

Forðafraeðistuðlar. Poruhluti bergs

**Valgarður Stefánsson**

**Greinargerð VS-91-02**

## FORÐAFRÆÐISTUÐLAR

### Poruhluti bergs

#### 1. Inngangur

Þekking okkar á þeim eiginleikum bergs, sem hafa bein áhrif á jarðhitakerfi, er af skornum skammti. Frá forðafraeðilegu sjónarmiði eru það fyrst og fremst berglekt og grophlutfall (poruhluti) sem skipta mestu máli. Í líkanreikningum eru oft notaðar ágískanir um þessar stærðir og ganga þessar ágískanir gegn um reikningana svo fremi að ekki séu aðrar mælingar sem gera þessar ágískanir óraunhæfar. Í þeim tilvikum er forsendunum breytt til samræmis við þær beinu mælingar sem fyrir liggja.

Spurning er hvernig hægt er að nota fyrirbyggjandi gögn um eiginleika íslensks bergs til að meta þá stuðla sem notaðir eru í forðafraeði og hvernig standa skuli að kerfisbundnum athugunum og söfnun gagna um forðafraeðistuðla íslenskra jarðhitakerfa. Þá koma fram spurningar eins og:

- a) Verður matið að byggjast eingöngu á mælingum á kjörnum sem teknir eru úr viðkomandi jarðhitakerfi, eða má ganga út frá að sams konar berggerð hafi svipaða eiginleika frá einu jarðhitakerfi til annars?
- b) Er hægt að taka mið af mælingum á sýnum sem tekin eru á yfirborði (eða nálægt yfirborði), eða þurfa mælingarnar að vera af kjörnum úr borholum?
- c) Er hægt að taka mið af borholumælingum (neutron-neutron, gamma-gamma, nat.gamma, viðnám o.s.frv.) við mat á forðafraeðistuðlum í vissu jarðhitakerfi, eða jafn vel almennt í íslenskum jarðhitakerfum?

#### 2. Fyrirliggjandi gögn

Besta samantektin um mælingar á íslensku bergi er líklega skýrslan *Eðlismassi og poruhluti bergs* eftir þá Svan Pálsson, Guðmund Inga Haraldsson og Guðmund H. Vigfússon (OS-84048/VOD-18 B, Maí 1984). Í þessari skýrslu er greint frá mælingum á eðlismassa og poruhluta 341 sýna. Í flestum tilvikum er mældur bæði virkur poruhluti ( $\phi_1$ ) og heildarporuhluti ( $\phi_2$ ).

Við úrvinnslu á borholumælingum úr Reyðarfjarðarholunni voru notuð gögn frá Nick Christensen um eðlisþyngd og poruhluta á kjarnanum. Gallinn við þær mælingar var að einungis var mældur virkur poruhluti á þeim sýnum sem tekin voru úr kjarnanum. Samanburður milli borholumælinga og mælinga á kjarnanum var þess vegna langt frá því að vera góður. Auk þess var ekki tekið tillit til mismunandi stærðar á "sýnum" þegar borholumælingar voru bornar saman við mælingar á kjarnabútum. Hins vegar er fróðlegt að skoða niðurstöður borholumælinganna. Sem meðaltal yfir alla holuna fékkst:

	Eðlisþyngd [kg/m <sup>3</sup> ]	Bergeðlismassi [kg/m <sup>3</sup> ]	Poruhluti [%]
Hraun	2800 ± 220	3020 ± 180	10.9 ± 8.3
Innskot	2940 ± 180	3040 ± 160	5.0 ± 5.0
Öll holan	2850 ± 230	3030 ± 200	8.7 ± 8.0

Nú er það svo að dreififall (distribution) fyrir poruhluta og eðlisþyngd er langt frá því að vera normaldreifing (Gauss), svo það er að vissu marki misvísandi að gefa upp dreifinguna sem skekkjumörk eða frávik í töflunni hér að ofan. Hins vegar lítur dreifingin á bergeðlismassa út fyrir að vera mjög nálægt normaldreifingu, enda eru frávikin hlutfallslega minnst fyrir þá stærð.

Í nifteindamælingum er poruhluti alltaf dreifður, og í sumum tilvikum er dreififallið tvískipt. Sem dæmi um slíkar poruhlutaákvarðanir skulum við taka holur á Nesjavöllum. Meðalporuhluti og meðalfrávik fyrir þessar holur er gefinn í næstu töflu:

Hola	Poruhluti [ % ]
NG-6	20.7 ± 9.6
NG-7	17.7
NG-9	21.5 ± 8.8
NG-10	19.4 ± 8.0
NJ-11	23.2 ± 9.8
NJ-12	20.6 ± 8.6
NJ-13	19.2 ± 9.5
NJ-14	17.4 ± 7.7
NJ-15	23.6 ± 10.0
NJ-16	18.4 ± 7.4
NJ-18	21.5 ± 11.0

Í þessum 11 holum er meðalporuhluti alls staðar um 20 %, en meðalporuhluti í hermireikningum á Nesjavallakerfi var 5 % (gildi sem notuð voru í reikningum voru á bilinu 1-10%). Í hermireikningum er virkur poruhluti notaður, en nifteindamælingarnar eru næmar fyrir heildarporuhluta. Þá vaknar spurning:

- \* Getur verið að heildarporuhluti á Nesjavöllum sé að meðaltali 20% en að virkur poruhluti sé að meðaltali 5% ?

Til þess að varpa ljósi á svona spurningu þarf mæligögn þar sem bæði virkur poruhluti og heildarporuhluti er mældur fyrir sama sýnið. Einu gögnin sem uppfylla þessi skilyrði eru mælingar Svans og féлага.

Í holu NJ-17 á Nesjavöllum voru teknir þrjár kjarnar árið 1986. Á fjórum kjarnabútum var mæld bæði virkur poruhluti og heildarporuhluti. Eftirfarandi niðurstöður fengust:



Kjarni	Virkur poruhluti [ % ]	Heildarporuhluti [ % ]
1	15.9	16.7
1	11.7	12.5
2	11.7	12.8
3	10.4	10.9

Þessar einstöku mælingar benda ekki til að það sé verulegur munur á virkum poruhluta og heildarporuhluta á Nesjavöllum. Hins vegar ber að undirstrika það að þetta eru einungis fjórar einstakar mælingar á litlum kjarnabútum og þess vegna varla hægt að draga ályktun um gerð jarðhitakerfisins út frá þessum gögnum. Hins vegar er rétt að benda á að nifteindadreifingin gaf mjög svipaðar niðurstöður og poruhlutamælingarnar á kjörnunum eins og sést í eftirfarandi töflu:

Kjarni	Dýpi [m]	Sýni	Mældur virkur poruhluti á kjörnum [ % ]	Heildar poruhlutfall frá n-n mælingu [ % ]
1	876.0	I.c	8.9-12.0	12-13
	877.5	I.b	13.9-18.2	17-18
	879.7	I.a	10.2	12-16
2	1003-1010	II:a	8.7	4-18
		II:c	11.7-16.8	
3	1453-1454	III.a	10.4-12.0	8-13
		III.c	11.5	

Þessar niðurstöður virðast benda til að kvörðun n-n mælinganna sé nærri lagi, og að það megi nota þær til að ákvarða meðalporuhluta í jarðhitakerfum. Hins vegar liggur það ekki alveg ljóst fyrir hvernig nota skuli n-n mælingarnar til þess að setja upp þrívíða dreifingu poruhluta í jarðhitakerfi, t.d. líkan fyrir hermireikninga.

Í hermireikningum er breyting enthalpíu með tíma næm fyrir poruhluta, þannig að lítil poruhluti hefur í för með sér að enthalpía vex með tíma. Fyrir Kröflu og Olkaria skiptir það sköpum hvaða poruhluti er valinn til að herma enthalpíubreytingar frá einstökum holum. Á Nesjavöllum er það ekki einkenni á holum að þær þorni með tíma. Nesjavallalíkanid er þannig ekki eins næmt fyrir poruhluta eins og líkön fyrir Kröflu og Olkaria, a.m.k. á meðan poruhlutinn er nægjanlega mikill. Það getur því verið að niðurstöður Nesjavallahermunar mundu lítið breytast þó menn hefðu valið 15% meðalporuhluta í stað þeirra 5% sem notuð voru í reikningunum.

Einn er sá parameter, sem erfitt verður að einangra til þess að meta áhrif hans á forðafræðistuðla, og það er ummyndun. Kemur aukin ummyndun bergsins að auka eða minnka poruhluta bergsins? Flestir virðast hafa þá tilfinningu að aukin ummyndun verði til þess að poruhluti minnki. Hins vegar er ummyndun ekki sama og holufyllingar. Berg á Nesjavöllum er ef til vill meira ummyndað en berg á Reyðarfirði, en berg á Reyðarfirði er e.t.v. meira holufyllt en berg á Nesjavöllum! Það vekur athygli að tíðnidreifing poruhluta í Reyðarfjarðarholunni er frábrugðin þeirri tíðnidreifingu sem fæst á Nesjavöllum (í reynd er tíðnidreifingin mjög svipuð fyrir allar holurnar á Nesjavöllum). Þetta gæti einfaldlega stafað af því að móbergsmýndun er verulegur hluti af jarðlagastaflanum á Nesjavöllum,



en hverfandi í jarðlagastaflanum á Reyðarfirði. Hins vegar finnst mér ástæða að varpa fram eftirfarandi spurningu:

\* Er það mögulegt að ummyndunin auki poruhluta bergsins?

Þetta hljómar eins og argasta trúvillla.

Mér er enn í fersku mynna hvað það þótti slæm niðurstaða þegar við fengum þær niðurstöður á sínum tíma að poruhluti væri mun hærri í neðri hluta holu NG-6 heldur en fékkst í efri hluta holunnar. Enginn hafði kjark að halda því fram að þetta væri vegna þess að poruhluti ykist með aukinni ummyndun. Á hinn bóginn eyddum við löngum tíma í að leita að skekkju í víddarleiðréttingunni, en án árangurs. Það kom meira að segja til tals að vera ekkert að birta þessar niðurstöður, þær litu svo vitleysilega út. En af því að við fundum enga haldbæra ástæðu fyrir því að mælingarnar væru vitlausar, voru niðurstöðurnar birtar.

En lítum nú nánar á ummyndunarpróssessinn. Þegar frumsteind ummyndast þá skeður það að einhver steind í berginu, sem við köllum A breytist í aðra steind sem við köllum B. Það geta verið margir möguleikar fyrir hendi við ummyndun, t.d.

A → B  
 A → C  
 A → D  
 A → E o.s.frv.

Menn eru sammála um að það séu a.m.k. tveir þættir sem hafa mikil áhrif á ummyndunarpróssessinn, en þeir eru hitastig og nærvera vatns. Yfirleitt tengja menn ummyndunina aðeins við hitastig og setja hitastigsmörk á að einhver viss steind (t.d. epidot) geti myndast.

En skoðum fleiri þætti. Steindin A sem situr í móðurberginu tekur upp visst pláss þar. Köllum það eðlisrúmmál steindarinnar A og táknum það með  $V_A$ . Á sama hátt hafa steindirnar B, C, D, . . . . eðlisrúmmálið  $V_B, V_C, V_D, \dots$ . Til þess að prósessinn A → B geti gengið, þarf  $V_B \leq V_A$ .

Það getur svo sem gengið að ein og ein steind A breytist í B jafn vel þó eðlisrúmmál B sé stærra en eðlisrúmmál A, en til þess að prósessinn geti grasserað í berginu þarf eðlisrúmmál þeirrar steindar sem myndast að vera minna eða í mesta lagi jafn stórt og eðlisrúmmál frumsteindarinnar. Það er þekkt að frumsteindin hefur möguleika á að myndbreytast á marga vegu. Sá prósess sem verður fyrir valinu er einfaldlega sú breyting sem er auðveldust. Við getum líka sagt að þetta er bein afleiðing af öðru lögmáli varmafræðinnar, sem segir að heildar entropían aukist.

Það er vel þekkt að ummyndun breiðist út frá þeim stöðum þar sem vatn er fyrir hendi í berginu, t.d. út frá sprungu. Menn tala um að útfellingin éti sig inn í bergið. Þetta virðist mér benda til að það sé meira framboð af vatni í ummyndaða hluta bergsins heldur en í móðurberginu. Ef poruhlutinn er ekki hærri í ummyndaða hlutanum heldur en í móðurberginu, sé ég ekki ástæðu fyrir því að ummyndaði hlutinn sé samfelldur í berginu og vel afmarkaður frá þeim hluta bergsins sem ekki hefur ummyndaðst.

Niðurstaðan af þessum hugleiðingum er þá einfaldlega sú að það eru fyrir hendi rök sem benda til að poruhluti bergs aukist með aukinni ummyndun. Það liggja ekki fyrir tölfræðileg gögn sem skera úr um þetta atriði, en þetta er auðsjáanlega svo mikilsvert atriði að það ætti að koma upp sem fyrst mælingaprógrammi sem gæti skorið úr um hvort poruhluti aukist eða minnki með aukinni ummyndun bergs.

Hér er líklega rétt að undirstrika að það er að mfnu viti nauðsynlegt að greina á milli tveggja prósessa

sem eiga sér stað þegar heitt vatn streymir um berg. Annars vegar sá prósess þegar frumsteindin A breytist í aðra steind B, sem situr áfram á sama stað í bergin, og hins vegar sá prósess þegar viss steind fellur út úr jarðhitavökvanum, og sest að í vissri holu eða sprungu í berginu. Fyrri prósessinn er það sem ég kalla ummyndun, en seinni prósessinn vildi ég kalla holufyllingu eða útfellingu. Þessi skilgreining leyfir að það sé til algjörlega holufyllt berg án þess að nokkur ummyndun sé til staðar, og að það geti verið fyrir hendi kolummyndað berg án þess að neinar holufyllingar séu fyrir hendi. Mér skilst að vísu að jarðfræðingar hafi aldrei séð berg með þessum teoretisku eiginleikum sem lýst er hér að ofan. Það kemur til af því að þar sem heitt vatn streymir um berg eru báðir prósessarnir í gangi. Það þýðir þó ekki að menn verði endilega að blanda saman ummyndun og holufyllingum.

### 3. Innra samband

Forðafræðileg úttekt á jarðhitakerfi byggir á þeim forsendum sem menn gefa sér um kerfið, og þar eru forðafræðistuðlar eins og lekt og poruhluti mikilsverðar stærðir. Í flestum tilfellum er þekkingin á forðafræðistuðlunum takmörkuð, eða a.m.k. takmarkaðri en við vildum að hún væri. Þess vegna er nauðsynlegt að vita eitthvað um samband forðafræðistuðlanna við aðrar stærðir í jarðfræði, svo að mat okkar á forðafræðistuðlunum byggji á öllum upplýsingum sem eru fyrir hendi.

Þá er spurning hvaða jarðfræðiparametra eigi að miða forðafræðistuðlana við, eða réttara hvaða jarðfræðiparametrar eru líklegir að hafa áhrif á forðafræðistuðlana? Borholujarðfræðingar leggja mikla vinnu í að greina berggerð, þ.e. hvort bergið er súrt eða basískt. Segja má að þetta sé í reynd gróf efnagreining á berginu. Það er spurning hvort það skipti máli fyrir lekt og poruhluta hvernig efnasamsetning bergsins er. Menn hafa þó haldið því fram að vatnsæðar komi gjarnan fram í eða á mótum súrra innskota á háhitasvæðum. Einnig virðast menn á því að basalt sé "þéttara" en lþparft. Það er því líklega rétt að skipta berginu eftir efnasamsetningu, þó svo að það sé líklega aðrir parametrar sem hafa meiri áhrif á forðafræðistuðlana heldur en efnasamsetning bergsins.

Næsta flokkun jarðfræðinnar hefur að gera með hvernig bergið myndast. Hér koma inn flokkar eins og hraunlög, innskot, gangar, móberg, túff, bólstrarberg, jökulruðningur, þursaberg, o.s.frv. Þessi flokkun hefur trúlega meiri áhrif á lekt og poruhluta heldur en efnasamsetning bergsins. Sem fyrstu nálgun í flokkun bergs til að skoða forðafræðistuðla sýnist mér að eftirfarandi tafla komi að notkun:

	Basískt	Ísúrt	Súrt
Hraun			
Innskot			
Móberg			
Bólstrar			
Set og ruðningur			

Fyrir hvern af þessum 15 gluggum í töflunni mundum við vilja eiga dreififall fyrir bæði lekt og poruhluta.

Ástæðan fyrir því að ég tek bólstra sem sérstakan myndunarflokk í töflunni hér að ofan er sú að við skoðun á gögnum þeirra Svans og félaga kemur í ljós að það er mikill munur á virkum poruhluta og



heildarporuhluta í bólstrabergi úr borkjörnum af Tungnársvæðinu. Um þetta verður fjallað nánar seinna í þessari greinargerð.

Sem þriðja víddin í þessari flokkun bergs kemur svo ummyndunin. Eins og áður er getið er ummyndun erfiður parameter, því menn hafa ekki sett neinn tölulegan kvarða á þennan parameter. Þó mætti hugsa sér kvarða eins og *ferskt*, *ummyndað*, *kolummyndað*. Ef við veljum þannig þrískiptingu fyrir ummyndun fengjum við þrjár tölur eins og töfluna hér að ofan, og alls þyrftum við því 45 dreififöll fyrir bæði lekt og poruhluta til þess að við gætum sagt að við vissum eitthvað um samband forðafræðistuðlanna við jarðfræðilega parametra.

Sem fjórða víddin í þessari flokkun verður hvort mælt gildi á forðafræðistuðli er af sýni teknu á yfirborði eða úr borkjarna. Yfirborðsveðrun hefur eflaust einhver áhrif á bæði lekt og poruhluta, en spurning er hvort óþekkt áhrif yfirborðsveðrunar skipta meira máli en óþekkt áhrif ummyndunar í kjarna. Einfaldasta ráðið til að skera úr um þetta er auðvitað að gera mælingar bæði á kjörnum og yfirborðssýnum. Það eykur gluggafjölda okkar úr 45 í 90.

Ef við svo gerum ráð fyrir að þurfa a.m.k. 100-200 sýni fyrir hvern glugga til þess að fá tölfræðilega marktækt gildi, þá þurfum við að mæla svo sem 9000 - 18000 sýni til þess að fá nægjanlega góðan grundvöll til þess að segja eitthvað um hvaða jarðfræðiparametrar skipta máli fyrir forðafræðistuðlana. Ef við hins vegar skoðum að frá upphafi byggðar í landinu hafa aðeins verið mæld rúmlega 300 sýni þar sem bara poruhluti en ekki lekt hafa verið mæld, þá gefur það auga leið að það er mjög langt í það að við höfum nægjanlega góðan gagnagrunn til þess að draga ályktanir um forðafræðistuðla í íslensku bergi.

#### 4. Athugun á fyrirliggjandi gögnum

Eins og áður hefur verið sagt er skýrsla þeirra Svans Pálssonar og félaga besti gagnagrunnurinn um forðafræðistuðla í íslensku bergi. Skýrslan tekur til mælinga á 341 sýni sem mæld hafa verið. Skýrslan nær aðeins til mælinga á eplisþyngd og poruhluta, en það sem gerir niðurstöður skýrslunnar mjög áhugaverðar er að bæði virkur poruhluti og heildar poruhluti er mældur á flestum sýnum.

Úr gagnagrunni Svans og félaga hef ég valið þrjár mælistærðir, eðlisþyngd (eðlismassi í skýrslunni), virkan poruhluta ( $\phi_1$  í skýrslunni) og heildarporuhluta ( $\phi_2$  í skýrslunni). Ástæðan fyrir þessu vali er t.d. að fyrir hverja berggerð (efnasamsetningu) er línulegt samband milli eðlisþyngdar og heildarporuhluta, en sambandið milli eðlisþyngdar og virks poruhluta er oftast talsvert dreift og þess vegna er erfiðara að vinna með það samband frá tölfræðilegu sjónarmiði.

Fyrirfram er ekki vitað hvaða samband er á milli virks poruhluta og heildarporuhluta, en trúlegast þætti manni að það væri líka línulegt samband. Það gefur því vissar upplýsingar að plotta upp annars vegar eðlisþyngd á móti heildarporuhluta og hins vegar virkan poruhluta á móti heildarporuhluta.

Ef við svo reiknum jöfnu bestu línu í gegn um þessi punktasetnið hafa stuðlar línunnar merkingu og segja til um gæði gagnanna. Skoðum fyrst eðlisþyngd sem fall af heildarporuhluta.

$$\rho = A \cdot \phi_2 + B$$

Í þessu tilviki er stuðullinn B bergeðlismassi (matrix density) bergsins. Á sama hátt sjáum við að ef  $\phi_2 = 1$  er  $A + B =$  eðlisþyngd vökvans í porunum. Ef við fáum línu þar sem  $A + B$  er langt frá því að vera einn er trúlega eitthvað bogið við magn eða gæði gagnanna.



Á sama hátt fæst fyrir sambandið milli heildarporuhluta og virks poruhluta:

$$\phi_2 = A \cdot \phi_1 + B$$

Í þessu tilviki gildir að ef  $A$  er mjög nálægt því að vera 1 þá getum við sagt að  $B$  sé munurinn á  $\phi_2$  og  $\phi_1$  og að þessi munur er konstant fyrir þessa berggerð. Ef  $A$  er aftur á móti ekki nálægt einum getum við ekki dregið þá ályktun að poruhlutamunurinn sé konstant.

Hér er rétt að benda á þann mun sem við fáum annars vegar með því að plotta gögnin eins og lýst er hér að ofan og t.d. að reikna út  $\phi_2 - \phi_1$  fyrir hvert sýni og taka svo meðaltal af þeim gildum sem þá fást. Ef  $A$  er nálægt því að vera 1 fáum við mjög svipaða niðurstöðu, en ef  $A$  er ekki nálægt einum verða niðurstöðurnar mismunandi. Ef við notum meðaltalsaðferðina erum við í raun að þvinga því skilyrði upp á gögnin að  $A = 1$ . Með því að plotta upp gögnin og reikna út stuðla bestu línu setjum við ekki hömlur á gögnin og þess vegna gefur sú aðferð upplýsingar um gæði gagnana, sem hæglega gæti farið forgörðum ef meðaltalsaðferðin er notuð.

Eftir að hafa valið mælistærðir og aðferðir til að bera þær saman er næsta spurning að skipta gögnunum niður eftir jarðfræðilegum parametrum. Fyrir rúmlega 300 sýni er auðvitað út í hött að reyna að búa til 90 flokka eins og lýst var hér að framan. Eftir nokkurn leik að gögnunum urðu eftirfarandi flokkar ofan á:

Basalt  
Basalt bólstrar  
Völuberg, jökulberg, leir og set  
Súrt berg  
Líparít bólstrar  
Þursaberg og túff

Fyrsta spurningin í þessu samhengi er:

\* Er hægt að sjá mun á borkjörnum og sýnum teknum á yfirborði með svona flokkun?

Fyrir hvern af þessum 6 jarðfræðilegu flokka var þá gögnum skipt niður á borkjarna og yfirborðssýni. Í reynd fengust aðeins 10 flokkar því tveir flokkanna voru tómir eða höfðu aðeins eitt sýni.

Í viðauka 1 eru sýndar þær myndir sem plottaðar hafa verið fyrir mismunandi jarðfræðilega flokkun. Það sést á myndunum í Viðauka 1 að flokkunin gengur sums staðar of langt, þannig að tölfræðilegar skekkjur verða mjög stórar í sumum tilvikum. Hins vegar eru margir flokkar þar sem tölfræðileg skekkja er mjög viðunandi. Í þessum þætti erum við hins vegar að leita svara við spurningunni hvort við sjáum mun á kjörnum og yfirborðsbergi. Við verðum því að gera flokkunina rétt jafn vel þó skekkjumörkin verði stór í sumum tilvikum.

Skoðum þá fyrst sambandið á milli heildarporuhluta og virkra pora. Í næstu töflu eru gefnir línulegu stuðlarnir sem fengust við plottun gagna úr gagnagrunni Svans og félaga.

	Borkjarnar		Yfirborðssýni	
	A	B	A	B
Basalt	0.9979	0.0163	0.9639	0.0168
Basalt bólstrar	0.7206	0.1450	1.0158	0.0518
Völuberg, jökulberg, leir og set	0.9537	0.0249	0.84	0.047
Súrt berg			1.0096	0.0341
Líparít bólstrar			1.0116	0.0469
Pursaberg og túff	1.0091	0.005	0.9875	0.0151

Í öllum þessum tilvikum er gott línulegt samband (þ.e.  $A = 1$ ) nema fyrir basalt bólstra úr borkjörnum og fyrir yfirborðssýni af völubergi, jökulbergi leir og seti. Hins vegar eru bara fyrir hendi tvö sýni frá yfirborði fyrir flokkinn völuberg, jökulberg, leir og set, svo það er ekki marktæk niðurstaða.

Ef við þröngvum því skilyrði upp á basalt bólstrana að  $A = 1$  verður poruhlutamismunurinn milli heildar poruhluta og virks poruhluta um það bil 10% .

Niðurstaðan af þessum athugunum verður því sú að munurinn á heildarporuhluta og virks poruhluta er minni en 10% fyrir allt berg nema basalt bólstra. En að meðaltali er munurinn á heildarporuhluta og virks poruhluta 4% . Þetta er ansi mikilsverð niðurstaða frá forðafræðilegu sjónarmiði.

Ef við sleppum áhrifum bólstrabergsins þá er munurinn á heildarporuhluta og virks poruhluta innan við 3% . Þetta þýðir að í flestum tilfellum þarf ekki að greina á milli heildar poruhluta og virks poruhluta í uppsetningu á líkani fyrir visst jarðhitakerfi. Þetta þýðir líka að við getum í flestum tilvikum notað poruhluta fenginn frá nifteindadreifingu til þess að meta poruhlutadreifingu í jarðhitakerfi.

Í næstu töflu berum við saman línulegu stuðlana sem fást þegar eðlisþyngd er plottuð upp á móti heildarporuhluta. Þar gildir að  $B = \rho_M$  sem er bergeðlismassi (matrix density). Næmari stærð fyrir gæði gagnanna er þó eðlisþyngd poranna  $\rho_P$ , sem fæst ef við setjum  $\phi = 1$ . Í töflunni er þessi stærð einnig gefin.

	Borkjarnar			Yfirborðssýni		
	A	$B = \rho_M$	$\rho_P$	A	$B = \rho_M$	$\rho_P$
Basalt	-2.1791	3.0262	0.8471	-2.1608	3.0182	0.8574
Basalt bólstrar	-2.0815	2.9659	0.8844	-2.1912	2.9637	0.7725
Völuberg, jökulberg, leir og set	-1.6663	2.8716	1.2053	-0.45	2.52	2.07
Súrt berg				-1.9227	2.6518	0.7289
Líparít bólstrar				-1.6091	2.4629	0.8538
Pursaberg og túff	-1.3784	2.803	1.4246	-1.7764	2.7961	1.0197

Það sem skiptir máli í þessari samantekt er hvað við fáum slæmar niðurstöður úr þeim stuðlum sem við settum upp sem kontról á aðferðina. Við gerum ráð fyrir að eðlisþyngd poranna sé 1, en í flestum tilfellum fáum við gildi sem eru mjög langt frá því að vera einn. Við fáum gildi frá 0.7 og upp í 2.1.

Stuðullinn B gefur í þessu tilviki nokkuð sennilegan bergeðlismassa  $\rho_M$ . Þannig er bergeðlismassinn fyrir basalt og basalt bólstra um  $3.0 \text{ g/cm}^2$  og súra bergið hefur bergeðlismassa  $2.5 - 2.6 \text{ g/cm}^2$  eins og búast mætti við. Hins vegar hefði ég átt von á því að bergeðlismassi í þursabergi og túffi væri líkari bergeðlismassa basalts en raunin er. Ég hefði haldið að bergeðlismassi bergs væri í raun mælikvarði á efnasamsetningu bergsins, og að meira en 90% af efninu í þursabergi og túffi væri sama efni og er í basalti. Hins vegar er bergeðlismassi fyrir þursaberg og túff um  $2.8 \text{ g/cm}^2$  bæði fyrir yfirborðssýni og borkjarna. Þetta er nokurn veginn miðja veginn milli bergeðlismassa basalts og bergeðlismassa líparíts. Ef við gerum ráð fyrir að grunnefnið í þursabergi og túffi sé svipað og í basalti ætti bergeðlismassinn að vera mun nær  $3.0$  en raunin er. Þá kemur spurning:

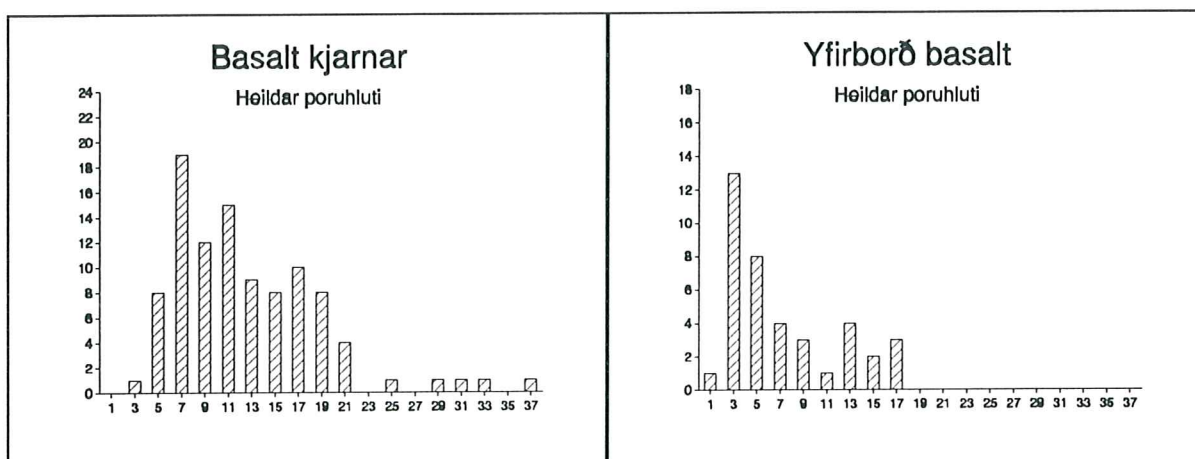
\* Hefur myndunargerð bergsins áhrif á bergeðlismassa bergsins?

Þó þessi spurning hafi e.t.v. ekki bein áhrif á forðafraeðistuðlana skiptir hún máli fyrir skilning okkar á berginu. Mér finnst eðlilegt að efnasamsetning bergsins hafi áhrif á bergeðlismassann, en ég á erfitt með að skilja hvernig myndunarprósessinn hefur áhrif á bergeðlismassann. Hins vegar sýnist mér að fyrirbyggjandi gögn sýni að myndunarprósess hefur áhrif á bergeðlismassa. Þetta er auðsjáanlega atriði sem þarf að skoða betur.

Næsta skrefið er að bera saman pohlutadreifinguna fyrir þá jarðfræðilegu parametra sem valdir hafa verið. Meðaltal heildarporuhluta og breidd dreifingar eru tífundaðar í næstu töflu:

	Kjarnar Heildarporuhluti %	Yfirborðssýni Heildarporuhluti %
Basalt	$12.1 \pm 6.3$	$7.9 \pm 9.3$
Basalt bólstrar	$25.6 \pm 5.9$	$20.7 \pm 10.4$
Völuberg, jökulberg, leir og set	$29 \pm 6$	$19.5 \pm 7.8$
Þursaberg og túff	$24.6 \pm 8.8$	$34 \pm 12$
Súrt berg		$17 \pm 17$
Líparít bólstrar		$15.8 \pm 8.5$

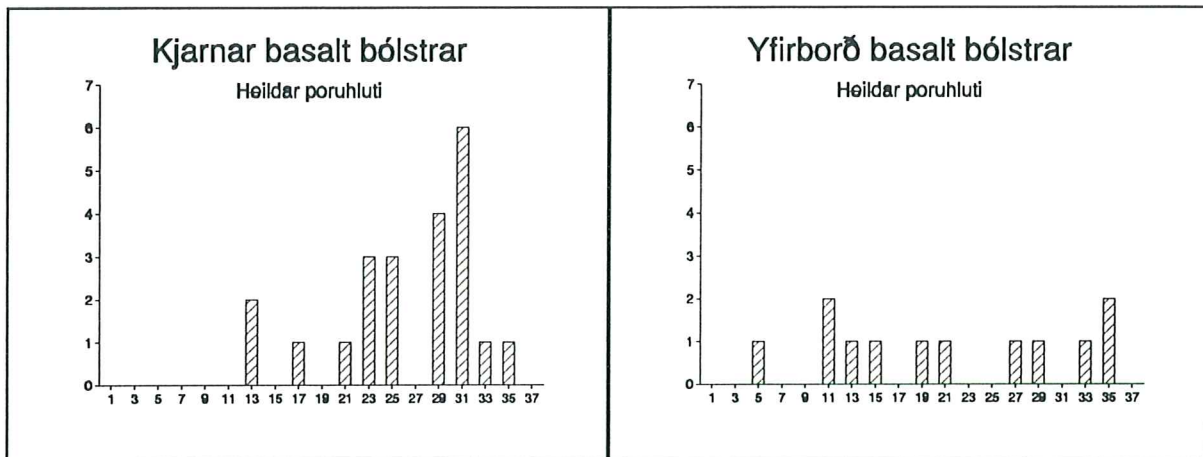
Myndir fyrir þessi dreififöll fara hér á eftir



Mynd 1

Mynd 2





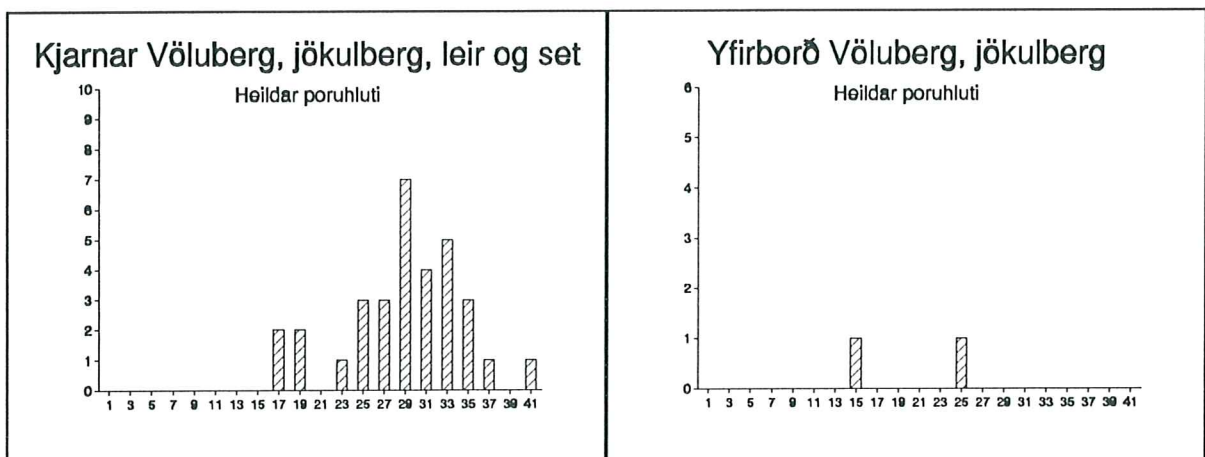
Mynd 3

Mynd 4

Fyrir basalt sýnin getum við ekki séð tölfræðilegan mun á poruhlutadreifingu á sýnum úr borkjörnum og sýnum teknum á yfirborði. Á sama hátt var sýnt fram á það áður að ekki kom fram munur á yfirborðsbasalti borkjarnabasalti í þeim línulegu stuðlum sem fengust fyrir poruhluta og eðlisþyngd. Niðurstaðan verður því sú að fyrir flokkinn basalt er ekki hægt að sjá mun milli sýna frá yfirborði og sýna sem tekin eru úr borkjörnum.

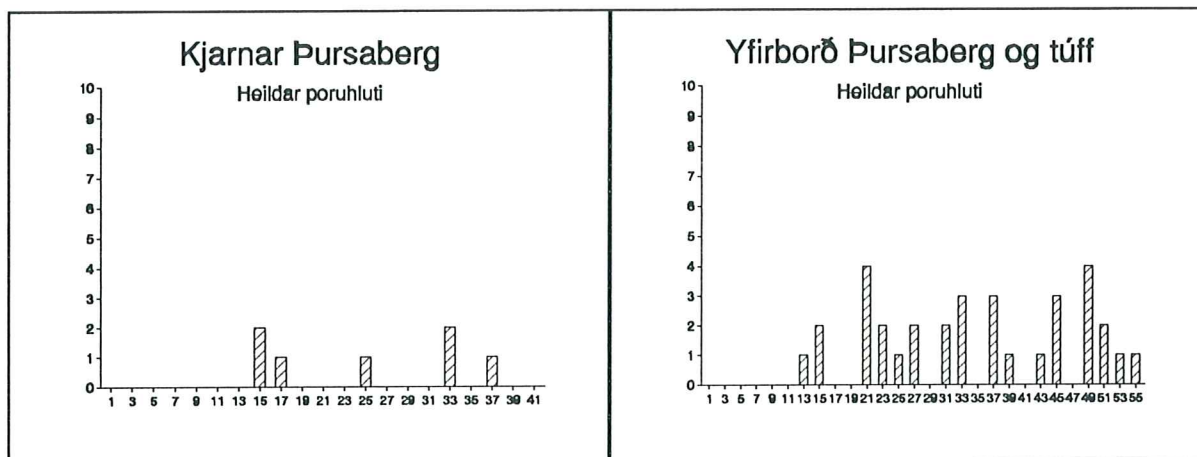
Dreififöllin fyrir basalt bólstra eru á myndum 3 og 4. Hér kemur út sama niðurstaðan og fyrir basaltið, að ekki er hægt að greina tölfræðilega á milli yfirborðssýna og kjarnasýna. Þetta gildir fyrir alla þá parametra, sem skoðaðir hafa verið hér. Hins vegar er fyrir hendi marktækur munur á flokkunum basalt annars vegar og basalt bólstrar hins vegar. Er þar fyrst að nefna að poruhluti er mun hærri fyrir bólstrana heldur en fyrir vanalegt basalt. Áður hefur líka komið fram að munurinn á heildarporuhluta og virks poruhluta er meiri fyrir basalt bólstra en fyrir aðra jarðfræðilega flokkun. Þetta er mjög áberandi fyrir sýnin, sem tekin eru úr borkjörnum, en munurinn er líka mikill fyrir yfirborðssýni. Flokkurinn basalt bólstrar er auðsjáanlega verður allrar athygli frá forðafræðilegu sjónarmiði. Hér hefur komið fram að heildarporuhluti er hár, og að það er mikill munur ( $\approx 10\%$ ) á heildarporuhluta og virks poruhluta. Fyrirliggjandi gögn benda til að ef við mundum bera saman virkan poruhluta hjá basalt bólstrum og hjá vanalegu basalti þá mundum við fá svipuð dreififöll.

Dreififöll fyrir flokkinn Völuberg, jökulberg, leir og set er sýnt á myndum 5 og 6. Yfirborðssýni eru aðeins tvö, svo það er ekki hægt að draga miklar tölfræðilegar ályktanir af svo fáum sýnum. En miðað við þau gögn sem fyrir liggja er ekki hægt að sjá mun milli yfirborðssýna og kjarna. Þetta gildir bæði



Mynd 5

Mynd 6



Mynd 7

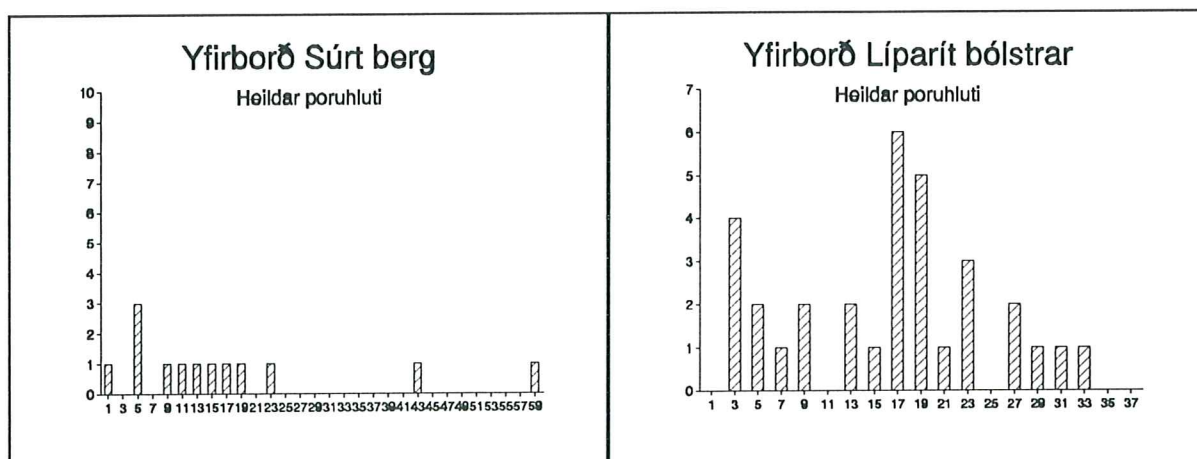
Mynd 8

fyrir poruhlutadreifingu og þá línulegu stuðla sem áður voru fengnir um poruhluta og eðlisþyngd.

Fyrir flokkinn Þursaberg og túff fást mjög svipaðar niðurstöður og fyrir flokkinn völuberg, jökulberg, leir og set. Poruhlutinn er hár ( yfir 20% ), bergeðlismassinn um  $2.8 \text{ g/cm}^3$ , gott línulegt samband milli heildar poruhluta og virks poruhluta og lítil munur á heildar poruhluta og virks poruhluta. Miðað við fyrirliggjandi gögn virðist því mega slá þessum tveim flokkum saman og kalla þann flokk *set og ruðningur* eins og stungið var upp á fyrir í þessum skrifum.

Sem heildarniðurstaða fyrir flokkinn þursaberg og túff fæst að það er ekki hægt að sjá mun á þeim gildum sem fást úr yfirborðssýnum og sýnum teknum úr borkjörnum.

Fyrir súrt berg er staðan sú að flest sýnin, sem fyrir liggja eru úr líparít bólstrum á yfirborði. Nokkur sýni frá yfirborði eru ekki sérstaklega tilgreind sem bólstrar og eru þau tekin öll saman í flokk, sem kallaður er súrt berg. Miðað við niðurstöður, sem fengust fyrir basalt og basalt bólstra mundu menn líklega vænta þess að sjá svipaðan mun fyrir líparít og líparít bólstra. Svo er þó ekki raunin. Dreififöllin á myndum 9 og 10 eru tölfraðilega eins svo sem sjá má í töflunni um meðaltal heildarporuhluta og meðal frávik. Það er mjög gott línulegt samband milli poruhlutanna og munurinn  $\phi_2 - \phi_1$  er 3.4% fyrir vanalegt líparít en 4.7% fyrir líparít bólstra. Það er því ekki hægt að sjá að líparít bólstrarnir hafi neina sérstöðu eins og basalt bólstrar.



Mynd 9

Mynd 10

Eftir þessa skoðun sýnist mér að það þurfi bara fjóra jarðfræðilega flokka fyrir þessi gögn sem fyrir liggja. Þessir flokkar eru:

Basalt hraun  
 Basalt bólstrar  
 Móberg, set og ruðningur  
 Súrt berg

## 5. Niðurstöður

Í kaflanum hér á undan kom fram að ekki var hægt að greina milli mælinga á borkjörnum og mælinga gerðum á yfirborðssýnum. Fyrirliggjandi gögn virðast réttlæta jarðfræðilega skiptingu í fjóra flokka, en fínni skipting virðist ekki vera til bóta. Gögnunum var því endurraðað í flokkana: Basalt hraun, Basalt bólstrar, Móberg, set og ruðningur, og Súrt berg.

Töflur fyrir þessa endurröðun er í Viðauka 2. Næsta tafla sýnir hins vegar samandregnar niðurstöður þessarrar flokkunar.

	Eðlisþ. [kg/m <sup>3</sup> ]	Bergeðlis- massi [kg/m <sup>3</sup> ]	Virkur poruhluti [%]	Heildar poruhluti [%]	Δφ [%]
Basalt hraun	2790 ± 170	3020	9.4 ± 7.4	10.9 ± 7.5	1.5
Basalt bólstrar	2460 ± 180	2960	15 ± 8	24 ± 8	9.0
Móberg, set og ruðningur	2310 ± 200	2850	29 ± 10	30 ± 10	1.0
Súrt berg	2240 ± 230	2530	12 ± 10	16 ± 11	4.0

Hér er rétt að benda á nokkur atriði:

- Í töflunni er bergflokkum raðað eftir eðlisþyngd, þanig að basalt hraun hafa hæstu eðlisþyngd og hæstan bergeðlismassa, en líparít og annað súrt berg er með lægstu eðlisþyngd og lægstan bergeðlismassa.
- Að meðaltali er lægsti poruhluti um 10% í þeim jarðfræðilegu flokkum, sem skoðaðir eru í töflunni hér að ofan. Hæsti poruhluti er að meðaltali um 30%.
- Síðasti dálkur í töflunni Δφ sýnir muninn á heildar poruhluta og virkum poruhluta. Fyrir basalt hraun og fyrir flokkinn móberg, set og ruðningur er nánast enginn munur á þessum stærðum. Fyrir basalt bólstra er þessi munur mjög verulegur eða 9%, og súrt berg er með 4% mun á heildar poruhluta og virkum poruhluta.
- Breiddin í poruhlutadreifingunni er alls staðar um 10%, ef við gerum ráð fyrir að dreifingin sé normal dreifing, og að meðalfrávik sé mælikvarði á breidd dreifingarinnar.

Á næstu blaðsíðum eru sýndar myndir af poruhlutadreifingu og sambandi milli poruhlutanna og sambandi milli eðlisþyngdar og heildarporuhluta fyrir þá jarðfræðilegu flokka, sem valdir hafa verið.



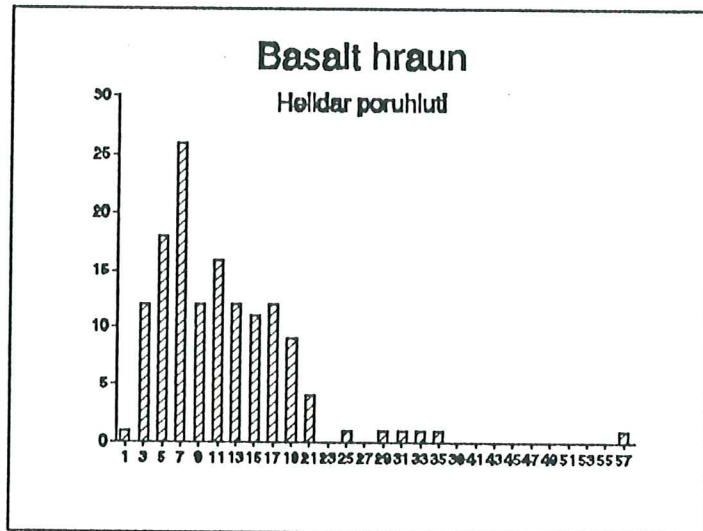
Í framhaldi af töflu hér að framan sem sýndi meðalporuhluta í einstökum holum á Nesjavöllum er rétt að benda á að svipuð úrvinnsla á borholumælingum hefur verið gerð fyrir holur RV-40 og RV-41 í Reykjavík. Í báðum þessum holum kemur fram dreifing sem er mjög svipuð dreifingunni í Nesjavallaholum. Poruhlutinn er  $20 \pm 8\%$ , bæði fyrir holu RV - 40 og holu RV - 41. Í 11 holum á Nesjavöllum er meðaltal meðalgildanna á poruhluta  $20.3\%$ .

Auk þess að tölndreifing poruhluta í holum RV-40 og RV-41 hefur verið gerð og birt í skýrslum OS, er að finna í skýrslunni *REYKJAVÍK, HOLA RV-41 Borholurannsóknir* eftir þau Ómar Bjarka Smárason, Helgu Tulinius, Guðlaug Hermannsson, Þorstein Thorsteinsson, Jens Tómasson og Vigdísu Harðardóttur (OS-88026/JHD-02) athyglisverð samantekt um poruhluta í mismunandi jarðlagasyrpum á Elliðaársvæðinu. Þetta mat á poruhluta er byggt á niðurstöðum borholumælinga (nifteindadreifing). Fimm holur á Elliðaársvæðinu (RV-41, RV-39, RV-37, RV-36, og RV-29) voru athugaðar og meðaltal poruhluta einstakra jarðlagasyrpa metið. Gerð þessarra jarðlagasyrpa er *basalt, móberg, set og ísúrt berg*.

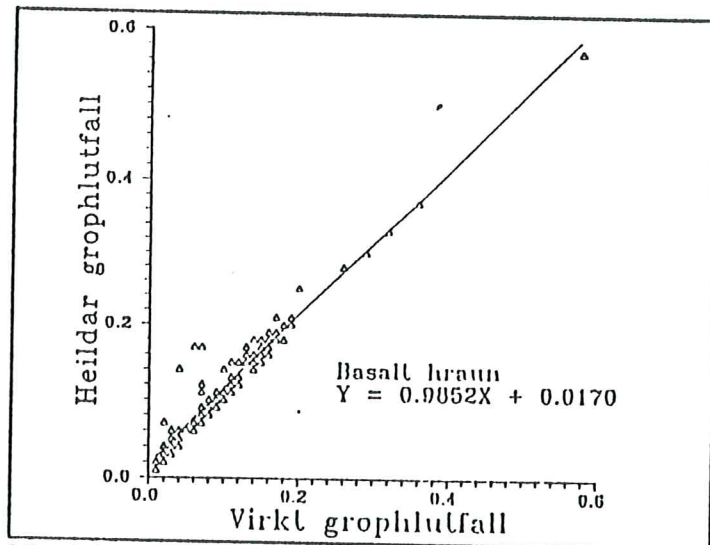
Á Elliðaársvæðinu hafa verið greind sjö basaltsyrpur, þrjár móbergssyrpur, tvö set og ein ísúr syrpa. Gögnin spanna ekki alla þessa möguleika, en gildi eru fyrir hendi frá sex basalt syrpum, einu seti, þrem móbergssyrpum og einni ísúrri syrpu. Ef við tökum meðalgildi fyrir hverja berggerð fæst eftirfarandi:

Basalt	17 %
Set	25 %
Móberg	21 %
Ísúrt berg	13 %

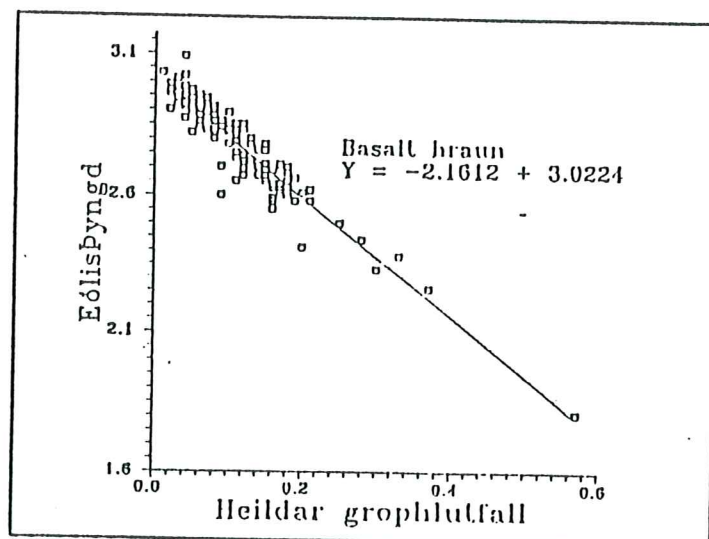
Þessi gildi passa allsæmilega við gildin á bergsýnunum, sem gefin eru í töflunni á bls. 12.



Mynd 11



Mynd 12



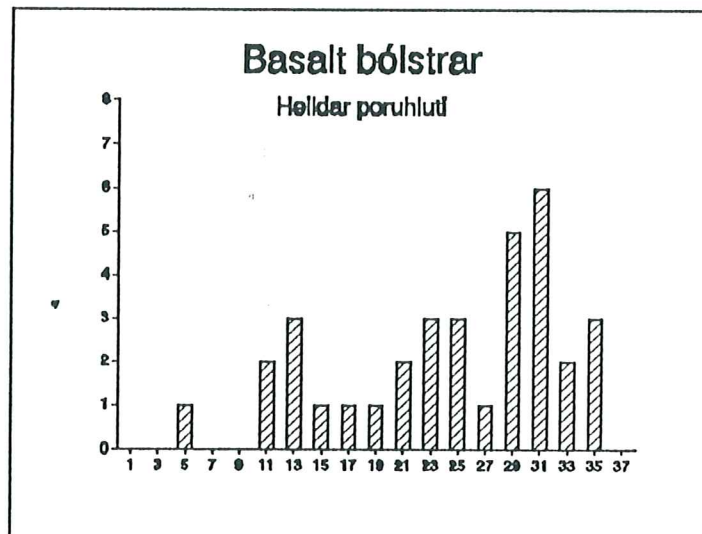
Mynd 13

Basaltsyrpurnar á Elliðaársvæðinu gefa 17% poruhluta, en basalhraunin í töflunni gefa 11%. Hins vegar er meðalporuhluti bergsýnanna af basaltbólstrum 24%. Ef við sláum saman floknum basalt og floknum basalt bólstrar er meðaltal og meðalfrávik poruhlutans fyrir bergsýnin  $0.1349 \pm 0.0919$  % Aðferðin sem notuð er í skýrslunni um holu RV-41 leyfir ekki mat á breidd poruhlutadreifingar fyrir basaltsyrpurnar á Elliðaársvæðinu, en þau gögn, sem liggja fyrir, benda ekki til að neitt ósamræmi sé hér á ferðinni. Það er að vísu ekki alveg víst hvernig basalt bólstrar eru greindir í svarfi, þar sem borholujarðfræðingar virðast ekki nota þetta nafn við gerð jarðlagasniða. Vera má að basalt bólstrar falli oft undir skilgreininguna *basaltrík brekksa* í svarfgreiningu. Það er því ekki gefið hvort basalt bólstrar falla undir skilgreininguna basaltstyrpa eða móbergssyrpa í svarfgreiningu.

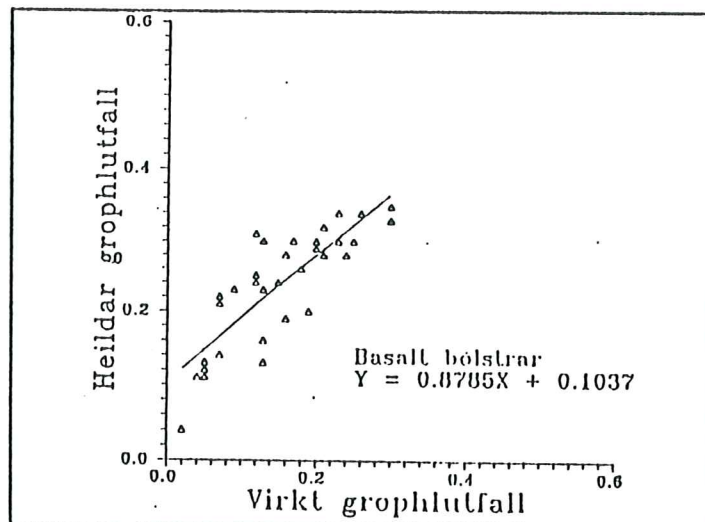
Eftir nokkra umræðu við Jens Tómasson um þessi mál sýnist mér að í hans greiningum á svarfi mundu basalt bólstrar falla undir flokkunina *basaltrík brekksa*, og að basaltrík brekksa falli undir móbergsmýndun eða móbergssyrpu t.d. þegar jarðlögum á Elliðaársvæði er lýst. Þar sem Jens er að meira eða minna leiti lærifaðir annarra jarðfræðinga sem greina svarf úr borholum er trúlegt að þessi flokkun sé sú algengasta í þeim greiningum sem gerðar hafa verið fram á þennan dag.

Borholujarðfræðingar eru ekki alveg á einu máli hvort hægt sé að greina bólstraberg í svarfi. Sumir telja sig geta greint bólstra, en aðrir telja að það sé ekki hægt með neinu öryggi. Sú staðreynd að þessi flokkur er ekki fyrir hendi núna hjá borholujarðfræðingum bendir til að það sé ekki einfalt að greina basalt bólstra í svarfi.

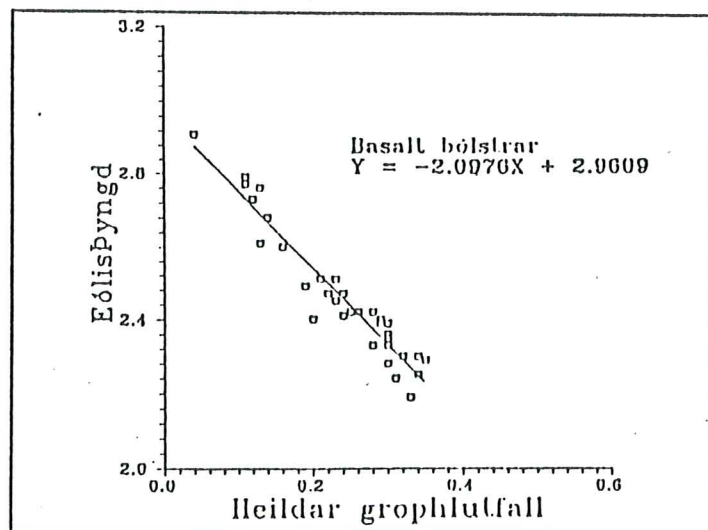
Í þessari greinargerð hefur því verið haldið til streitu að taka basalt bólstra



Mynd 14



Mynd 15



Mynd 16



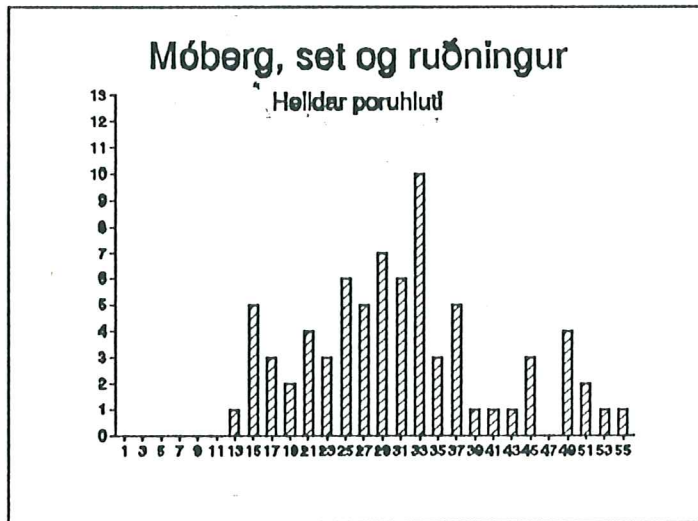
sem sérstakan flokk vegna þess að þessi jarðfræðilegi flokkur bergs virðist hafa mjög áhugaverða forðafræðilega eiginleika. Hins vegar lítur út fyrir að borholujarðfræðin geti lítið hjálpað okkur að finna þetta jarðfræðifyrbrigði í borholum, a.m.k. ef einungis er stuðst við smásjárgreiningu á borsvarfi. Basalt bólstrar falla undir móbergsmýndun í svarfgreiningu, og því er spurning hvort það hafi nokkuð upp á sig að vera með þennan flokk í umfjöllun um forðafræðistuðla, þar sem það eru litlar líkur á að við getum fengið upplýsingar um hvar basalt bólstrar eru í jarðhitakerfi. Reynslan verður að skera úr um það. Ef það kemur hins vegar skýrt fram að forðafræðingar séu mjög áhugasamir um að fá vitneskju um dreifingu bólstrabergs í jarðhitakerfi er líklegt að borholujarðfræðingar leggi sig fram í að finna aðferðir til þess að greina bólstra í svarfi, og jafn vel að þeir búi til sérstaka skraferingu fyrir þessa berggerð.

Niðurstöðurnar 25% poruhluti fyrir set og 21% poruhluti fyrir móberg á Elliðaársvæðinu er talið vera í samræmi við gildi, sem gefin eru í töflunni á bls. 12, en þar er móberg og set sett saman í flokk og meðalporuhluti er um 30%.

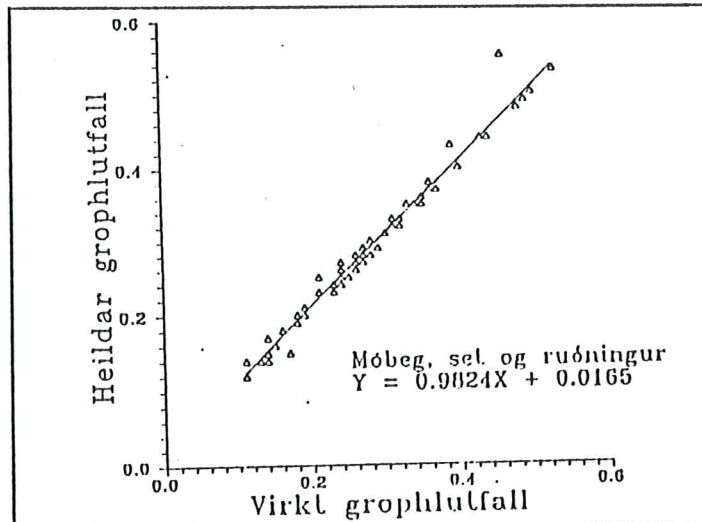
Ísúr syrpa á Elliðaársvæðinu gefur meðalporuhlutann 13%, á meðan meðalporuhlutinn fyrir öll úr sýni sem mæld hafa verið af þeim Svani og félögum gefur  $16 \pm 11\%$ , eins og sýnt er í töflunni á bls. 12.

Þó svo að sá samanburður sem gerður er í þessari greinargerð á niðurstöðum borholumælinga og niðurstöðum mælinga gerðum á bergsýnum virðist stundum vera nokkuð stórkastliskur er rétt að taka það fram að:

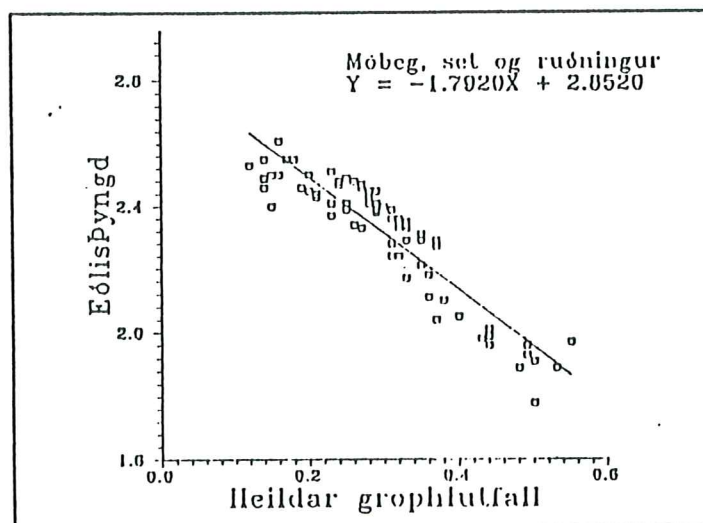
*Ekki hefur fundist tölfræðilega marktækur munur á poruhlutamælingum gerðum með nifteindadreifingu og poruhlutamælingum gerðum á*



Mynd 17



Mynd 18



Mynd 19



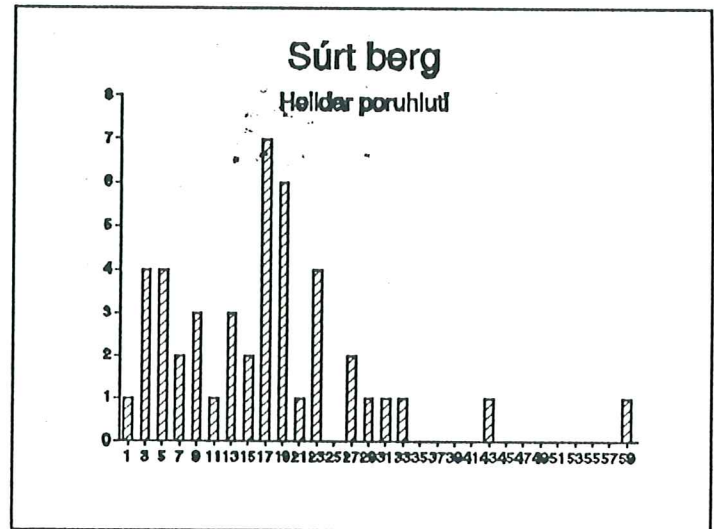
*bergskýning í tilraunastofu.*

Þetta er auðvitað hin merkasta niðurstaða, a.m.k. frá sjónarhóli borholumælinga. Menn virðast vera þeirrar skoðunar að mæling í tilraunastofu á bergsýni sé "áreiðanlegri" mæling en borholumæling. Ég hef reynt að gera mat á skekkjuvöldum í báðum aðferðunum, en ég get ekki séð að önnur aðferðin sé mælitæknilega betri en hin. Hins vegar finnst mér það ágætt ef eina "sönnunin" sem menn krefjast sé sú að niðurstöðum borholumælinga beri saman við niðurstöður í tilraunastofu.

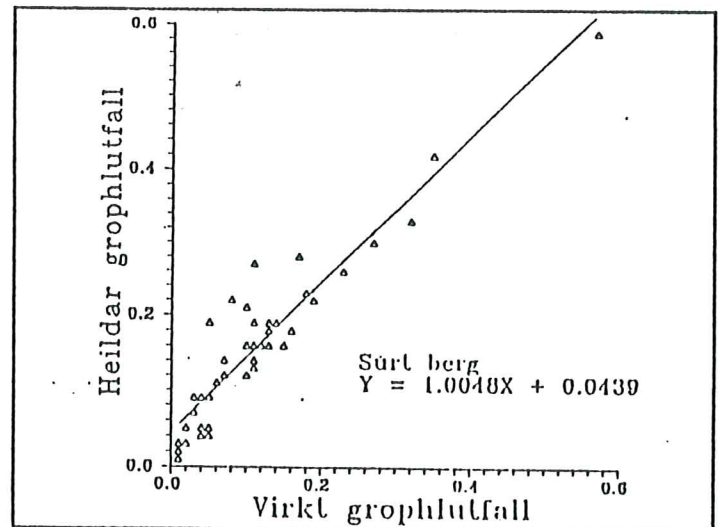
Það er rétt að benda á hér að poruhlutadreifing í holum RV-40 og RV-41 er svo til eins og poruhlutadreifingarnar í holum á Nesjavöllum. Hins vegar eru dreififöll poruhluta í Reyðarfjarðarholu og í tveim holum í Færeyjum (Lopra og Vestmanna) frábrugðnar. Bæði er meðalporuhluti lægri í þessum holum og einnig er form dreifingarinnar frábrugðið. Á Reyðarfirði og í Færeyjum er poruhlutadreifingin greinilega tvískipt, en tvískipting í öðrum holum er ekki sjáanleg ef frá er talin hola NG-6 á Nesjavöllum.

Þá er spurning: hvornig stendur á því að poruhlutadreifing er eins fyrir holur í Reykjavík og í holum á Nesjavöllum? Möguleg skýring á þessu er að jarðhitasvæðin í Reykjavík (Laugarnes og Elliðaársvæðið) eru gömul háhitasvæði (Jens Tómasson munnl. upplýsingar) og að háhitaummyndunin í þessum svæðum hafi aukið poruhlutann til jafns við það sem við sjáum nú á Nesjavöllum.

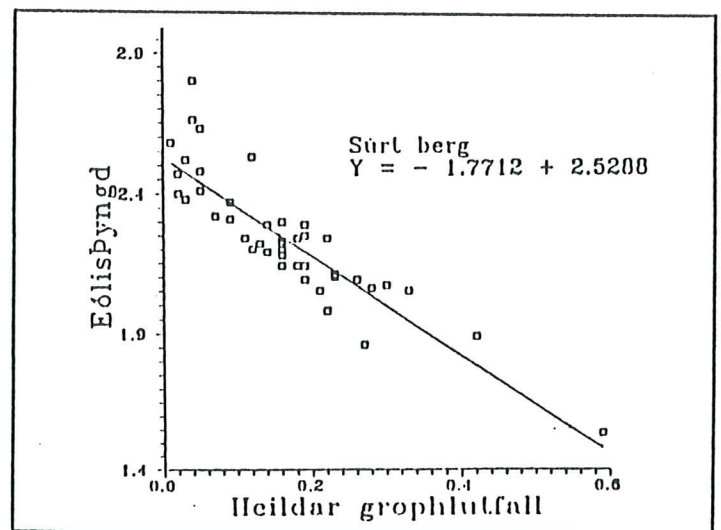
Hér er í raun verið að halda því fram að ummyndunarprósessin auki poruhluta og jafnframt að poruhluti í háhitakerfum sé hærri en utan háhitakerfanna. Munurinn á Nesjavöllum og Reykjavík annars vegar og Reyðarfirði og Færeyjum hins vegar er þá talinn stafa



Mynd 20



Mynd 21



Mynd 22

af því að fyrri flokkurinn er virk eða gömul háhitakerfi, en seinni flokkurinn er boraður utan við háhitasvæði. Þetta sjónarhorn er ekki í samræmi við niðurstöður Hjalta um Svartsengi (Hjalti Franzson: SVARTSENGI Jarðfræðilíkan af háhitakerfi og umhverfi þess, OS-90050/JHD-08) þar sem ein af niðurstöðum Hjalta er að poruhluti sé hærri utan jarðhitakerfis en innan þess.

Veikleikinn í svona fullyrðingu er auðvitað eins og áður að verið er að bera saman jarðlagastafla þar sem mismikil móbergsmýndun er fyrir hendi. Til þess að kanna áhrif ummyndunar á poruhluta verður að mæla skipulega í holum með svipaða jarðlagaupbyggingu og bera saman ferska hlutann og ummyndaða hlutann. Einnig þarf að fara í rofið háhitasvæði og taka sýni úr sama hraunlaginu þar sem hægt er að finna bæði ferskan og ummyndaðan hluta hraunlagsins. Einnig þarf að skoða poruhlutadreifingu úr nokkrum lághitaholum, þar sem menn eru sammála um að ekki sé fyrir hendi gamalt háhitasvæði. Búast má við að poruhlutadreifing í svona holum ætti að vera með meðalgildi mun lægra en 20% og það ætti að vera marktækur fjöldi mælinga sem kæmi á bilið 0-5%.

Ef ég skil Hjalta rétt þá byggir hann niðurstöður sínar á þeirri einföldu staðreynd að það eru meiri útfellingar eða holufyllingar í háhitakerfum en í bergi utan háhitasvæða á sama dýpi. Þessu ætla ég ekki að reyna að mæla í mót. Hins vegar hef ég reynt að gera því skóna í þessum skrifum að menn verði að greina á milli tveggja prósesa, annars vegar ummyndunar og hins vegar útfellinga eða holufyllinga. Fyrir poruhluta þá held ég því fram að þessir tveir prósessar virki í gagnstæðar áttir. Ummyndunarprósessin eykur poruhluta, en útfellingarprósessin minnkar poruhluta. Á einhverjum stað í berginu getur annar hvor þessarar prósesa haft yfirhöndina og lokalt séð eru báðir möguleikar fyrir hendi-þ.e. poruhluti getur bæði aukist og minnkað vegna áhrifa hita og nærveru vatns. Mér sýnist hins vegar að þau gögn sem skoðuð hafa verið í þessari greinargerð bendi allt eins til að í háhitakerfum hafi ummyndunin yfirleitt meiri áhrif á poruhlutann en áhrif útfellinganna.

Í flestum tilfellum er uppleysanleiki efna háður hitastigi þannig að hár hiti á jarðvatni hefur meiri möguleika á að leysa upp efni í bergi en lægri hiti. Þegar jarðhitavökvi, sem hefur streymt um háhitakerfi og leyst þar upp ýmisleg efni úr berginu, kemur út úr jarðhitakerfinu og kólnar eru miklar líkur á að sum efnanna falli út úr vökvanum og myndi útfellingabelti til hliðar eða ofan við háhitakerfið. Mér sýnist þess vegna að eitt af því sem háhitakerfi gera, er að flytja vissan hluta af bergmassanum út úr háhitakerfunum og út í bergið fyrir utan háhitakerfið, eða í útjaðra háhitasvæðisins. Þessi skilningur er ekki í fullu samræmi við teórfu Hjalta um að poruhluti sé minni innan háhitasvæða heldur en utan þeirra.

Í mörgum tilfellum eru verulegar útfellingar samfara því að jarðhitavatn kemur upp á yfirborð jarðar. Þetta má líka túlka á þann veg að jarðhitaprósessin sé að flytja massa úr jarðhitakerfinu út fyrir jarðhitakerfið. Slíkur prósess hlýtur að hafa þau áhrif að poruhluti í jarðhitakerfi eykst eftir því sem jarðhitakerfið þróast með tíma.

Niðurstaðan af þessum vangaveltum er sú að þróun jarðhitakerfanna hafi í för með sér að poruhluti háhitakerfanna aukist með tíma en að poruhluti bergs utan jarðhitakerfa muni lækka með tíma.

Til hægðarauka eru myndir af poruhlutadreifingu í einstökum holum sýndur í viðauka 3.



## 6. Framhald gagnasöfnunar

Það er nokkuð augljóst af niðurstöðum þessarar greinargerðar að þekking okkar á forðafræðistuðlum í íslensku bergi er ansi götótt. Til þess að bæta úr því verður að fara tvær leiðir:

1. Mæla poruhluta og lekt á fleiri bergsýnum
2. Vinna betur úr borholumælingum, bæði þeim sem fyrir liggja og þeim sem gerðar verða í framtíðinni.

Í Greinargerð VS/BS-91/03 *Vinnslu- og forðafræði háhitasvæða* frá 91-02-25 er áætlað að koma hér upp aðstöðu til að mæla lekt á bergsýnum og gera nokkuð átak í að safna sýnum á skipulegan hátt og mæla lekt og poruhluta á bergsýnum. Hér að framan var bent á það að við þyrftum líklega mælingar á nokkrum tugum þúsunda sýna, til þess að fá tölfræðilegt mat á forðafræðistuðlum í Íslensku bergi.

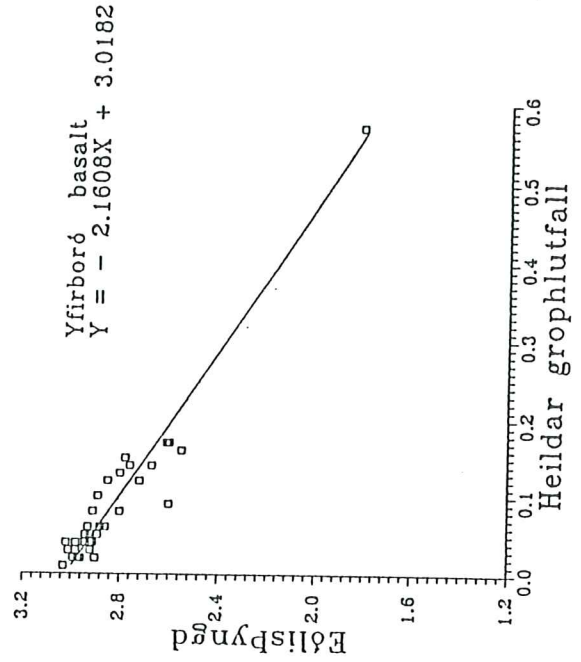
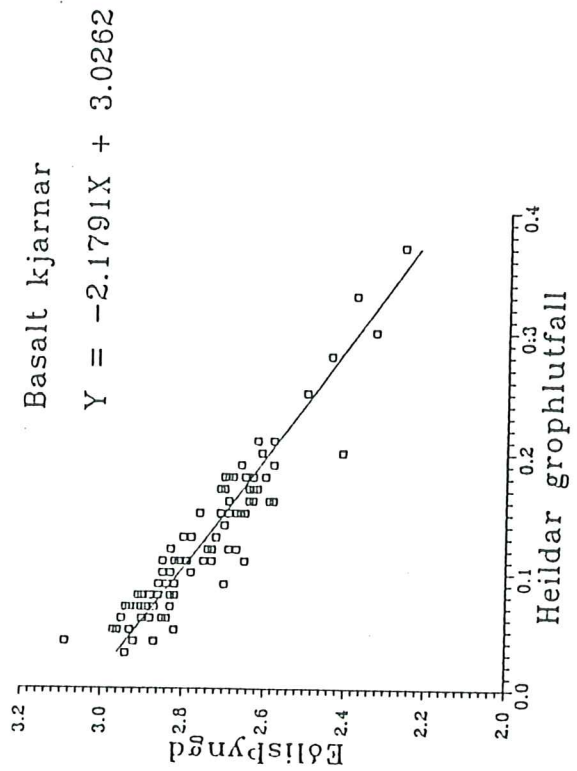
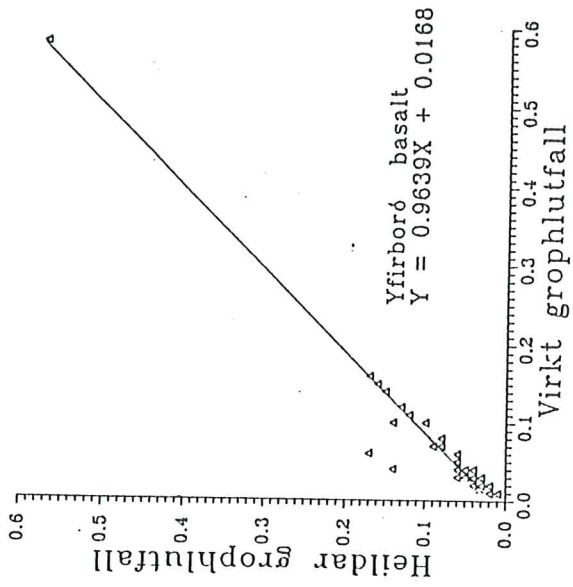
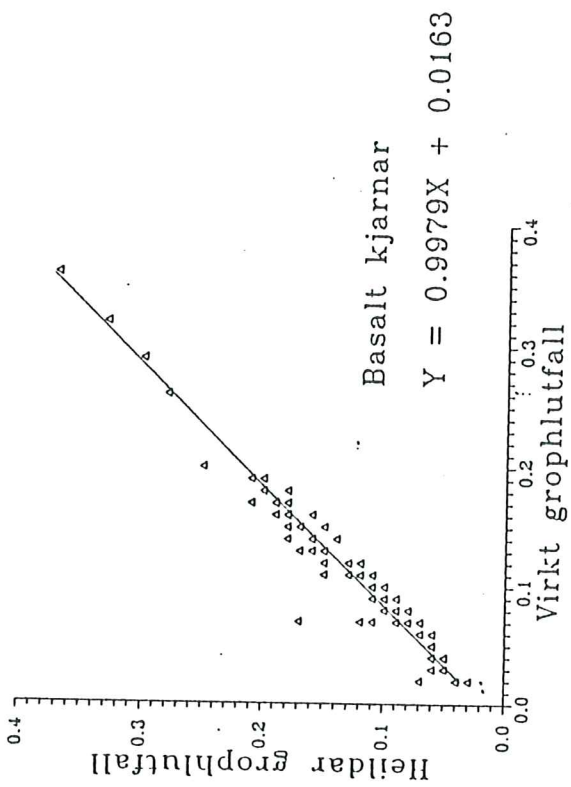
Úrvinnsla borholumælinganna verður líka í framtíðinni að verða markvissari, þannig að forðafræðileg markmið ráði úrvinnslunni frekar en jarðfræðileg sjónarmið eins og reyndin hefur verið fram að þessu. Hér má nefna nokkur atriði:

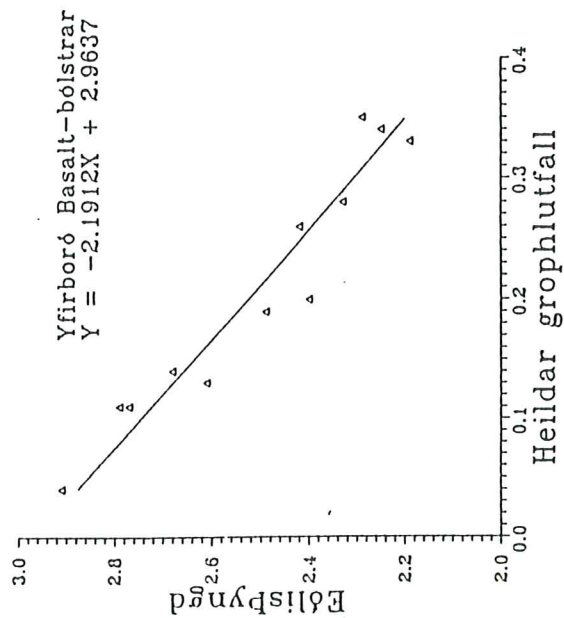
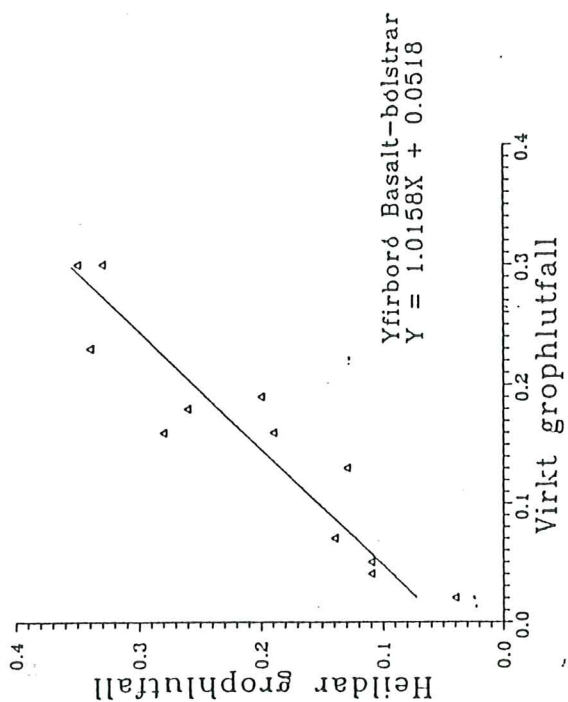
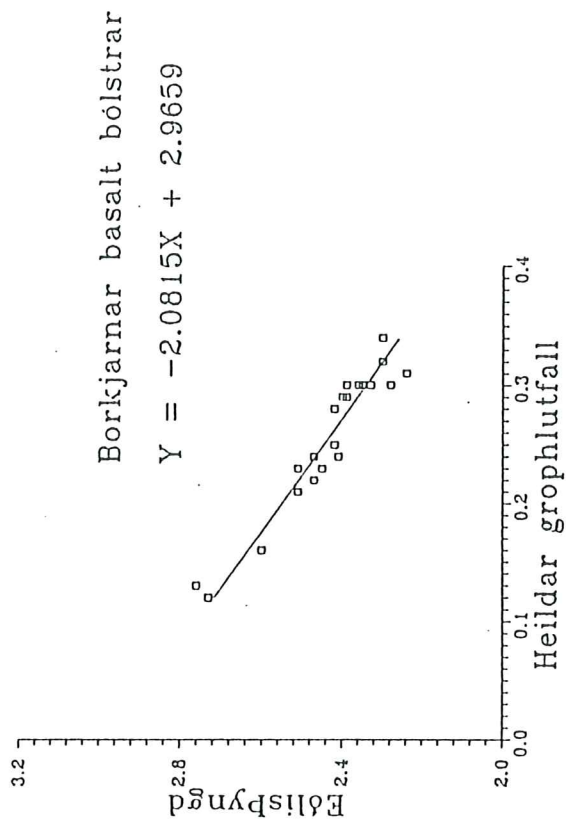
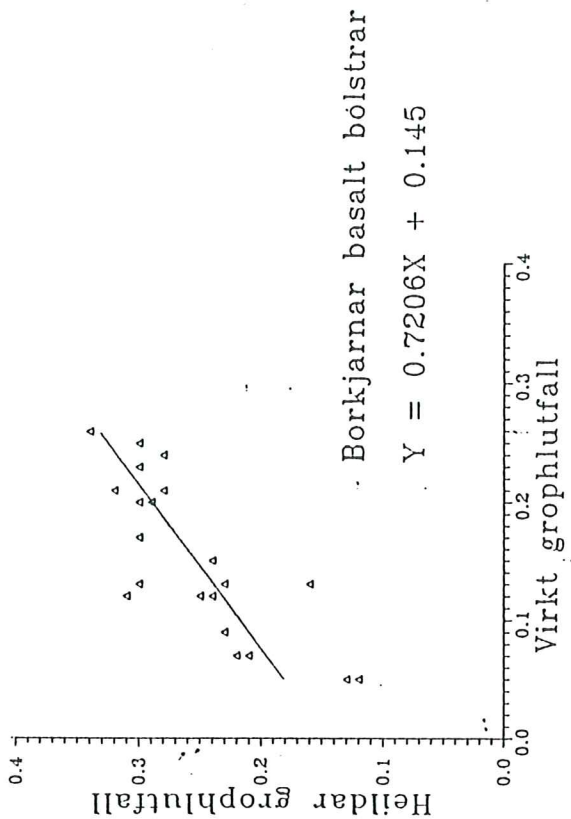
- \* Tengja borholumælingar beint og/eða tölfræðilega við mælingar á bergsýnum.
- \* Vinna úr mælingum með hliðsjón af þeim spurningum sem koma fram í þessari greinargerð. T.d. að bera saman poruhlutadreifingu í fersku bergi (ofarlega í holu) og í ummynduðu bergi (neðarlega í holu). Einnig ætti að bera saman poruhlutadreifingu í innskotum við dreifinguna í móðurbergi.
- \* Finna úrvinnsluleiðir til þess að setja upp þrívítt líkan af poruhluta í jarðhitakerfi, sem byggir á niðurstöðum borholumælinga.
- \* Samnýta mismunandi borholumælingar til þess að fá betri upplýsingar um forðafræðistuðla í einstöku jarðhitakerfi. Á sínum tíma var gerð tilraun til að túlka saman nifteindamælingar og viðnámsmælingar í borholum. Niðurstöður þeirra athugana var að með þessari samtúlkun mætti fá fram hlutfall milli sprunguporuhluta og poruhluta, sem er jafndreifður um bergið (matrix porosity).

Varðandi poruhluta í íslenskum jarðhitakerfum sýnist mér að mesta upplýsingagildið sé í þeim borholumælingum, sem þegar hafa veið gerðar.

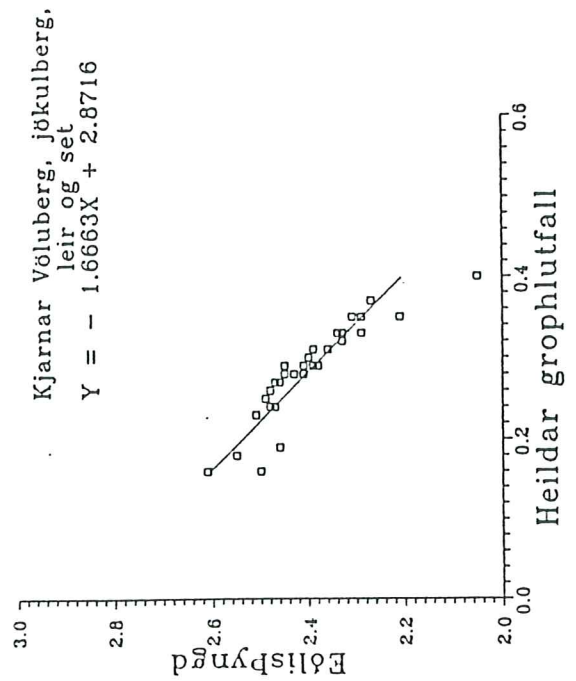
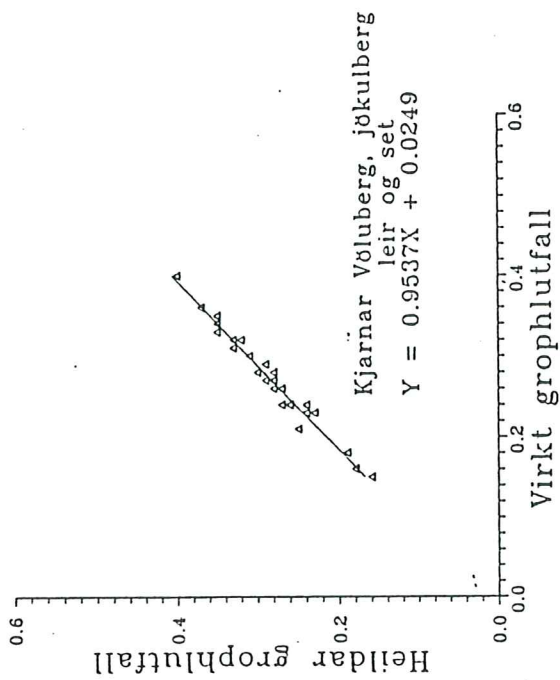
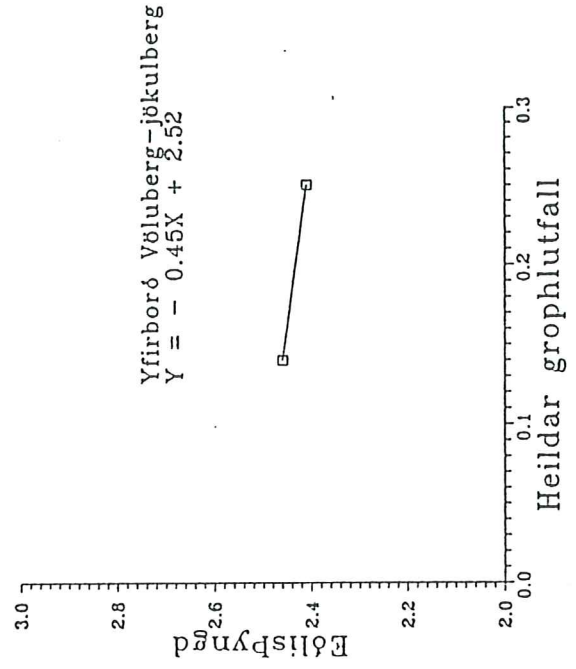
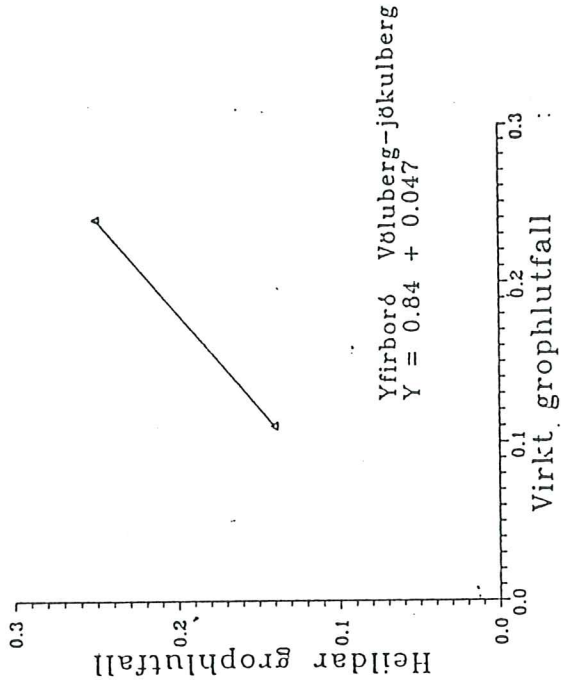


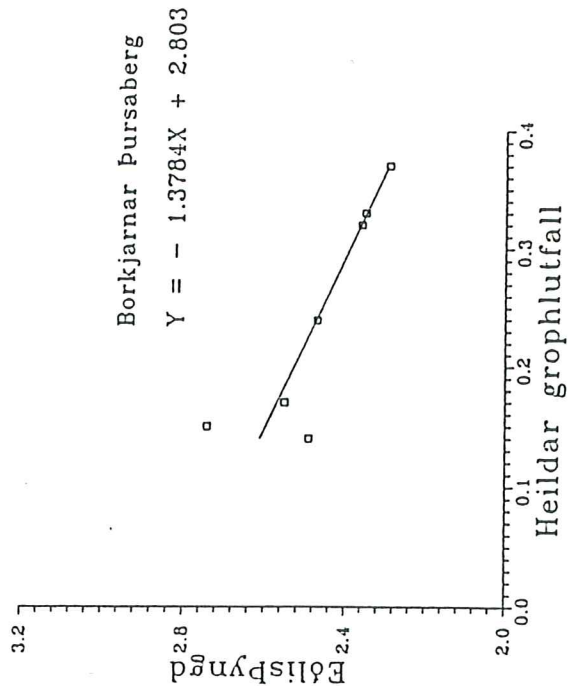
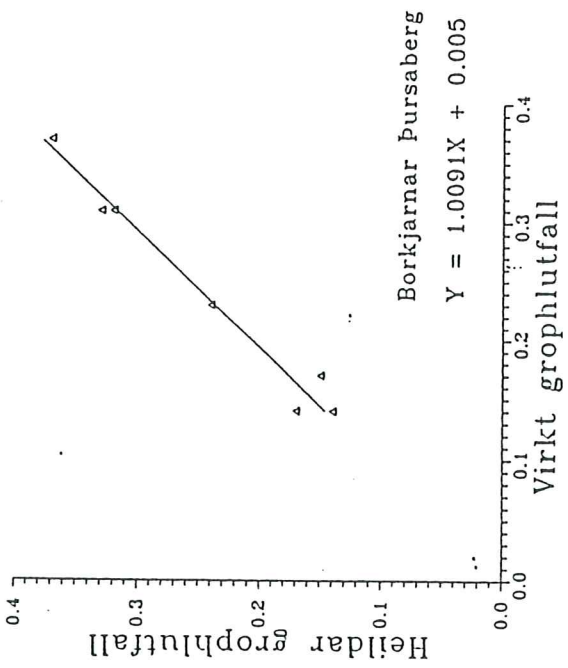
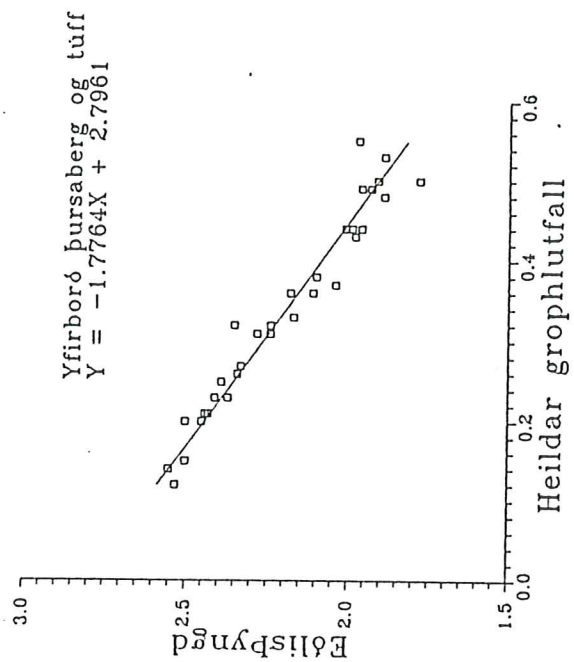
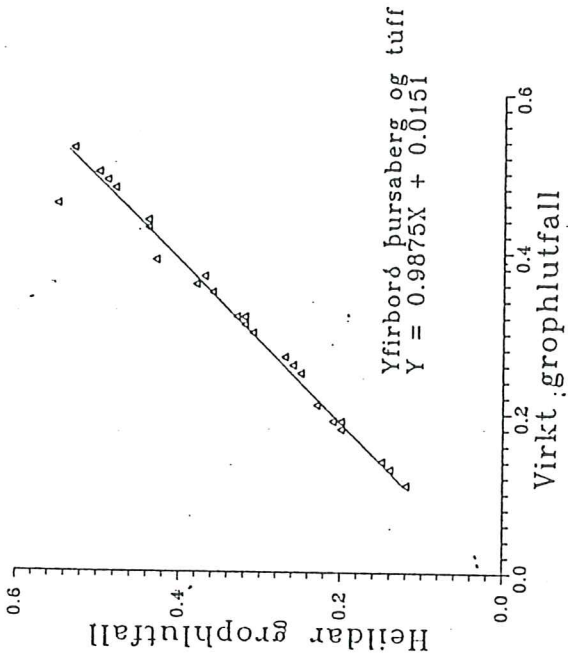
## VIÐAUKI 1

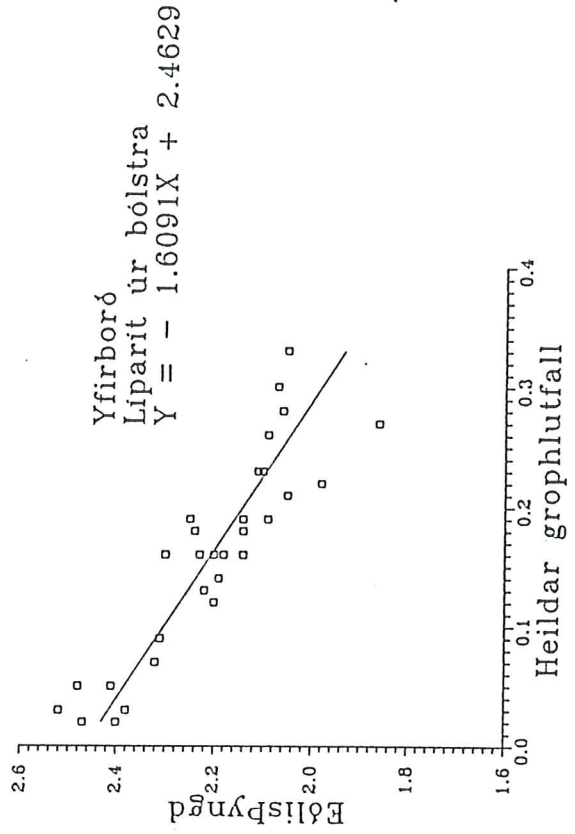
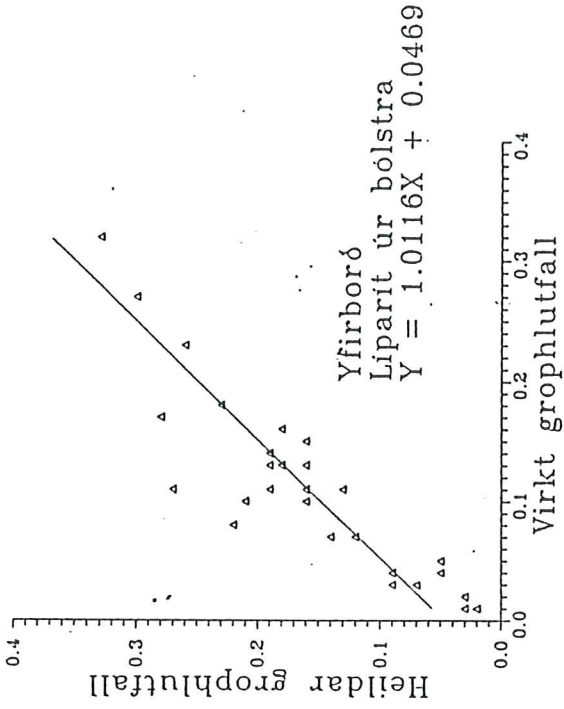
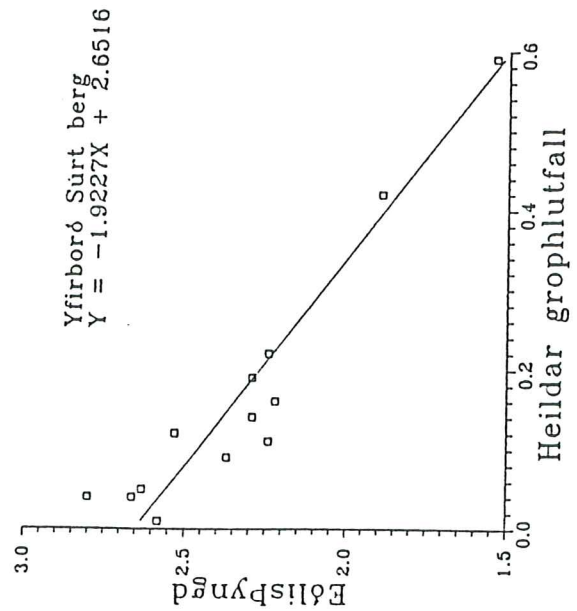
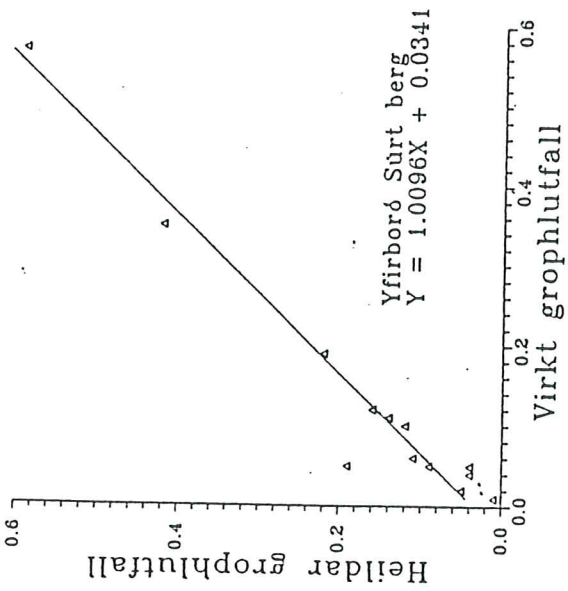














## VIÐAUKI 2

		BASALT			
Nr	Staður	Dýpi	Eðlisþ.	Virk.	Heildar
		[m]	[g/cm <sup>3</sup> ]	gropa	gropa
22	Akranes H-2	49.1	2.74	0.12	0.12
22			2.63	0.13	0.16
22			2.64	0.14	0.16
20		97.7	2.33	0.29	0.3
19		82.7	2.61	0.19	0.2
257	Krafla H-2	540	2.7	0.08	0.09
286	Krafla H-5	790	2.82	0.03	0.05
10	Vestm. H-1	640	2.59	0.14	0.16
11		1010	2.87	0.02	0.07
12		1517	2.96	0.04	0.05
151	Sigalda E-8	2.9	2.76	0.13	0.15
152		4.5	2.71	0.15	0.17
153		8.7	2.94	0.06	0.07
154		11.2	2.93	0.06	0.07
155		14.6	2.86	0.07	0.09
156		22	2.69	0.13	0.16
157		23.9	2.63	0.15	0.18
158		26	2.86	0.08	0.08
159		30	2.9	0.06	0.07
160		31.4	2.89	0.06	0.07
161		39.3	2.87	0.06	0.07
162		43.2	2.88	0.04	0.06

163		47.4	2.79	0.1	0.11
164		52.1	2.82	0.1	0.11
165		53.6	2.81	0.1	0.11
166		58	2.81	0.09	0.11
167		60	2.73	0.07	0.12
168		67	2.88	0.08	0.08
169		69	2.85	0.1	0.11
170		70.5	2.78	0.12	0.13
171		73.5	2.5	0.2	0.25
172		77	2.44	0.26	0.28
173		77.7	2.62	0.07	0.17
174		79.3	2.65	0.14	0.18
59	Hrauneyj.HP-4	4	2.66	0.12	0.15
60		8.4	2.84	0.05	0.06
61		11.8	2.85	0.04	0.06
62		18.3	2.69	0.17	0.18
63		20	2.84	0.07	0.09
64		21	2.85	0.09	0.1
65		23.1	2.68	0.18	0.18
71	Hraun. HP-14	13.3	2.91	0.07	0.07
72		14.7	2.9	0.08	0.08
73		19.5	2.79	0.07	0.11
98	Hraun. HP-15	3.2	2.75	0.1	0.11
99		5.2	2.7	0.14	0.14
100		11	2.83	0.07	0.08
101		18.3	2.91	0.06	0.07
102		18.6	2.8	0.11	0.13
103		21.3	2.91	0.07	0.08
104	Hraun. HP-15	22.5	2.91	0.07	0.08
105		29.1	2.92	0.06	0.07
106		35	2.85	0.08	0.1



122	Hraun. HP-34	2.7	2.73	0.11	0.12
123		6	2.82	0.08	0.08
124		6.8	2.67	0.13	0.15
129	HP-35	3.5	2.63	0.15	0.17
130		6	2.65	0.13	0.15
131		10.5	2.64	0.15	0.17
132	HP-37	12	2.85	0.06	0.06
133		13	2.83	0.07	0.07
134		15.5	2.72	0.12	0.13
135		34	2.91	0.06	0.07
79	HP-38	3	2.58	0.17	0.19
80		11	2.78	0.09	0.1
136	HP-41	3.7	2.78	0.1	0.1
137		6.4	2.78	0.1	0.1
138		8.9	2.83	0.07	0.07
139		10	2.6	0.18	0.18
27	Kaldárholt H-1	46	2.95	0.03	0.06
28		58	2.71	0.13	0.15
23	Sölvaholt H-1	39.4	2.69	0.11	0.15
24		58.4	2.86	0.09	0.09
25		68	2.96	0.04	0.05
34	Nesjavellir#4	88-426	2.38	0.32	0.33
35			2.58	0.19	0.21
36			2.62	0.17	0.21
37			2.26	0.36	0.37
96	Krísuvík H-5	428	2.69	0.11	0.12
97		670	2.41	0.18	0.2
188	H-6	412	2.58	0.16	0.16
189		413	2.73	0.11	0.11
190		625	2.65	0.11	0.11
191		821	2.89	0.06	0.07

195	H-7	155	2.87	0.02	0.04
196		186	2.94	0.02	0.03
196			2.71	0.15	0.15
197	H-8	377	2.9	0.05	0.06
198		378	2.93	0.04	0.05
200		930	2.82	0.08	0.09
193	Njarðvíkurheiði	209.5	2.7	0.16	0.18
194		497	2.92	0.02	0.04
17	Seltjarnarn. H-1	77	2.97	0.03	0.05
15	H-2	80.2	2.66	0.16	0.19
5	Skyggnir H-39	28.6	2.83	0.11	0.12
6		209.2	2.83	0.08	0.1
4	G-32	850	3.09	0.02	0.04
14	Gufunes	173	2.7	0.13	0.17
30	Stardalur H-1	61	2.67	0.07	0.12
270	Sigalda		2.67	0.04	0.14
40	Reykjakot		2.55	0.15	0.16
45			2.60	0.07	0.09
46			2.90	0.01	0.02
175	Reykjadalur		2.92	0.03	0.05
185			2.89	0.04	0.05
271	Kálfstindar		2.60	0.06	0.17
85	Sog		2.72	0.11	0.12
87			2.61	0.16	0.17
91			1.81	0.58	0.57
254	Helgaf.Mosf.		2.92	0.03	0.04
236	Grímansfell		2.99	0.01	0.02
278	Brimnes		2.80	0.12	0.13
250	Esja		2.94	0.03	0.04
223			2.92	0.03	0.03
246			2.80	0.07	0.08

217			2.97	0.01	0.02
218			3.03	0.01	0.01
244			2.94	0.04	0.05
245	Melafjall		2.86	0.05	0.06
247	Esja		2.98	0.02	0.03
220			2.92	0.02	0.03
238			3.02	0.04	0.04
240			2.93	0.04	0.06
221			3.01	0.02	0.03
231			2.89	0.10	0.10
226			2.76	0.10	0.14
251			2.98	0.04	0.04
225			2.85	0.11	0.12
224			2.96	0.01	0.02
253			2.78	0.14	0.15
249			2.98	0.02	0.03
248			2.94	0.02	0.04
222			2.91	0.02	0.04
255			2.91	0.08	0.08
227			2.86	0.03	0.06
252			2.95	0.03	0.04
229			2.88	0.06	0.06
230			2.96	0.02	0.02
235			2.97	0.02	0.02
	Meðaltal		2.786043	0.093741	0.109353
	Meðalfrávik		0.171298	0.074213	0.075202



		BASALT BÓLSTRAR			
Nr	Staður	Dýpi	Eðlisþ.	Virk.	Heildar
		[m]	[g/cm <sup>3</sup> ]	poruh.	poruh.
31	Námafj. H-8	>540	2.60	0.13	0.16
31			2.40	0.20	0.29
54	Hrauneyjar HP-3	13	2.51	0.13	0.23
55		29.5	2.47	0.15	0.24
56		30.9	2.47	0.07	0.22
57		31.5	2.30	0.21	0.32
58		43.5	2.30	0.26	0.34
66	HP-10	6.3	2.24	0.12	0.31
67		10	2.42	0.12	0.25
68		10.5	2.45	0.09	0.23
69		19	2.39	0.20	0.29
70		23	2.28	0.13	0.3
74	HP-20	13.6	2.51	0.07	0.21
75		15	2.41	0.12	0.24
76	HP-22	5.9	2.76	0.05	0.13
77		12.5	2.73	0.05	0.12
141	HP-23	21	2.35	0.20	0.3
108		30	2.33	0.17	0.3
147	HP-46	23	2.42	0.21	0.28
148		23.5	2.42	0.24	0.28
149		26	2.39	0.25	0.3
150		27.9	2.36	0.23	0.3

327	Sigalda		2.79	0.05	0.11
331			2.68	0.07	0.14
180	Reykjadalur		2.40	0.19	0.20
181			2.49	0.16	0.19
182			2.19	0.30	0.33
281	Kálfstindur		2.29	0.30	0.35
316	Stapafell		2.42	0.18	0.26
314			2.33	0.16	0.28
315			2.25	0.23	0.34
326	Mosfell		2.77	0.04	0.11
332			2.61	0.13	0.13
222	Esja		2.91	0.02	0.04
	Meðaltal		2.46	0.15	0.24
	Meðalfrávik		0.18	0.08	0.08

		MÓBERG, SET OG RUÐNINGUR			
Nr	Staður	Dýpi	Eðlisþ.	Virk.	Heildar
		[m]	[g/cm <sup>3</sup> ]	poruh.	poruh.
21	Akranes H-2	30.2	2.47	0.23	0.24
21			2.48	0.24	0.24
21			2.51	0.23	0.23
109	Hrauneyjar HP-24	11.9	2.39	0.27	0.29
111	HP-27	14.1	2.49	0.21	0.25
112		18	2.27	0.36	0.37
113		20.4	2.36	0.3	0.31
114	HP-28	16.8	2.29	0.34	0.35
115		19	2.46	0.24	0.27
116	HP-30	13.6	2.39	0.3	0.31
117	HP-31	9.6	2.33	0.32	0.33
118		13	2.31	0.35	0.35
119		15.5	2.45	0.29	0.29
120		19.5	2.40	0.28	0.3
121		24	2.45	0.26	0.28
125	HP-34	9.5	2.36	0.3	0.31
126		10.8	2.43	0.28	0.28
127		11	2.33	0.32	0.33
128		12.7	2.33	0.32	0.32
140	HP-42	6.3	2.38	0.27	0.29
142	HP-46	5.6	2.41	0.27	0.28
143		10	2.41	0.27	0.29



144		10.3	2.47	0.26	0.27
145		17.5	2.34	0.32	0.33
146		21.8	2.48	0.24	0.26
26	Sölvaholt H-1	73.3	2.29	0.31	0.33
7	Húsavík H-1	954	2.55	0.16	0.18
8		1052.4	2.61	0.15	0.16
9	Vestmannaeyjar H-1	240	2.05	0.4	0.4
13	Reykjanes H-8	1369	2.50	0.15	0.16
1		1372	2.46	0.18	0.19
29	Stardalur H-1	42	2.21	0.33	0.35
257	Krafla H-2	540	2.49	0.14	0.14
282	Krafla H-5	790	2.4	0.17	0.15
107	Vestmannaeyjar H-1	782	2.55	0.14	0.17
2	Reykjanes H-6	570.5	2.47	0.23	0.24
16	Seltjarnarnes H-1	52.4	2.35	0.31	0.33
18		93.2	2.36	0.31	0.32
192	Ártún H-38	300	2.29	0.37	0.37
52	Sauðá		2.41	0.24	0.25
177	Reykjadalur		2.46	0.11	0.14
51	Sauðá		2.53	0.11	0.12
183	Reykjadalur		2.10	0.36	0.38
187	Slaga		1.89	0.48	0.48
83	Sog		1.99	0.43	0.44
90			1.96	0.49	0.49
93			1.93	0.49	0.49
94			1.96	0.49	0.49
48	Sauðá		2.55	0.13	0.14
49			2.28	0.30	0.31
50			2.33	0.27	0.27
53			2.50	0.14	0.15
38	Grændalsá		2.34	0.26	0.26

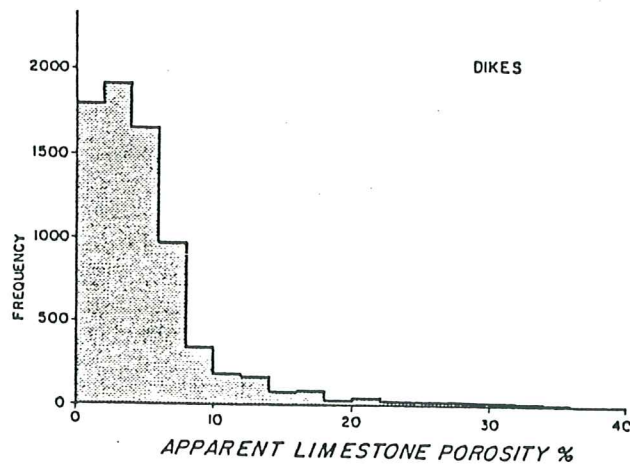
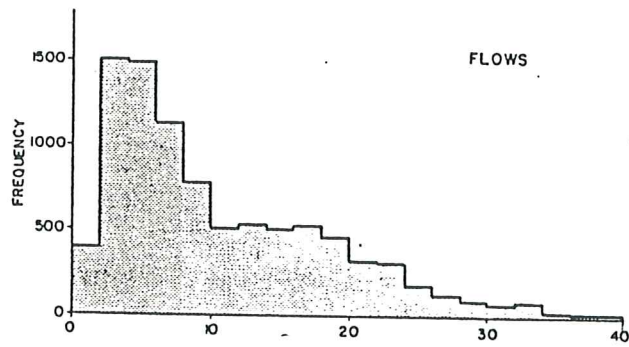
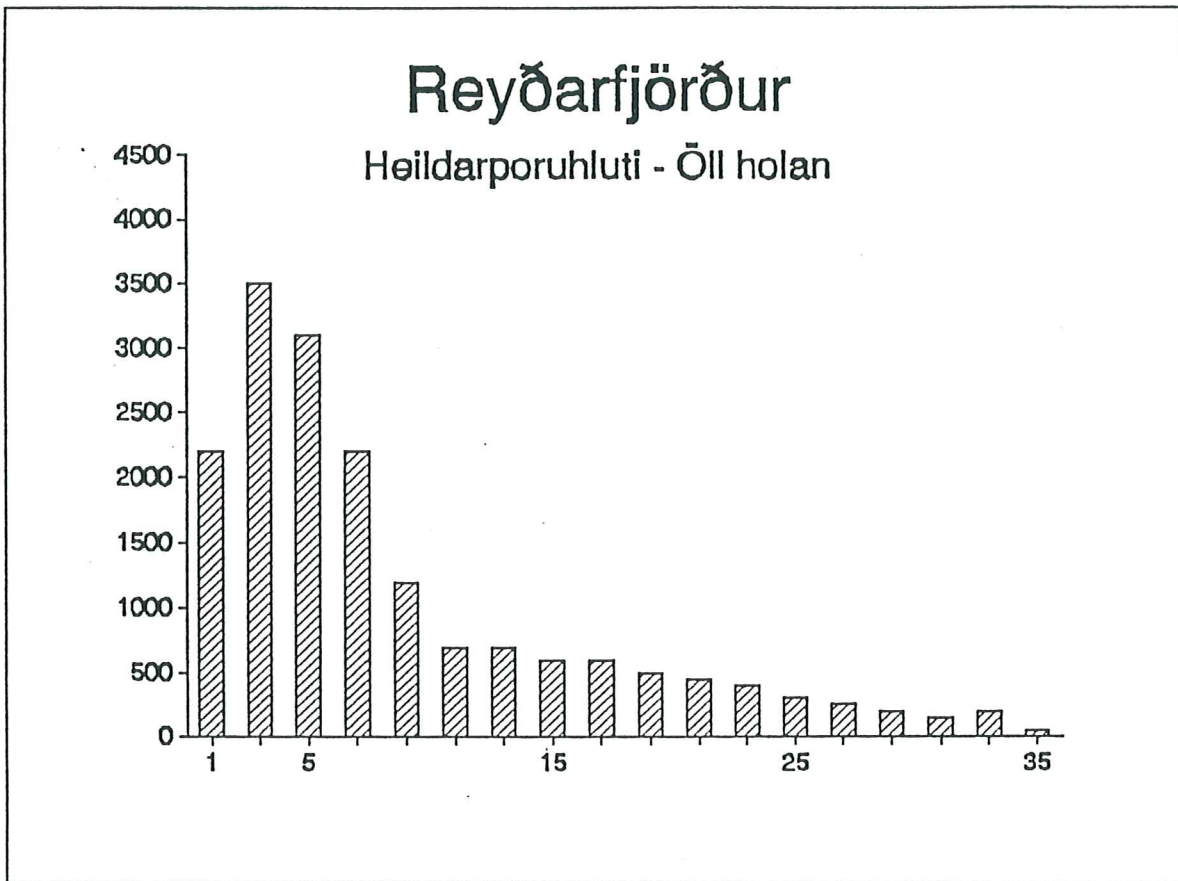
39			2.18	0.35	0.36
41			2.24	0.32	0.32
44			2.24	0.30	0.31
47			2.43	0.19	0.21
176	Reykjadalur		2.35	0.31	0.32
178			2.50	0.18	0.20
184			1.98	0.39	0.43
186			2.11	0.35	0.36
81	Sog		2.17	0.32	0.33
82			1.96	0.44	0.44
83			1.78	0.50	0.50
84			2.01	0.44	0.44
86			2.39	0.25	0.25
88			2.04	0.37	0.37
89			1.97	0.46	0.55
92			1.89	0.53	0.53
95			1.91	0.50	0.50
216	Leiðhamar		2.37	0.21	0.23
213	Kléberg		2.45	0.19	0.20
214			2.41	0.21	0.23
215			2.44	0.19	0.21
	Meðaltal		2.31	0.29	0.30
	Meðalfrávik		0.20	0.10	0.10

	SÚRT BERG			
Nr	Staður	Eplisþ. [g/cm <sup>3</sup> ]	Virk. poruh.	Heildar poruh.
276	Selfjall	2.80	0.05	0.04
266	Landmannalaugar	2.37	0.05	0.09
303		2.22	0.12	0.16
277	Kerlingarfjöll	1.54	0.57	0.59
275		2.29	0.05	0.19
263		2.24	0.06	0.11
273		1.89	0.35	0.42
274	Geldingadalsfjall	2.29	0.11	0.14
42	Grændalsá	2.53	0.10	0.12
219	Lokufjall	2.66	0.04	0.04
233	Esja	2.63	0.02	0.05
237		2.24	0.19	0.22
256	Stardalur	2.58	0.01	0.01
333	Stóragil	2.20	0.11	0.16
334		2.52	0.02	0.03
335		2.48	0.04	0.05
336		2.41	0.05	0.05
337		2.18	0.10	0.16
325		2.05	0.10	0.21
338		2.14	0.13	0.19
339		2.22	0.11	0.13
340		2.14	0.16	0.18



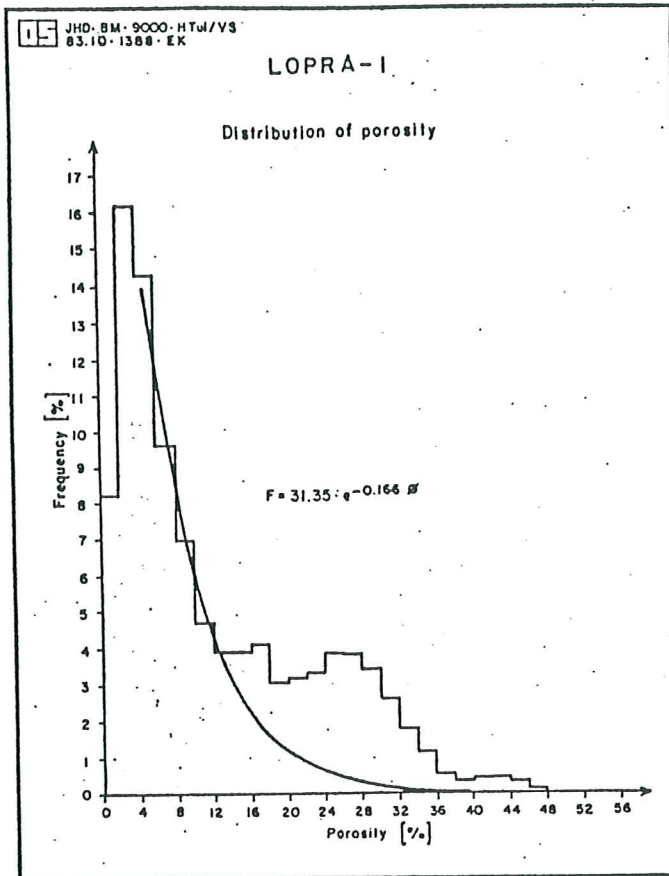
268	Landmannalaugar	2.47	0.01	0.02
262		2.38	0.01	0.03
269		1.86	0.11	0.27
319		2.20	0.07	0.12
320		2.31	0.03	0.09
321		2.06	0.17	0.28
322		2.30	0.13	0.16
328		2.24	0.13	0.18
267		2.11	0.18	0.23
310		2.31	0.04	0.09
312		2.19	0.07	0.14
327		2.40	0.01	0.02
324		2.25	0.14	0.19
318	Bláhnúkur	2.23	0.13	0.16
304		2.18	0.10	0.16
305		2.14	0.15	0.16
306		2.32	0.03	0.07
307		2.09	0.23	0.26
308		2.05	0.32	0.33
317		2.10	0.18	0.23
313		2.07	0.27	0.3
309		2.09	0.11	0.19
265	Kerlingarfjöll	1.98	0.08	0.22
	Meðaltal	2.24	0.12	0.16
	Meðalfrávik	0.23	0.10	0.11

### VIÐAUKI 3

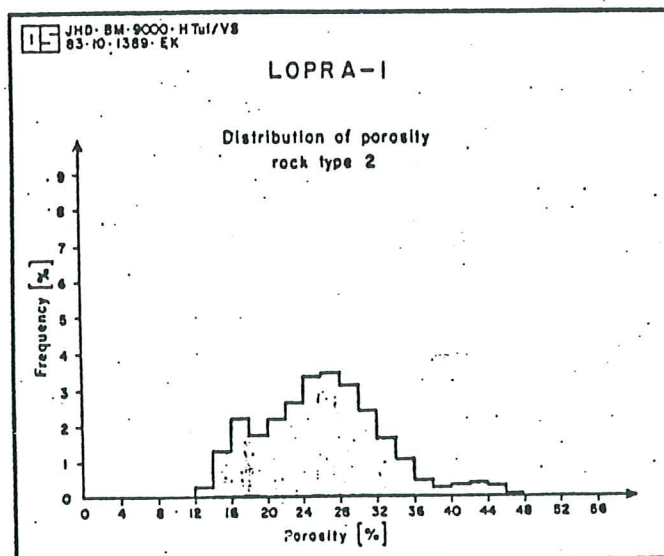


Porosity distributions for flows and dikes.

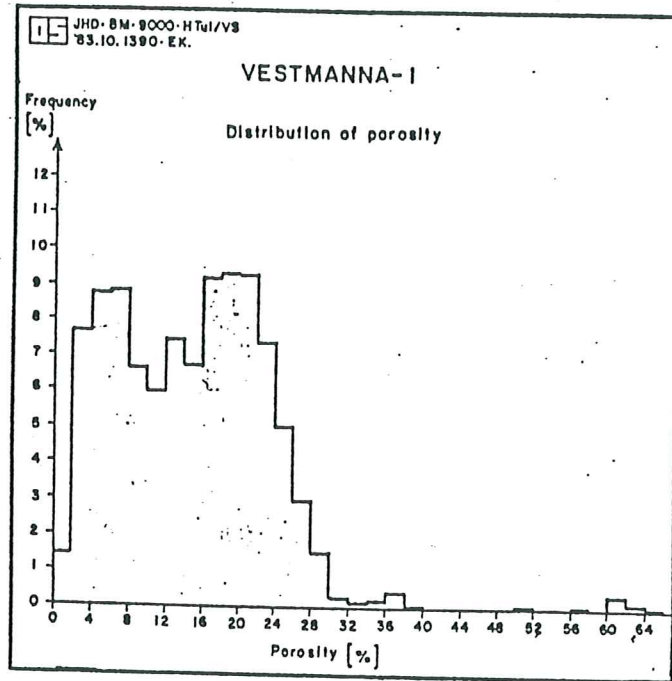




Distribution of porosity in Lopra-1.

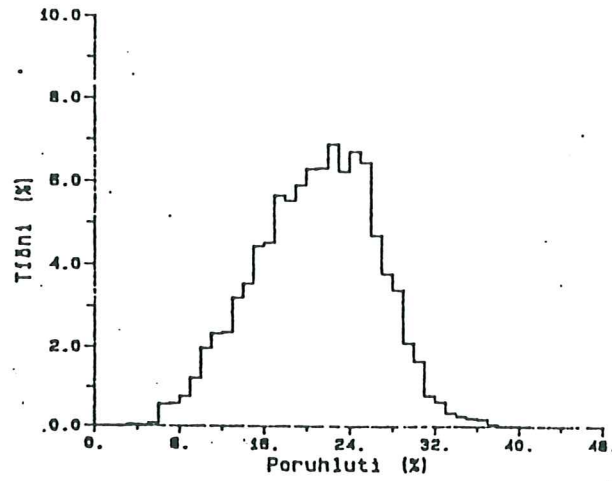


Porosity distribution of high porosity rocks in Lopra-1.



Distribution of porosity in Vestmanna-1.

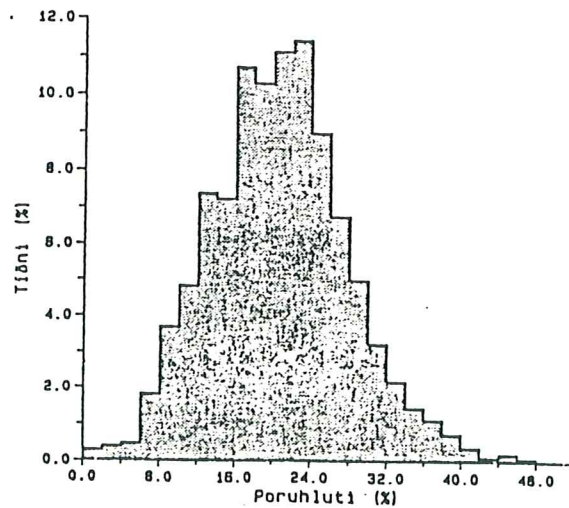
REYKJAVÍK HOLA RV-40 310-2072 m



Poruhlutí - tíðnidreifing í RV-40

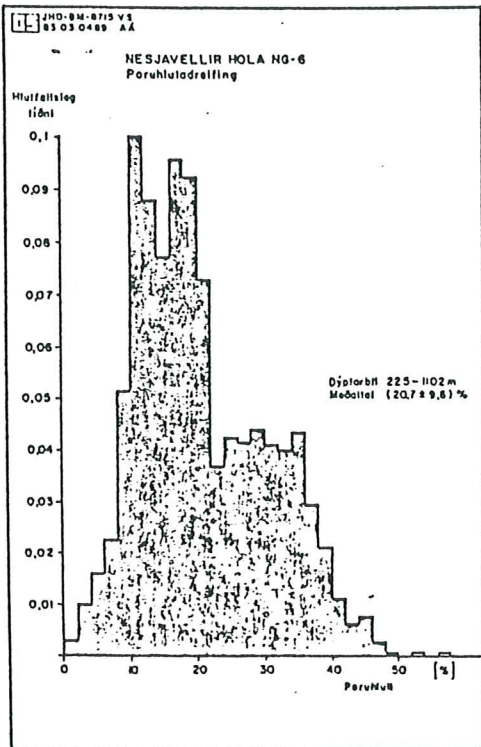
JHD.BM.1111.HTu1  
85.02.0318 T

REYKJAVÍK HOLA RV-41 440-1505m

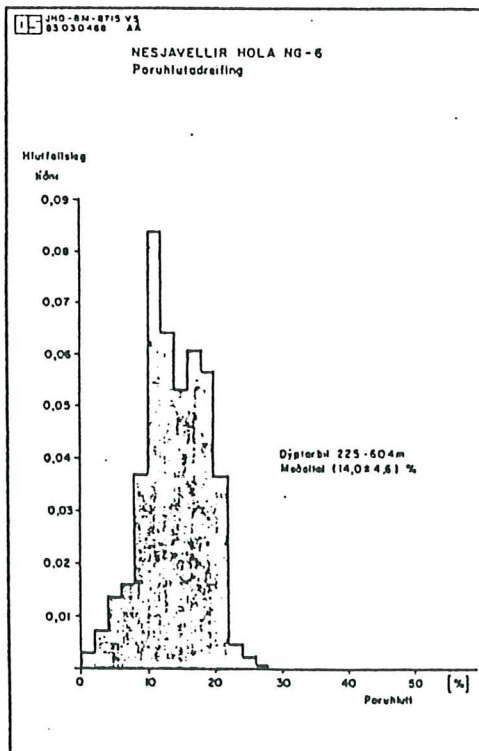


Tíðnidreifing poruhluta í holu RV-41

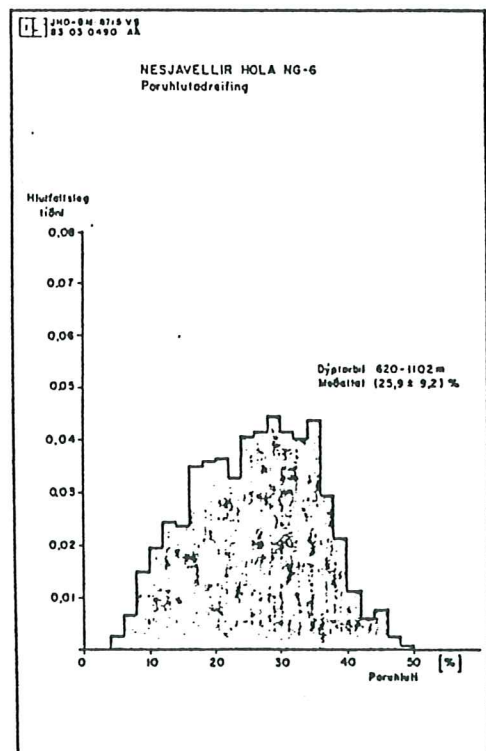




Poruhlutadreifing á dýptarbilinu 225-1102 m



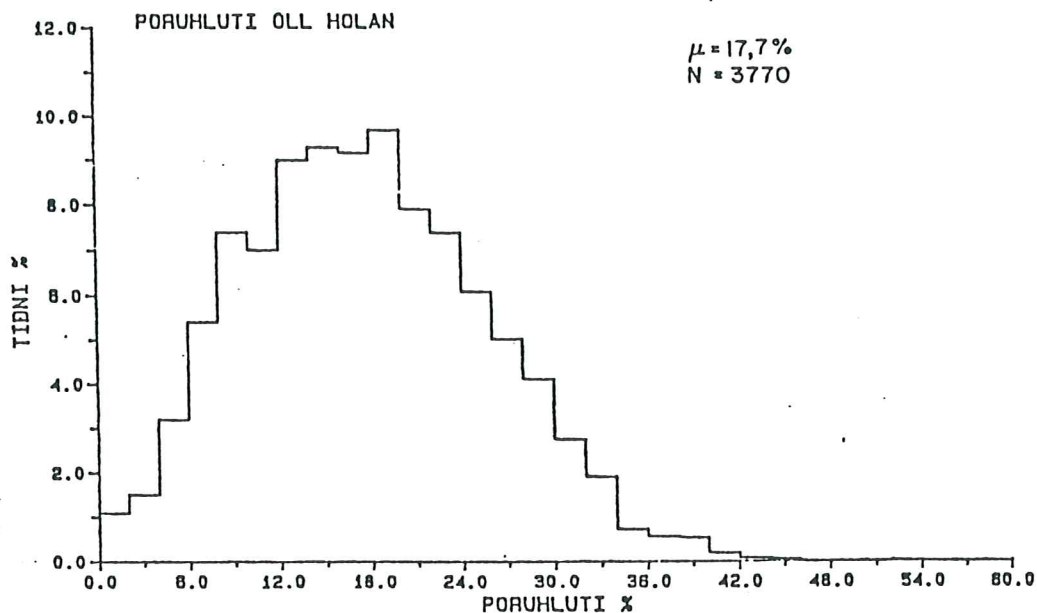
Poruhlutadreifing í efri hluta holu



Poruhlutadreifing í neðri hluta holu

JHD-BM-8715 HS  
88.02.0114 T

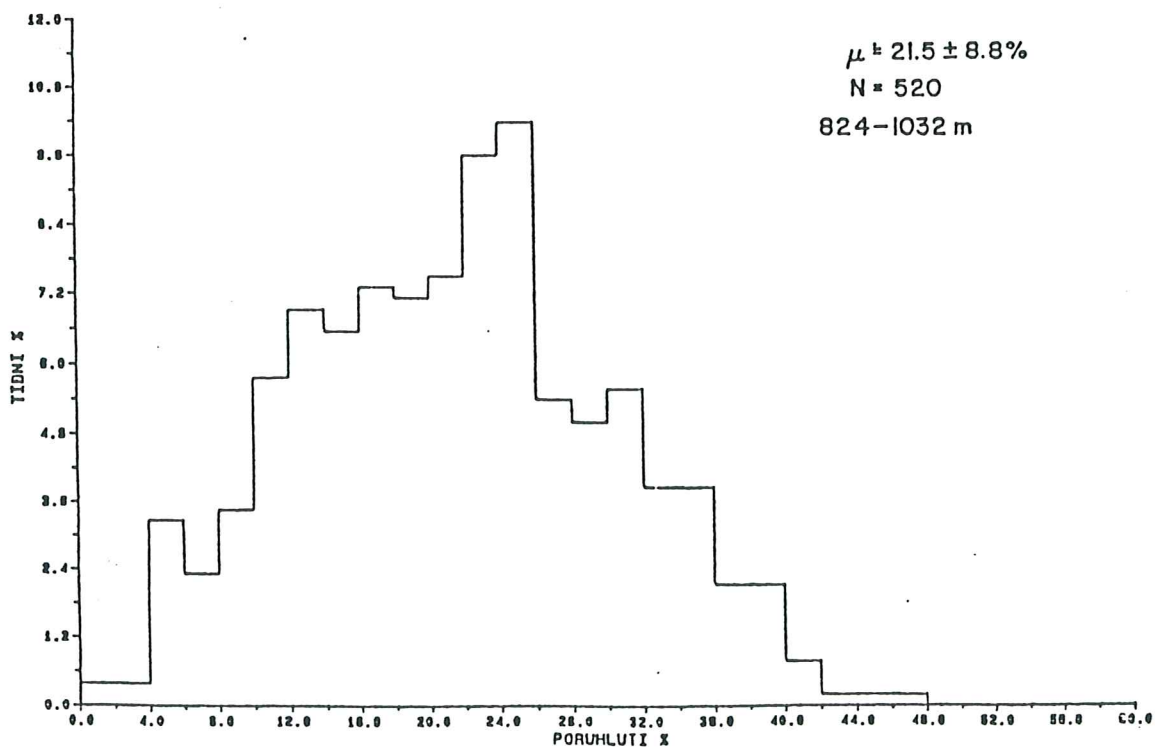
### NESJAVELLIR NG-7



Poruhluti á bilinu 180 - 1688 m

JHD-BM-8715 HS  
85.12.1292 T

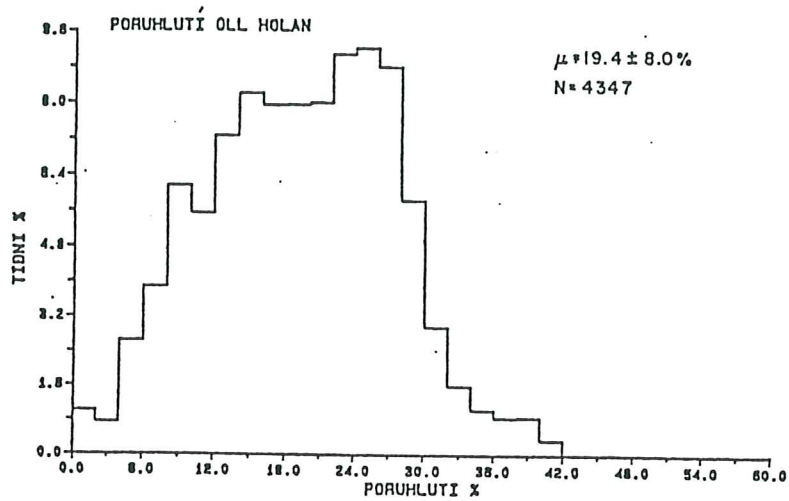
### NESJAVELLIR NG-9 PORUHLUTI



Tíðnidreifing poruhluta

JHD-BM-8715 HS  
88.02.0130 T

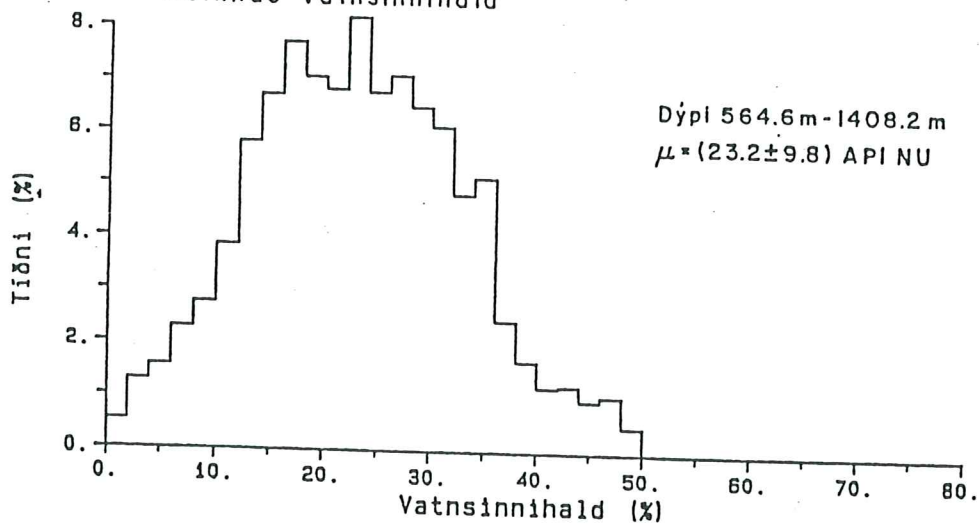
NESJAVELLIR NG-10



JHD-BM-8715 HS  
88.03.0204/2 T

NESJAVELLIR HOLA NJ-11

Reiknað vatnsinnihald

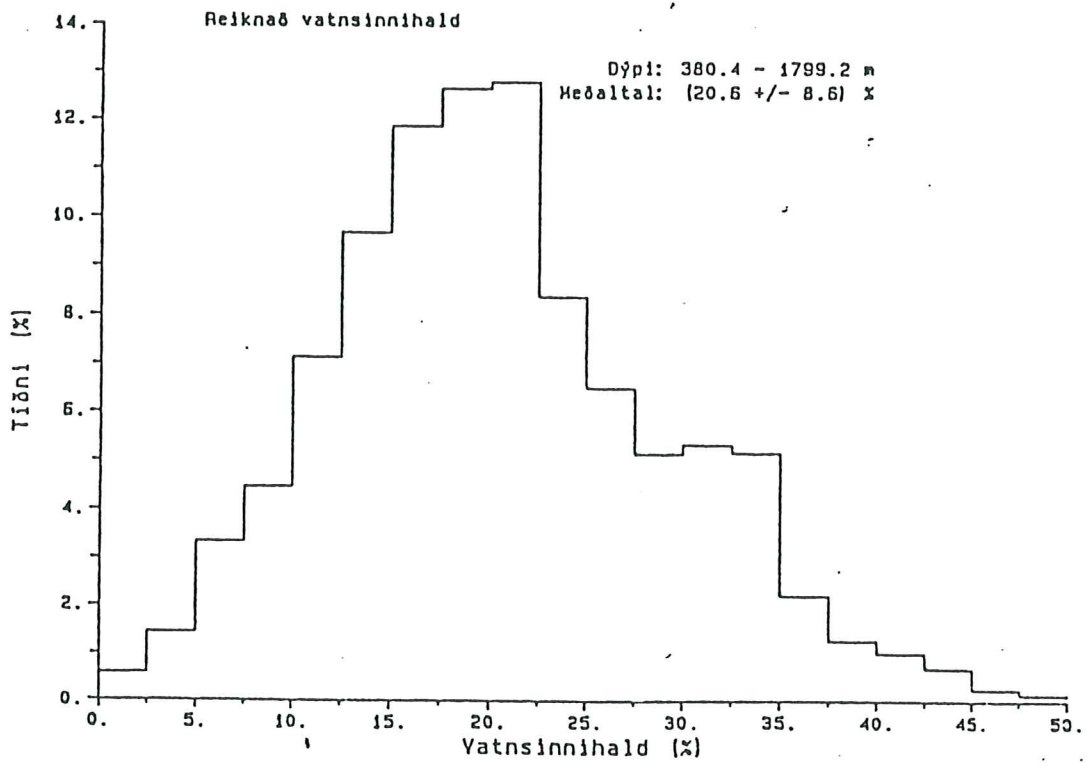


Reiknað vatnsinnihald, tíðnidreifing



NESJAVELLIR HOLA NJ-12

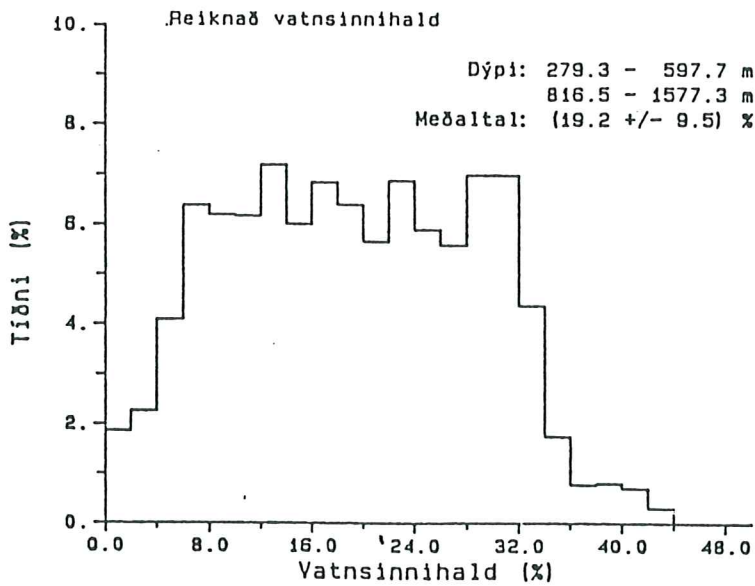
JHD-BH-8715 HS  
86.03.0208/2 T



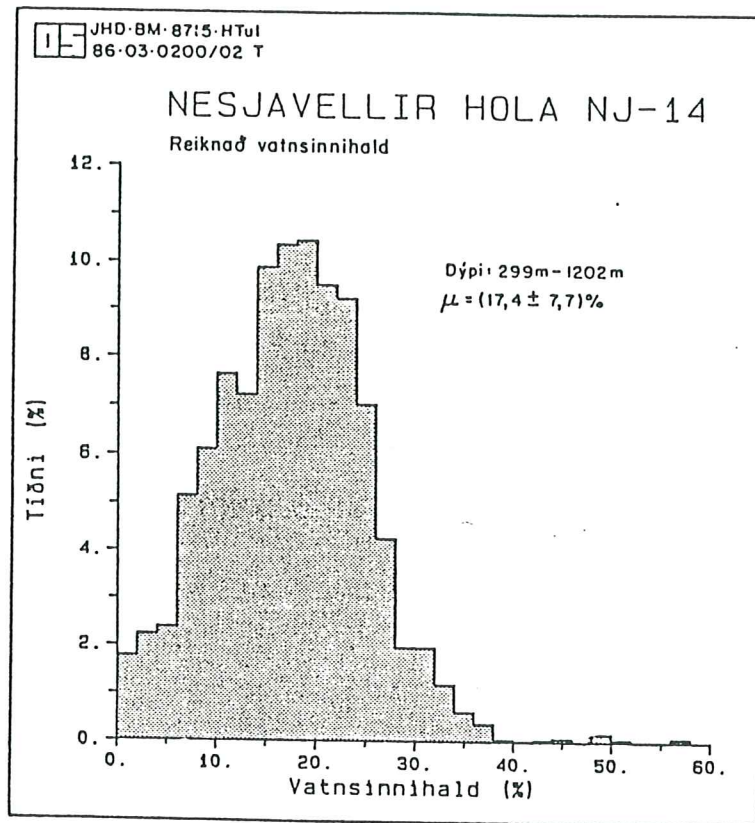
Reiknað vatnsinnihald, tíðnidreifing

JHD-BH-8715 HS  
86.03.0212/2 T

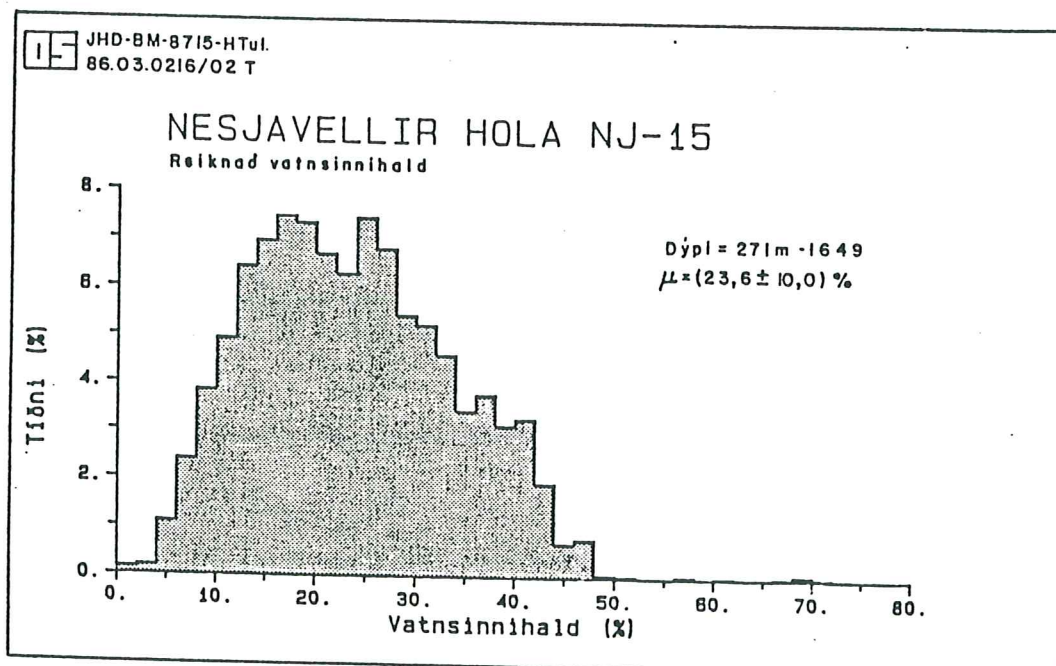
NESJAVELLIR HOLA NJ-13



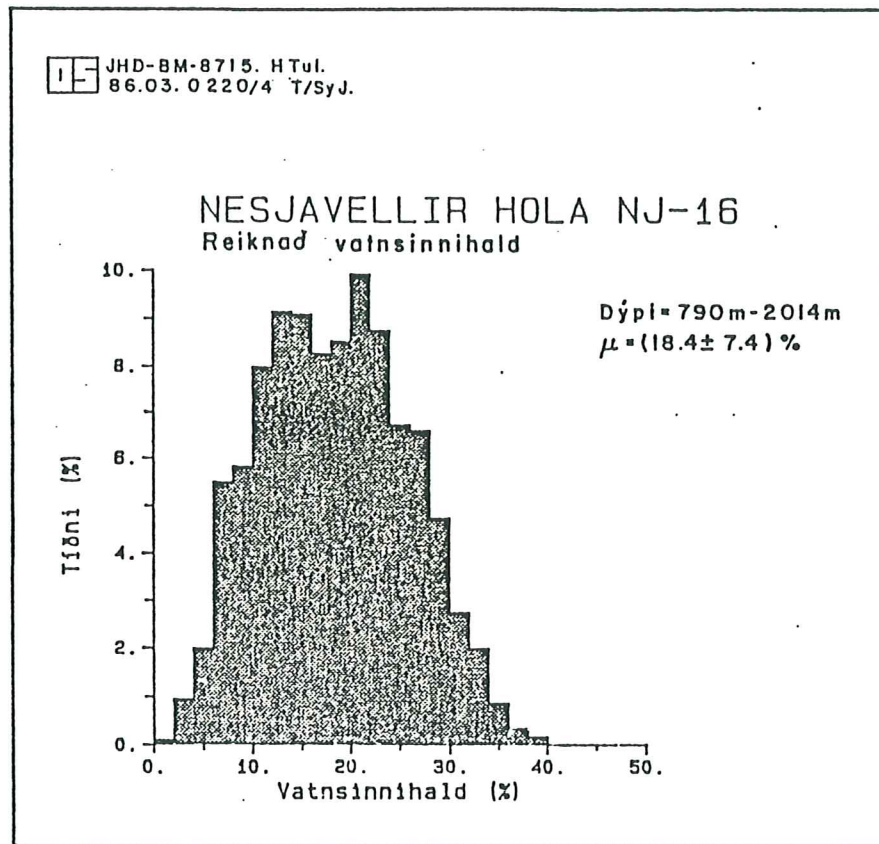
Reiknað vatnsinnihald, tíðnidreifing



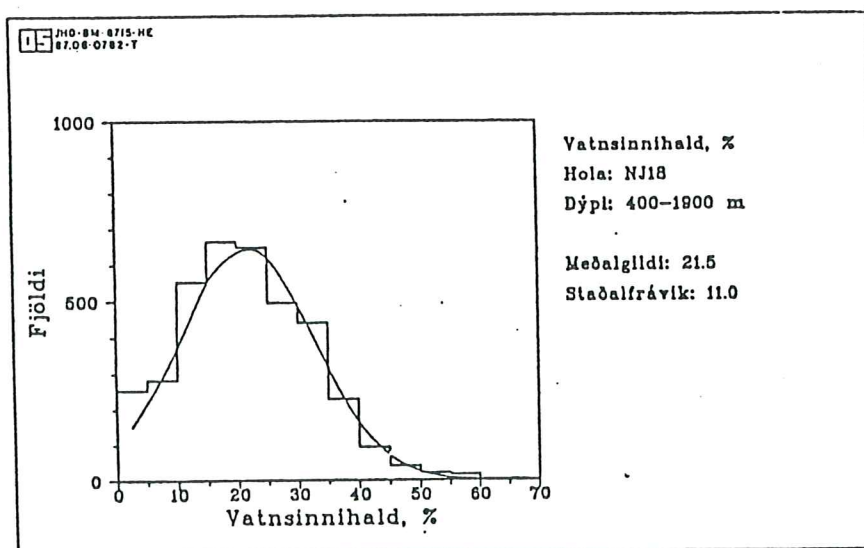
Reiknað vatnsinnihald, tíðnidreifing



Reiknað vatnsinnihald, tíðnidreifing



Reiknað vatnsinnihald, tíðnidreifing



Tíðnidreifing vatnsinnihalds

