

ORKUSTOFNUN

Jarðhitadeild

UMMYNDUN BERGGRUNNS Á

JARÐHITASVÆÐINU í KRÖFLU

Hrefna Kristmannsdóttir

OSJHD 7854

*Des.*

UMMYNDUN BERGGRUNNS Á

JARÐHITASVÆÐINU Í KRÖFLU

Hrefna Kristmannsdóttir

## Efnisyfirlit

Inngangur	S.1
Ummyndun bergsins, dreifing og gerð ummyndunarsteinda	S.4
Efnaskipti milli bergs og vökva við ummyndun	S.24
Helstu niðurstöður	S.26

Myndaskrá

Mynd nr.

		fnr.	bls.
1	Legg ummyndunarbelta í berggrunni Kröflusvæðis.		
	a Snið I - I'	16017	5
	b " II - II'	16019	6
	c " III - III'	16018	7
	d " IV - IV'	16304	8
2	Kort af borsvæðinu í Kröflu, sem sýnir legu þversniða	16423	9
3	Jarðlagasnið		
	a Snið I - I'	14828	10
	b " II - II'	14879	11
	c " III - III'	16009	12
	d " IV - IV'	16163	13
4	Niðurstöður þunnsneiðatalninga í svarfi úr borholum.		
	a KG - 8	16338	14
	b KG - 10	16336	15
	c KJ - 11	16337	16
5	Samsetning zeolíta í borholusvarfi úr KG - 3 og KJ - 11. $\text{CaO-Na}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3$ þríhyrningsgraf.	17936	21
6	Samsetning epidóts úr holu KJ - 11. $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-FeO}$ þríhyrningsgraf.	17934	21
7	Samsetning aktinolíts úr holum KG - 10 og KJ - 11. $\text{MgO-FeO-CaO}$ þríhyrningsgraf.	17935	21
8	Log $K/T^\circ\text{C}$ fyrir hvarfið $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + \text{K}^+ \rightleftharpoons \text{KAlSi}_3\text{O}_8 + \text{Na}^+$	17943	23

## Töflur

- |   |   |      |
|---|---|------|
| 1 | Samband ummyndunarbelta við hitastig og svæðaummyndunarfés. | S.3  |
| 2 | Efnasamsetning ummyndunarsteinda                            | S.20 |

### Inngangur

Tilgangur þessarar skýrslu er að birta gögn og niðurstöður frá bergfræðiathugunum, sem gerðar voru eftir að framvinduskýrslur um einstakar Kröfluholur komu út. Einnig er gefið yfirlit yfir niðurstöður ummyndunarrannsókna á bergi úr borholum í Kröflu og túlkun þeirra varðandi hitaástand í berggrunni. Fjallað er einnig stuttlega um efnaskipti samfara ummyndun og efnajafnvægi bergs og vökva.

Sett hefur verið fram líkan, byggt á athugunum á jarðhitaummynduðu bergi sl. 7 ár, þar sem reynt er að tengja ummyndunarbelti ákveðnum hitastigsbilum. Er þá einnig byggt á þeim hitamælipunktum í borholum, sem taldir eru vera í sem næst ótrufluðu ástandi. Ummyndun bergs er háð mörgum þáttum. Sú breytistærð, sem talin er hafa mest áhrif er berghitastigið. Bent skal á í þessu sambandi að Stefán Arnórsson hefur leitt að því líkur að efnasamsetning jarðhitavökva stjórnist af hita og seltu og ráðist af einföldum jónaskiptajafnvægjum við steindir í berginu (Guðmundur Pálmason o.fl. 1978). Hið einfalda samband milli berghita og gerða ummyndunarsteinda, sem sett er fram í líkaninu byggist á ákveðnum forsendum og er alls ekki algilt. Byggist það á gagnrýnu mati hvenær forsvaranlegt er að beita því. Hinar ýmsu gerðir ummyndunarsteinda bregðast misfljótt við breyttu hitaástandi. Það hversu hátt berghitastigið er hefur einnig áhrif á hraða steindabreytinga. Ummyndunarahraði er einnig háður vatnsleiðni og sömuleiðis hraði endurskreiðrar ummyndunar í bergi.

Zeolít bregðast fljótt við breytingum á berghitastigi. Önnur zeolít en wairakít og laumontít eru ekki stöðug við hitastig yfir 200°C. Ef hitastigull er hár og berghita yfir 200°C er náð á litlu dýpi (ofan 1000 m) og við lágan þrýsting (sbr. Juan and Lo, 1971) myndast wairakít. Laumontít er hins vegar stöðugt við berghita yfir 200°C þegar hitastigull er lágur og þrýstingur því orðinn allhár þegar berghitinn nær 200°C. Á háhitasvæðunum myndast því wairakít við u.þ.b. 200°C og laumontít og lághitazeolítin hverfa. Á lághitasvæðunum myndast yfirleitt ekkert wairakít. Þar eru aðgreind þrjú zeolítabelti á hitastigsbilinu 40-100°C. Laumontít myndast fyrst við u.þ.b. 100°C og virðist vera stöðugt til allt að 300°C. Öll önnur zeolít hverfa á bilinu 110-200°C.

Zeolít eru því einkum gagnleg til að rekja hitastigsbreytingar á lághitasvæðum.

Epidót myndast við berghita um 260°C. Þessi steind hefur ekki mikla tilhneigingu til að endurkristallast yfir í aðrar steindir þótt berghitastig lækki. Það að epidót finnst í bergi vitnar því aðeins um að einhvern tíma




hafi berghitastig verið þar yfir 260°C.

Leirsteindir ættu samkvæmt niðurstöðum rannsóknastofutilrauna að bregðast fljótt við hitastigsbreytingum innan 200-300°C. Athuganir í náttúrunni benda til hins sama. Hins vegar er endurskreið ummyndun fremur treg við berghita um 100°C. Beltaskipting í ummyndun á háhitasvæðum hefur af þessum sökum aðallega verið byggð á breytingum í leirsteindagerðum.

Margar algengar ummyndunarsteindir eru stöðugar yfir stórt hitastigsbil (t.d. kvars og kalsít) og aðrar er ekki unnt að tengja beint hitastigi.

TAFLA I

SAMBAND UMMYNDUNARBELTA VID BERGHITASTIG OG SVÆÐUMMYNDUNARFÉS

Berghitastig 0c	Ummyndun- arbelti	Einkennis- steindir	Breytingar á steindum og steinda- floknum.	Fés í svæða- ummyndun.
			Lághita-zeolít og smektlít myndast	
50	a	Smektlít Zeolít	Lághita-zeolít → laumontít	ZEOLÍTA FÉS
			1	
100	b	Blandlags- leirsteindir	Millillög hafa myndast í smektlíti	
			11	
200	111	Klórít Epidót	Laumontít → wairakit Smektlít → blandlagsleirsteindir	
			111	
250	1V	Klórít Aktinólít	Blandlagsleirsteindir → Klórít Epidót myndast samfellt	
			1V	
300			Aktinólít myndast	GRÆNSKÍFER FÉS
			Albítisering algeng í plagioklas	

Tafla birt í grein Guðmundar Pálmasonar o.fl., 1978.



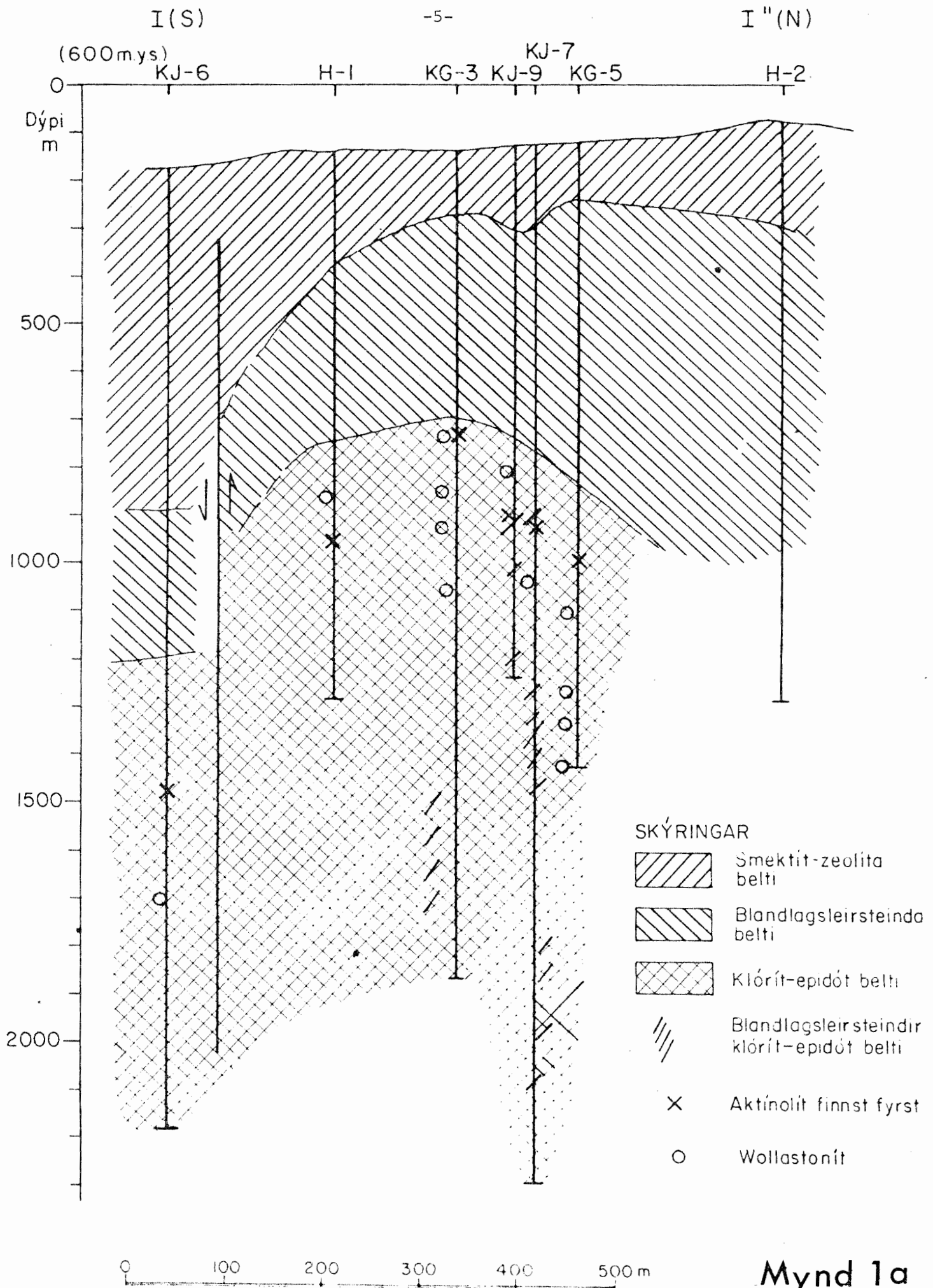
Ummyndun bergsins; dreifing og gerð ummyndunarsteinda

Í framvinduskýrslum um borun einstakra hola í Kröflu (OS JHD 7524, 7641, 7642, 7646, 7647, 7713, 7710, 7709, 7708) er lýst ummyndun bergsins og niðurstöðum greininga á ummyndunarsteindum. Úrvinnsla var nokkuð mislangt á veg komin þegar skýrslurnar komu út. Í flestum skýrslanna er aðeins byggt á smásjárathugunum og röntgengreiningum og í skýrslum OS JHD 7647 og 7710 var þeim ekki að fullu lokið. Niðurstöður í skýrslu OS JHD 7641 byggja á all-umfangsmiklum bergefnagreiningum og örgreiningum á steindum. Skýrsla um niðurstöður bergefnagreininga (OS JHD 7822) kom út nú í vor. Niðurstöður steindagreininga með örgreini á svarfsýnum úr holum 3, 5, 10 og 11 hafa ekki verið birtar áður í skýrslu. Í þessari samantekt eru þær notaðar. Endanlegar niðurstöður greininga á svarfi úr holum KJ-7 og KJ-9 eru notaðar í þessari skýrslu.

Á myndum 1a, b, c og d (fnr. 16017, 16019, 16018 og 16304) er sýnd lega ummyndunarbelta með dýpi í fjórum þversniðum gegnum holurnar. Lega þversniðanna er sýnd á mynd 2. Til samanburðar eru sýnd tilsvarendi jarðlagasnið á myndum 3a, b, c og d (fnr. 14828, 14879, 16009 og 16163). Á ummyndunarsniðunum er einnig sýnt hvar amfiból (aktinólít) finnst fyrst í holunum og hvar blandlagsleirsteindir finnast í klórít-epidót belti. Á þrem sniðanna er einnig sýnt hvar wollastonít og aðrar "háhitaummyndunarsteindir" finnst í holunum. Á myndum 4a, b og c (fnr. 16336, 16337 og 16338) eru sýndar niðurstöður þunn-sneiðatalninga í nokkrum holanna, en þær gefa allgóða mynd af hlutfallslegu magni helstu ummyndunarsteinda í berginu. Í skýrslu OS JHD 7542 og OS JHD 7641 voru birtar niðurstöður þunnsneiðatalninga úr öðrum borholum. Í talningu eru leirsteindir aðeins flokkaðar niður í "brúnan leir" og "grænan leir", þar sem ekki er unnt að greina leirsteindir til tegunda í smásjá. Séu myndir 1a, b, c og d bornar saman við töflu 1 sést að þrjú ummyndunarbelti eru skýrt afmörkuð í berggrunni Kröflu það fjórða kemur einnig fram, en mörk þess eru yfirleitt óljósari. Miðað við það hitaástand, sem talið er ríkja í berggrunninum (sjá t.d. OS JHD 7846) er samræmið við líkanið í töflu 1 ekki mjög gott. Engin merki þeirra snöggu breytinga á berghitastigi, sem talin eru verða á 1000-1500 m dýpi, hafa heldur fundist í ummyndunarmynstrinu.

Verður nú rakin dreifing einstakra steinda og steindaflokka í holunum.

Kalsít finnst aðallega sem sprungu- og holufylling í berginu, en er einnig í grunnmassa endurkristallaðs glers og basalts. Mest finnst af því í móbergi. Allt að 30 rúmmáls % kalsít finnst í sumum sýnum. Kalsít finnst frá því efst í holunum. Á 800-1000 m dýpi minnkar magn kalsíts yfirleitt verulega eða það hverfur alveg. Í holu KJ-6 finnst kalsít þó alveg í botni á 2000 m. Magn þess er mismikið en á t.d. 1200 m og 1500 m dýpi og nálægt botni er allmikið magn kalsíts.



Mynd 1a

II (VSV)  
KG-8

KG-10 KG-4

H-2

Dýpi  
0  
m

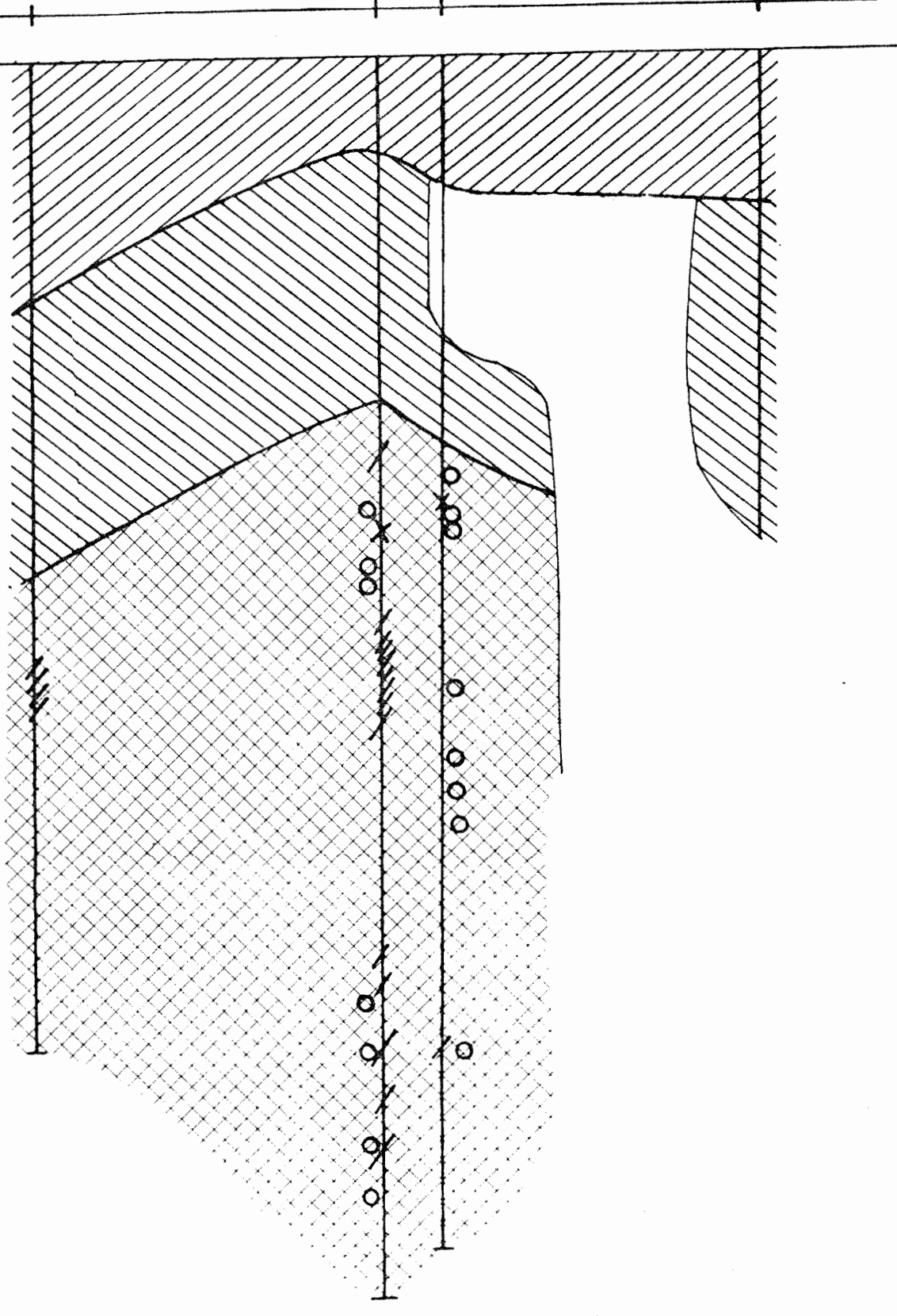
500

1000

1500

2000

0 100 200 300 400 500 m



Mynd 1b.

III  
(V)

-7-

III'  
(A)

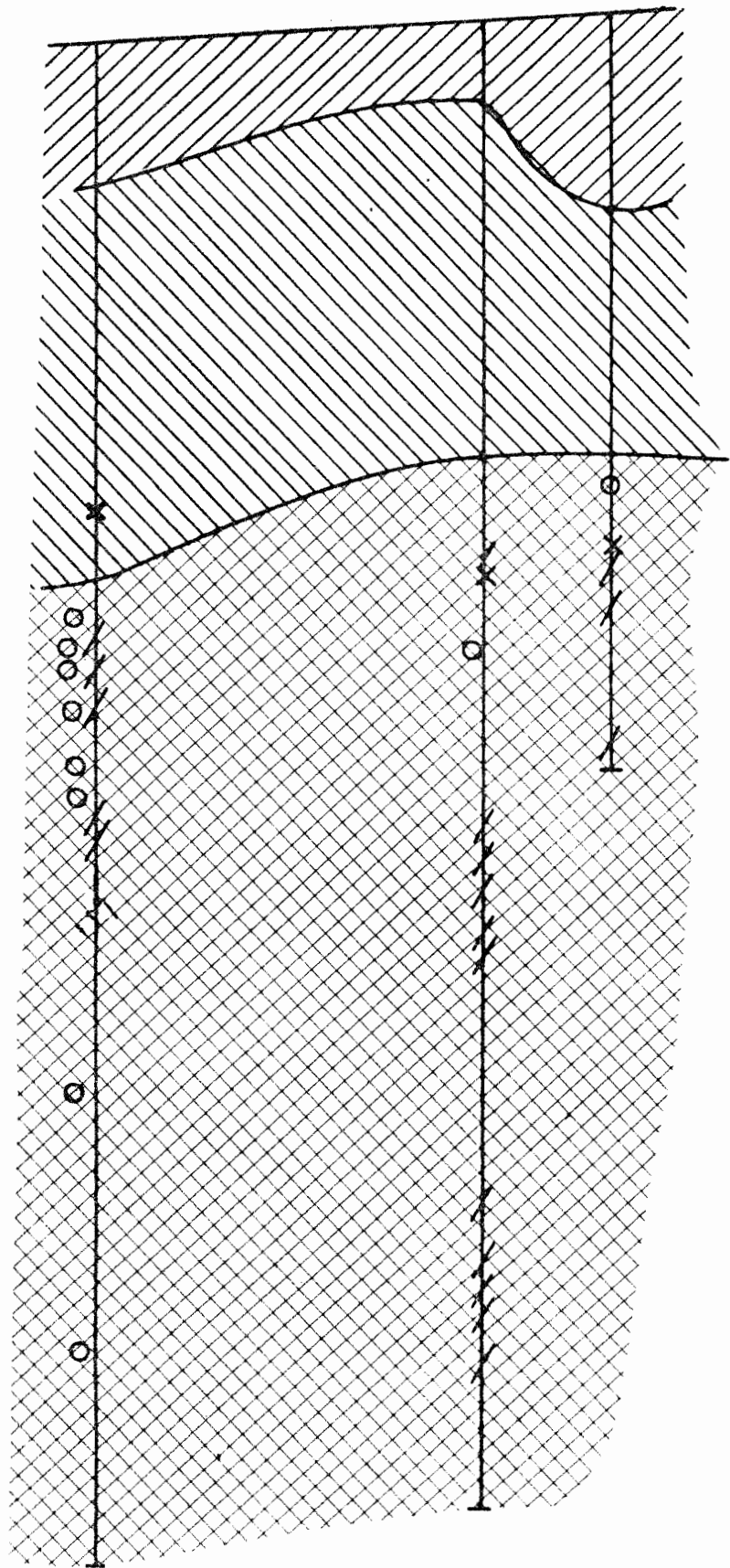
KJ-II

KJ-7

KJ-9

500 m y.s)

0  
500  
1000  
1500  
2000



Mynd 1c



ORKUSTOFNUN

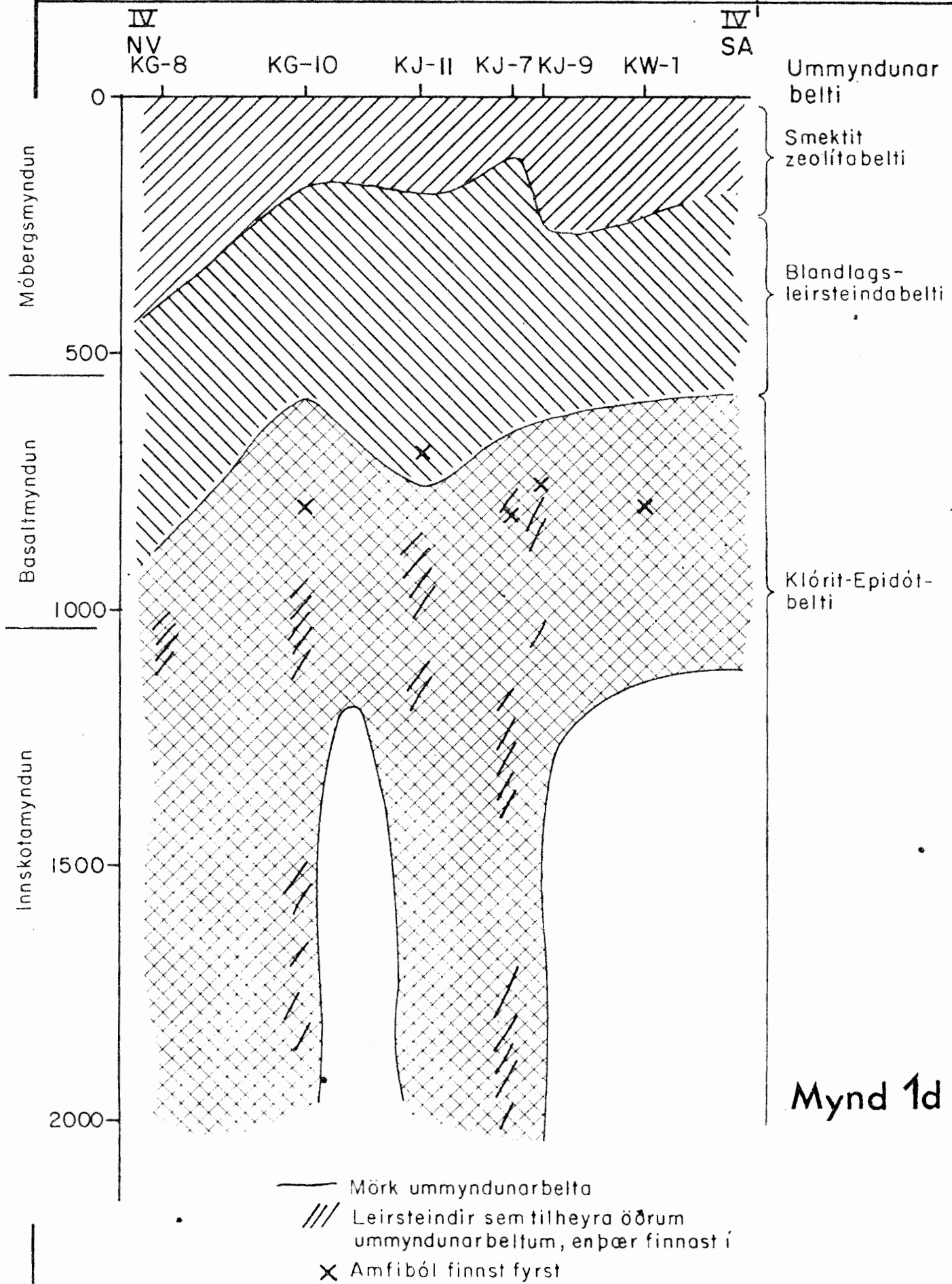
77-II-14 HK/IS

T-489

Krafta

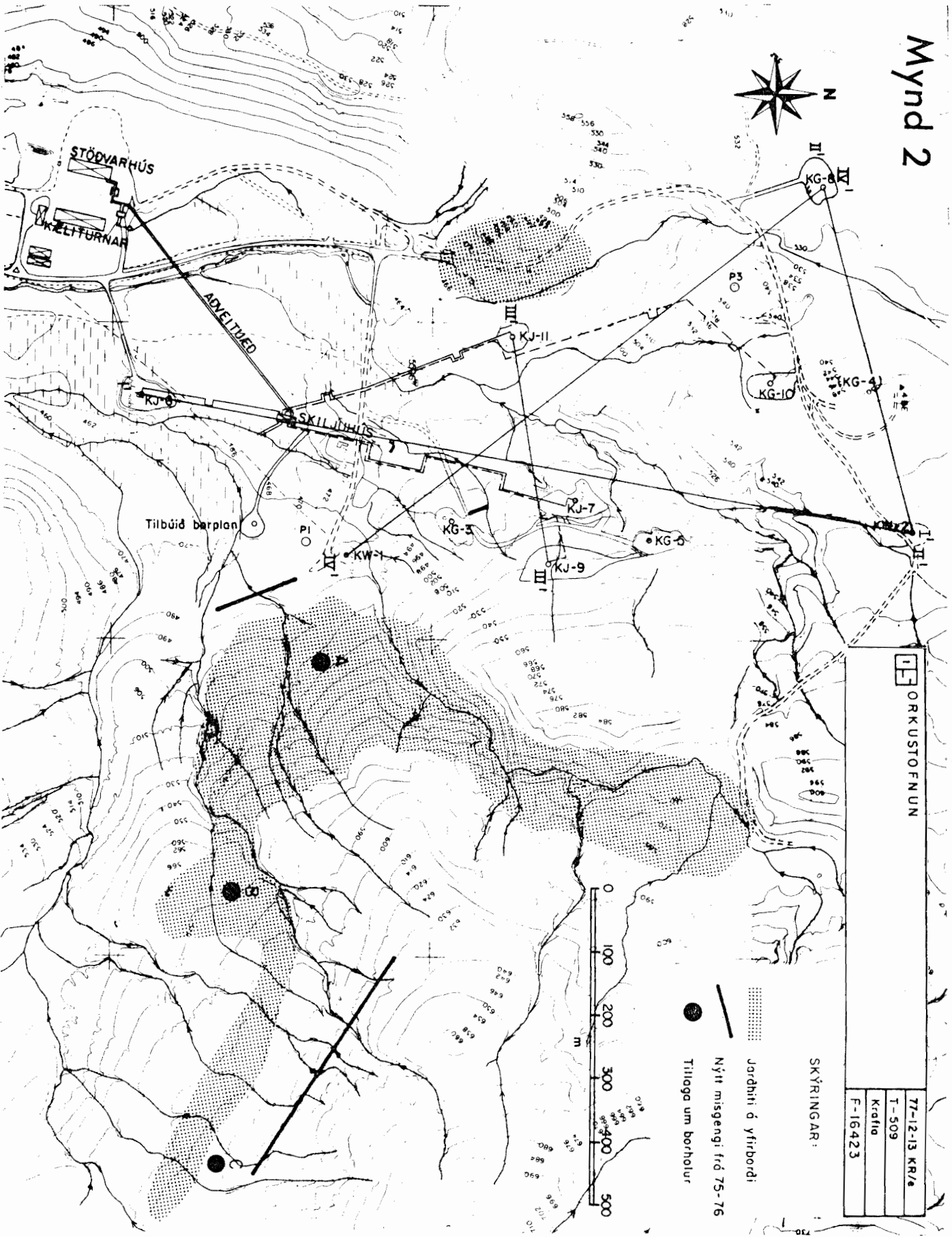
F-16304

Yfirlit yfir skiptingu berggrunnis í ummyndunarbelti



Mynd 1d

# Mynd 2



ORKUSTOFNUN	
77-12-13 KR/4	
T-509	
Kraflo	
F-16423	

SKÝRINGAR:

Jardhiti á yfirborði

Nýtt misgengi frá 75-76

Tilloga um borholur



S

N

0 200 400 600 800 1000 1200 1400 1600 m

Dýpi  
0  
m

KJ-6

H-1

KG-3

KJ-7

KG-5

H-2

600

400

200

0

-200

-400

-600

-800

-1000

-1200

-1400

-1600

200

400

600

800

1000

1200

1400

1600

1800

2000

2200

Granófýr

Dólerít

Túffkennt set

Gjall

Glerkennt basalt

Ferskt-basalt

Ummyndað basalt

Súrt túff

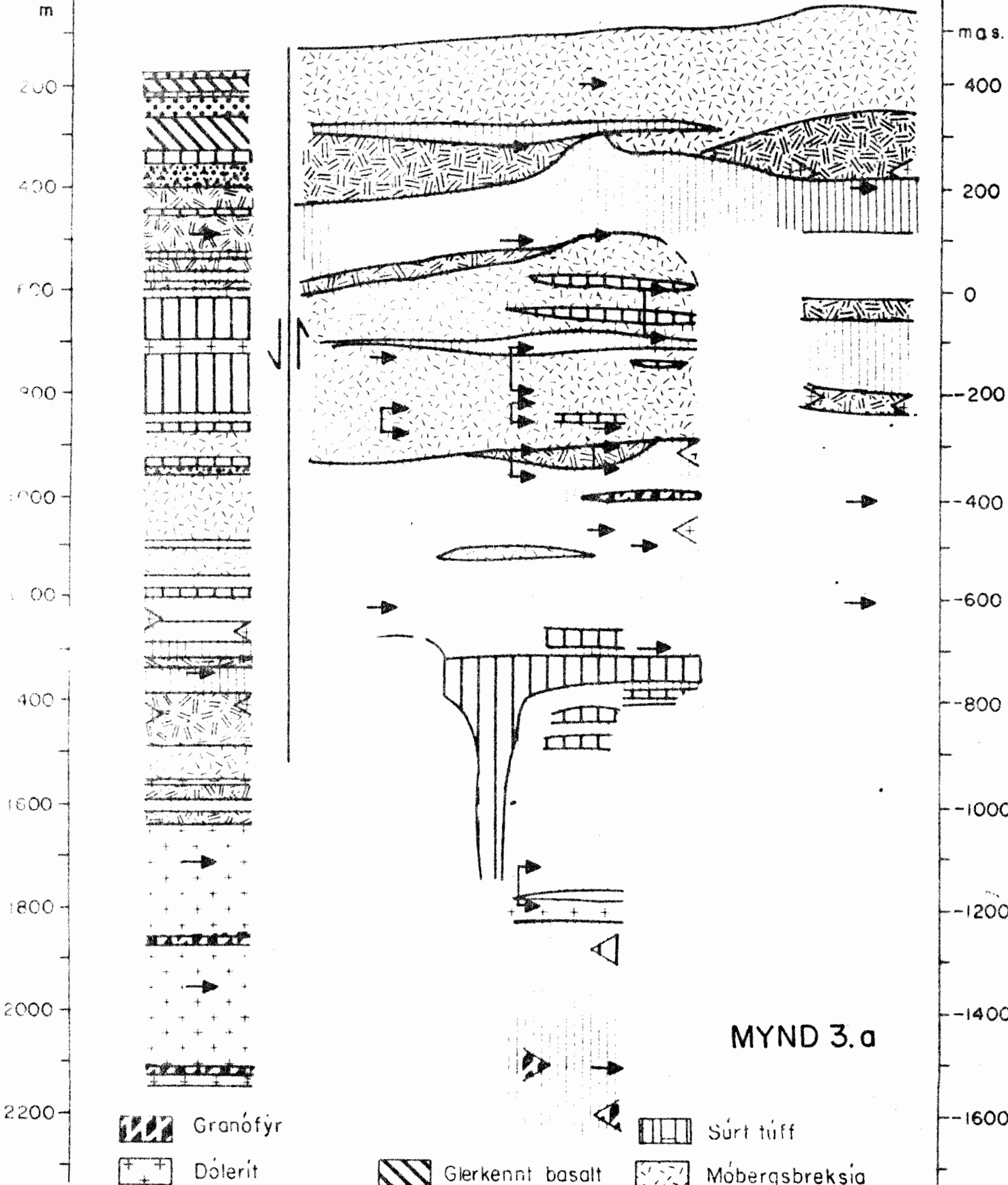
Móbergsbreksía

Basaltbreksía

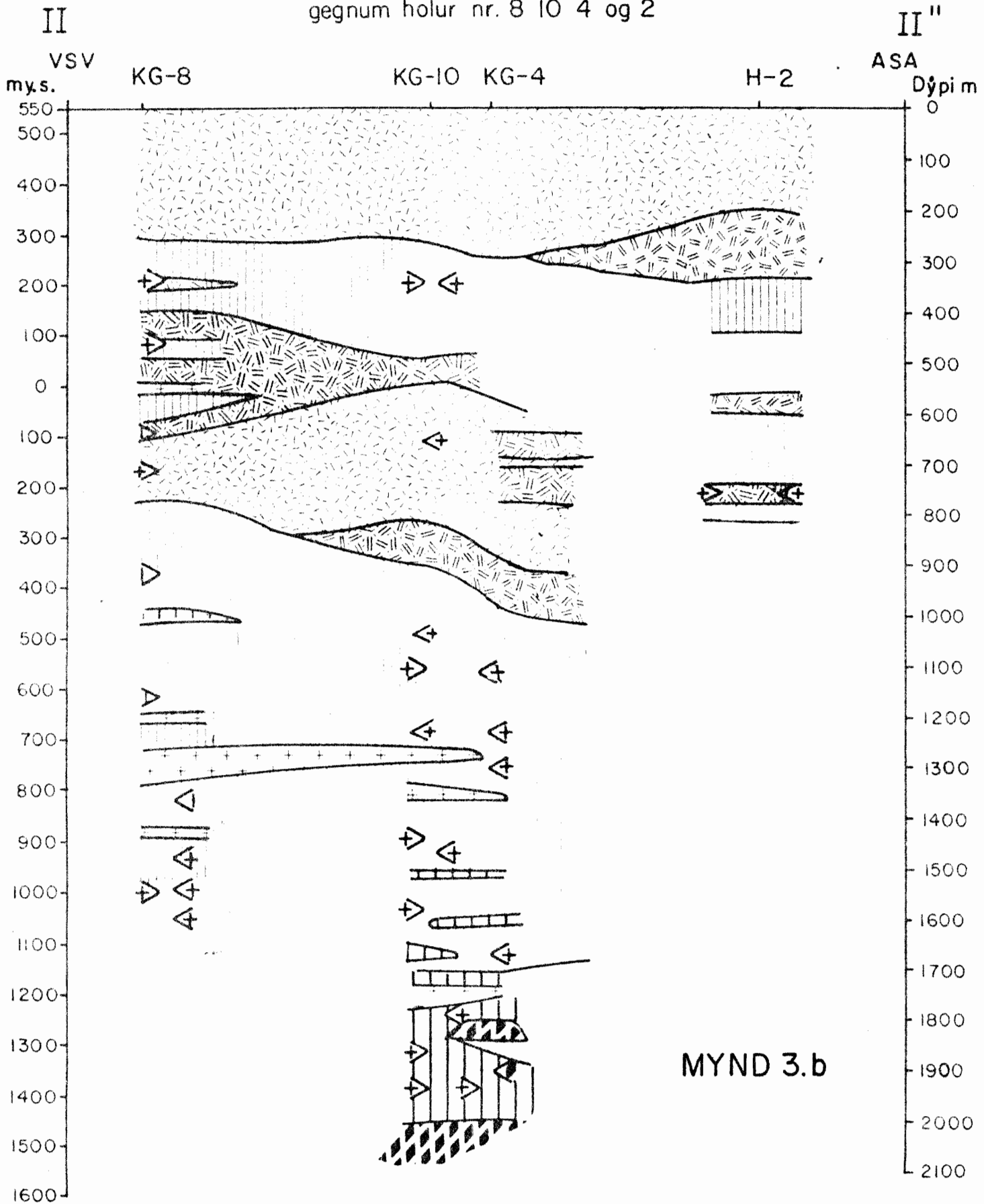
Gangar

Vatnsæðar

MYND 3.a

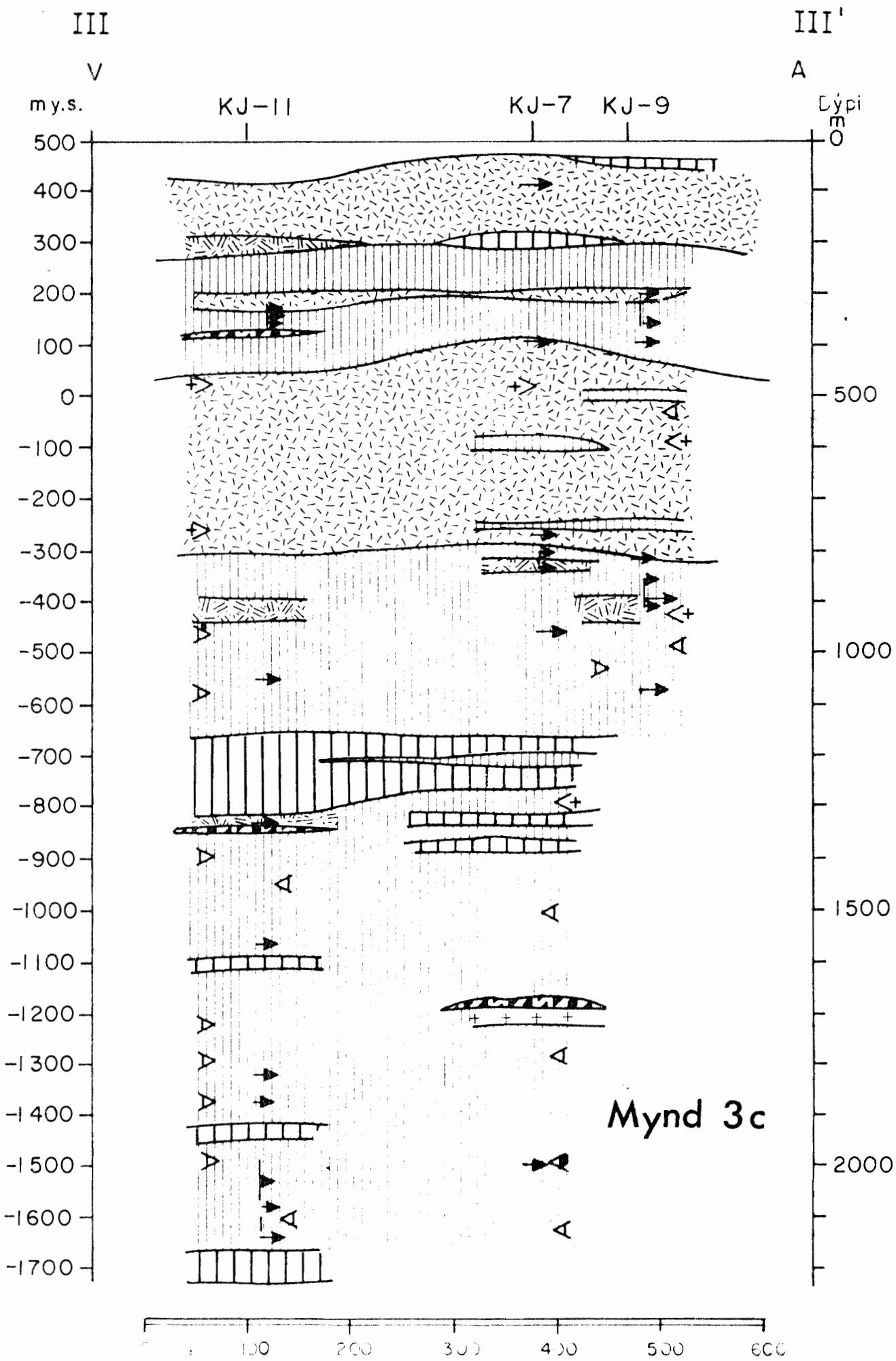


Jarðlagasnið frá VSV - ESE á Kröflusvæði gegnum holur nr. 8 10 4 og 2



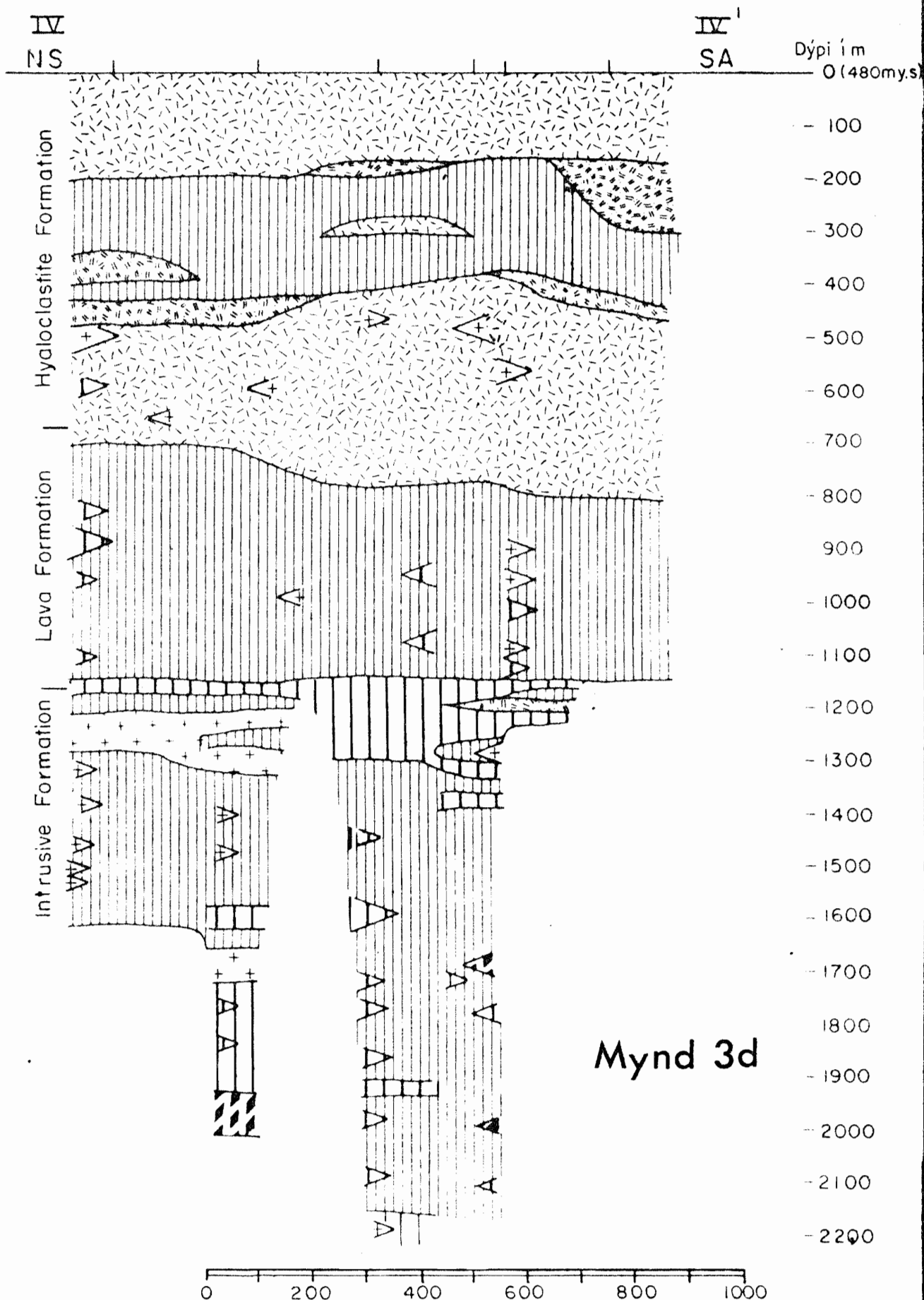
MYND 3.b







Gróf tenging milli helstu berg-  
myndana, sem borholur KG-8-KW-1 skera





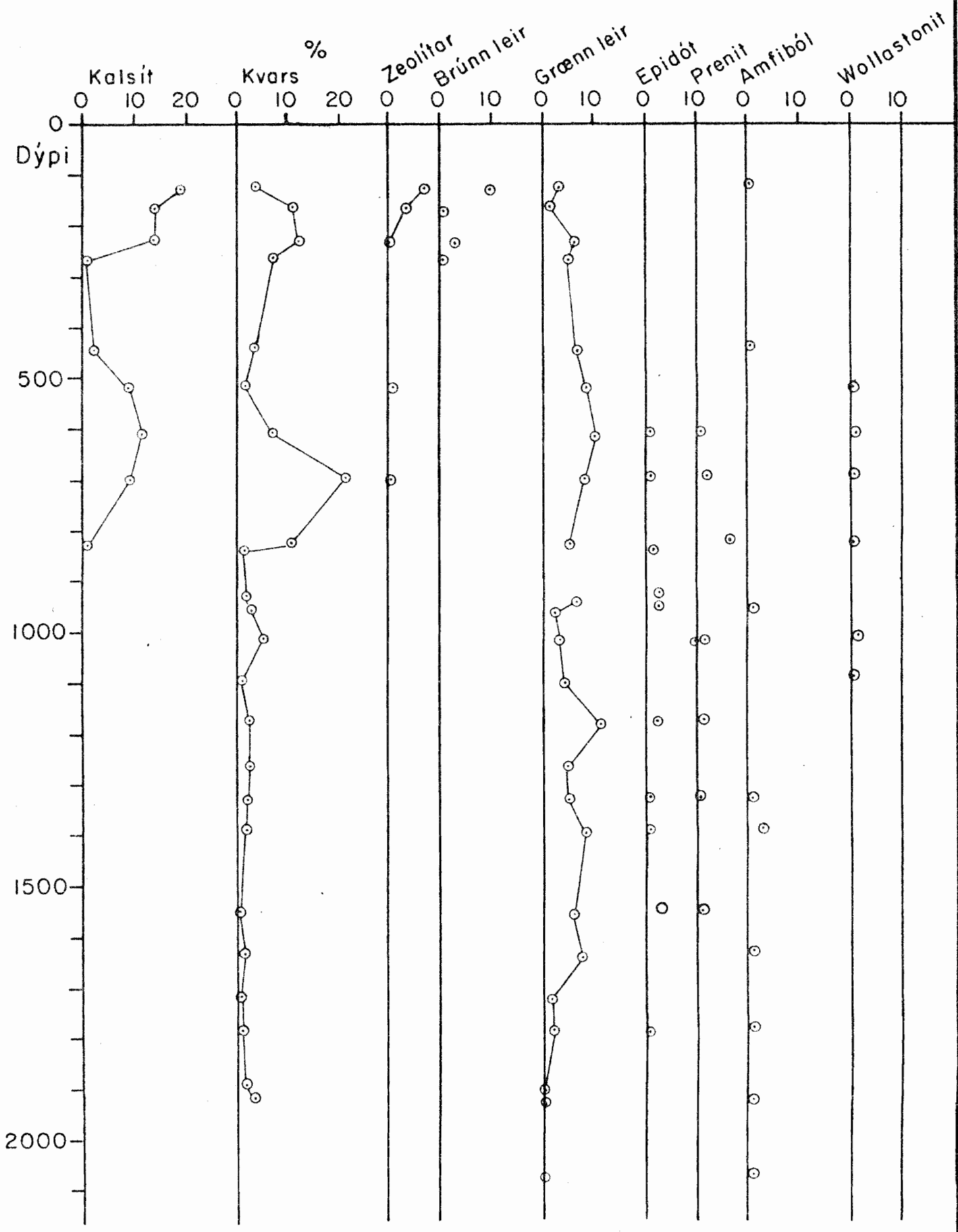


ORKUSTOFNUN  
Jarðhitadeild

# Mynd 4b

Niðurstöður þunnsneiðatalninga úr holu KG-10 í Kröflu

77-24-II HK/IS
T-493
Krafla
F-16336





ORKUSTOFNUN  
Jarðhitadeild

# Mynd 4c

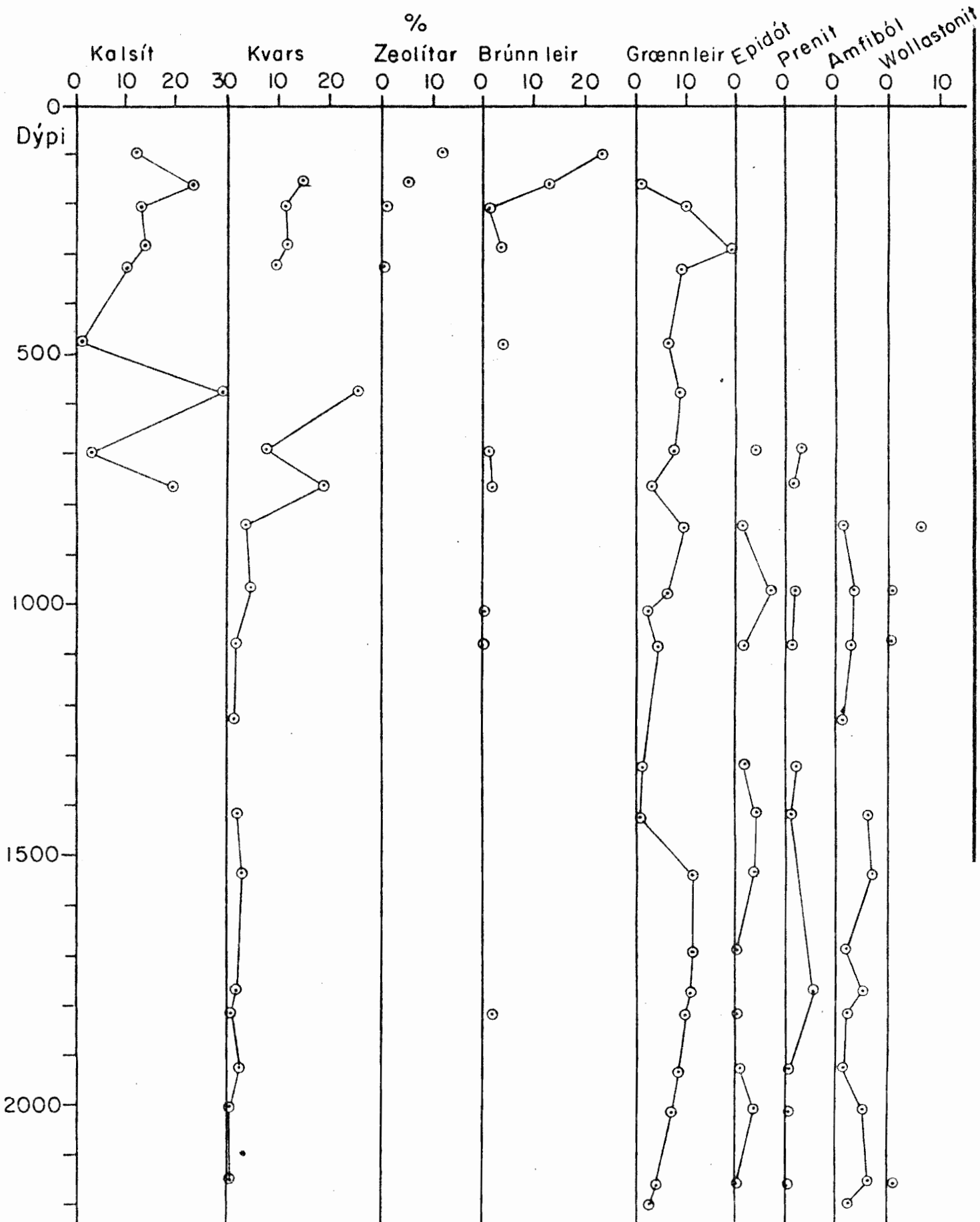
Niðurstöður þunnsneiðatalninga úr holu KJ-II í Kröflu

77-24-II HK/IS

T-494

Krafla

F-16337



Zeolítar sýna nokkuð breytilega dreifingu frá einni holu til annarrar. Dreifingin sýnir þó í megindráttum sömu mynd og dreifing leirsteinda sýnir. Í holum KJ-6, KG-8 og KJ-11 hvarfa zeolítar aðrir en wairakít á meira dýpi en í hinum holunum. Þó finnast stakir zeolítar á miklu dýpi langt neðan zeolítabeltis í holum KW-1, KW-2, KG-4, KG-10, KG-8, KJ-9 og KJ-11. Oftast finnast þeir í innskotsbergi.

Örgreiningar voru gerðar á zeolítum úr holum KG-3 og KJ-11. Laumontít, heulandít stilbít og wairakít voru greind með góðum árangri, en fremur torveldlega gekk að greina mordenít. Ca:Na hlutfall er yfirleitt nálægt einum í wairakíti (0.95-1.0) (Mynd 5, fnr. 17936). Laumontít, stilbít og heulandít eru einnig oftast nálægt því að vera hrein Ca-zeolít, en Ca:Na hlutfall er breytilegra og að jafnaði heldur lægra en í wairakíti. Greiningar á mordeníti sýna mjög breytilegt Ca:Na hlutfall (0.60-0.95), en greiningarnar eru ekki áreiðanlegar. Þótt zeolítar svari breyttu hitaástandi fremur fljótt hefur endurkristöllum frá lághitazeolítum yfir í háhitazeolíta í för með sér mun meiri flutninga og endurröðun innan kristalsins en breyting frá einni leirsteindagerð yfir í aðra. Í þéttu bergi gætu því zeolít haldist óbreytt við hitastig sem þau eru óstöðug við. Í þéttu bergi er einnig líklegra að steindir geti myndast metastabílt t.d. vegna þess að efnahlutföll eru hagstæð.

### Leirsteindir

Helstu leirsteindagerðir, sem myndast í berginu, eru þríoktaeðrískt, járnríkt, smektít; klórít, sem er mjög járnríkt og blandlagsleirsteindir á milli þessara tveggja. Í minna magni finnast einnig illít og blandlagsleirsteindir úr smektít og illíti. Tvær síðarnefndu steindirnar finnast nær eingöngu í innskotsbergi.

Beltaskipti í ummyndunarmynstri byggist mikið á þeim breytingum sem verða á ráðandi leirsteindagerð. Eins og sést á myndum 1a, b, c og d (fnr. 16017, 16018, 16019 og 16304) verða þessar breytingar á mismiklu dýpi í holunum. Dýpst liggja ummyndunarbeltin í holu KJ-6. Á myndunum er einnig sýnt hvar truflanir verða á ráðandi leirsteindagerð.

Athuganir á leirsteindum frá jarðhitaummynduðu bergi á Íslandi hafa sýnt að járnríkt þríoktaeðrískt smektít breytist smám saman yfir í járnríkt klórít á hitabilinu 150-230°C. Við u.þ.b. 200°C er þessi breyting komin svo langt áveg að steindirnar greinast á röntgen sem blandlagsleirsteindir af smektít og klórít eða svellandi klórít. Við 230-240°C er klórít svo

orðið ráðandi "leirsteind" (lagsilikat). Efnasamsetning leirsteindanna er ekki vel þekkt vegna tæknilegra örðugleika við greiningu. Nokkrar greiningar, sem taldar eru áreiðanlegar, hafa fengist af klórítí á örgreini með því að nota lágan straum og breiðan geisla. Aðeins lélegar greiningar hafa fengist af smektítí og blandlagsleirsteindum á örgreini enþá. Klórítíð er járnríkt, nálægt ripidolítí í samsetningu (tafla 2).

Þær strúktúrbreytingar, sem verða á kristalgrind lagsilikatanna við breytingu frá smektítí yfir í blandlagsleirsteindir og síðan klórít, eru fremur smávægilegar. Leirsteindir ættu því að svara fremur fljótt breytingum í kerfinu.

Rannsóknastofutilraunir með upprunanlegt berg eða steindir af þessari gerð eru ekki víðtækar. Tilraunir, þar sem basalt og sjór er hitað og hvarfað saman hafa gefið nokkuð frábrugðnar niðurstöður. Í þeim myndast t.d. klórít ekki fyrr en við mun hærra hitastig en á jarðhitasvæðunum. Rannsóknir frá erlendum jarðhitasvæðum hafa fram til þessa verið illa sambærilegar vegna þess að berggrunnur hefur verið frábrugðinn berggrunni á íslenskum jarðhitasvæðum. Nýlegar rannsóknir frá Hawai hafa gefið mjög líkar niðurstöður og fengist hafa hér áður (Fan, pers. uppl.).

Í þéttu innskotsbergi í klórít-epidót ummyndunarbelti finnast stundum blandlagsleirsteindir eða jafnvel smektít. Innskotsbergið er auk þess að vera þéttara en grannbergið einnig yngra og yfirleitt mun ferskara.

Í sumum holanna í Kröflu koma einnig fram slíkar truflanir í basalhraunlögum og móbergi. eru þær nær eingöngu bundnar við borholur 7-11 þ.e. holur boraðar eftir 1975. Einkum er áberandi munur á milli dreifingar leirsteinda í KG-4 og KG-10, þar sem þær holur eru mjög nálægt hvor annarri og berglög og ummyndunarbelti eru hin sömu í holunum. Munur á milli dreifingu leirsteinda í holum 1 og 3 annars vegar og 7 og 9 hins vegar er einnig greinilegur. Þessi munur bendir eindregið til breytinga á kerfinu á milli árána 1975 og 1976, sennilega lækkaðs berghita.

Epidót finnst fyrst á mismiklu dýpi í holunum. Sums staðar finnst epidót staðbundið við gangajaðra mun ofar en samfelld myndun epidóts hefur átt sér stað. Grynnt er á það belti, sem epidót finnst samfelld á undir miðju borsvæðisins. Dýpkar niður á þetta belti til SV og NA og er dýpst á það í holum KJ-6, KG-8, KJ-11 og KW-2. Epidótið fellur aðallega út í sprungum, en myndast einnig í grunnmassa. Magn þess er mjög breytilegt, en það getur orðið allt að 20% (rúmmál) af berginu. Efnasamsetning epidótsins sýnir

ekki reglulegar breytingar með dýpi. Sama meðalsamsetning er á 800 og 2100 m dýpi í holu KJ-11, en járnríkara epidót er á 1000-1300 m dýpi. Beltun sést í sumum kornanna og eru þá jaðrarnir yfirleitt með minna járn-magni.

Á mynd 6 (fnr. 17934) eru sýndar efnagreiningar á epidóti frá mismunandi dýpi í holu KJ-11 í CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> og FeO þríhyrningsgrafi. Meðalefnasamsetning epidóts í KJ-11 gefur steindaformúluna Ca<sub>2.1</sub> Fe<sup>3+</sup><sub>0.6</sub> Al<sub>2.2</sub> Si<sub>3.1</sub> O<sub>12</sub> (OH).

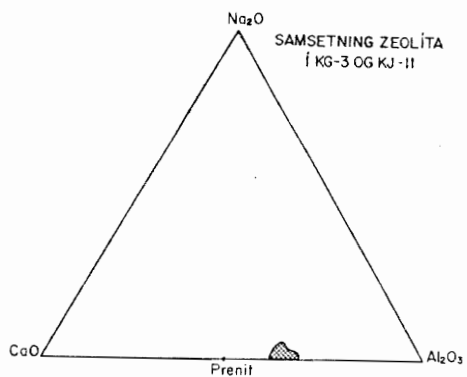
### Amfiból

Amfibólsteindir hafa greinst í öllum holanna nema KW-2 og KG-8. Þær eru yfirleitt í smáum kristöllum og voru greindar í leirsteindafraksjón áður en þær fundust með vissu í þunnsneiðum. Þeir ljóseiginleikar sem unnt er að greina benda til að amfibólíð sé aktínólít og örgreiningar á steindum úr KG-10 og KJ-11 sýna að um aktínólít er að ræða (tafla 2 og mynd 7). Aktínólítið finnst fyrst á 750-800 m dýpi í flestum holunum. Í holu 3 finnst það þó á 600 m dýpi og ekki fyrr en á 870 m dýpi í holu KG-5. Aktínólít hefur lítið fundist í borholusvarfi frá íslenskum háhitasvæðum áður. Lágmarks myndunarhitastig aktínólítsins virðist frá þeim takmörkuðu borholugögnum sem til eru, vera um 280°C. Er það í allgóðu samræmi við áætlaða svæðamyndbreytingu (regional metamorphism) bergs við lágan þrýsting. Aktínólítið í borholusvarfinu frá Kröflu bendir til mun hærri berghita en algengt er á öðrum háhitasvæðum sem borað hefur verið í. Dreifing steindanna bendir ekki til beinna tengsla við innskotavirkni. Aktínólítið finnst ekki í KW-2 og KG-8 og grynnt er á það í KG-3. Er það í samræmi við þá mynd sem dreifing annarra ummyndunarsteinda gefur. Einnig sýnir dreifing aktínólíts vissa fylgni við mælt hitaástand í berggrunninum (Finnst ekki í KG-8 og KW-2 og mjög djúpt í KJ-6).

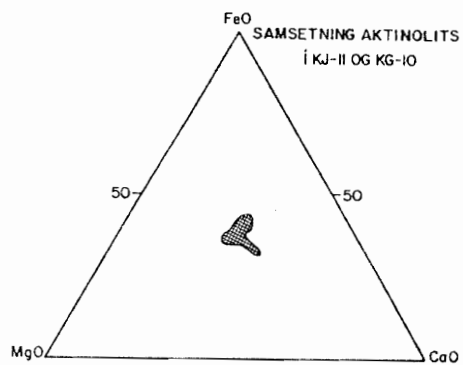


Tafla 2

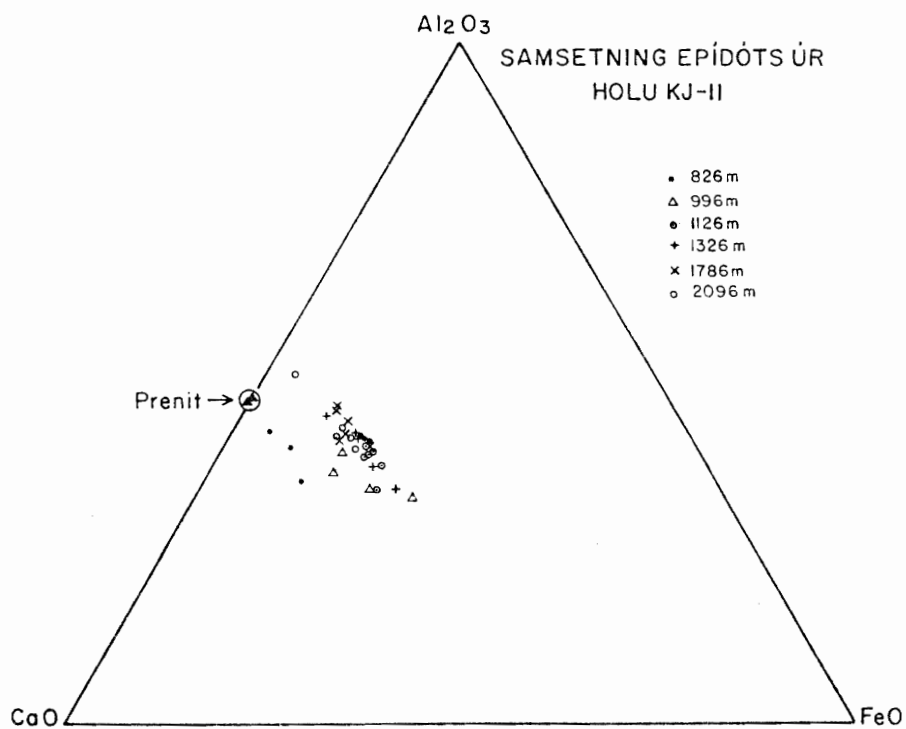
	Andradit												
	Epidót		Klórít		Amfiból		Plagioklas, ferskur og albittsendaur		Titanít		epidót korni		Heden- berít
	KJ-11	KJ-11	KJ-11	KJ-11	KJ-11	KJ-11	KJ-11	KJ-11	KJ-11	KJ-11	KG-4	KG-4	
Prant	1052	996	2096	1590	1466	2160	2019	1590	1466	2160	1126	780	780
SiO <sub>2</sub>	44.40	42.88	40.38	28.17	26.88	49.51	49.60	57.20	66.19	32.70	34.61	36.18	47.40
TiO <sub>2</sub>	-	-	-	0.12	0.00	0.29	0.00	0.06	0.00	29.96	-	0.00	0.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25.06	18.77	25.23	17.95	19.26	5.23	30.34	26.18	21.09	9.23	1.23	2.56	0.01
Ferít	0.71	12.70	7.88	26.19	32.06	16.21	0.02	9.50	0.17	0.62	24.26	25.55	27.00
MnO	-	-	-	0.80	0.81	0.51	0.00	0.00	0.01	0.05	-	0.09	1.26
MgO	-	-	-	15.22	12.92	14.22	0.26	0.03	0.00	0.04	-	0.09	0.00
CaO	27.25	24.18	25.44	0.12	0.09	10.68	16.23	8.81	0.50	25.68	34.60	33.30	21.88
Ni <sub>2</sub> O	0.00	0.12	0.02	0.07	0.04	0.56	2.84	5.92	7.16	0.65	0.00	0.00	0.13
K <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.18	0.06	0.27	0.17	0.00	0.05	0.01	0.00
Summa	97.42	98.65	98.97	88.67	91.06	97.30	99.35	98.97	95.20	98.93	94.75	97.78	97.68



MYND 5



MYND 7



Mynd 6

Prenít finnst fyrst á svipuðu dýptarbili og epidót. Það finnst ekki eins samfelldt og epidót, en er oft með epidóti í sprungufyllingum og holrýmum. Magn preníts er yfirleitt lágt, en í stöku sýni getur það orðið allt að 10% af berginu.

Örgreiningar á preníti sýna að það er nær hreint  $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  (tafla 2 og mynd 6). FeO magn er 0-0.7% og magn annarra efna innan við 0.1%.

Kalsíumsilikatið reyerít fannst rétt neðan 100 m dýpis í holu KW-2. Kalsíumsilikatið wollastonít fannst í flestum holanna (ekki KW-2 og KG-8). Ofan 1000 m dýpis sjást oft bein tengsl á milli myndunar wollastoníts og jaðra innskotsbergs, en slík tengsl eru yfirleitt óljósari á meira dýpi. Neðan 1000 m er wollastonít mun algengara en ofar í berggrunnum. Wollastonít í efstu 1000 m berggrunnsins er örugglega myndað við kontaktumyndun við jaðra innskota við hvörfun kalsíts og kvars (OS JHD 7853). Ég tel ólíklegt að wollastonít falli út úr jarðhitavökva við hitastig undir 300°C, enda benda varmafræðilegir útreikningar ekki til að virkni  $\text{Ca}^{2+}$  og sýrustigi í jarðhitavatninu sé stjórnað af jafnvægi við wollastonít (OS JHD 7853) við 200-300°C. Með hliðsjón af rannsóknastofutilraununum og þeirri reynslu að myndunarhitastig í náttúrunni er oftast talsvert lægra en tilraunir sýna er ekki ólíklegt að wollastonít gæti fallið út úr jarðhitavökvanum við 330-350°C. Hins vegar hefur aldrei náðst hreint sýni af svo heitu jarðhitavatni í Kröflu auk þess sem varmafræðileg gögn eru af skorum skammti við hitastig yfir 300°C. Enn er því jarðhitaútfelling wollastoníts í Kröflu neðan 1000 m og við hitastig yfir 300°C aðeins stutt þeim líkum að þá eykst magn þess og bein tengsl við innskotslög sjást mjög sjaldan.

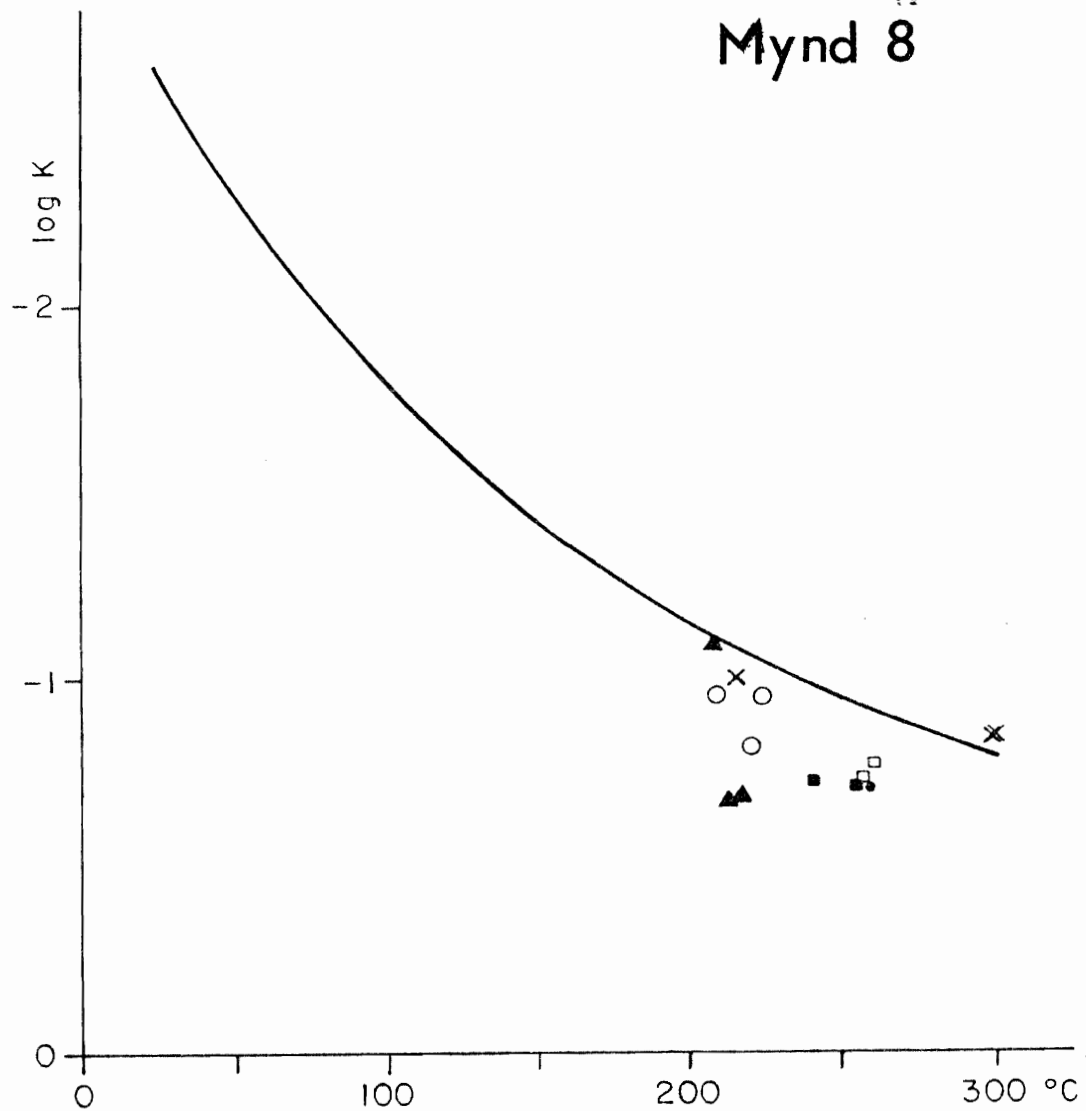
Feldspöt. Albítisering á plagioklas er fremur algeng frá a.m.k. 800 m dýpi, en sést yfirleitt ekki í miklu magni. Á örgreini hafa fundist flekkir í beltuðum hálfalbitiseruðum plagioklösum með alkalifeldspatsamsetningu. Hreint kalifeldspat (adular) hefur fundist á um 800 m dýpi í holu KG-5 (greint í örgreini) og sennilega einnig á sama dýpi í KG-3 (smásjargreining). Aðeins fundust örfáir kristallar í hvoru sýni.

Virknimargfeldi  $[\text{Na}^+]/[\text{K}^+]$  í djúpvatni frá Kröfluholum (mynd 8) sýnir sæmlega fylgni við jafnvægisferil fyrir jónaskipti alkalifeltspata. Talsverð dreifing er á gildunum. Á mynd 8 var reynt að velja einkennandi djúpvatnsamsetningu fyrir hverja holu og sýna einnig mestu dreifingu sem fram kemur í gildum reiknuðum frá marktækum sýnum. Í þeim holum (KW-1, KJ-6 og KJ-7)



JAFNVÆGISFERILL FYRIR HVARFIÐ  
 $KAlSi_3O_8 + Na^+ \rightleftharpoons NaAlSi_3O_8 + K^+$

Mynd 8



- ▲ KW-2
- × KJ-9
- KG-8
- KJ-7
- KJ-6
- KW-1

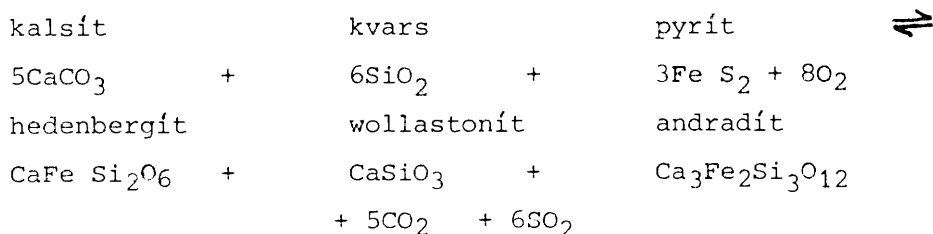
þar sem innstreymi er blandað er kísilhiti ekki marktækur og góðrar fylgni því ekki að vanta. Í þeim holum þar sem innstreymi er hreinn vatnsfasi (KW-2, KG-8, KJ-9) falla flest gildin nálægt ferlinum, en stór frávik sjást einnig í gildum frá þessum holum eins og sýnt er á mynd 8. Líklegt sýnist að samsetning jarðhitavatns í Kröflu við 200-300°C ráðist m.a. af jónaskipta-jafnvægi við alkalifeltspöt.

Málmsteindir hafa lítið verið athugaðar í bergi frá Kröflu. Nokkrar fægðar þunnisneiðar af bergi úr KG-3, KG-10 og KJ-11 hafa þó verið athugaðar og gerðar örgreiningar á sýnum úr sömu holum. Magnetít helst að mestu óummyndað, nema hvað rönd af maghemiti sést stundum við kornajaðra. Afblöndun af ilmeníti á sér stað og virðist ilmenítið óstöðugra. Á stöku stað finnst nýmyndað títanítt (sphene) og hlýtur títanítt að koma úr ilmeníti. Leucoxene hefur ekki verið ákvarðað með fullu öryggi, en mjög títanríkir fasar sem hafa greinst á örgreini eru taldir vera leucoxene. Pyrít er algeng útfellingasteind í Kröflubergi og pyrrhotít finnst einnig, en í mun minna magni. Pyrít er í langmestu magni í móbergssmyndun, enda er járn þar í mun auðleysanlegra formi en í kristölluðu basalti.

Auk wollastoníts finnast nokkrar aðrar steindir í Kröfluberginu, sem örugglega eru myndaðar við staðbundna upphitun við jaðra innskotsbergs. Þetta eru pyroxeninn hedenbergít og granatsteindin andradít. Hreint magnetít (án títans) finnst einnig með þessum steindum og er mjög sennilega myndað á þennan hátt.

Þessar steindir eru einkennandi fyrir kontaktumyndun við um eða yfir 500°C í kalksteini og tilheyra hornblendri hornfels / K-feltspat cordíerít hornfelsfési. Stundum má sjá frá smásjárathugunum að steindirnar hafa myndast á kostnað eldri útfellinga úr jarðhitavatninu. Í útfellingaæðunum ofan 1000 m er kalsít oft í mestu magni og kvars og pyrít með. Þessar steindir innihalda öll þau efni, sem nauðsynleg eru til að mynda wollastonít, hedenbergít og andradít.

Má hugsa sér að við oxandi aðstæður verði t.d. hvarfið:



Einnig geta hedenbergít, wollastonít og granat myndast á kostnað epidóts (sjá Liou, 1973).

Við örgreiningar á epidóti í holu KJ-11 greindist andradít í tveim sýnum í nánnum samvexti við epidót. Granatið var í örsmáum kornum og samvaxið epidóti. Það hafði ekki fundist við skoðun á þunnsneiðunum. Bæði þessi sýni eru nálægt innskotslögum (á 1126 og 1312 m dýpi) og gæti andradítið verið myndað þarna við kontaktummyndun á epidóti (eða á undan því). Þar sem granat hefur fundist í mestu magni neðan 1000 m dýpis í holu KG-4 og KG-10 er það yfirleitt eitt sér í klösum og upprunatengsl við epidót hafa ekki sést.

#### Efnaskipti milli bergs og vökva við ummyndun.

Í skýrslu OS JHD 7822 var fjallað um þær efnabreytingar sem orðið hafa á berginu við jarðhitaummyndun. Helstu áhrif ummyndunar í samsetningu bergsins eru þau að vatnsinnihald eykst, einkum í móbergsmýndun. Magn karbonats eykst og sömuleiðis magn brennisteins. Magnhlutfall helstu málmoxyða, annarra en alkalimálmana, breytist hins vegar að jafnaði fremur lítið. Þó sést hlutfallsleg aukning á MgO í smektít-zeolítabelti. Kalsíum, kísill og járn eru öll verulega hreyfanleg við ummyndun en aðeins koma fram staðbundnar magnbreytingar á þessum efnum. Veruleg útskolun og flutningar yfir lengri vegalengdir verða á alkalimálmunum. Magn uppleystra efna er lágt í jarðhitavatni frá Kröflu eins og í öðru ósöltu jarðhitavatni. Heildarútskolun úr berginu er því hæg. Mest útskolun verður á þeim efnum sem leysast auðveldlega upp eins og alkalimálmunum. Magn hinna ýmsu efna í vökvanum er háð efnajafnvægjum við steindir í berginu. Þessi efnajafnvægi eru mjög háð hita.

Athugun á því hvort efnajafnvægi sé á milli jarðhitavökvans í Kröflu og þeirra ummyndunarsteinda sem þar finnast er oft torveld.

Í fyrsta lagi er innstreymi í margar borholurnar blanda af gufu og vatni og auk þess eru þau sýni sem safnað er blanda af innstreymi frá mismunandi dýpi. Því er mjög erfitt að reikna af neinni nákvæmni efnasamsetningu djúpvökva. Kvikuvirkni veldur einnig óreglulegum breytingum á samsetningu djúpvökvans. Í öðru lagi eru jarnvægisferlar sumra algengra ummyndunarsteinda eins og t.d. epidóts háðir svo mörgum breytistærðum að útreikningar eru illfrankvæmanlegir. Fyrir sumar algengustu og magnmestu ummyndunarsteindirnar, eins og

leirsteindirnar, vantar öll varmafræðileg gögn. Nokkur einföld efnajafnvægi milli steinda og jarðhitavökva hafa verið athuguð. Djúpvatn virðist vera í jafnvægi við alkalifeltspöt á bilinu 200-300°C. Á sama hitabili sést engin fylgni milli virkni  $\text{Ca}^{2+}$  og sýrustigs í jarðhitavökvanum og jafnvægisferla fyrir myndun wollastoníts. Í skýrslum OS JHD 7832 og OS JHD 7846 er fjallað um efnajafnvægi kísils, karbonata og brennisteinssambanda við jarðhitavökvann, einkum með tilliti til áhrifa kvikuvirkni á samsetningu jarðhitavökvans. Djúpvökvinn virðist vera í jafnvægi við kvars og pyrit og pyrrhotít á öllu því hitastigsbili sem ríkir í berggrunninum. Jafnvægi ríkir við kalsít við hitastig allt að 290°C.

Sú breyting sem verður á samsetningu jarðhitavökvans við afgösun kviku raskar þeim efnajafnvægjum sem ríkja milli steinda í berginu og jarðhitavökvans. Það hversu víðtæk áhrifin verða er háð því hversu lengi röskunin stendur.

Niels Óskarsson (1978) hefur t.d. bent á að  $\text{SO}_2$  sem streymdi inn á jarðhita-kerfið frá kviku myndi hvarfast við þrígild járn-sambönd í lausn og gæti t.d. leyst upp epidót í berginu. Leirsteindir í berginu eru mjög járnríkar og er járníð bundið bæði sem tvígilt og þrígilt járn. Hlutfallslegur leysanleiki leirsteinda/epidóts er ekki þekktur, en þó er vitað að smektít er auðleyst í súrri lausn og myndi trúlega leysast auðveldar upp en epidót. Magn leirsteinda í berginu er margfalt magn epidóts og er því líklegt að við útskolun járnns úr berginu yrði það að einhverju leyti á kostnað leirsteindanna. Áhrif upplausnar járnns á leirsteindirnar myndu væntanlega verða þau að járn-fátakara klórít og smektít myndaðist, einnig gæti illít að e-u leyti komið í stað smektíts. Ekki er því líklegt að breytingar þær sem fundist hafa á leirsteindum í holum boruðum eftir 1975 geti stafað af þessum áhrifum. Æskilegt væri þó að gera víðtækari örgreiningar á leirsteindum og mæla þá einkum efnahlutföllin Fe/Mg og Si/Al. Þessi hlutföll er hægt að greina með talsverðri nákvæmni einnig í smektíti þótt heildarefnagreiningar séu torveldar.

#### Helstu niðurstöður

Reglulegt ummyndunarmynstur með þrem afmörkuðum beltum kemur fram í berggrunni Kröflusvæðis. Fjórdæ ummyndunarbeltið kemur einnig fram, en er ekki eins vel afmarkað og hin. Samræmi er ekki sérlega gott milli legu beltanna og þess hitastigs, sem talið er nú ríkja í efri hluta berggrunnins. Ummyndunar-

beltin sýna að grynnt er á háan berghita í miðju þversniða gegnum borsvæðið bæði frá S-N og V-A. Mismunur á gerðum leirsteinda í borholum boruðum 1974/1975 og síðar sýnir að breytingar hafa orðið á jarðhitakerfinu á þessum tíma. Sú breyting, sem best gæti skýrt þennan mun er að berghitastig ofan 1000 m hafi lækkað á þessu tímabili. Samspil kvikuvirkni og jarðhitavirkni við ummyndun bergsins kemur vel fram í staðbundnum rásum, þar sem háhitaummyndunarsteindir hafa myndast á kostnað eldri útfellinga. Yfirstandandi umbrot á Kröflusvæði hafa raskað efnajafnvægjum milli steinda og jarðhitavökva, en ekki hefur enn verið sýnt fram á áhrif þess á ummyndunarmynstur í berggrunninum.



Tilvitnanir

1. Juan, V.C. and Lo H-J. 1971. The stability fields of natural laumontite and wairakite and their bearing on the zeolite facies. Proc. Geol. Soc. China, 14, 34-44.
2. Guðmundur Pálmason, Stefán Arnórsson, Ingvar Birgir Friðleifsson, Hrefna Kristmannsdóttir, Kristján Sæmundsson, Valgarður Stefánsson, Benedikt Steingrímsson, Jens Tómasson og Leó Kristjánsson, 1978. The Iceland Crust: Evidence from drillhole data on structure and processes. Proceedings, The Second Ewing Symposium. Í prentun.
3. Helgeson, H.C., 1969. Thermodynamics of hydrothermal systems at elevated temperatures and pressures. Amer. J. Sci., 267, 729-804.
4. Liou, J.G. 1973. Synthesis and stability relations of epidote,  $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{FeSi}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$ . J. Petrol, 14, 381-413.
5. Níels Óskarsson, 1978. Effect of magmatic activity on fumarole gas composition in the Námafjall-Krafla volcanic center, N.-Iceland (Norræna Eldfjallastöðin 7803).
6. OSJHD 7542 Jarðlög og ummyndun í borholum 1 og 2 í Kröflu. Hrefna Kristmannsdóttir.
7. OSJHD 7641 Borholur 3, 4 og 5 í Kröflu. Borun, vatnsæðar, niðurstöður berggreininga. Hrefna Kristmannsdóttir, Guðmundur Ómar Friðleifsson, Einar Gunnlaugsson.
8. OSJHD 7642 Borholur 3, 4 og 5 í Kröflu. Lýsing jarðlaga. Hrefna Kristmannsdóttir.
9. OSJHD 7646 Krafla, hola KJ-6. Borun jarðlög, vatnsæðar og ummyndun. Hrefna Kristmannsdóttir, Margrét Kjartansdóttir, Ásgrímur Guðmundsson, Guðmundur Ó. Friðleifsson.

10. OSJHD 7647 Krafla, hola 7. Framvinduskýrsla um borun, jarðlög vatnsæðar og ummyndun.  
Hrefna Kristmannsdóttir, Ásgrímur Guðmundsson, Guðmundur Ó. Friðleifsson, Margrét Kjartansdóttir.
11. OSJHD 7708 Krafla hola KJ-11. Borun, vatnsæðar, jarðlög og ummyndun.  
Hrefna Kristmannsdóttir, Ásgrímur Guðmundsson, Margrét Kjartansdóttir.
12. OSJHD 7709 Krafla hola KG-10. Borun, vatnsæðar, jarðlög og ummyndun.  
Hrefna Kristmannsdóttir, Ásgrímur Guðmundsson, Margrét Kjartansdóttir, Guðmundur Ómar Friðleifsson.
13. OSJHD 7710 Krafla hola KJ-9. Borun, skoltöp, jarðlög og ummyndun.  
Hrefna Kristmannsdóttir, Ásgrímur Guðmundsson, Margrét Kjartansdóttir.
14. OSJHD 7713 Krafla hola KG-8. Borun, vatnsæðar, þrýstiprófun, lektarprófun, jarðlög og ummyndun. Hrefna Kristmannsdóttir, Ásgrímur Guðmundsson, Margrét Kjartansdóttir, Guðmundur Ómar Friðleifsson.
15. OSJHD 7822. Efnasamsetning ummyndaðs bergs í Kröflu.  
Jan Swantesson, Hrefna Kristmannsdóttir.
16. OSJHD 7832. Framvinduskýrsla um efnafræði útfellinga í borholum við Kröflu. Stefán Arnórsson.
17. OSJHD 7846. Krafla. Hitaástand og gastegundir í jarðhitakerfinu.  
Gestur Gíslason, Trausti Hauksson, Halldór Ármannsson.
18. OSJHD 7853 Wollastonite: First recording in Iceland.  
Hrefna Kristmannsdóttir.