grímur Björnsson, Hilmar Sigvaldason, Hjalti Franzson, Jósef Hólmjárn, Ómar Sigurðsson, Sigurður Benediktsson og Sverrir Þórhallsson 1995. Ölkelduhálssvæði. Hóla ÖJ-1, 3. áfangi: Borun vinnsluhluta frá 781 m í 1035 m. Orkustofnun, OS-97007/JHD-05 B, 25 s.

Benedikt Steingrímsson, Helga Tulinius, Hjalti Franzson, Ómar Sigurðsson, Einar Gunnlaugsson og Gestur Gíslason 1997. Ölkelduháls hola ÖJ-1, Borun, rannsóknir og vinnslueiginleikar. Lokaskýrsla. Orkustofnun, OS-97019. 190 s.

Hjalti Franzson 1978. Structure and petrochemistry of the Hafnarfjall-Skarðsheiði central volcano and the surrounding basalt succession, West-Iceland. Dótorsritgerð við Edinborgarháskóla, 264 s.

Hjalti Franzson, Ásgrímur Guðmundsson, Guðmundur Ómar Friðleifsson og Elsa G. Vilmundardóttir 1997. Forðafræðistuðlar. Staða bergfræðirannsókna í lok 1997. Áfangaskýrsla um samvinnuverk Hitaveitu Reykjavíkur og Orkustofnunar. Unnið fyrir Auðlindadeild Orkustofnunar. Orkustofnun, OS-97077, 57 s.

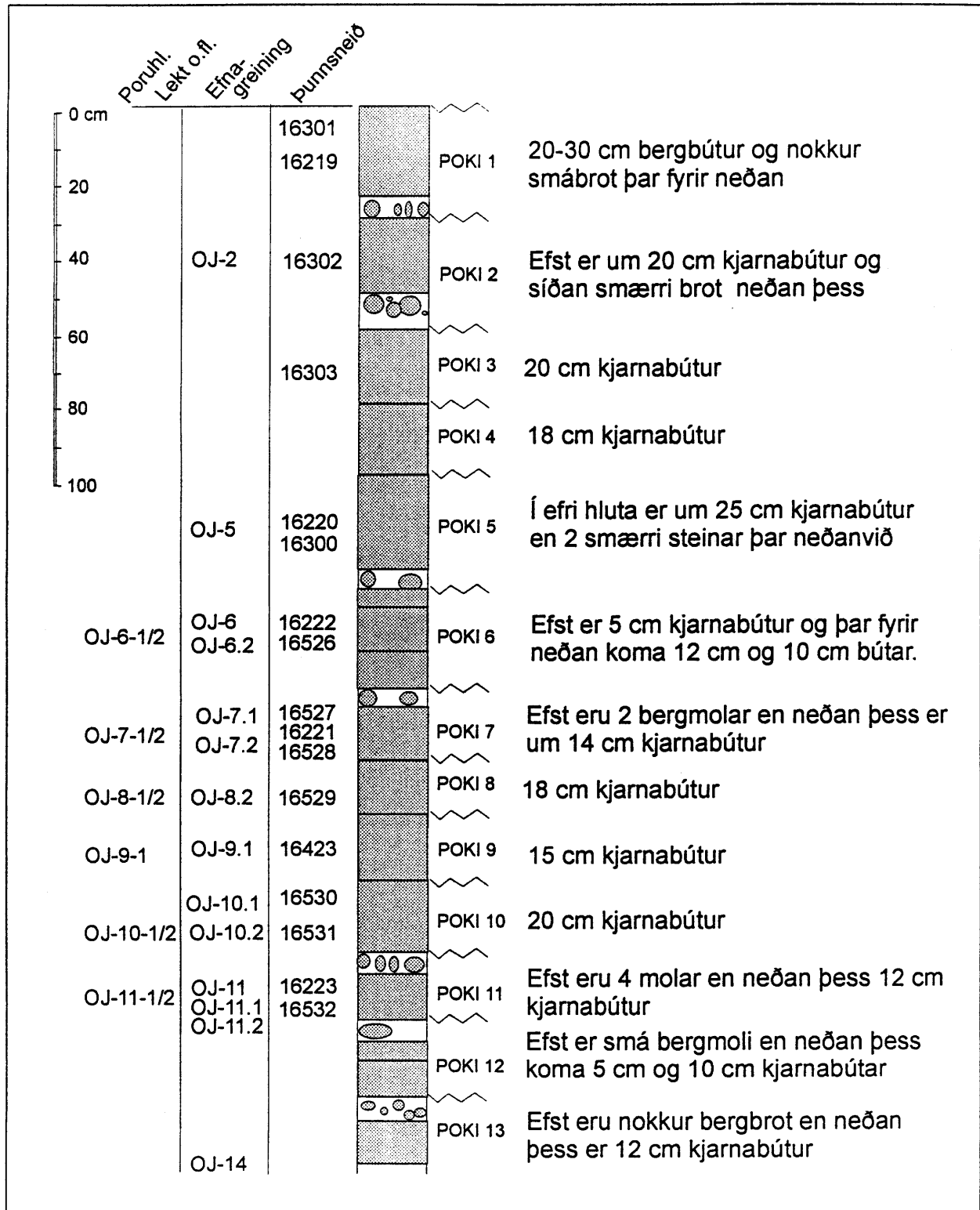
Ómar Sigurðsson og Valgarður Stefánsson 1994. Forðafræðistuðlar. Mælingar á bergsýnum. Orkustofnun, OS-94049/JHD-28 B, 35 s.

Valgarður Stefánsson, 1993: Varmaleiðni og poruhluti. Orkustofnun, OS-93038/JHD-11, 41 s.

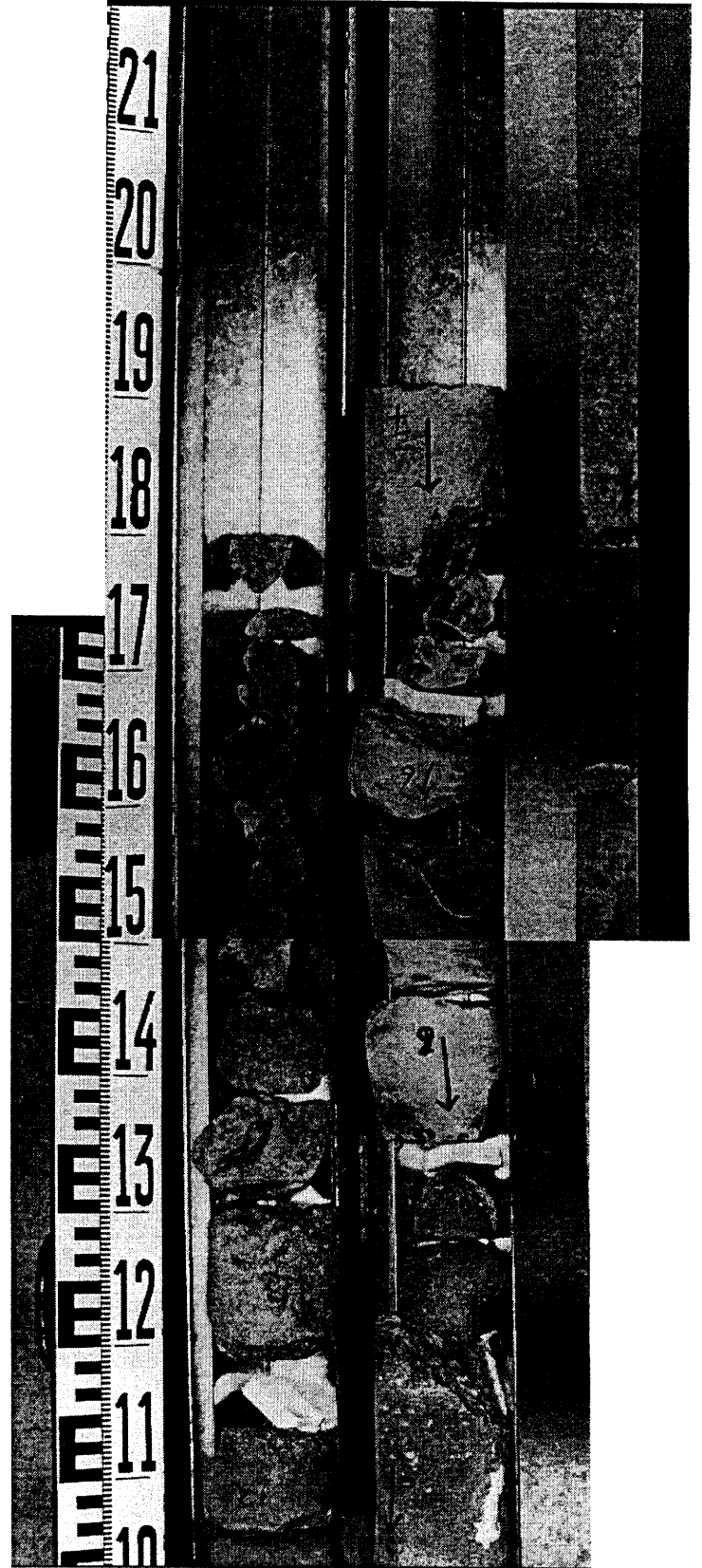
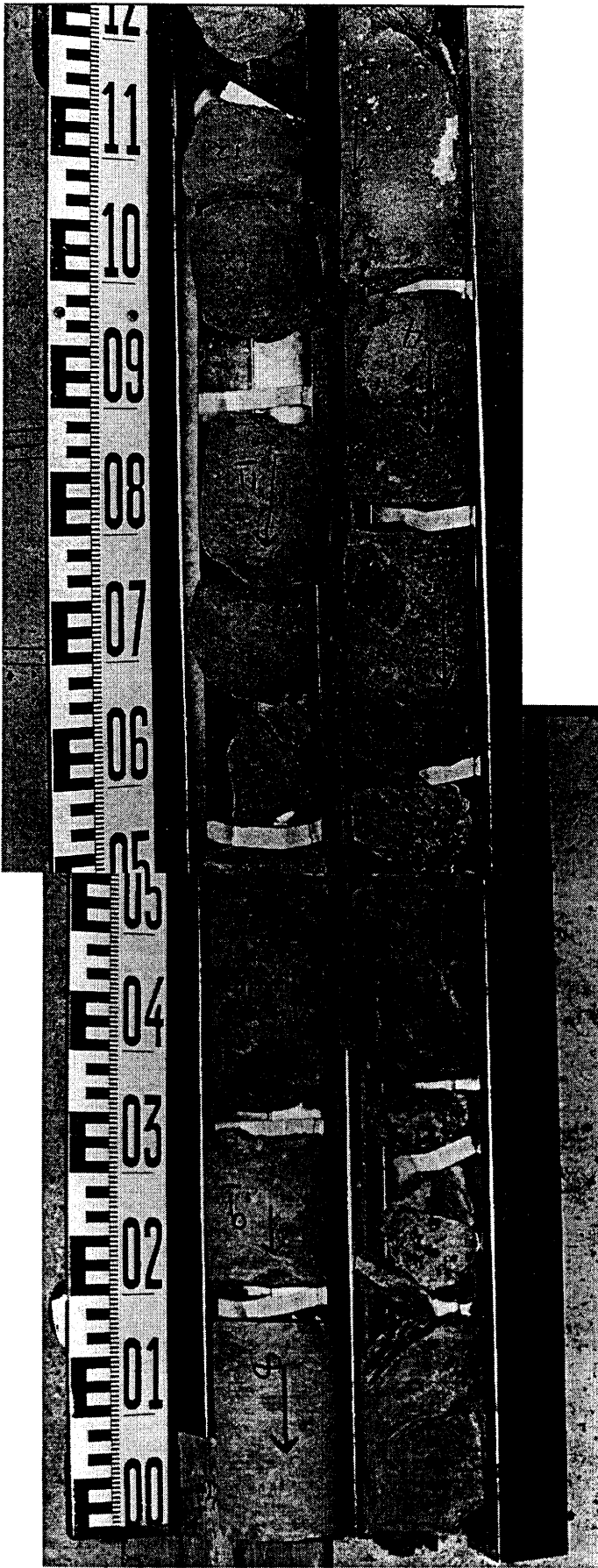


# ÖLKELDUHÁLSKJARNI

Sýnastaðir í eðlisfræðimælingum, efnagreiningum og þunnsneiðum



Mynd 1. Sýnastaðir í eðlisfræðimælingum, efnagreiningum og þunnsneiðum.



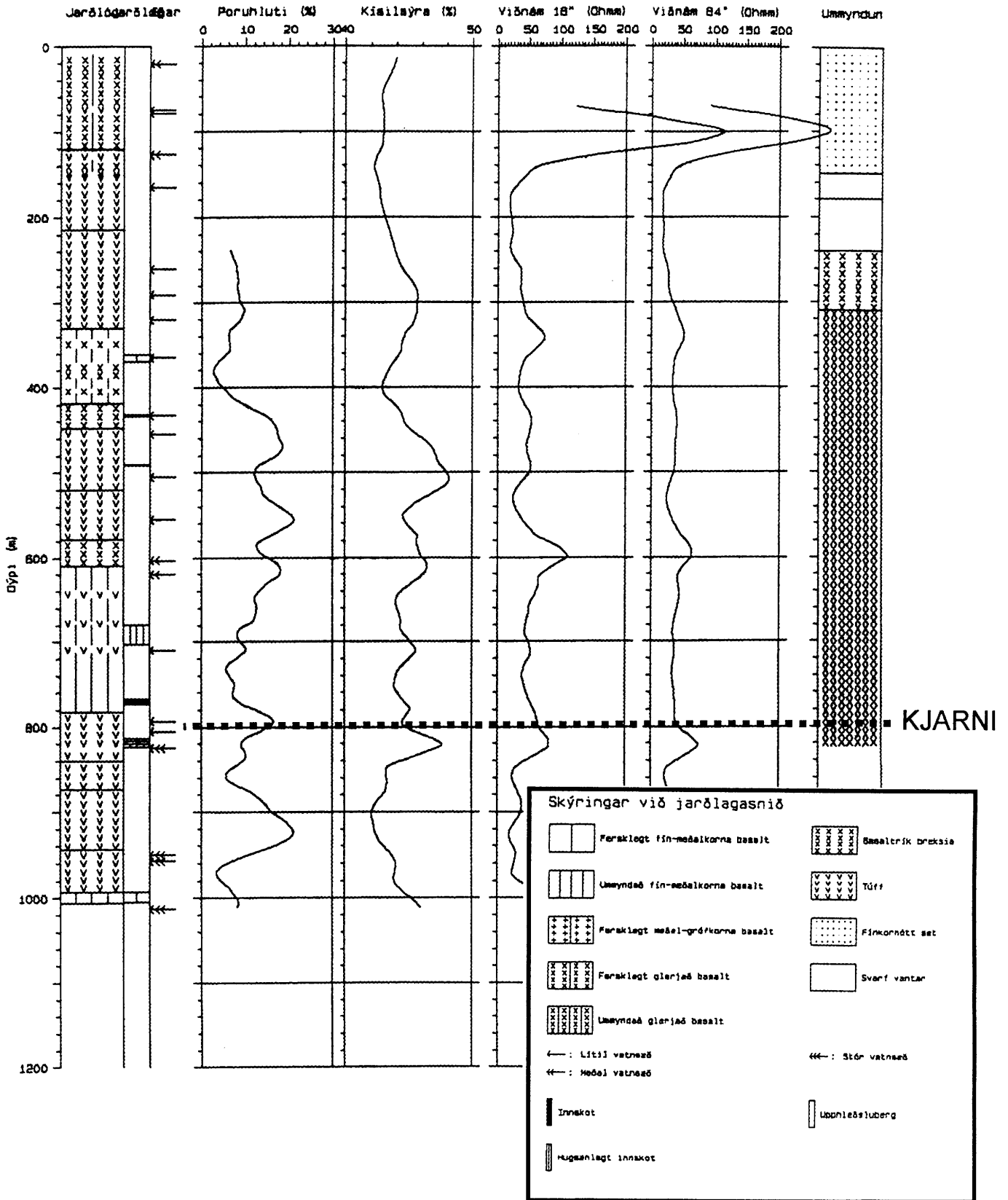
Mynd 2. Ljósmynd af kjarna.



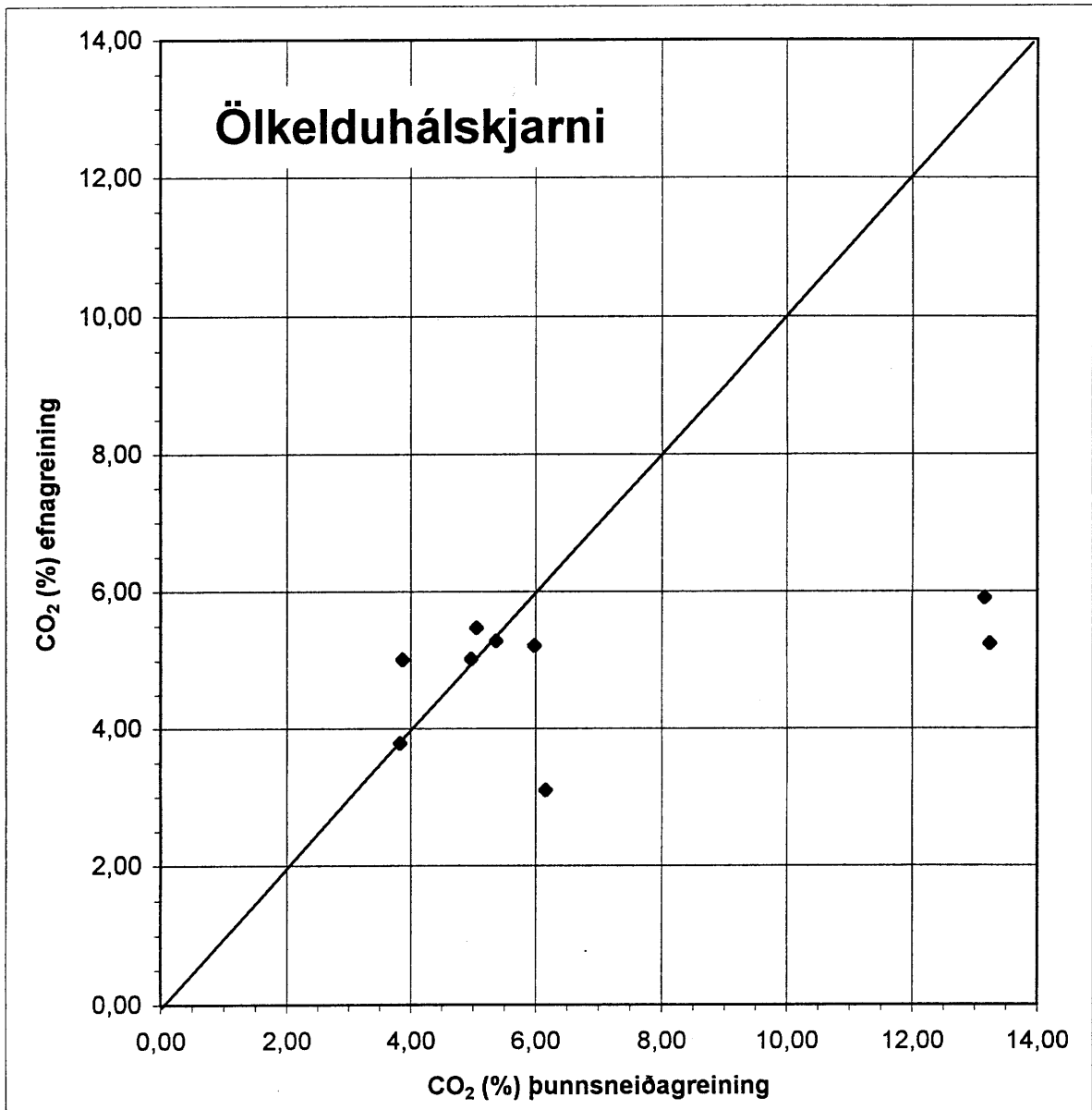


# Ölkelduháls hola ÖJ-01

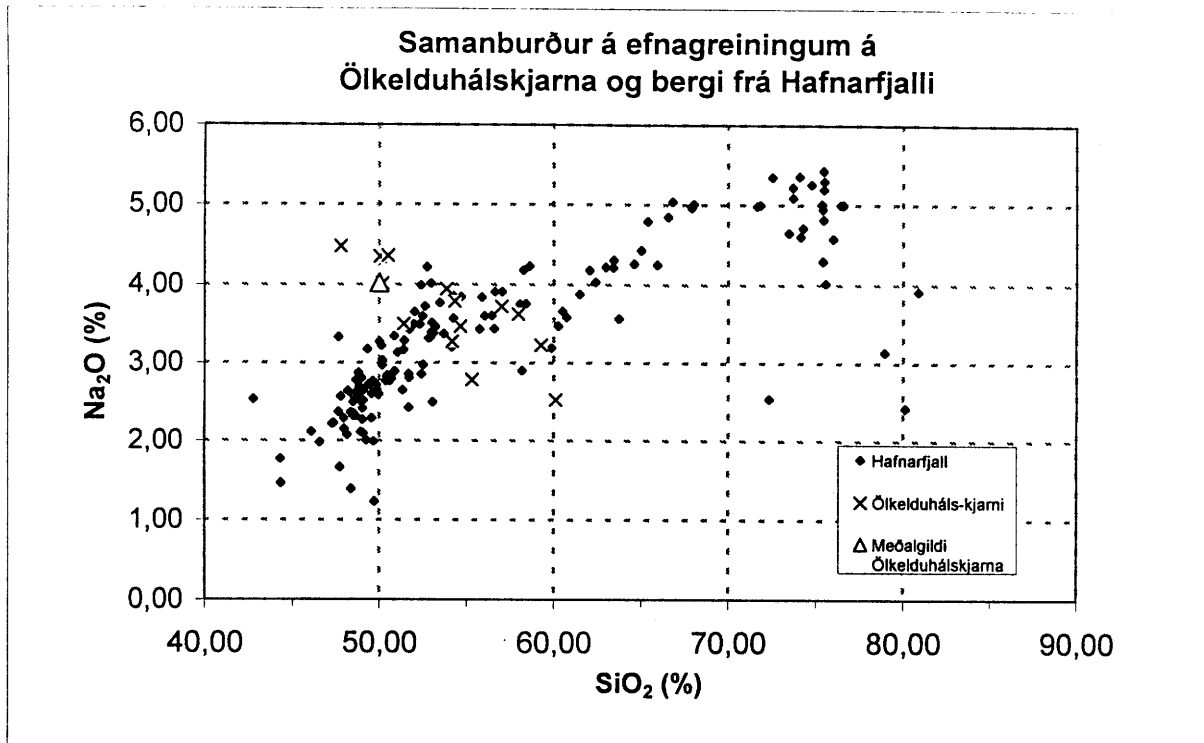
## Einfaldað jarðlagasnið, mælingar og ummyndun



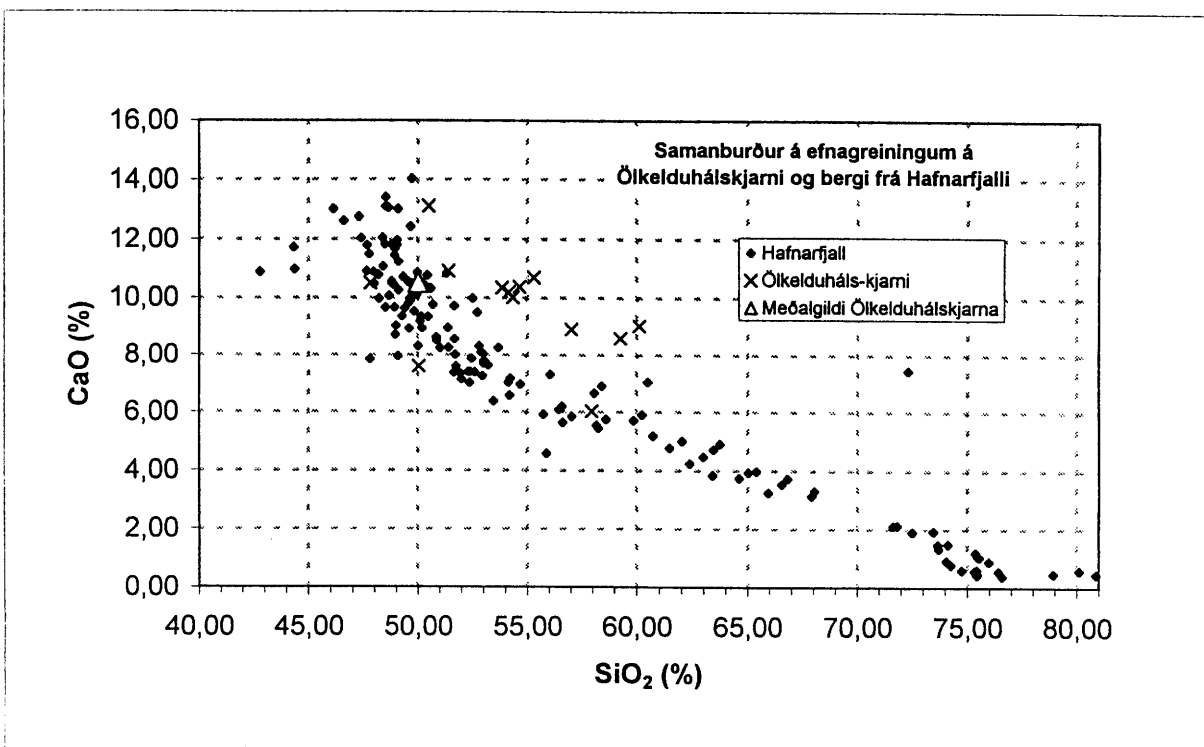
Mynd 4. Einfaldað jarðlagasnið, jarðlagamælingar og ummyndunarbelti.



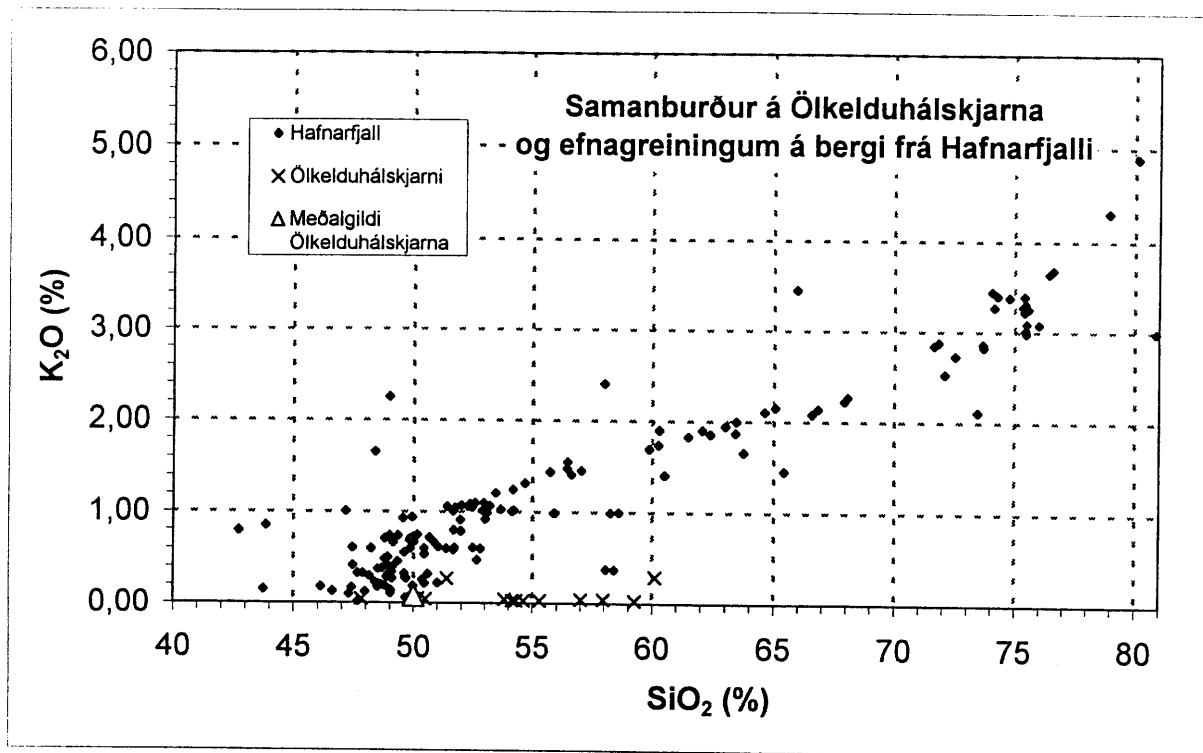
**Mynd 5.** Samanburður á CO<sub>2</sub> við þunnsneiðaskoðun og efnagreiningar.



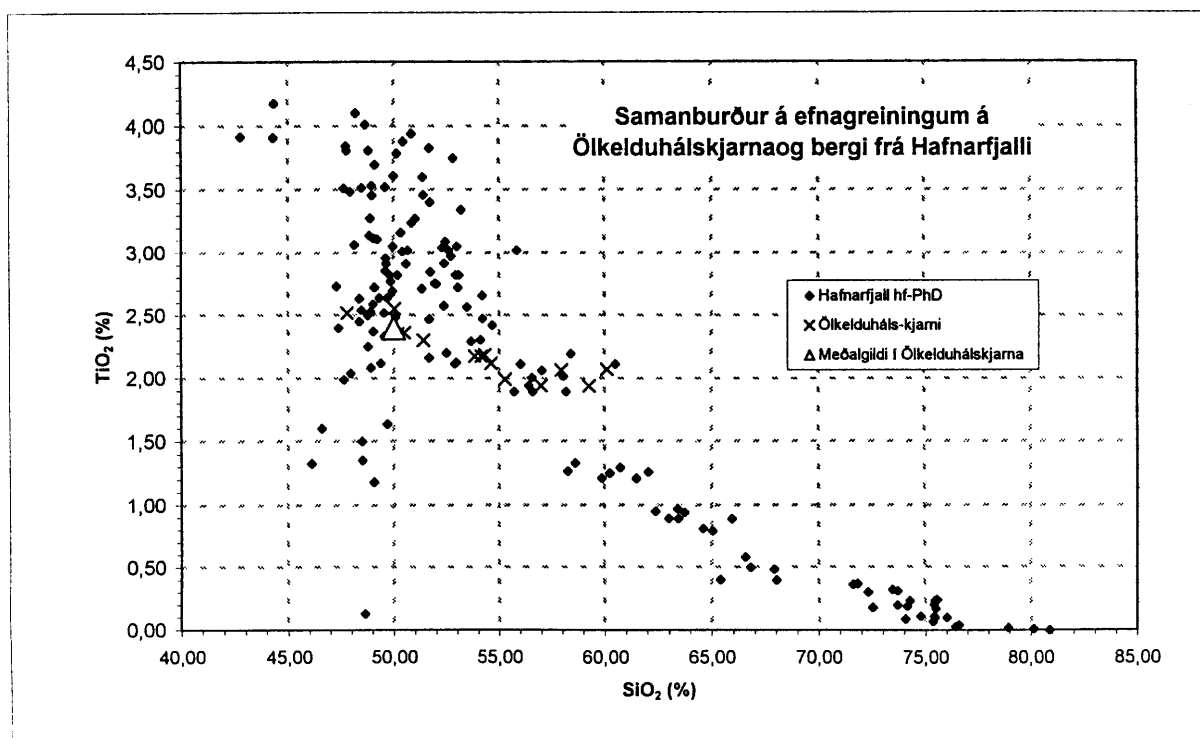
**Mynd 6.** Samband  $\text{SiO}_2$  og  $\text{Na}_2\text{O}$ . Samanburður sýna frá Hafnarfjalli-Skarðsheiði og Ölkelduhálskjarna.



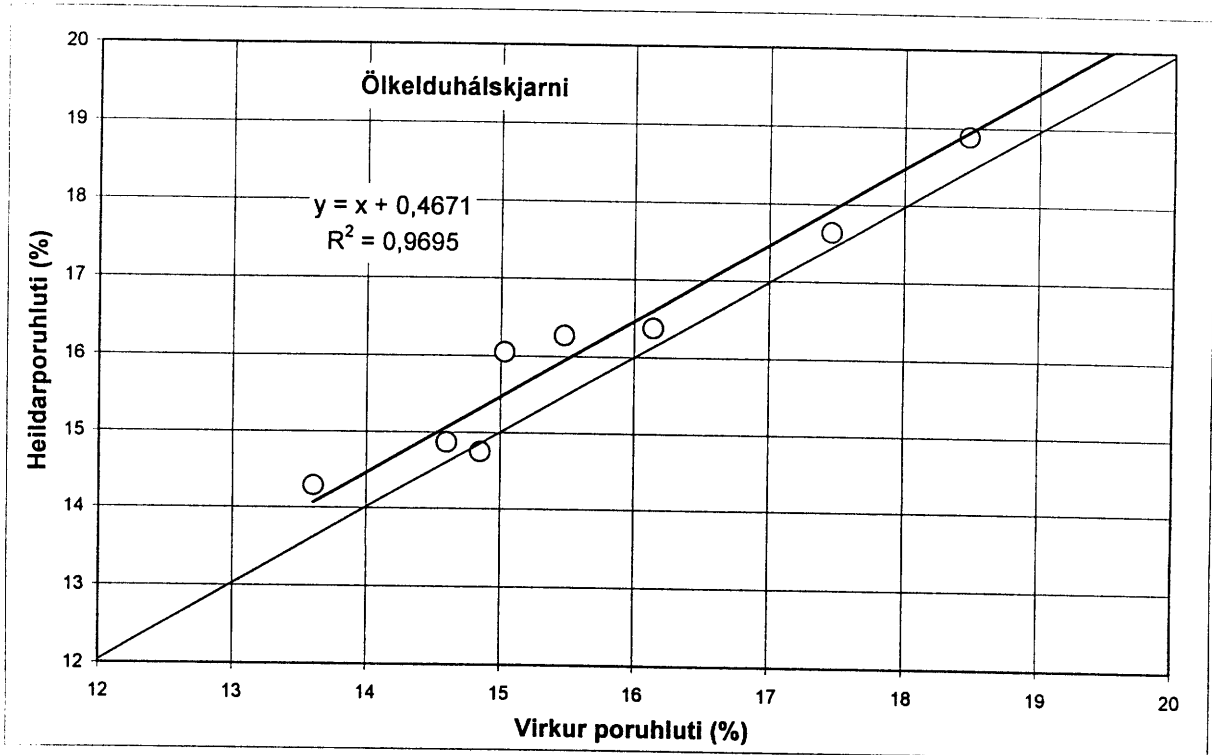
**Mynd 7.** Samband  $\text{SiO}_2$  og  $\text{CaO}$ . Samanburður sýna frá Hafnarfjalli-Skarðsheiði og Ölkelduhálskjarna.



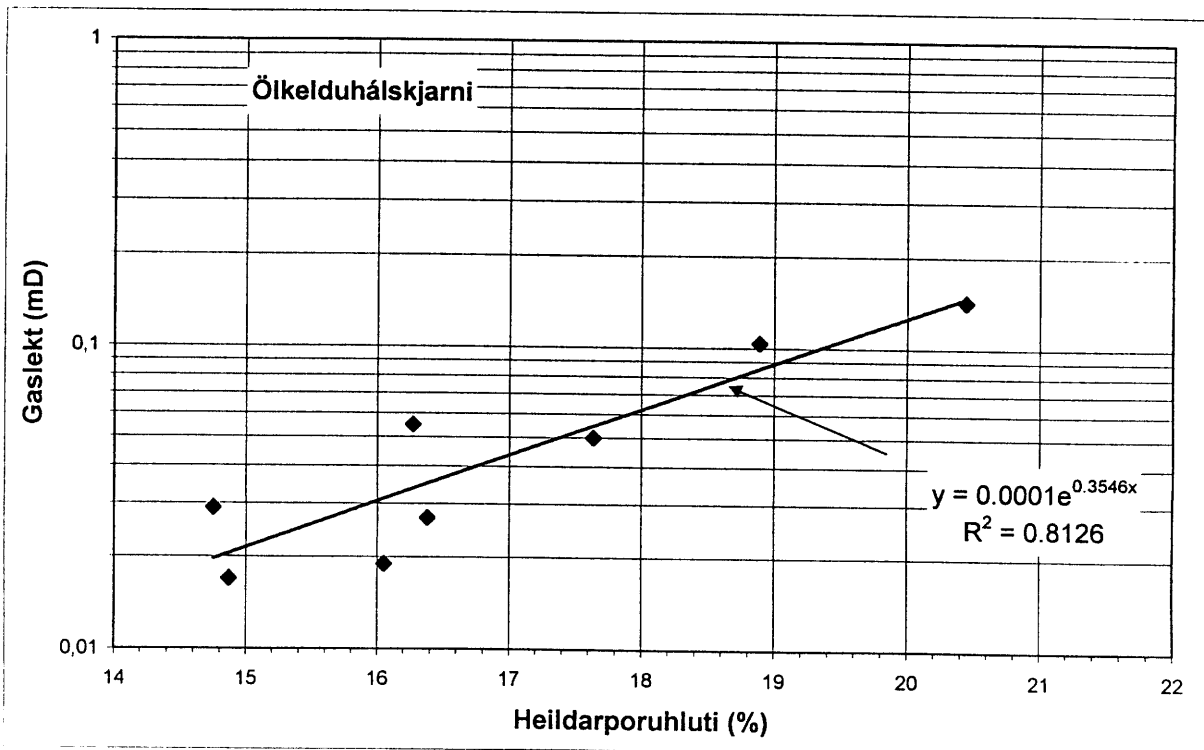
**Mynd 8.** Samband  $SiO_2$  og  $K_2O$ . Samanburður sýna frá Hafnarfjalli-Skarðsheiði og Ölkelduhálskjarna.



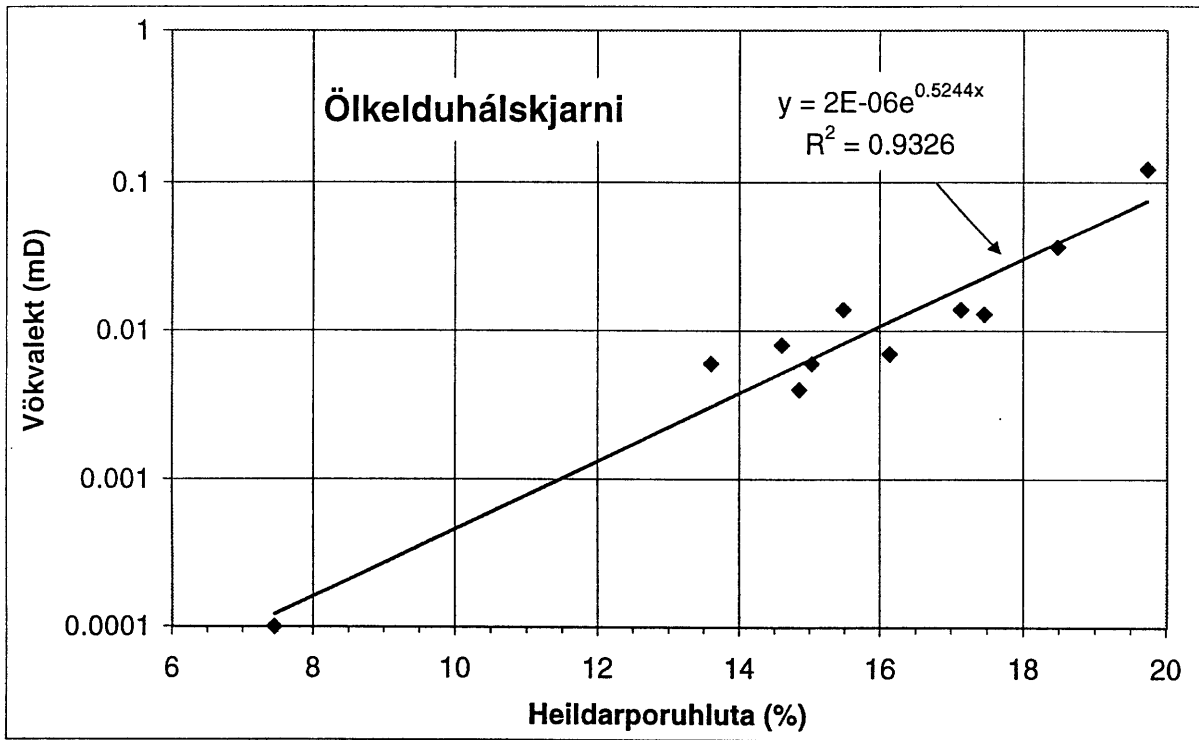
**Mynd 9.** Samband  $SiO_2$  og  $TiO_2$ . Samanburður sýna frá Hafnarfjalli-Skarðsheiði og Ölkelduhálskjarna.



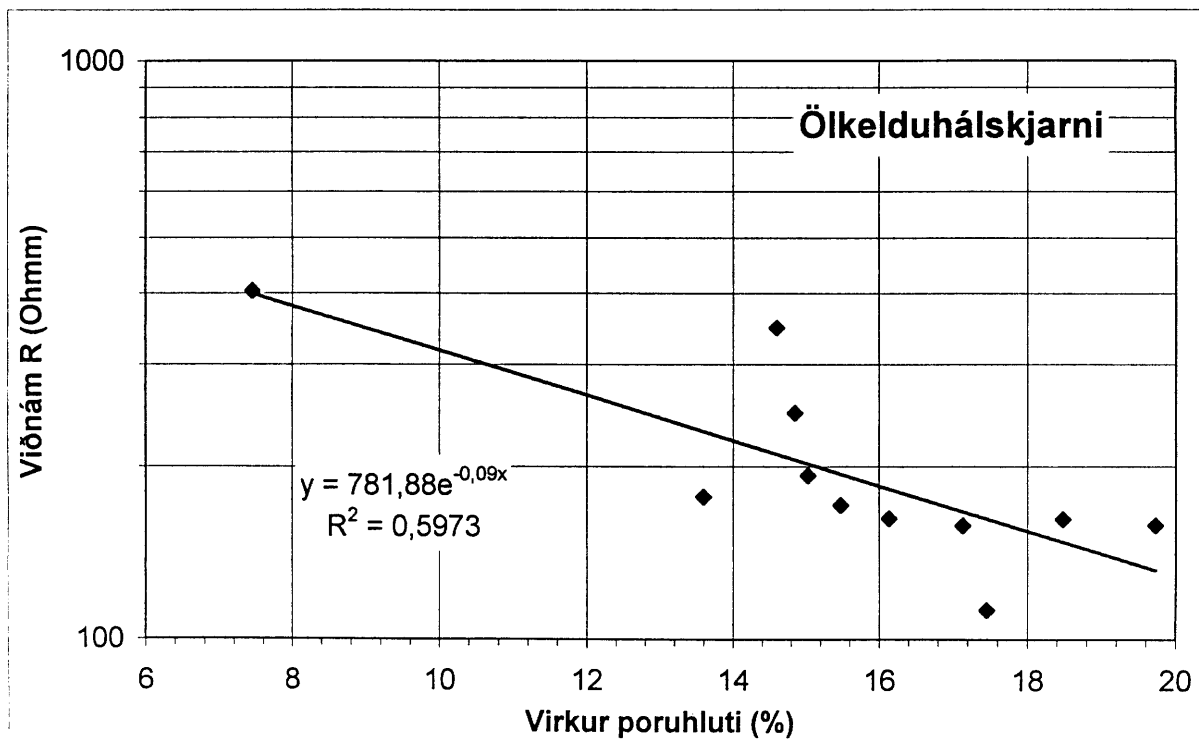
Mynd 10. Samanburður á virkum poruhluta og heildarporuhluta.



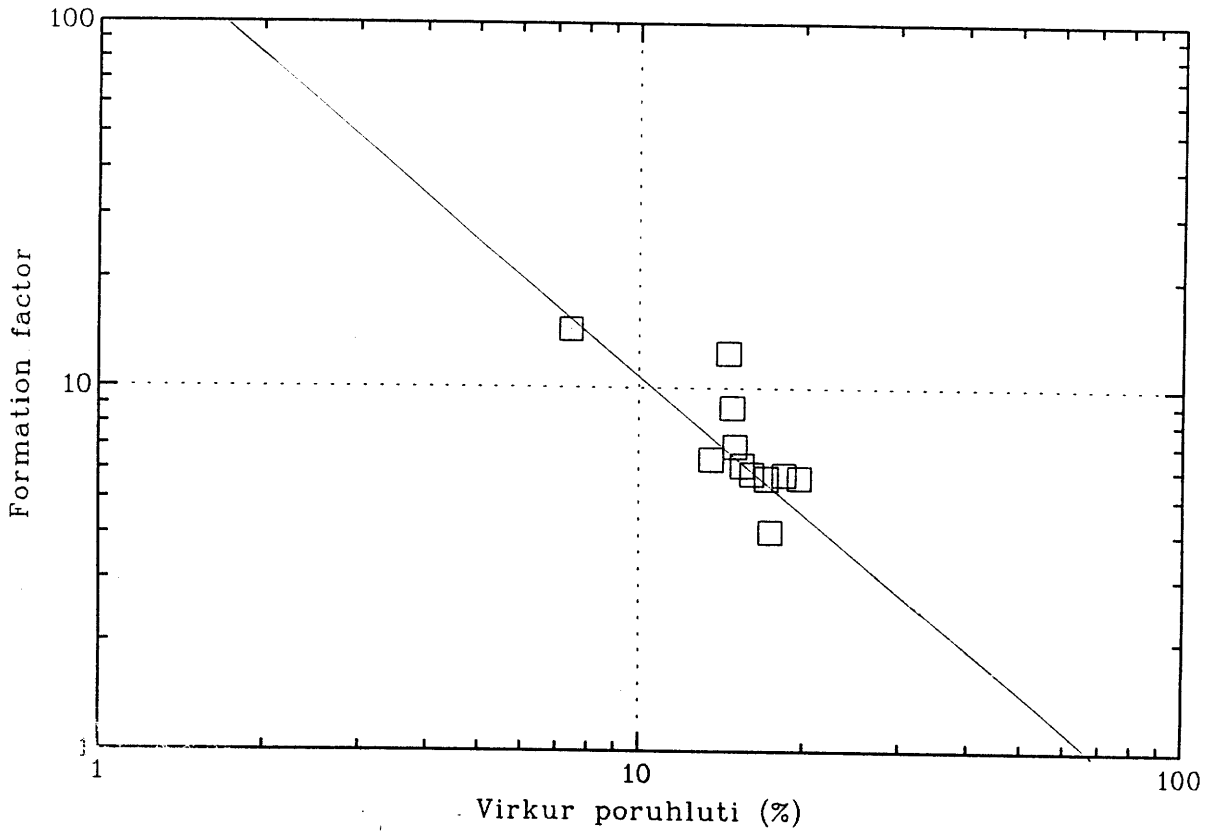
Mynd 11. Samband gaslektar og heildarporuhluta.



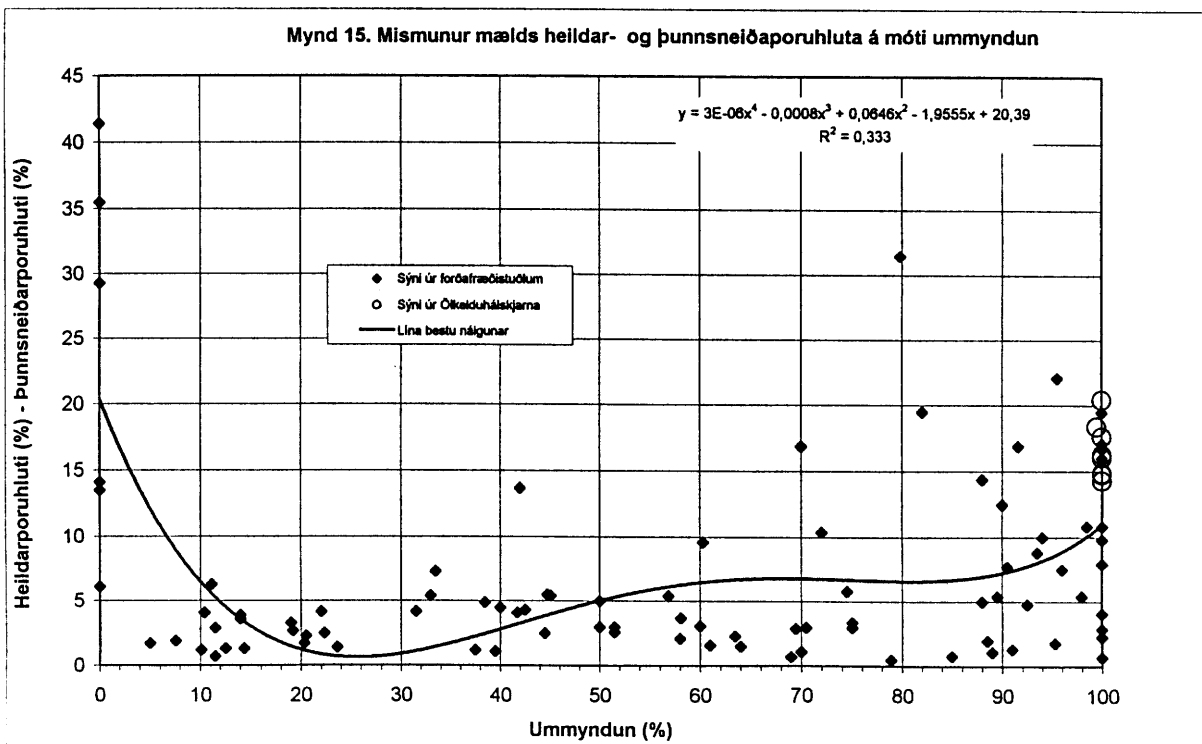
Mynd 12. Samband vökvalektar og heildarporuhluta.



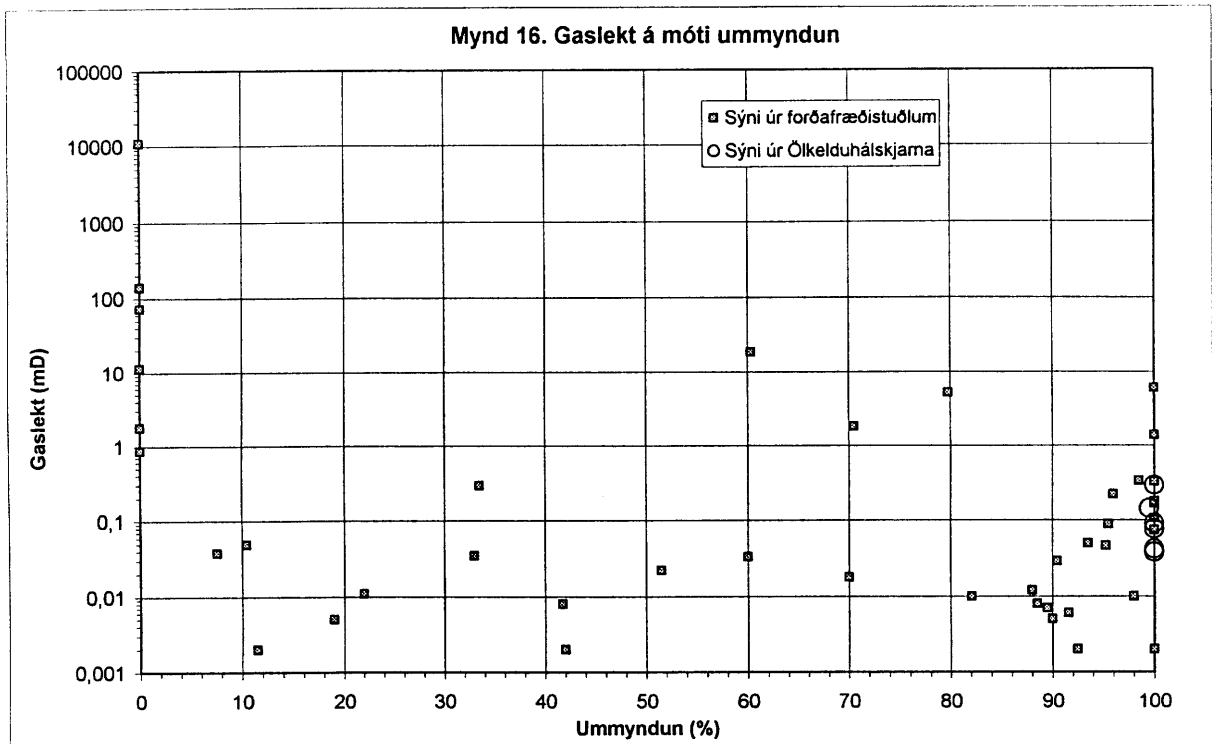
Mynd 13. Samband virks poruhluta og viðnáms ( $R_o$ ).



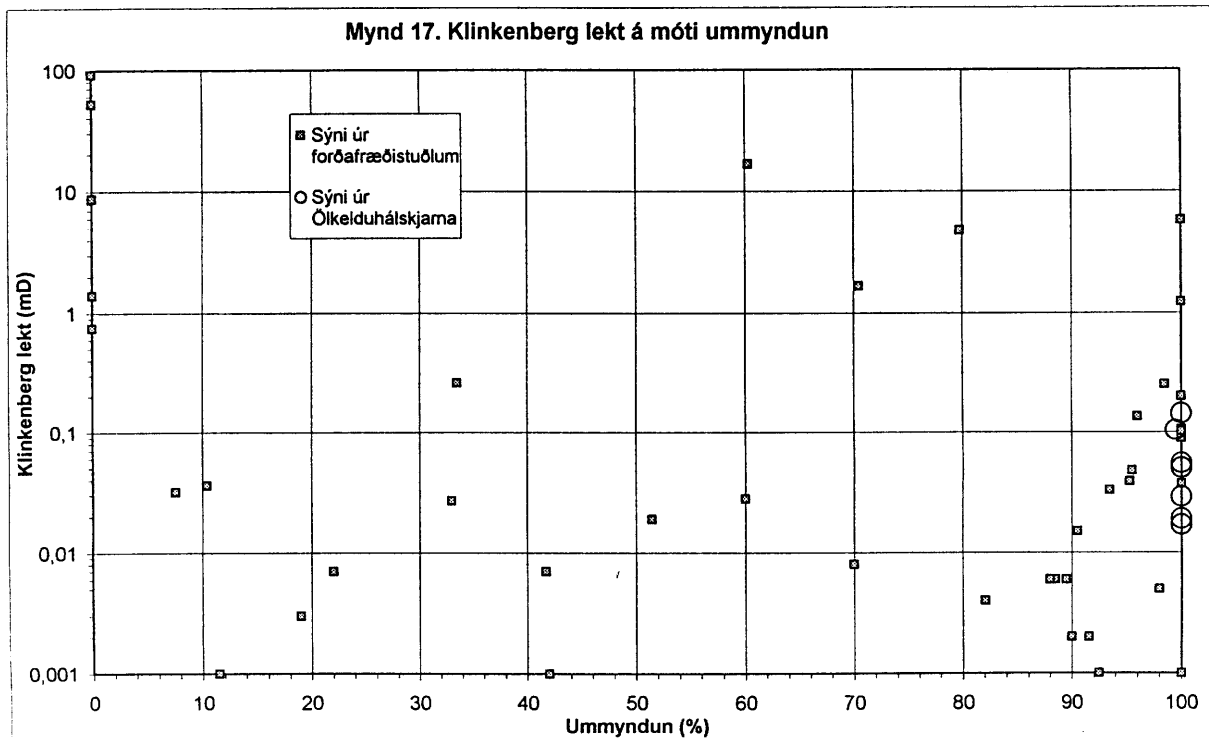
Mynd 14. Samband "formation factor" og poruhluta.



Mynd 15. Mismunur mældsheildarporuhluta og þunnsneiðaporuhluta sem fall af ummyndun.

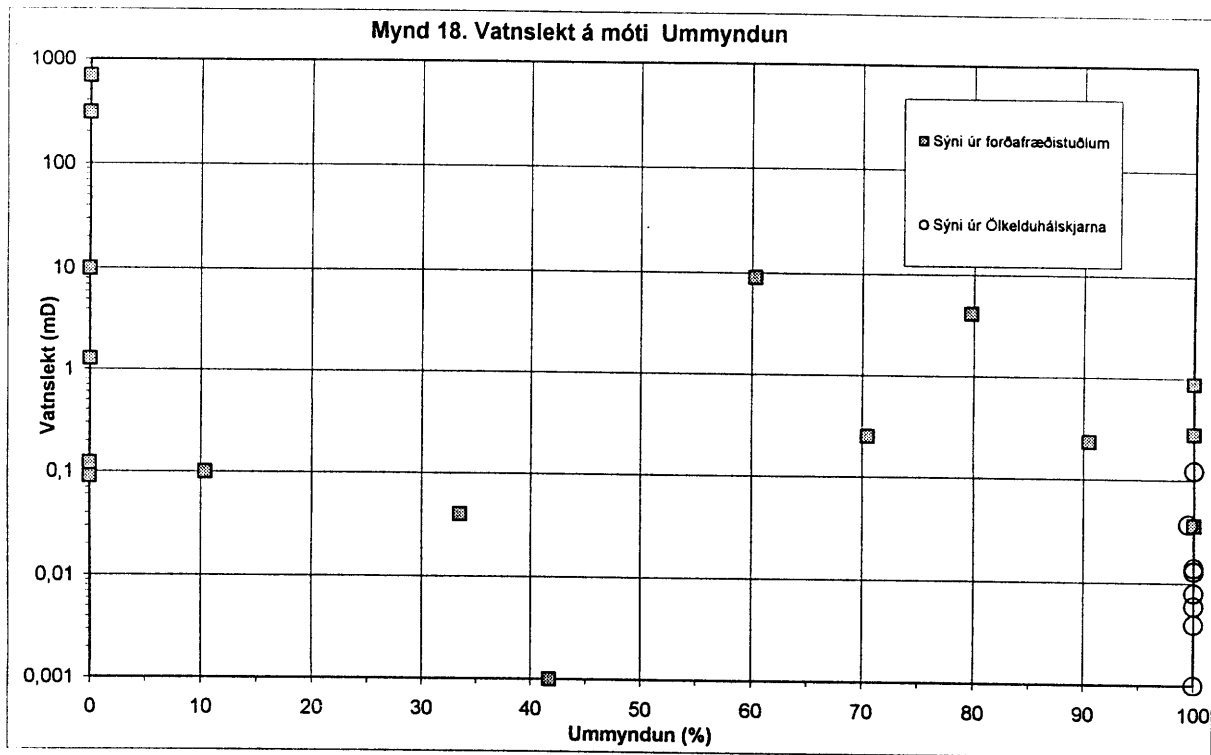


**Mynd 16.** Samband gaslektar og ummyndunar.

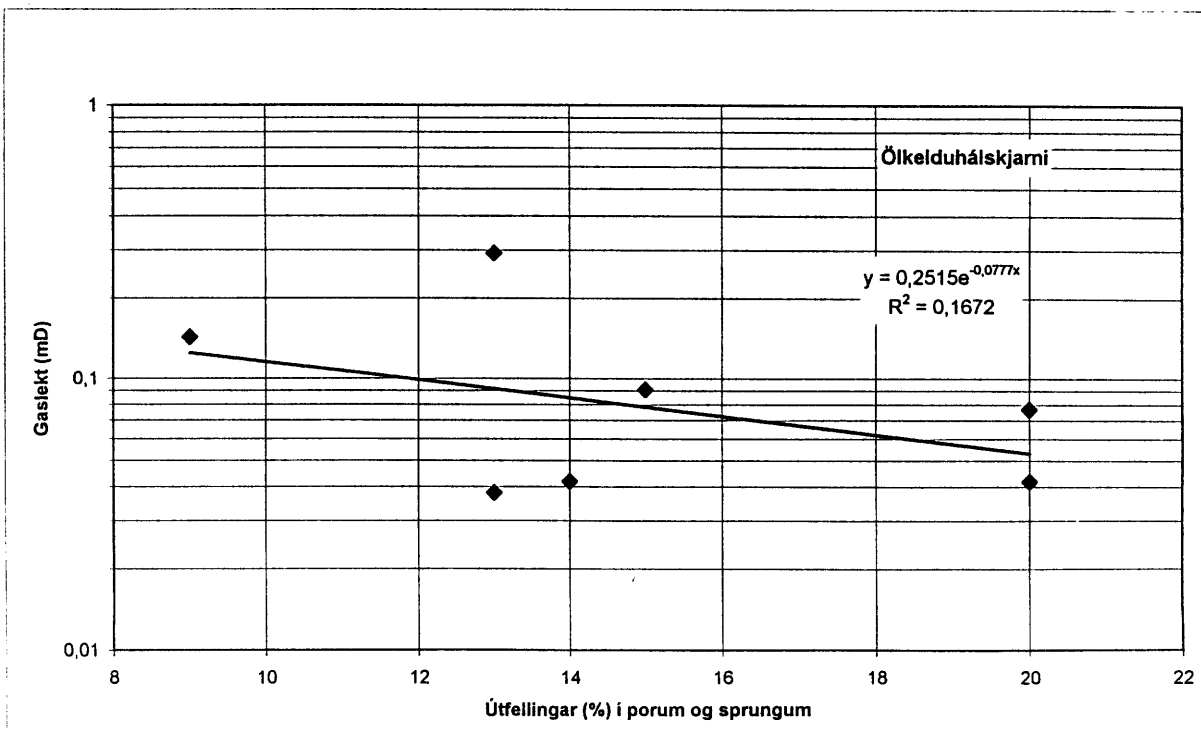


**Mynd 17.** Reiknuð Klinkenberglekt sem fall af ummyndun.

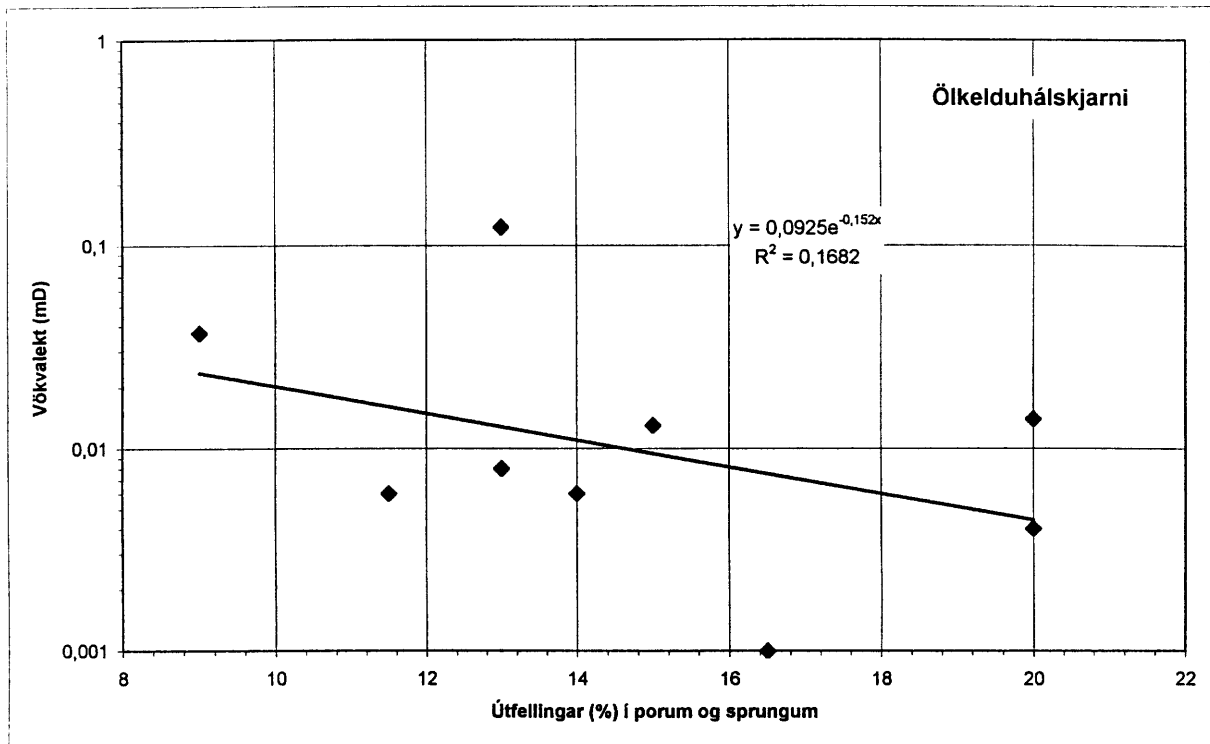




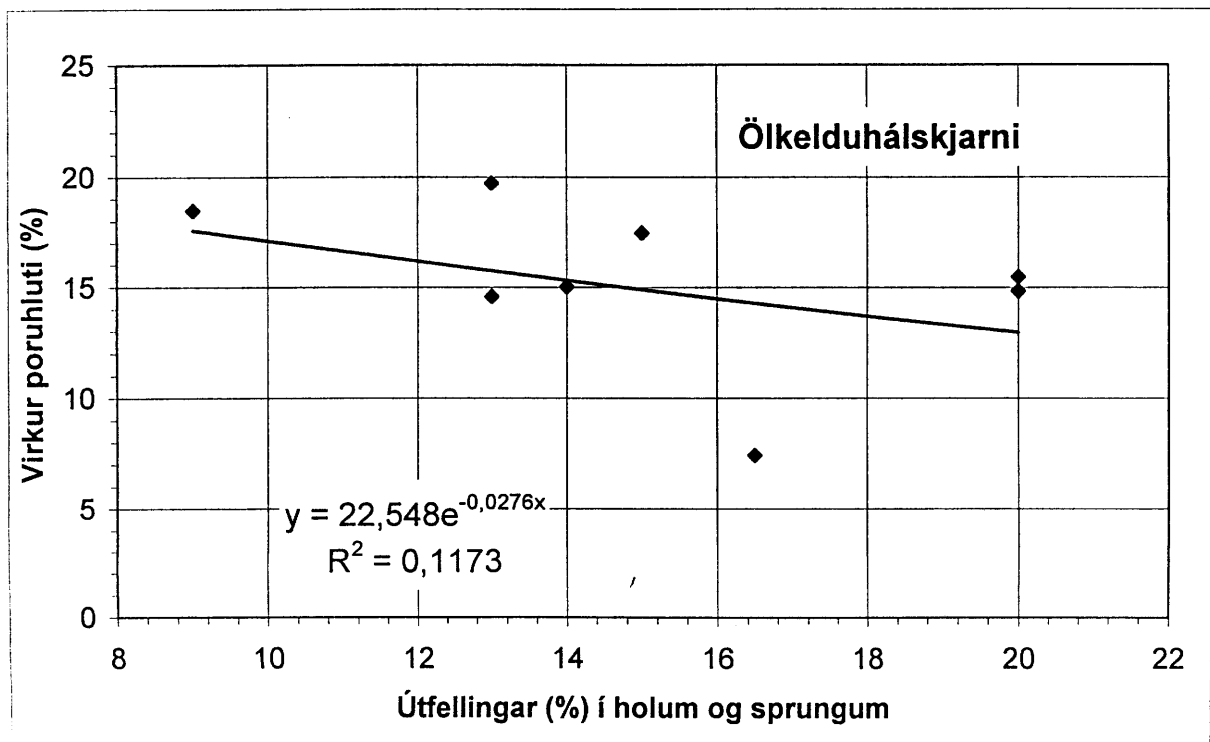
**Mynd 18.** Samband vökvalektar og ummyndunar.



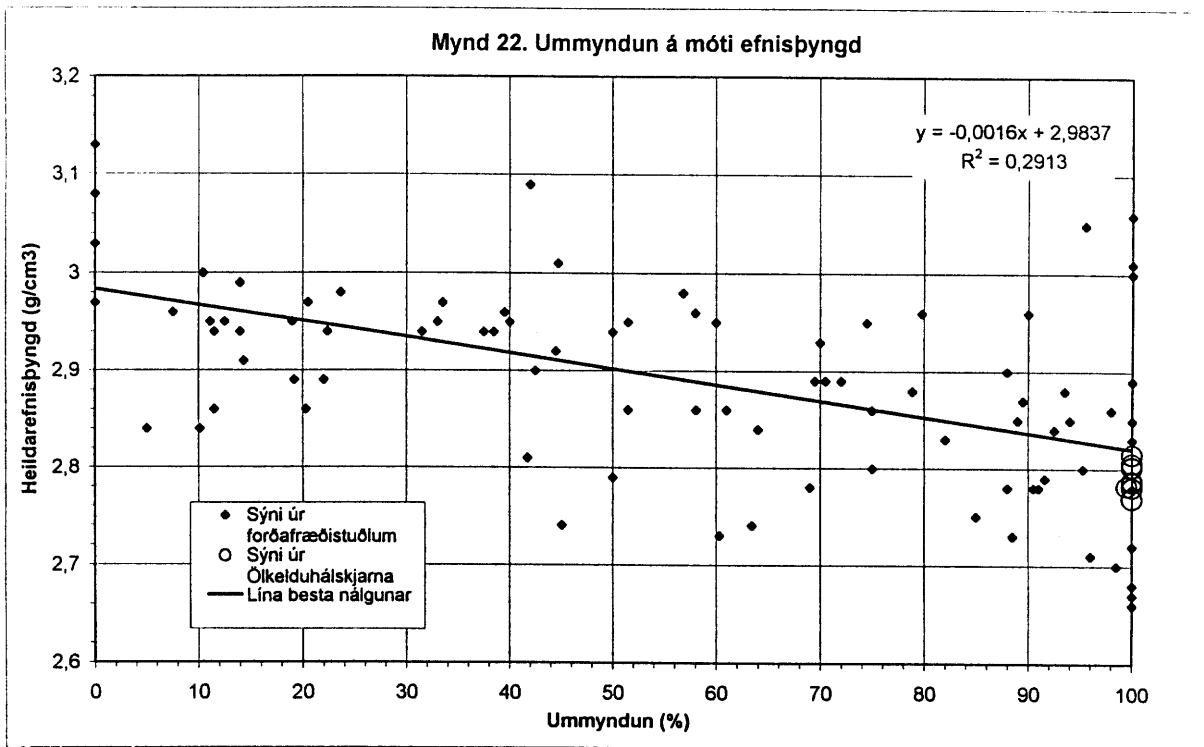
**Mynd 19.** Samband gaslektar og útfellinga.



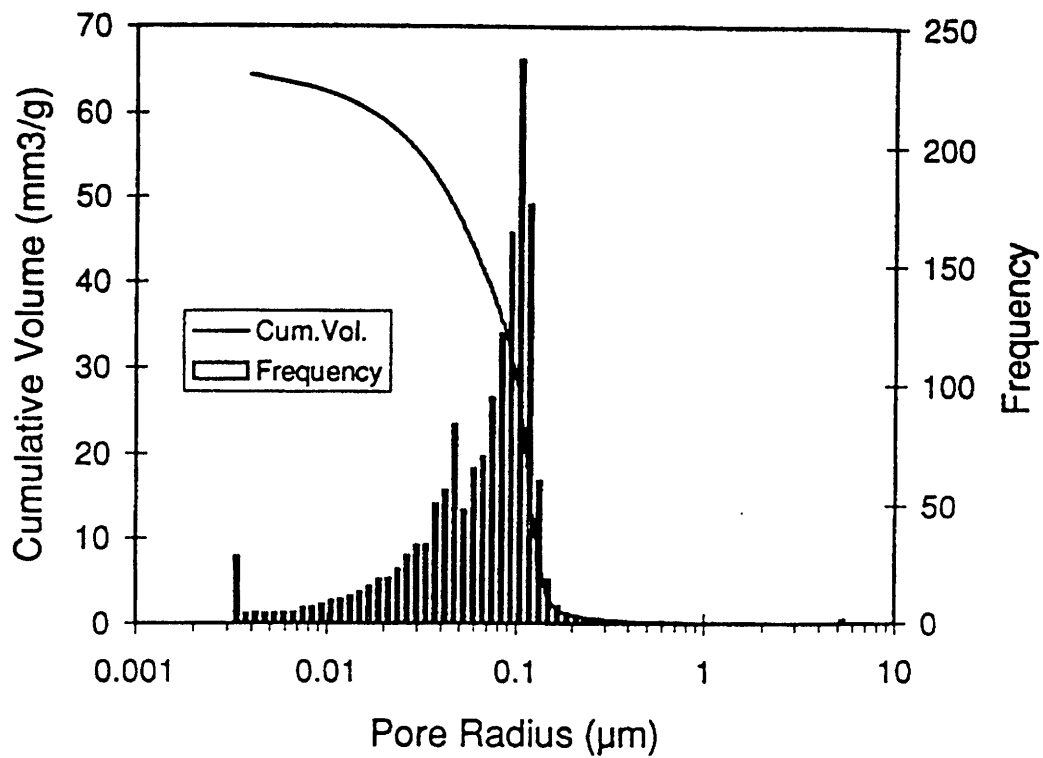
Mynd 20. Samband vökvalektar og útfellinga.



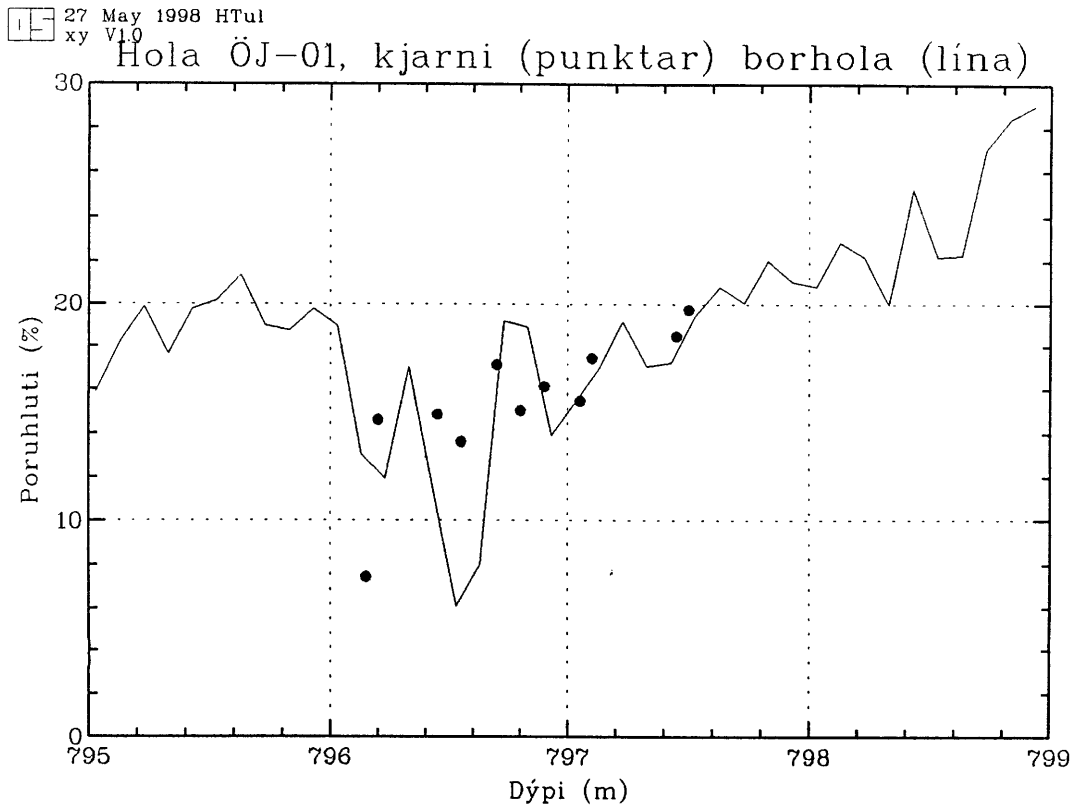
Mynd 21. Samband virks poruhluta og útfellinga.



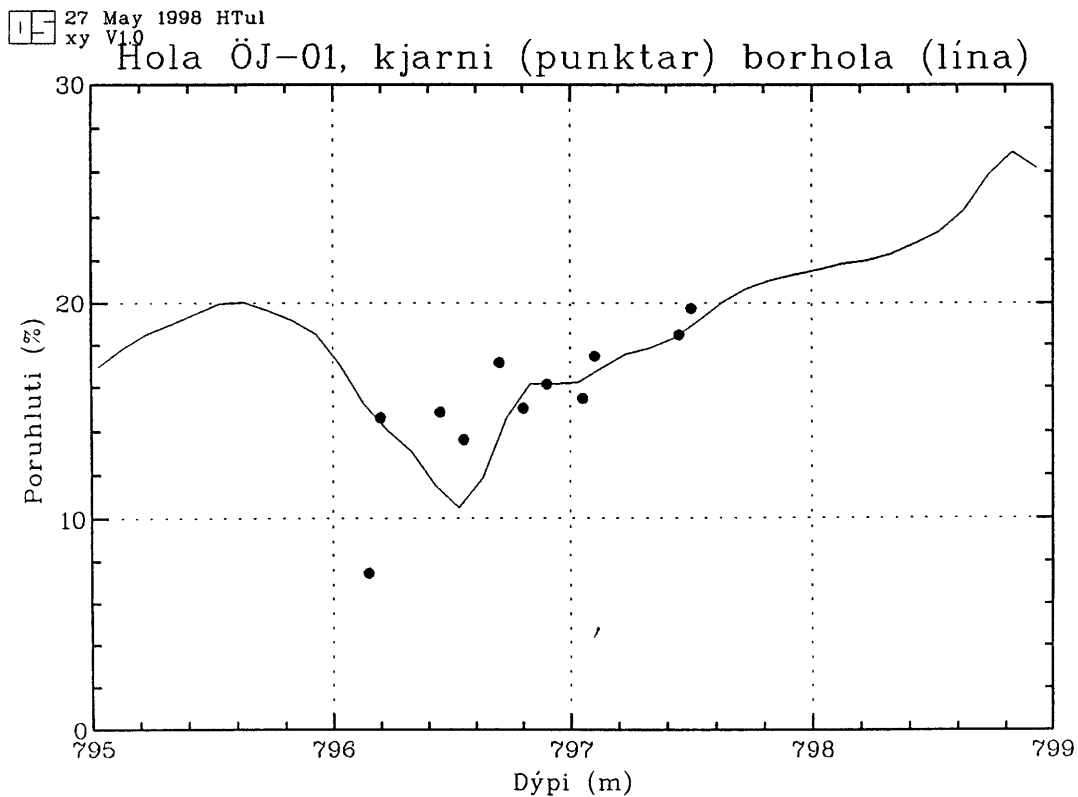
Mynd 22. Samband heildareðlisþyngdar og ummyndunar.



Mynd 23. Fjöldi pora sem fall af þvermáli pora.



Mynd 24. Samband mælds poruhluta og reiknaðs poruhluta út frá nifteindamælingu.



Mynd 25. Samband mælds poruhluta og reiknaðs poruhluta út frá síðri nifteindamælingu.



## **VIÐAUKI 1**

**Skýrsla Dönsku jarðfræðistofnunarinnar um rannsókn á Ölkelduhálskjarna  
(Conventional and special core analysis of cores from well ÖJ-1)**



DGU Service report no. 59 • 1995

# CONVENTIONAL AND SPECIAL CORE ANALYSIS

For Orkustofnun

Well: ÖJ-1

Core Analysis Laboratory

By Niels Springer and Jan Andersen

Confidential report

Copy no.

5

Not to be released



---

# Contents

---

1. Introduction .....	3
2. Sampling and analytical programme .....	4
3. Flow diagram of the analytical procedure .....	5
4. Analytical Methods .....	6
4.1 Conventional cleaning and drying .....	6
4.2 Gas permeability .....	6
4.3 Klinkenberg permeability .....	6
4.4 He-porosity and grain density .....	7
4.5 Archimedes porosity .....	7
4.6 Fluid saturation determination .....	7
4.7 Precision of analytical data .....	8
4.8 Electrical measurements at room conditions .....	9
4.9 Liquid permeability .....	10
5. Results .....	11
5.1 Core analysis results .....	11
5.2 Chemical analysis of pore water .....	14
5.3 Formation brine data .....	15
5.4 Mercury injection test .....	16
5.5 Acoustic velocity and thermal conductivity .....	16

---

# 1. Introduction

---

By request of ORKUSTOFNUN, DGU Core Analysis Laboratory has carried out conventional and special core analysis on material from the Ölkelduhals well ÖJ-1.

The analytical programme was specified in a fax transmission from Orkustofnun dated February 6, 1995. The analytical programme included the following subjects:

- Extraction of fluids from 4 plugs
- Chemical analysis of the extracted fluids
- Isotopic analysis of the extracted fluids
- Drilling of 10 plugs for core analysis
- Conventional core analysis on 10 plugs
- Liquid permeability determined on 10 plugs
- Formation resistivity factor measured on 5 plugs
- Mercury injection test on 1 plug
- Total porosity measured on the remaining 9 plugs
- Acoustic velocity measured on 2 plugs
- Thermal conductivity measured on the same 2 plugs

Preliminary data and correspondence relating to the subject has been mailed on 13.02, 28.02, 18.04, 02.06 and 18.08.1995 to Mr. Ómar Sigurdsson who has been the contact person at Orkustofnun during this study.

---

## 2. Sampling and analytical programme

---

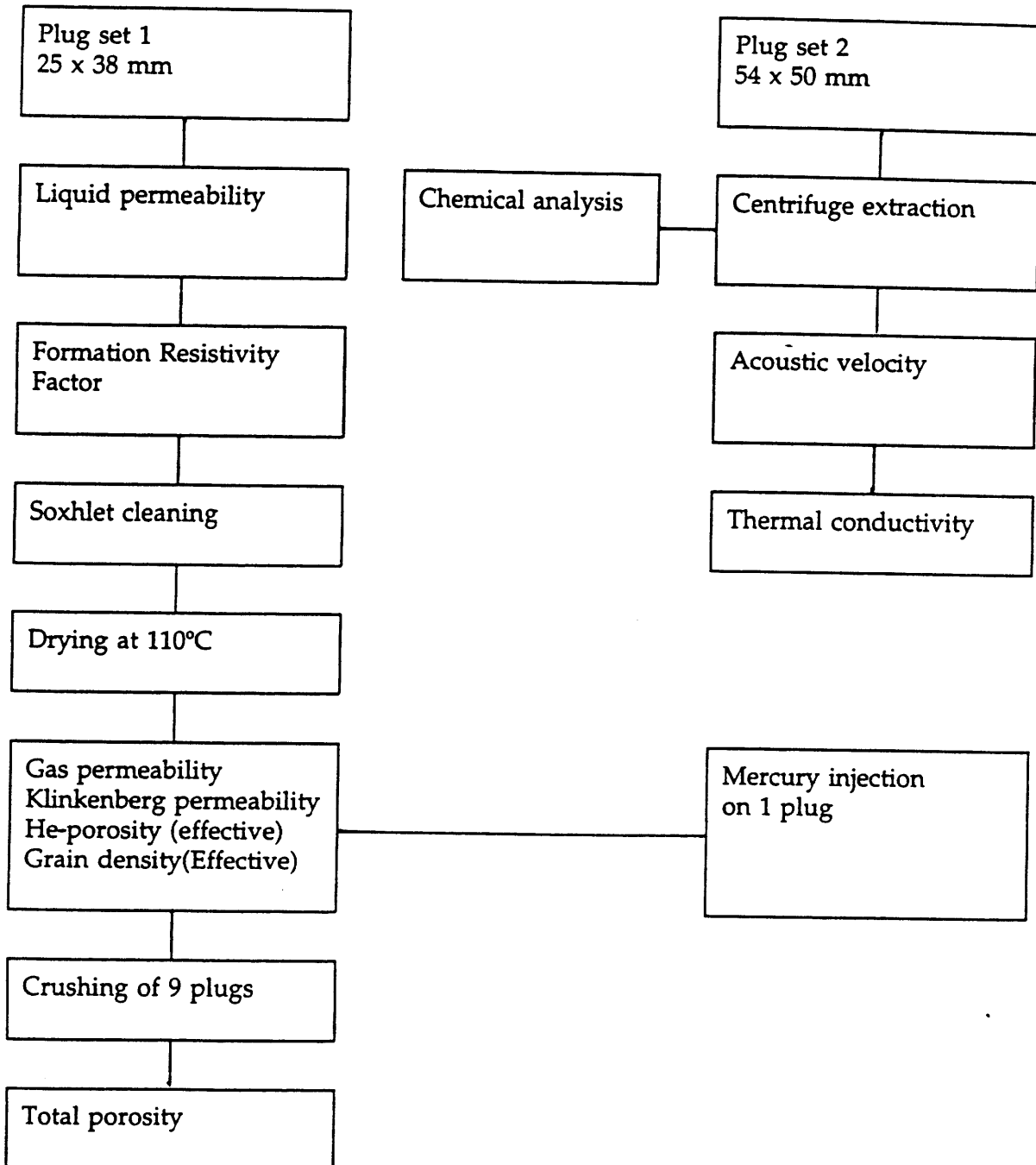
A total of 6 pcs. of full core, numbered 6 - 11 and approx. 10-15 cm long, was received for analysis on February 24, 1995. The samples were packed in plastic bags but were not sealed. No depth indication was found on the core pieces. For reference then, all plugs drilled from the full core pieces have as their first digit the same number as the full core piece from which they were drilled. Four samples were immediately selected for formation water analysis and placed in a deep freezer. After freezing 4 plugs of 54 mm diameter were drilled using liquid nitrogen as a coolant. These samples were then handled to the Geochemical Dept. for further analysis as described in a later section. On April 3, 1995 10 litres of Laugarnes formation water was received. This brine was used during the special core analysis programme, and a sample was analyzed in the Geochemical Dept. as well, section 5.3.

After extraction of formation water, two of the large 54 mm plugs were resaturated and forwarded for acoustic velocity and thermal conductivity measurement at the Danish Geotechnical Institute. A separate report on this study is included.

Due to the limited supply of core material, the four 54 mm plugs were later plugged to obtain a 1" diameter plug for conventional core analysis. Further, seven 1" diameter plugs were drilled from the remaining core material, making up a total of 11 plugs for routine and special core analysis.

The liquid permeability to water and the formation resistivity factor was determined, and the plugs were then cleaned in methanol and dried at 110 °C. The plugs were passed on to conventional core analysis, but 2 plugs broke during analysis and could not pass the complete analytical programme. After analysis, 10 plugs were recleaned in methanol and dried at 110 °C. One plug was sent to ResLab in Norway for mercury injection test; a separate report on this study is included. The remaining 9 plugs were crushed down for determination of total porosity. The core analysis results are presented in section 5.

### 3. Flow diagram of the analytical procedure



---

## 4. Analytical Methods

---

The following is a short description of the methods used by the Core Analysis Laboratory. For a more detailed description of methods, instrumentation and principles of calculation the reader is referred to API recommended practice for core-analysis procedure (API RP 40, 1960).

### 4.1 Conventional cleaning and drying

The plugs are drilled and trimmed to a size of 1" diameter and 1.5" length. The samples are then placed in a Soxhlet extractor, which continuously soaks and washes the samples with methanol. This process removes water and dissolves salt precipitated in the pore space of the rock. Extraction is terminated when no chloride ions are present in the methanol. Samples containing hydrocarbons are then cleaned in toluene until a clear solution is obtained. Samples are vacuum dried at 90°C or 110°C, or they are humidity dried at 60°C and 40% relative humidity until constant weight occurs, depending on the requirements of the client.

### 4.2 Gas permeability

The plug is mounted in a Hassler core holder, and a confining pressure of 400 psi applied to the sleeve. The specific permeability to gas is measured by flowing nitrogen gas through a plug of known dimensions at differential pressures between 0 and 1 bar. No back pressure is applied. The readings of the digital gas permeameter are checked regularly by routine measurement of permeable steel reference plugs.

### 4.3 Klinkenberg permeability

**Steady state instrument (DGU M1989):** The Klinkenberg corrected gas permeability, sometimes termed the equivalent liquid permeability, is calculated from gas permeability measurements performed at 3 different mean pressures in the plug sample.

The plug is mounted in a Hassler core holder, and a confining pressure of 400 psi is applied to the sleeve. Nitrogen gas pressures of 3, 5 and 8 atm. (abs.) are applied at the upstream end of the plug, and the downstream pressure is regulated until a suitable flow is obtained. The differential pressure is kept approx. constant in order to maintain a similar flow regime during the 3 measurements. When a steady state is reached, the upstream pressure, the differential pressure across the plug and the flow reading is recorded. A linear regression of permeability on inverse mean pressure is performed for the 3 measurements, and the intercept on the permeability axis is the Klinkenberg corrected gas permeability.

Klinkenberg corrected gas permeabilities are only reported down to approx. 0.1 Md on normal routine terms. The performance of the digital gaspermeameter is checked regularly by routine measurements of permeable steel reference plugs.

**Unsteady state instrument (Coretest OPP 610):** The automatic overburden permeameter-porosimeter measures gas permeability, equivalent liquid permeability and porosity at overburden pressures to 10,000 psi. The lower limit of permeability is below 1  $\mu$ D. The unsteady state or transient technique gives the Klinkenberg corrected permeability, slip and turbulence factors with a single measurement (Stan Jones, 1972). A conventional air permeability is calculated from the measured data at a specified mean pore pressure.

#### **4.4 He-porosity and grain density**

The effective porosity is measured on cleaned and dried samples. The porosity is determined by subtraction of the measured grain volume and the measured bulk volume. The Helium technique, employing Boyle's Law, is used for grain volume determination, applying a double chambered Helium porosimeter with digital readout, whereas bulk volume is measured by submersion of the plug in a mercury bath using Archimedes principle. The effective grain density is calculated from the grain volume measurement and the weight of the cleaned and dried sample.

The total porosity is calculated from the bulk volume and dry weight of the plug, and a measurement of the total grain density obtained on the crushed and pulverized plug.

#### **4.5 Archimedes porosity**

Samples that are saturated to 100% with a liquid can have their bulk volume determined by Archimedes test, i.e. by submersion in a jar containing the saturating liquid and weighing of the buoyancy. If the sample grain density is known (e.g. from a He-porosity measurement) or can be estimated with good precision, the sample pore volume and porosity can be calculated.

#### **4.6 Fluid saturation determination**

The water content of a plug is extracted by Dean Stark distillation with toluene. The water is retained by a condenser, and the amount is directly measured in a calibrated trap. The oil content of the plug is dissolved in the toluene. The quantity of oil is calculated as the difference between the original sample weight and the weight after extraction, corrected for the amount of water recovered. The plug is finally Soxhlet cleaned to remove salt precipitated in the pore space. The porosity is then measured as described above.

The calculation of fluid saturation presumes that the oil gravity is known. If it is unknown, a value is assumed in the final calculation, usually 1.0 g/ml for the brine and 0.85 g/ml for the oil. The percentage of the plug pore volume which is not occupied by either water or oil is the gas saturation.

#### 4.7 Precision of analytical data

The table below gives the precision (= reproducibility) at the 68% level of confidence (+/- 1 standard deviation) for routine core analysis measurements performed at the DGU Core Analysis Laboratory.

Measurement	Range, Md	Precision
Grain density		0.003 g/cc
Porosity		0.1 porosity-%
Permeability: (Klinkenberg)	0.01-0.1	15%
	0.1-1	10%
	> 1	4%
Permeability: (Conventional)	0.001-0.01	25%
	0.01-0.1	15%
	> 0.1	4%

The precision of the fluid saturation determination depends on the pore volume of the plug. The greater the plug and the greater the porosity of the plug, the better precision is obtained. The following table gives the precision in absolute percent-point.

Porosity	1" x 1.5" plugs	1.5" x 3" plugs
> 20%	5%	1%
10-20%	10%	2%
5-10%	20%	5%
< 5%	> 20%	> 5%

Certain factors might alter the stated precision of the fluid saturation determination. Loss of material during handling of the plug will result in an increase in the calculated oil saturation, and a similar decrease in the calculated gas saturation. This may occur for fragile or loosely consolidated rocks or if the rock contains dissolvable matters like halite. As the lost material usually has a greater density than oil, it may happen that the estimated volume of oil and the measured volume of water all together take up more space than the actual pore volume after cleaning.

#### 4.8 Electrical measurements at room conditions

The measurements at room conditions are performed at a constant temperature of 22°C. Deviations from this temperature does not exceed 1°C.

##### Formations factor

In a "clean" formation (non-shaly) the formation resistivity FRF is described by the following set of equations:

$$FRF = \frac{R_o}{R_w} = \frac{a}{\emptyset^m}$$

Where  $R_o$  = resistivity of 100% saturated sample ( $\Omega$  m)  
 $R_w$  = resistivity of formation brine ( $\Omega$  m)  
 $\emptyset$  = porosity  
 $a$  = constant  
 $m$  = cementation factor

For a plug sample FRF is calculated from the following formula:

$$FRF = (1/R_w) \times (rA/L)$$

Where  $R_w$  = resistivity of brine in ( $\Omega$  m)  
 $r$  = resistance of plug sample in ( $\Omega$ ) at  $S_w = 100\%$   
 $A$  = area of plug in  $m^2$   
 $L$  = length of plug in m

Rearranging Archie's equation for the formation factor:

$$\log FRF = -m \log \emptyset a$$

produces a straight line relationship in a double logarithmic diagram where FRF is plotted as a function of  $\emptyset$ . The constant  $a$  is then determined as the intercept and the cementation factor  $m$  as the slope of the best fit straight line. Values for  $m$  are usually preferred for  $a=1$ , which is expected from theoretical grounds. Therefore a set of regression constants are given for a regression line which has been biased through (1,1).

The measurement of F is conducted at plugs which have been fully saturated with deaerated simulated formation brine, and placed in a resistivity core holder. The resistance of the plug is measured as the impedance to an AC signal of 1 KHz frequency. The resistivity of the brine is measured in a specially designed standard cell. The standard cell is calibrated using a suitable conductivity standard solution delivered by a recognized chemical company. Data logging is performed using the HP 4276A LCZ-meter controlled by an HP 85 desk top computer which facilitates fast data collection.



#### 4.9 Liquid permeability

The liquid permeability is measured by flowing liquid through the sample at a constant flow or differential pressure between 0 and 1 bar. The measurements are performed at room temperature with no back pressure applied. The liquid permeability rig is controlled by a PC based data acquisition program that monitors the differential pressure, the liquid flow rate and the temperature of the liquid. The measurement continues until the measured permeability is approximately constant with time. The reported liquid permeability is the mean value of several determinations performed over a period from a few minutes to several hours, depending on the permeability of the sample.

## 5. Results

### 5.1 Core analysis results

The results measured on the 1" diameter plugs are presented in table 5.1. It is observed that the maximum difference between the effective and the total porosity is 1%. The liquid permeability and formation resistivity factor were measured at a confining hydrostatic sleeve pressure of 400 psi (2.72 MPa). The results are presented in table 5.2. The porosity vs. formation resistivity factor plot yielded an anomalously low cementation factor of 1.09, fig. 5.1.

Table 5.2. ÖJ-1, listing of liquid permeability and formation resistivity factor.

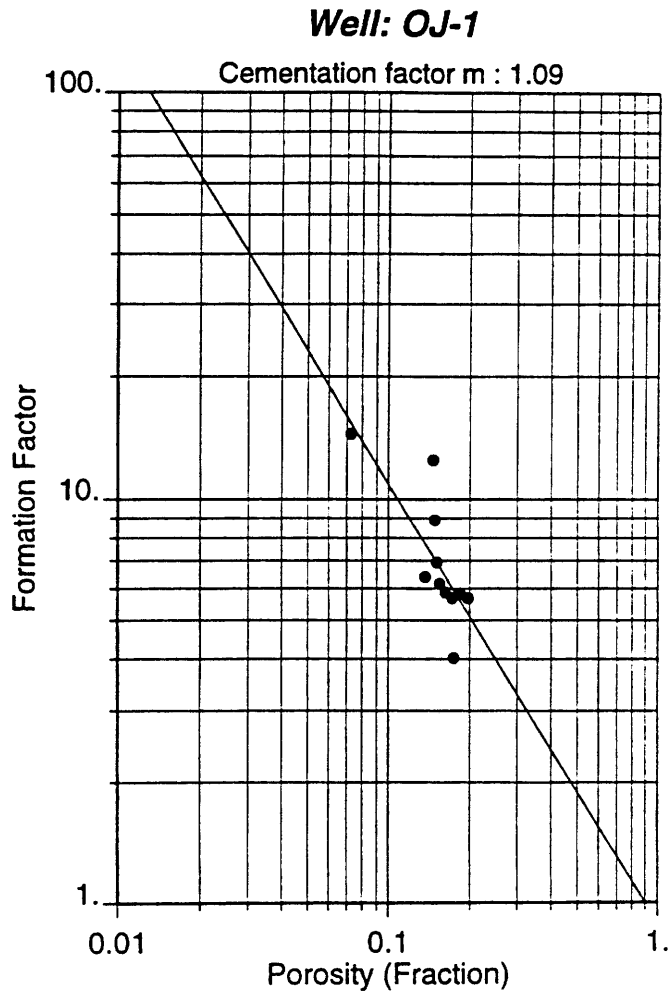
ORKUSTOFNUN, ÖJ-1				
Plug no.	Liquid permeability (Md)	Measured resistance $r$ (k $\Omega$ )'	Resistivity $R_o = r\pi D^2/4L$ ( $\Omega m$ )	FRF $R_o/R_w$
6.1	<0.000	30.4	404.2	14.5
6.2	0.008	26.3	348.3	12.5
7.1	0.004	15.1	247.0	8.86
7.2	0.006	13.4	177.2	6.38
8.1	0.014	11.9	158.0	5.67
8.2	0.006	14.5	193.0	6.93
9.1	0.007	9.9	162.8	5.84
10.1	0.014	12.9	171.4	6.15
10.2	0.013	8.5	112.7	4.04
11.1	0.037	12.2	162.1	5.81
11.2	0.123	11.9	158.4	5.68

Table 5.1. ÖJ-1, listing of conventional plug analysis data.

ORKUSTOFNUN, ÖJ-1												
Plug	D (mm)	L (mm)	Porosity (eff) (%)	Grain density (eff) (g/cc)	Porosity (total) (%)	Grain density (total) (g/cc)	FF $R_o/R_w$	Gas perm. (mD)	Gas perm. (mD)	Klinkenberg Slip factor b ( $10^{14}$ ft <sup>-1</sup> )	Corrected Data $\beta$ ( $10^{14}$ ft <sup>-1</sup> )	$\alpha$ ( $10^4$ $\mu$ m)
6.1	24.98	36.86	7.45	2.815	nd	nd	14.5			Plug broken		
6.2	24.96	36.95	14.60	2.802	14.87	2.814	12.5	0.038	0.017	78.2	0.0	0.0
7.1	25.1	30.25	14.85	2.769	14.75	2.769	8.86	0.042	0.029	26.9	16.2	15.4
7.2	24.96	36.85	13.60	2.806	14.29	2.834	6.38			Plug broken		
8.1	24.96	36.85	17.14	2.772	nd	nd	5.67	0.094	0.053	49.3	2.40	4.11
8.2	25.01	36.90	15.03	2.788	16.05	2.823	6.93	0.042	0.019	74.1	0.0	0.0
9.1	25.08	30.05	16.14	2.770	16.38	2.780	5.84	0.055	0.027	65.2	4.34	3.77
10.1	25.0	36.95	15.48	2.781	16.27	2.808	6.15	0.077	0.055	25.5	4.82	8.52
10.2	24.95	36.89	17.46	2.802	17.64	2.811	4.04	0.091	0.050	51.3	5.60	9.13
11.1	25.0	36.95	18.48	2.782	18.89	2.796	5.81	0.143	0.104	23.6	1.22	4.11
11.2	25.0	36.87	19.73	2.786	20.44	2.812	5.68	0.293	0.143	66.3	0.0	0.0

nd: not determined

Fig. 5.1. ÖJ-1, formation resistivity factor multi sample plot.



## 5.2 Chemical analysis of pore water

Due to the very low permeability of the material (<0.1 Md) only 1 ml of pore water could be extracted from the plug samples. This was sufficient for chemical analysis, but the isotope analysis of  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta \text{D}$  could not be carried out.

The procedure for the extraction and analysis of pore water was the following: 4 plugs of 54 mm diameter were cut while cooling with liquid nitrogen. The 4 plugs were then placed in special centrifuge buckets, allowed to stabilize at room temperature, and centrifuged for 1 hour at 4000 RPM. Pore water was only produced from 2 plugs, and the two samples were combined prior to analysis due to the very low yields. Chemical analysis of anions were carried out using an ion chromatography. Cations were analyzed by atomic absorption spectroscopy.

The results of the chemical analysis of pore water are shown in table 5.3. The milli-equivalent sum of anions and cations differ for the ions given in the table, the milli-equivalent sum of anions being the lowest. This difference show that certain major anions are missing in table 5.3, probably silicates and bicarbonate, which could not be determined on the small amount of pore water extracted.

(sign. Troels Laier, 17.08.1995)

Table 5.3. Chemical composition of pore water extracted from ÖJ-1 core by centrifugation.

Constituent	mg/l
Cl	279
SO <sub>4</sub>	36
Na	213
K	58
Mg	14
Ca	67

$\Sigma$  anion = 8.1 meq/l;  $\Sigma$  cation = 15.2 meq/l

### 5.3 Formation brine data

A simulated formation brine had to be used during special core analysis long before the composition of the extracted pore water was available. For this purpose approx. 10 l of Laugarnes brine was forwarded from Orkustofnun. This brine was used during liquid permeability, formation resistivity factor and acoustic velocity/thermal conductivity measurements. The chemical and physical data measured for this brine is listed in table 5.4 below

Table 5.4. ÖJ-1, chemical and physical data for Laugarnes brine.

Ion	mg/l
Cl	57
SO <sub>4</sub>	29,5
Na	71
K	3,2
Mg	<0,1
Ca	2,8
pH	7,82
Alkalinit	0,88 meq/l

$\Sigma$  anion = 3,1 meq/l;  $\Sigma$  cation = 3,3 meq/l

Laugarnes brine, physical data measured at 23°C				
Measured resistance $r$	Cell factor $f$	Brine resistivity $R_w = r f$	Density g/ml	Viscosity cP
7.7 k $\Omega$	$3.62 \times 10^{-3}$	27.87 $\Omega$ m	0.995	1.0003



## **VIÐAUKI 2**

**Rannsóknaskýrsla Dönsku jarðtæknistofnunarinnar á Ölkelduhálskjarna**

**(Capillary pressure measurement by mercury  
injection on core sample from well ÖJ-1)**







## **Reservoir Laboratories AS**

Pir-Senteret  
N-7005 Trondheim  
Norway

Telephone: +47 73 51 60 55  
Telefax: +47 73 51 42 93

# **Report**

**Client:** Geological Survey of Denmark  
**Report Title:** Capillary pressure measurement by mercury injection  
on core sample from Well Öj-1  
**Report No.:** 3001/50-95  
**Authors:** Ivar Erdal

Report no. 3 of 5

**Accessibility:** Restricted

**Client's Filing Code:**

**Project Manager:** Ivar Erdal  
**Report Control:** Hans Petter Normann

**Sign:**

**Date:** 95-10-03

**No. of Pages:** 14

**No. of Appendices:** 1

**Key words:**

Capillary pressure measurements by mercury injection  
Drainage/imbibition  
Pore size distribution

Well Öj-1  
Sample 8.1

## TABLE OF CONTENTS

1. Equipment and principle	2
2. Material and preparation	2
3. Results	3

## LIST OF TABLES

Table 3.1 Results from mercury injection	3
--	---

## LIST OF FIGURES

Figure 3.1 Pore size distribution in plug no. 8.1	5
Figure 3.2 Capillary pressure curves for plug no. 8.1	5

## APPENDIX

Appendix A Raw data from mercury injection test	
---	--

## 1. EQUIPMENT AND PRINCIPLE

The measurements are performed using a Carlo Erba Porosimeter Mod. 1520 and a helium porosimeter.

- 1) The matrix volume is measured using a helium porosimeter.
- 2) The rock sample is evacuated.
- 3) Mercury is introduced, bulk volume is obtained.
- 4) Pressure is applied to mercury in steps, penetrated mercury is measured at equilibrium at each step.
- 5) Porosity,  $\phi_{Hg}$ , is obtained at the last pressure step assuming that all pores are completely filled.
- 6) Pressure is reduced in the mercury, and produced mercury is measured at equilibrium at each step.

## 2. MATERIAL AND PREPARATION

One piece of core material was received from DGGU. The core material was from Iceland, Well Öj-1.

The sample was cut into pieces of approximate size 5 x 5 x 10 mm with a weight of approx. 1.5 g. The sample was dried in a heating cabinet at 60°C for 1 -2 days and evacuated to  $10^{-4}$  mbar until constant weight was achieved. They were then subjected to mercury injection to a maximum pressure of approximately 2000 bar.

### 3. RESULTS

The initial results include bulk volume and weight of sample, and final results include pore volume. Table 3.1 lists specific pore volume, mass of sample and porosity.

**Table 3.1 Results from mercury injection - Well Oj-1**

Plug no.	Depth (feet)	$V_g$ (cm <sup>3</sup> /g)	mass (g)	$\Phi_{He}$ (%)	$\Phi_{Hg}$ (%)
8.1	-	0.0703	2.64	16.3	15.1

$$V_g \quad \text{Specific pore volume} \quad V_g = \frac{V_{inj.}}{m_{sample}}$$

$$\Phi_{Hg} \quad \text{Mercury porosity} \quad \Phi_{Hg} = \frac{(V_{pores})_{Hg}}{(V_{bulk})_{Hg}} \cdot 100$$

$$\Phi_{He} \quad \text{Helium porosity} \quad \Phi_{He} = \frac{(V_{pores})_{He}}{(V_{bulk})_{Hg}} \cdot 100$$

In further calculations the pores are assumed to be circular and pore size is obtained by the Young-Laplace law.

Figures 3.1 and 3.2 show the pore size distribution in a frequency plot, where this derivative is plotted vs. pore size, and the capillary pressure plots for both injecting and retrieving mode.

Histograms are used for showing the pore size distribution. The value  $dV/dD$ , which is an abbreviation of  $dV/d(\log D)$ , is plotted. This is the derivative of the cumulative curve calculated from;

$$\left[ \frac{dV}{d(\log D)} \right]_i = \frac{V_{inj,i+1} - V_{inj,i-1}}{\log D_{i-1} - \log D_{i+1}}$$

where  $D$  denotes the pore diameter in microns. The points  $i-1$  and  $i+1$  are used instead of the actual data point to obtain a smoothing effect.

Tabulated data are given in Appendix A.

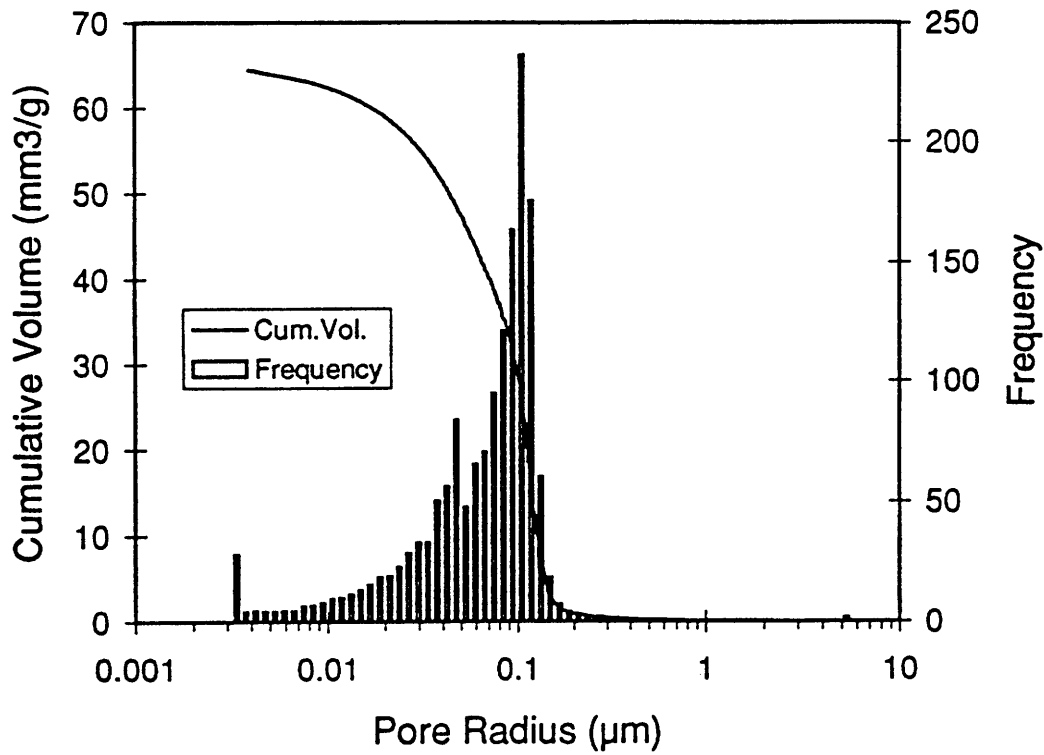


Figure 3.1 Pore size distribution in plug no. 8.1

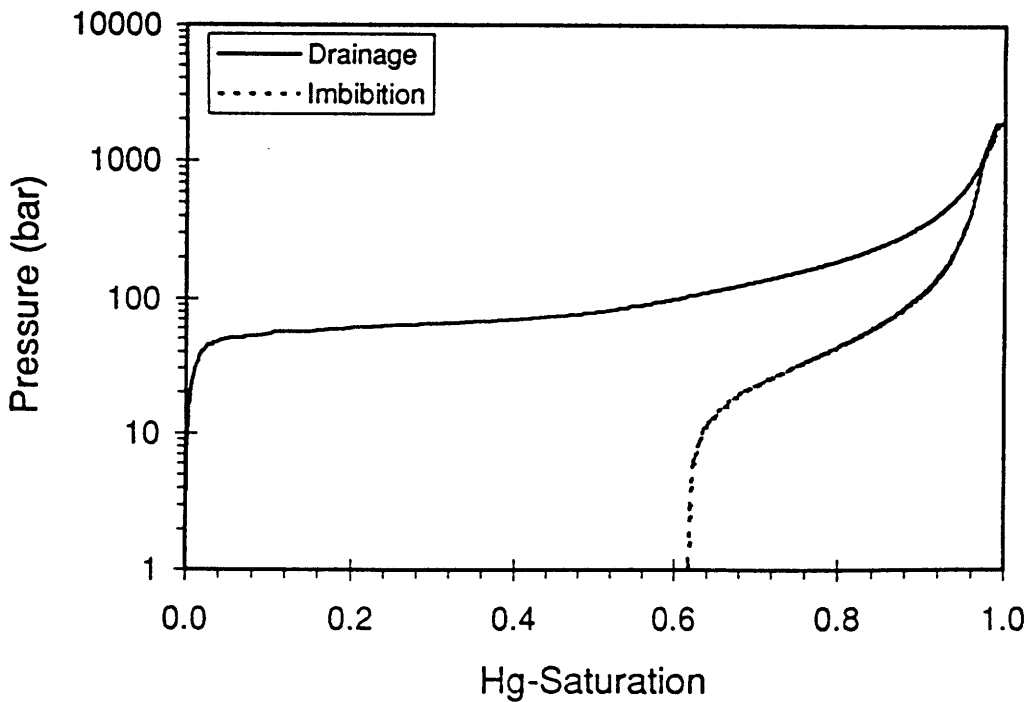


Figure 3.2 Capillary pressure curves for plug no. 8.1

### **VIÐAUKI 3**

**Rannsóknaskýrsla Dönsku jarðtæknistofnunarinnar á Ölkelduhálskjarna**

**(Acoustic Velocity and Thermal Conductivity)**





# Orkustofnun OJ-1

## Acoustic Velocity and Thermal Conductivity

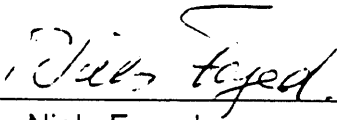
### Data report 1

Client's reference : 075-003  
DGI job No : 160 10682

Client : Geological Survey  
Thoravej 8  
DK-2400 Copenhagen NV  
Denmark

Prepared : Helle Foged Christensen ( contact person )

Approved :

  
\_\_\_\_\_  
Niels Foged

## 1. Introduction

This data report contains the results of rock mechanical testing of 2 cores from well OJ-1. The test programme includes 2 Acoustic Velocity measurements at 3 confining pressures and 2 Thermal Conductivity measurements.

## 2. Acoustic Velocity measurements

Before testing, the specimens were saturated with formation water at vacuum. The bulk density  $\rho$  ( $\text{g/cm}^3$ ) were calculated based on weight after saturation and measured dimensions of the specimen. The classification properties are listed in table 1:

Test	Height/diameter mm	$\rho$ $\text{g/cm}^3$
7	48.82/54.51	2.497
9	48.82/54.83	2.482

Table 1: Classification properties

The specimens were installed in a standard Hoek cell with lead foil between specimen and end pistons to ensure contact. The specimens were loaded in hydrostatic stress state to 1 MPa, 2.5 MPa and 10 MPa (10, 25 and 100 bar) and sound velocities were measured at each stress level. Due to the short specimens, it was not possible to measure sound velocities at a vertical stress below 1 MPa. In table 2 the measured sound velocities and calculated dynamic moduli are listed:

Stress level MPa	$t_p$ $\mu\text{s}$	$t_s$ $\mu\text{s}$	$v_p$ m/s	$v_s$ m/s	$G_{\text{dyn}}$ MPa	$E_{\text{dyn}}$ MPa	$v_{\text{dyn}}$
Test 7:							
1	14	24.5	3487	1993	9915	24937	0.26
2.5	14	23	3487	2123	11250	27129	0.21
10	12.5	23	3906	2123	11250	29035	0.29
Test 9:							
1	13	23	3755	2123	11183	28298	0.27
2.5	14	23	3487	2123	11183	26966	0.21
10	13	23	3755	2123	11183	28298	0.27

Table 2: Acoustic Velocities and Dynamic Moduli

The travel times have been corrected for a zero value of 6  $\mu\text{s}$  for the P-wave and 6  $\mu\text{s}$  for the S-wave, respectively.

### 3. Thermal Conductivity

The Thermal Conductivity measurements were carried out by The department for Geophysics at the University of Aarhus. The conductivity was measured using the divided bar technique and the vertical stress level was 1 MPa (10 bar). The following results were found:

Test 7:                    2.77 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>

Test 9:                    2.52 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>

#### Notation list:

$\rho$	-	Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )
$t_p, t_s$	-	Travel time for compressional and shear waves, respectively
$v_p, v_s$	-	Acoustic velocities for compressional and shear waves, respectively
$G_{dyn}$	-	Dynamic shear modulus (MN/m <sup>2</sup> )
$E_{dyn}$	-	Dynamic modulus of elasticity (MN/m <sup>2</sup> )
$\nu_{dyn}$	-	Dynamic Poisson's ratio