



ORKUSTOFNUN  
Jarðhitadeild

JARÐHITASVÆÐIÐ VIÐ HVÍTHÓLA

Hermireikningar og vinnsluspá

Helga Tulinius  
Ómar Sigurðsson

OS-88007/JHD-03 B

Apríl 1988

JARÐHITASVÆÐIÐ VIÐ HVÍTHÓLA

Hermireikningar og vinnsluspá

Helga Tulinius  
Ómar Sigurðsson

OS-88007/JHD-03 B      Apríl 1988

## EFNISYFIRLIT

	Bls.
EFNISYFIRLIT	1
MYNDASKRÁ	2
1 INNGANGUR	3
2 HVÍTHÓLASVÆÐIÐ	3
3 LÍKAN	4
4 NÁTTÚRULEGT ÁSTAND HVÍTHÓLASVÆÐISINS	6
5 VINNSLUSAGA	7
6 VINNSLUSPÁR	8
7 UMRÆÐA	8
8 HELSTU NIÐURSTÖÐUR	9
9 TILLÖGUR	10
HEIMILDIR	10
TAFLA 1 Upphafsgildi og hellsu eiginleikkar kubbalíkansins	6

## MYNDASKRÁ

	Bls.
1. Afstöðumynd af Hvíthólasvæðinu	12
2. Áætlaður berghiti út frá mælingum í holum KJ-21, KJ-22 og KJ-23	13
3. Áætlaður upphafsþrýstingur í holum KJ-21, KJ-22 og KJ-23	13
4. X-Z kubbalíkanið	14
5. Reiknuð hitadreifing á Hvíthólasvæðinu fyrir vinnslu	15
6. Reiknuð þrýstidreifing á Hvíthólasvæðinu fyrir vinnslu	16
7. Reiknaður berghiti í KJ-21 fyrir vinnslu	17
8. Reiknaður berghiti í KJ-23 fyrir vinnslu	17
9. Reiknaður þrýstingur í KJ-21 fyrir vinnslu	18
10. Reiknaður þrýstingur í KJ-23 fyrir vinnslu	18
11. Vinnslusaga KJ-21 tímabilið 1982.10.09 - 1987.12.31	19
12. Vinnslusaga KJ-22 tímabilið 1982.10.09 (1983.08.19) - 1987.12.31	19
13. Mældur þrýstingur í holu KJ-21 á 700 m og 800 m dýpi frá 1982.10.09 - 1987.12.31	20
14. Reiknaður þrýstingur á 750 m dýpi í holu KJ-21	20
15. Mældur þrýstingur í holu KJ-22 á 600 m dýpi frá 1982.10.09 (1983.08.19) - 1987.12.31	21
16. Mældur hiti í holu KJ-21 á 600 m dýpi	21
17. Reiknaður hiti í holu KJ-21 á 575 m dýpi	21
18. Reiknaður þrýstingur 31.12.87 í holu KJ-21	22
19. Reiknaður hiti 31.12.87 í holu KJ-21	22
20. Reiknaður hiti 31.12.87 í holu KJ-23	23
21. Vinnsluspá 1	24
22. Vinnsluspá 2	24
23. Vinnsluspá 3	24

## 1. INNGANGUR

Í þessari greinargerð er fjallað um hermireikninga fyrir vinnslusvæði Kröfluvirkjunar við Hvíthóla. Notað var forritið SHAFT-79 sem verið hefur í eigu Orkustofnunar um nokkurt skeið. Útgáfa 79 af forritinu er gerð af K. Pruess og R.C. Schroeder á Lawrence Berkeley Laboratory í Kaliforníu, Bandaríkjunum (Pruess og Schroeder, 1980). Tilgangur þessa verks var fyrst og fremst að þjálfa starfsmenn JHD í notkun forritsins, en jafnframt að fást við raunverulegar aðstæður í íslensku jarðhitakerfi. Orkustofnun bar allan kostnað af þessu verki.

Hvíthólasvæðið var valið vegna þess að ekki höfðu verið framkvæmdir sambærilegir útreikningar fyrir það svæði áður, það er frekar lítið, þar eru fáar holur og ekki er vitað með vissu um vatnafræðileg tengsl þess við önnur vinnslusvæði við Kröflu. Þar eru einnig til nokkuð góð gögn um upprunalegt ástand og breytingar með tíma eftir að vinnsla úr svæðinu hófst.

Með forritinu SHAFT-79 má herma eftir hita- og þrýstibreytingum í tveggja fasa jarðhitakerfum. Forritið leysir jöfnur fyrir flæði massa og orku í kubbálíkani af jarðhitakerfinu með svokallaðri "integrated finite difference" aðferð.

Í forritinu er hver kubbur höndlaður sem gropið efni, en í raun eru holrýmin í jarðlögunum við Hvíthóla að mestu í stórum og smáum sprungum. Lektin er þá mest í sprungunum, hins vegar er vatnsrýmdin í berginu sem er lítið lekt. Erlendis eru til forrit sem herma massa og orkuflæði í jarðhitakerfum, þar sem rennsli og rýmd jarðlaganna er að miklu leyti háð sprungum, en reikningar með þeim eru mjög viðamiklir og kostnaðarsamir. Til að beita þeim forritum við hermireikninga þarf innri gerð jarðhitakerfanna að vera mjög vel þekkt. Sú þekking fæst aðeins með langri vinnsluögu og miklum jarð- og jarðeðlisfræðilegum rannsóknum á jarðhitakerfinu. Það hefur hins vegar sýnt sig við hermireikninga á öðrum svæðum (Leirbotnar og Suðurhlíðar

í Kröflu, Nesjavellir o.fl.) að hægt er að ná viðunandi samræmi milli líkans og gagna með forritum eins og hér er notað, þar sem reikningar miðast við gropið efni. Þessi forrit eru yfirleitt einfaldari í notkun og reikningar með þeim því auðveldari og ódýrari.

Í forritinu SHAFT-79 er einnig sú einföldun gerð að vökvinn í jarðhitakerfinu er meðhöndlaður eins og um hreint vatn væri að ræða, en ekki tekið tillit til gasa eða annarra efna í jarðhitavatninu. Í jarðhitavatninu frá Hvíthólasvæðinu er fremur lítið um gös þannig að áhrif þeirra á eðliseiginleika vatnsins ættu að vera hverfandi og þessi einföldun því réttlætanager.

## 2. HVÍTHÓLASVÆÐIÐ

Þrjár holur eru á svæðinu þ.e. KJ-21, KJ-22 og KJ-23 (mynd 1), og voru þær boraðar á árunum 1982 og 1983 (Ásgrímur Guðmundsson o.fl., 1982a,b, 1983a,b,c,d,e, Benedikt Steingrímsson o.fl., 1983, 1984, Halldór Ármannsson og Benedikt Steingrímsson, 1984). Hóla KJ-21 er 1200 m djúp og sker hún nokkrar æðar, þær stærstu á 630 m dýpi og í kringum 975 m dýpi. Holan hefur gefið um 40 kg/s í heildarrennsli og er áætlað að um 60% komi úr efri æðinni og 40% úr neðri æðunum. Hóla KJ-22 var boruð í 1877 m sem svarar til um 1740 m raundýpis þar sem holan var skáboruð og er heildarhlíðrun um 540 m í botni. Holan skar nokkrar æðar, þær helstu á 600 m, 960 m, 1270 m og 1750-1800 m. Stærstar eru taldar æðarnar á 600 m og 1270 m dýpi. Áætlað er að um 40% af heildarrennsli hólú KJ-22 komi úr efstu æðunum, en neðri æðarnar gefi um 60% af heildarrennslinu sem er alls um 20 kg/s. Hóla KJ-23 var boruð í 1968 m dýpi og sker fáar og lítt gæfar vatnsæðar. Helstu æðarnar eru á 600 m og 700 m dýpi, en of tregar til að réttlæta virkjun holunnar. Hóla-23 er staðsett vestan gossprungu og misgengis sem liggur um Hvíthólasvæðið, en hóla KJ-21 er þar austan við.

Myndir 2 og 3 sýna áætlaðan berghita og upphafsþrýsting í jarðhitakerfinu við

holurnar. Berghiti við holur KJ-22 og KJ-23 er mjög svipaður niður í 1000 m dýpi, en þar fyrir neðan breytist berghiti kringum KJ-22 mjög lítið en hækkar hins vegar neðan 1400 m umhverfis KJ-23. Þessi munur stafar sennilega af því að hola KJ-22, sem er skáboruð, er komin út fyrir heita jarðhitakerfið og inn í kaldara vatnskerfi tengt norður-suður sprungusveimi sem liggur vestan við svæðið. Berghitinn við holu KJ-21 er nokkru hærri en við hinar holurnar á 500 m-1000 m dýpi. Nokkur þrýstimunur er milli holanna en þrýstingurinn er hæstur í KJ-21, um 5,5 bar lægri í KJ-22 og um 6,5 bar lægri í KJ-23 en KJ-21. Þetta þrýstifall er talið stafa af gossprungu og/eða misgengi sem liggur um Hvíthóla á milli hola KJ-21 og KJ-23 (mynd 1) og virkar sem stemmir. Hola KJ-22, sem eins og áður segir var stefnuboruð til vesturs, sker gossprunguna á um 950 m dýpi.

Hita- og þrýstiferlarnir gefa til kynna að heitur vökví streymi um uppstreymisrás inn í kerfið austan við Hvíthóla og er líklegt að uppstreymisrásin sé skammt austan við holu KJ-21. Hola KJ-22 tekur hluta af heildarrennsli sínu úr þessu kerfi, en einnig hluta úr kaldara vatnskerfi neðan 1000 m dýpis sem tengt er norður-suður sprungusveimnum.

Þegar lítið er á svarfgreiningar úr holunum er hægt að skipta berginu undir Hvíthóla-svæðinu upp í láréttar syrpur (Ásgrímur Guðmundsson, munnlegar upplýsingar). Efst er frekar ferskt (lítið ummyndað) og lekt lag sem nær niður í um 200 m dýpi. Þar fyrir neðan tekur við móberg sem er tiltölulega þétt og virkar sem nokkurskonar lok á jarðhitageyminn. Fyrir neðan móbergið í um 500 m dýpi taka við lekari jarðlög sem samanstanda aðallega af basalt breksíu og eru þessi lög um 500 m þykk þ.e. ná niður í um 1000 m. Í þessari syrpu eru æðarnar sem taka úr heitari hluta jarðhitakerfisins. Í um 1000 m þéttist bergið og innskotatiðni eykst. Þar fyrir neðan er lítið um æðar, nema í holu KJ-22 sem skásker sprungur og misgengi tengd kaldara vatnskerfi í og neðan 1100-1200 m dýpis.

Gossprungu og misgengi liggja á milli KJ-21 og KJ-23 og virka sem stemmir sem hindrar vökvastreymi þar á milli.

### 3. LÍKAN

Allar fyrirliggjandi upplýsingar um jarðhitakerfið við Hvíthóla voru notaðar til að búa til líkan af því. Ákveðið var að hafa líkanið eins einfalt og kostur væri, en þó það flókið að það næði að líkja eftir þekktum eiginleikum jarðhitakerfisins. Holurnar, þar sem eiginleikar kerfisins eru þekktir, eru á litlu afmörkuðu svæði. Mælingar og athuganir í holunum þrem gefa upplýsingar um jarðfræðiuppbyggingu svæðisins og hitabreytingar í lóðréttum fleti. Einnig þrýsting í hverri holu og þrýstimun á milli hola. Holurnar eru hins vegar nálægt hver annarri og upplýsingar um breytingar í láréttum fleti því takmarkaðar við svæðið á milli þeirra. Fyrir þetta verkefni var því valið tvívítt líkan sem er lóðrétt snið og liggur gegnum jarðhitasvæðið frá VNV til ASA (mynd 1). Þannig sker sniðið eina af ríkjandi sprungustefnum á svæðinu undir nær 90° horni. Holunum var síðan varpað inn á sniðið. Lengd sniðsins var ákveðin 600 m til vesturs og 1000 m til austurs út frá holu KJ-21. Þessi stefna á sniðinu var valin m.a. vegna þess að innstreymi inn í jarðhitakerfið er talið vera austan til og ekki í mikilli fjarlægð frá holu KJ-21, en nákvæm staðsetning eða vitneskja um eðli þess er lítið þekkt og verður ekki reynt að skýra það nánar hér. Þar sem reiknilíkanið er mjög gróft skiptir nákvæm staðsetning á innstreyminu ekki miklu máli í þeim reikningum sem framkvæmdir voru hér. Þá er vitað að hola KJ-22 hittir í kaldara vatnskerfi þegar hún fer út í sprungusveiminn neðan 1000m dýpis. Ríkjandi rennslisstefna í því er norður/suður samhliða sprungum og misgengjum og kemur þetta vatnskerfi einnig fram vestan við Leirbotnasvæðið (Guðmundur S. Böðvarsson o.fl. 1984). Sniðið var látið ná niður á 2 km dýpi og sýnir þannig töluverðar breytingar í hita frá austri til vesturs og þrýstifall í sömu stefnu. Sniðið er því líklega nærri samhliða rennslisstefnu jarðhitavatsins sem streymir

frá uppstreymisrás austan Hvíthóla og inn á jarðhitasvæðið samsíða öskjubrotinu. Þetta val á stefnu sniðsins hentar því mjög vel til að herma náttúrulegt ástand jarðhitakerfisins.

Snið samsíða ríkjandi sprungustefnum á svæðinu hefði sýnt mjög óverulegar hita- og þrýstingsbreytingar eftir sniðinu og með dýpi. Það hefði því hentað illa til að stilla af innstreymi í jarðhitakerfið og aðra eiginleika þess í náttúrulegu ástandi. Þykkt sniðsins var höfð 100 m en hægt hefði verið að velja þykktina aðra t.d. 1 m eða 1000 m án þess að það breytti neinu um hegðun, eiginleika eða niðurstöður líkansins. Það hefði eingöngu haft áhrif á skölun stærða eins og inn- og útstreymis. Val á 100 m fyrir þykktina gerir það að verkum að stærðargráður allra stærða eru eðlilegar og gefa þannig betri tilfinningu fyrir hegðun líkansins.

Sniðinu var síðan skipt upp í minni einingar, með tilliti til eiginleika bergsins (lekt, poruhluta), og var við það stuðst við jarðfræðiskiptingu svæðisins. Þannig var sniðinu skipt upp í 6 mismunandi berggerðir sem hafa mismunandi vatnafræðilega eiginleika. Þessum berggerðum er síðan aftur skipt upp í smærri einingar (mynd 4). Efst er berggerð sem kölluð er TOP og nær niður á 200 m dýpi þá tekur við MOB sem nær frá 200 m í 500 m. Fyrir neðan MOB er BRE sem er skipt í þrjú lög. Fyrsta lagið nær niður á 650 m, næsta í 850 m og það neðsta í 1000 m. Neðst er svo BAS sem er skipt í tvö lög og nær efra lagið frá 1000 m - 1500 m og það neðra í 2000 m. Berggerðin MIS er svo látin skera allan staflann og er þar verið að reyna að líkja eftir gosprungunni og misgenginu sem eru á milli hola KJ-21 og KJ-23. Í líkaninu er MIS haft 50 m breitt. Að síðust eru svo stórir kubbar VOL 1 - 8 hafðir til að stjórna streymi inn og úr kerfinu og líkja eftir áhrifum yfirborðs. Ofan á staflanum er þannig höfð stór eining VOL 1 sem á að líkja eftir yfirborðsaðstæðum með meðalhita 5,2 °C og eins bars þrýstingi. Ekki var hægt að velja lægri yfirborðshita þar sem töflur yfir eigin-

leika vökva sem koma með forritinu náðu ekki lengra niður í hita. Í töflunum eru eðliseiginleikar vatnsins skráðir sem fall af innri orku og eðlismassa en það eru hinar óháðu reiknibreytur forritsins. Ofangreind gildi svara til innri orku upp á 219 kJ/kg og 1000,01 kg/m<sup>3</sup> eðlismassa. Þessi eining er  $1 \times 10^{30}$  m<sup>3</sup> að stærð. Vestan við öll lárétta lög, nema TOP, eru hafðir stórkubbarnir VOL 2 - VOL 7. Þessir kubbar eru hafðir það stórir að hita og þrýstingsbreytinga gæti ekki í þeim þrátt fyrir að þeir taki eða láti frá sér mikið magn af vökva. Gert er ráð fyrir hitastigli og vatnsþrýstistigli í þessum kubbum (sjá töflu 1). Þeir eru ekki tengdir innbyrðis en gefa kost á innstreymi ættuðu að norðan eða sunnan og er þannig tekið tillit til rennslis eftir N-S sprungusveimnum. Seinast er svo lítill kubbur VOL 8 sem tengist kerfinu í austari horni þess og er notaður til að stjórna innstreyminu í uppstreymisrásina. Gert var ráð fyrir varmaflæði til neðsta lagsins sem svarar til 2 W/m<sup>2</sup> vegna eðlilegs hitaútstreymis frá jarðskorpunni. Þetta er sama varmaflæði og var notað í reikningum fyrir Leirbotna og Suðurhlíðar, en er eitthvað ofmetið fyrir Hvíthóla, þar sem þar er eingöngu um varmaleiðni að ræða. Þetta ætti þó ekki að valda neinni umtalsverðri skekkju í reikningum, en gæti haft smááhrif á hitann í neðstu 500 m sniðsins.

Helstu eiginleikar kubbanna eru skráðir í töflu 1, þeir eru að miklu leyti þeir sömu og voru notaðir við svipaða reikninga á Leirbotna- og Suðurhlíðasvæðinu við Kröflu (Guðmundur Böðvarsson o.fl., 1984). Þannig er poruhlutinn og varmaleiðnin valin eins. Einnig var á sama hátt valið að láta afstæða lekt vatns og gufufasa breytast línulega með gufumettun. Vatn er látið verða kyrrstætt við 30% vatnsmettun en gufa verður kyrrstæð við 5% gufumettun. Notkun á línulega afstæðri lekt vatns og gufu hefur reynst vel við hermun tveggja fasa sprunginna jarðhitakerfa með forritum sem miðast við gropið efni.

Tafla 1 Upphafsgildi og hellsu eiginleikar kubbalíkansins

Heiti	Lekt. ( $10^{-15} \text{ m}^3$ )	Poruhluti (%)	Þykkt (m)	Rúmmál ( $\text{m}^3$ )	Varmaleiðni ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Hiti ( $^{\circ}\text{C}$ )	Þrýstingur (bar)	E ( $\text{kJ}/\text{kg}$ )	Þéttleiki ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
TOP 1-10	10	15	200		1,5	60,0	9,65		
MOB 1-10	$2 \times 10^{-3}$	5	300		1,1	85,0	23,60		
BRE 1-10	10	5	150		1,7	105,0	41,50		
BRE 11-20	10	5	200		1,7	121,2	55,90		
BRE 21-30	10	5	150		1,7	137,9	70,70		
BAS 1-10	1,2	5	500		1,7	168,8	97,03		
BAS 11-20	1,2	5	500		1,7	216,3	139,80		
MIS 1	0,45	5	200		1,7	60,0	9,65		
MIS 2	0,45	5	300		1,7	85,0	23,60		
MIS 3	0,45	5	150		1,7	105,0	41,50		
MIS 4	0,45	5	200		1,7	121,2	55,90		
MIS 5	0,45	5	150		1,7	137,9	70,70		
MIS 6	0,45/0,2	5	500		1,7	168,8	97,30		
MIS 7	0,45/0,2	5	500		1,7	216,3	139,80		
VOL 1	100	5		$10^{30}$	1,7	5,2	1,0	219	1000,01
VOL 2	100	5	300	$10^{24}$	1,7	85,0	23,60		
VOL 3	100	5	150	$10^{13}$	1,7	105,0	41,50		
VOL 4	100	5	200	$10^{13}$	1,7	121,2	55,90		
VOL 5	100	5	150	$10^{13}$	1,7	137,9	70,70		
VOL 6	100	5	500	$10^{24}$	1,7	168,8	97,30		
VOL 7	100	5	500	$10^{24}$	1,7	216,3	139,80		
VOL 8	50	5		10000	1,7	300,0	167,00		

\* Lárétt lekt/lóðrétt lekt

#### 4. NÁTTÚRULEGT ÁSTAND HVÍTHÓLASVÆDISINS

Reynt var að fá fram upprunalegt ástand í jarðhitakerfinu þ.e. hita- og þrýstidreifinguna í svæðinu áður en vinnsla hófst á Hvíthólum. Gert var ráð fyrir því að í byrjun hafi verið ótruflaður hita- og vatnsþrýstingsstigull í kerfinu. Uppstreymi er látið koma inn í kerfið í austri í gegnum kubb VOL 8. Myndir 2 og 3 sýna áætlaðan berghita og upphafsþrýsting við holurnar.

Reiknilíkanið var síðan keyrt og innstreymi, lekt og poruhluta breytt þangað til hitinn og þrýstingurinn við æðarnar í KJ-21 náði mældum hita og þrýstingi fyrir vinnslu. Fyrir "besta" líkanið tók það 883 ár að ná þessu ástandi (250 tímabrep). Í þessu ástandi er kerfið nær æstætt ("steady state") þannig að hiti og þrýstingur breytist um minna en  $0,5^{\circ}\text{C}$  og 0,5 bar á 30 ára tímabili allstaðar í því.

Fyrir það líkan sem hér var staldrað við fékkst 2 kg/s streymi af  $300^{\circ}\text{C}$  heitu vatni miðað við að líkanið spanni 100 m þykkt. Þetta er sennilega bæði aðeins of mikið og of heitt innstreymi eins og vikið verður að í umræðukaflanum. Yfirlit yfir lekt og poruhluta fyrir "besta" líkanið er birt í töflu 1. Myndir 5 og 6 sýna hita og þrýstidreifinguna sem fékkst í líkaninu og myndir 7-10 sýna hita og þrýsting við holur KJ-21 og KJ-23. Reynt var að fá fram 6,5 bar þrýstimun milli hola KJ-23 og KJ-21 eins og mælingar gefa til kynna að hafi verið þar á milli. Lektin og samgangurinn yfir stemminn (gospunguna/misgengið) var stillt þannig af til að fá fram þennan þrýstimun. Eins og sést á mynd 6 tókst þetta, allavega í efri hluta kerfisins (BRE 500 m - 1000 m) en minna þrýstifall er í neðri hluta kerfisins (BAS fyrir neðan 1000 m). Annars er lítið þrýstifall frá austri til vesturs. Reynt var að fá fram viðsnúna hitaferla eins og berghitaferlar fyrir holurnar (mynd 2) sýna. Til þess



að fá það fram var innstreyminu beint upp eftir austurjaðri sniðsins upp undir MOB (500 m) með því að hafa lóðréttan lekt þar meiri en lárétta. Í uppstreymsrásinni er lóðréttan lektinn 2 sinnum meiri en sú lárétta í BRE en 16,7 sinnum meiri í BAS.

Eins og sést á mynd 5 fékkst nokkuð sannfærandi hitadreifing miðað við fyrirbyggjandi upplýsingar. Einnig sést, ef myndir 2 og 3 eru bornar saman við myndir 7 og 9, þ.e. áætluð og reiknuð hitastig í holum KJ-21 og KJ-23, að allgott samræmi er þar á milli.

Í því líkani sem hér var staldrað við og valið sem "besta" líkanið fyrir kerfið var komið tveggja fasa ástand í efsta lag BRE frá MIS og að austurjaðrinum. Í uppstreymsrásinni við austurjaðrinum var komið tveggjafasa ástand í BRE en ekki í BAS. Ekki er vítað til að tveggjafasa ástand hafi verið við holu KJ-21 á um 600 m dýpi fyrir upphaf vinnslu. Þó er víst að hiti og þrýstingur á þessu dýpi voru við suðumark. Þetta ástand kemur til með að hafa nokkur áhrif á viðbrögð líkansins við vinnslu og verður fjallað nánar um það síðar.

## 5. VINNSLUSAGA

Myndir 11 og 12 sýna vinnslu úr holum KJ-21 og KJ-22 frá 19. október 1982, en þá var holu KJ-21 hleypt upp, og fram að áramótum 1987/88. Holu KJ-22 var ekki hleypt upp fyrr en 19. ágúst 1983, en sami upphafstími er notaður fyrir báðar holurnar. Þessi gögn voru sett inn í reiknilíkanið og það keyrt áfram frá þeim tíma er áður var stoppað þegar upprunalegu ástandi fyrir vinnslu var náð. Það hita- og þrýstiástand, sem ríkti í lok keyrslunnar með grunnlíkaninu, var notað sem upphafsástand jarðhitakerfisins, þegar reynt var að herma eftir vinnslusögu þess.

Til að líkja eftir vinnslu úr svæðinu með líkaninu voru settir svelgir í nokkra smákubba sem samsvara æðunum í holunum, þ.e. massi var tekinn úr þessum kubbum. Reynt var þannig að fá fram svipað þrýstifall í líkaninu við vinnslu og mælt er í holunum (myndir 13 - 15). Prófa

varð sig áfram með því að skipta vinnslunni milli æða í vinnsluholunum og skala hana niður miðað við raunverulega stærð kerfisins. Þannig kom eftirfarandi í ljós: Fyrir holu KJ-21 virðist rúmlega 60% vinnslunnar koma úr efstu æðum holunnar á um 600 m dýpi en tæplega 40% úr neðri æðum (975 m dýpi). Eftir þessu var hermt með massatöku úr kubbunum BRE-5 og BRE-25 og var vinnslunni skipt í hlutföllunum 60/40. Fyrir holu KJ-22 eru hlutföllin þannig að um 40% kemur úr efri og heitari æðunum en 60% úr neðri æðunum. Þetta svarar til 40/60 hlutfalls úr kubbunum BRE-4 og BAS-2.

Við hermun á vinnslusögunni kom í ljós að skala þurfti heildarvinnsluna 5 fallt niður. Þetta bendir til að stærð jarðhitakerfisins þyrfti að vera um 5 sinnum meiri en notað var í grunnlíkaninu. Þannig þarf líkanið að vera 500 m í norður-suður stefnu (þykkt) og innrennslið inn í jarðhitakerfið svaraði þá til um 10 kg/s.

Mynd 14 sýnir reiknaðan þrýsting í 750 m dýpi í holu KJ-21 og eins og sést ef borið er saman við mynd 13 þá er nokkuð gott samræmi á milli reiknaðs og mælds þrýstings. Mældur hiti á 600 m dýpi í holu KJ-21 er teiknaður á mynd 16 og reiknaður hiti við KJ-21 á 575 m dýpi á mynd 17. Þar er einnig allgott samræmi á milli. Myndir 18 og 19 sýna reiknaðan þrýsting og hita með dýpi við holu KJ-21 um áramótin 1987/88 en vinnslugögn lágu fyrir fram að þeim tíma (myndir 11 og 12). Reiknaður hiti með dýpi við holu KJ-23 á sama tíma er teiknaður á mynd 20.

Með því að skala tvívíða grunnlíkanið í samræmi við massatökuna úr jarðhitakerfinu má fá allgott samræmi milli reiknaðs og mælds þrýstings í kerfinu svo og við hitabreytingar. Það ber þó að hafa í huga að grunnlíkanið er tvívítt og skipt niður í stórar einingar. Þriðja víddin, norður-suður, er höfð föst þannig að massatakan hefur samtímis áhrif í allri þykktinni (N-S stefnu). Ein af ríkjandi sprungustefnum á svæðinu er N-S þannig að lekt getur verið meiri í þá stefnu nálægt meginsprungunum. Lækkun

þrýstings á vinnslusvæðinu við Hvíthóla gæti því valdið aðstreymi úr norðri eða suðri. Þetta líkan tekur ekki tillit til þessa. Massataka úr stórum kubbum veldur því að þrýsti- og hitabreytingar verða sveiflukenndar. Þessar sveiflur ráðast af því hvenær kubburinn sem massinn er tekinn úr fær aðstreymi úr nærliggjandi kubbum. Þessi takmörk á grunnlíkaninu sem hér var stoppað við ber að hafa í huga þegar það er notað til að spá fram í tímann.

## 6. VINNSLUSPÁ

Eftir að búið var að fella líkanið að gögnunum var það notað til að reikna þrýsti- og hitabreytingar við áframhaldandi vinnslu úr holum KJ-21 og KJ-22. Það skal þó ítrekað að líkanið sem notað er hér, er mjög gróft og gefur því aðeins hugmynd um viðbrögð kerfisins við vinnslu. Þrjú tilfelli voru tekin fyrir:

1. Gert ráð fyrir sömu vinnslu og verið hefur þ.e. KJ-21 afkasti 40 kg/s samtals (60% úr 600 m og 40% úr 950 m) nú mánuði ársins. Holan er lokuð í júní, júlí og ágúst. Úr holu KJ-22 er tekið samtals 20 kg/s (40% úr 600 m og 60% úr 1100 m) en gert er, ráð fyrir að hún sé lokuð í tvær vikur á móti hverri einni sem hún er opin. Holu KJ-22 er einnig lokað í þrjá mánuði á ári og þá sömu og holu KJ-21.
2. Sama vinnsla og í tilfelli 1, en nú er holunni ekki lokað yfir sumarið, þ.e. sama vinnsla allt árið.
3. Neðri æðinni í KJ-22 er lokað og þá gert ráð fyrir því að hægt sé að taka 8 kg/s allt árið úr efri æðinni í KJ-22. KJ-21 er keyrð eins og í tilfelli 1, þ.e. með sumarhléum.

Myndir 21 - 23 sýna niðurstöður þessara reikninga. Fyrir annað og þriðja tilfelli lækkaði þrýstingur í efri æðum holu KJ-21 það ört að vinnsla hætti úr holunum á um það bil ári, 275 dögum í öðru tilfellingu og á 473 dögum í þriðja tilfellingu. Hins vegar þegar gert er ráð fyrir sömu vinnslu og verið

hefur þá ætti svæðið að endast mun lengur. Svo virðist sem jafnvægi komist á eftir um 7 ár eða í kringum áramótin 1994/95. Þá er þrýstingurinn við efri æð KJ-21 að vísu orðinn lágur eða í kringum 20 bar. Í þessum reikningum er gert ráð fyrir óbreyttu heildarrensli allan tímann og ekki tekið tillit til þess að þegar gufan þornar og orkuinnihald hennar eykst er hægt að minnka heildarrenslið án þess að draga úr orkuvinnslu holunnar. Við náttúrulegar aðstæður, þegar holur þróast þannig, haldast orkuafköstin nær óbreytt meðan dregur úr heildarrenslinu. Það má því gera ráð fyrir að í reynd verði þrýstifallið við holuna minna til langs tíma litið en fæst í þessum reikningum.

Hitabreytingar eru ekki mjög miklar í öllum tilfellunum eða um 16 °C við efri æð holu KJ-21 í fyrsta tilfellingu, en þar kemst á jafnvægi eins og í þrýstingnum þegar svæðið hefur þornað og eingöngu gufa kemur úr æðinni.

## 7. UMRÆÐA

Í þessu verki var valið að gera eins einfalt líkan og kostur var til að ná markmiðum þess, en þau voru fyrst og fremst að þjálfa starfsmenn Jarðhitadeildar Orkustofnunar í notkun forritsins SHAFT-79 og jafnframt að fást við raunverulegt viðfangsefni. Viðfangsefnið var Hvíthólasvæðið við Kröflu og reyndist unnt að herma á viðunandi hátt náttúrulegt ástand jarðhitakerfisins þar með tvívíðu lóðréttu líkani. Bútunin í líkaninu var höfð mjög gróf og tekur mið af jarðfræðiskiptingu svæðisins. Hins vegar setur víddin og sú skipting sem var valin líkaninu nokkur takmörk. Með því er t.d. ekki hægt að kanna tengsl Hvíthólasvæðisins við Leirbotna, en til þess þyrfti að bæta þriðju víddinni við. Forritið býður upp á þennan kost, en gögn um lárétta hita- og þrýstidreifingu eru takmörkuð, þar sem holur liggja nærri hver annari á Hvíthólasvæðinu. Óvíst er hvort líkanið fyrir náttúrulegt ástand kerfisins myndi batna mikið með þriðju víddinni, en hins vegar

mundi þriðja víddin hafa áhrif á hvernig aðstreymi er að vinnslusvæðinu eftir að vinnsla er hafin. Ef í ljós kæmi að norður-suður aðstreymi að vinnslusvæðinu væri af sömu stærðargráðu og það uppstreymi sem áætlað er í tvívíða líkaninu (10 kg/s) getur það haft veruleg áhrif á vinnsluspár. Í tvívíða líkaninu sem hér er notað er ekki tekið tillit til aðstreymis úr norðri austan gossprungunnar milli hola KJ-21 og KJ-23, en það er að nokkru leyti gert með VOL-kubbunum fyrir sprungusveiminn vestan Hvíthóla. Gera má ráð fyrir að öskjuriminn og berggangar tengdir honum takmarki aðstreymi úr suðri að Hvíthólum. Einnig mætti með finni skiptingu líkja betur eftir finni dráttum í hita- og þrýstidreifingunni í jarðhitakerfinu og á þetta sérstaklega við eftir að vinnsla er hafin úr kerfinu.

Eins og minnst var á hér framar fékkst allgott samræmi milli líkansins og mældrar hita- og þrýstidreifingar með því að nota innstreymið 2 kg/s af 300 °C vatni. Við þetta kemur þó fram tveggja fasa ástand í efri hluta kerfisins (í efsta lagi BRE) þar sem innstreymið kólnar lítið meðan það ris af 2000 m dýpi upp í 500 m dýpi og byrjar því að sjóða. Ekki er vitað til að tveggja fasa ástand hafi ríkt í jarðhitakerfinu fyrir vinnslu, en talið að það hafi verið nærri suðumarki á um 600 m dýpi. Þetta misræmi er hægt að laga í líkaninu með því að lækka hitann á innstreyminu um 10-20°C. Einnig gæti þurft að breyta magni þess örlítið. Þá yrði að keyra líkanið í eitthvað lengri tíma til að ná fram nær æstæðu upphafsástandi í kerfinu en hér þurfti (883 ár). Hita- og þrýstidreifingin ætti að verða svipuð en mun minni eða engin suða.

Þegar vinnsla er hafin úr jarðhitakerfinu lækkar þrýstingurinn í næsta nágrenni vinnsluholanna. Þar sem hiti í efri hluta kerfisins er nálægt suðumarki við náttúrulegar aðstæður byrjar suða þar. Suðan breiðist síðan út frá holunum, aðallega til austurs í átt að uppstreyminu. Það að suða er byrjuð í líkaninu, sem hér er notað, þegar við náttúrulegar aðstæður veldur því að þrýstilækkunin umhverfis

vinnsluholurnar nær fyrr jafnvægi þegar vinnsla hefst, þ.e. suðan heldur uppi þrýstingnum. Fyrir vinnsluspártílfelli 1 (mynd 21) tekur þetta um 7 ár en í reynd gæti þrýstingurinn fallið meira áður en þetta jafnvægi næðist þannig að fyrr myndi draga úr afköstum holu KJ-21. Einnig gerist það í þessu tilfelli að holan sagnar til sín meiri og meiri gufu þannig að vermi holuvökvans hækkar fyrr og meir en myndi líklega gerast annars. Þá gætir kælingar einnig minna við holurnar þar sem þær byrja strax að soga til sín gufu (myndir 16 og 17).

Til að herma vinnslutilfellið var hér ekki farið út í finni skiptingu á líkaninu til að setja holurnar inn. Það gerir það að verkum að líkanið hermir ekki viðbrögðin sem myndu sjást og mælast í holunum þ.e. breytingar í vermi og rennsli. Þetta er þó hægt að nálgast með finni skiptingu líkansins við holurnar eða með því að tengja sérstakt holulíkan þessu líkani en í því felst töluvert meiri vinna.

Hér hefur aðeins verið spáð fram í tímunn fyrir þrjú vinnslutilfelli. Ljóst er að fleiri áhugaverðir möguleikar eru á nýtingu Hvíthólasvæðisins. Hér hefur verið sett fram einfalt líkan sem getur í grófum dráttum hermt viðbrögð jarðhitakerfisins þar. Ef áhugi viðkomandi aðila er fyrir hendi mætti gera smávægilegar lagfæringar á líkaninu og færa það þannig til betra samræmis við fyrirliggjandi gögn. Eftir það er hægt að athuga á fljótlegan og ódýran hátt ýmsa áhugaverða vinnslumöguleika fyrir Hvíthólasvæðið. Það líkan mætti síðan víkka út til að kanna tengsl Hvíthólasvæðisins við önnur vinnslusvæði Kröflu-virkjunar.

## 8. HELSTU NIÐURSTÖÐUR

Gert hefur verið einfalt tvívítt líkan sem getur líkt eftir hita- og þrýstidreifingunni í jarðhitakerfi Hvíthólasvæðisins við náttúrulegar aðstæður. Þetta líkan hefur verið notað til að herma vinnslusögu svæðisins og gera grófar vinnsluspár fram í tímunn fyrir gefin vinnslutilfelli.

Samkvæmt líkaninu koma rúmlega 60% rennslis úr holu KJ-21 úr efri æðum holunnar (kringum 600 m dýpi) og tæp 40% úr neðri æðum hennar (975 m).

Náttúrulegt uppstreymi í jarðhitakerfið er um 10 kg/s af tæplega 300 °C heitu vatni.

Rúmmál jarðhitakerfisins er tiltölulega lítið, líklega á bilinu 0,3-0,5 km<sup>3</sup> sem svarar til 500 m í N-S, 500-1000 m þykkt (500 m - 1500 m dýpi) og 1000 m í A-V.

Miðað við núverandi vinnslustýringu og afköst bendir þetta einfalda tvívíða líkan til að svæðið endist í innan við 10 ár.

## 9. TILLÖGUR

Eins og fram hefur komið eru nokkrir annmarkar á tvívíða líkaninu sem nú liggur fyrir af svæðinu. Æskilegt er, áður en lengra verður haldið, að lagfæra þetta líkan til að fá betra samræmi milli reiknaðs ástands og mældra gagna fyrir upphaf vinnslu úr svæðinu.

Þá er lagt til að gert verði þrívítt vinnslulíkan af svæðinu. Það líkan tæki þannig tillit til aðstreymis úr norðri að svæðinu, auk þess sem það líkti betur eftir vinnslusögu svæðisins, þ.e. breytingum í vermi, þrýstingi og rennslu vinnsluholanna. Þetta líkan yrði síðan notað við gerð vinnsluspáa fyrir svæðið.

Athuga þarf fleiri vinnslutilfelli í samræmi við óskir Landsvirkjunar, en eins og fram hefur komið hefur vinnslustýring svæðisins afgerandi áhrif á endingartíma þess. Fyrirliggjandi reikningar sýna að breyting úr stöðugri vinnslu í vinnslu með þriggja mánaða sumarhléum lengir endingu svæðisins minnst sjöfalt. Því þarf að leggja áherslu á að kanna hagkvæmustu skiptinguna milli vinnslu og hvíldar, auk áhrifa af niðurdælingu þannig að sem best nýting fái úr jarðhitasvæðinu.

## HEIMLDIR

Ásgrímur Guðmundsson og Hilmar Sigvaldason, 1982a: Hóla KJ-21. Borun frá 0-293 m. OS-822118/JHD-34 B,

14s.

Ásgrímur Guðmundsson, Benedikt Steingrímsson, Guðmundur Ó. Friðleifsson, Hjörtur Tryggvason og Ómar Sigurðsson, 1982b: Krafla, hola KJ-21. Borun vinnsluhluta holunnar, frá 293 m til 1200 m. OS-82119/JHD-35 B, 19s.

Ásgrímur Guðmundsson, Dagbjartur Sigursteinsson, Guðjón Guðmundsson, Guðmundur Ó. Friðleifsson og Hjörtur Tryggvason, 1983a: Krafla, hola KJ-22. Borun fyrir vinnslufóðringu, frá 198 m til 567 m. OS-83070/JHD-20 B.

Ásgrímur Guðmundsson, Benedikt S. Steingrímsson, Dagbjartur Sigursteinsson, Guðjón Guðmundsson, Guðmundur Ó. Friðleifsson, Hjörtur Tryggvason og Ómar Sigurðsson, 1983b: Krafla, hola KJ-22. Borun vinnsluhluta holunnar, frá 567 m til 1877 m. OS-83071/JHD-22 B.

Ásgrímur Guðmundsson, Dagbjartur Sigursteinsson, Hilmar Sigvaldason, Hjörtur Tryggvason og Sigurður Benediktsson, 1983c: Krafla, hola KJ-23. Borun frá 70 m í 196 m og steyping 13 3/8" fóðringar. OS-83079/JHD-25 B.

Ásgrímur Guðmundsson, Benedikt S. Steingrímsson, Dagbjartur Sigursteinsson, Guðni Guðmundsson, Hjörtur Tryggvason og Sigurður Benediktsson, 1983d: Krafla, hola KJ-23. Borun frá 196 m í 539 m og steyping 9 5/8" fóðringar. OS-83080/JHD-26 B.

Ásgrímur Guðmundsson, Benedikt S. Steingrímsson, Guðjón Guðmundsson, Guðmundur Ó. Friðleifsson, Hilmar Sigvaldason, Hjörtur Tryggvason og Ómar Sigurðsson, 1983e: Krafla, hola KJ-23. Borun vinnsluhluta holunnar. OS-83082/JHD-27 B.

Benedikt Steingrímsson og Halldór Ármannsson, 1984: Krafla. Um

niðurdælingu affallsvatns á Hvíthóla-  
svæði. OS-84026/JHD-08 B.

Berkeley, California, U.S.A.

Benedikt Steingrímsson, Halldór Ármannsson og Jón Benjamínsson, 1983: Krafla. Hóla KJ-21. Upphitun, upphleyping og blástur. OS-83013/JHD-03 B, 35s.

Benedikt Steingrímsson, Ásgrímur Guðmundsson, Guðjón Guðmundsson, Guðmundur Ó. Friðleifsson, Helga Tulinius og Ómar Sigurðsson, 1984: Krafla, hóla KJ-23. Borun og rannsóknir. Lokaskýrsla. OS-84032/JHD-03, unnið fyrir Rafmagnsveitur ríkisins - Kröfluvirkjun.

Guðmundur S. Böðvarsson, Karsten Pruess, Valgarður Stefánsson og Einar T. Elíasson, 1984: The Krafla Geothermal Field, Iceland: 2. The Natural State of the System. Water Resources Research, Vol 20, No 11, p 1531-1544.

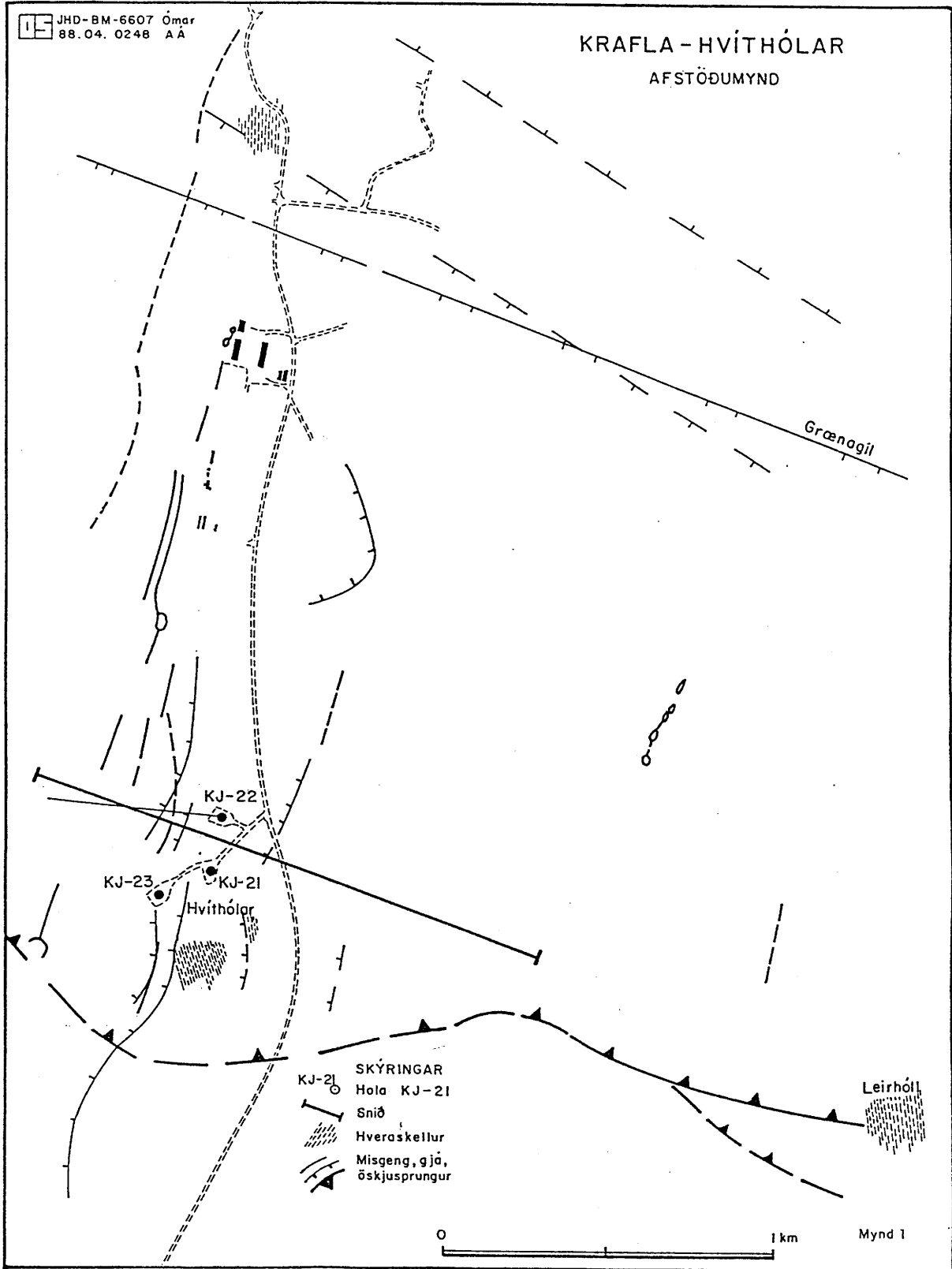
Guðmundur S. Böðvarsson, 1987: Líkanreikningar fyrir jarðhitakerfi Nesjavalla. I. The Nesjavellir Geothermal Field, Iceland. Prepared for The Reykjavík Municipal Heating service, Reykjavík, Iceland.

Gunnar V. Johnsen, 1984: Þyngdarmælingar um Hvíthóla 1983: OS-84045/JHD-12 B.

Halldór Ármannsson og Benedikt Steingrímsson, 1984: Krafla. Hóla KJ-22. Upphitun, upphleyping og blástur. OS-84008/JHD-02 B.

Knútur Árnason, Brynjólfur Eyjólfsson, Karl Gunnarsson, Kristján Sæmundsson og Axel Björnsson, 1984: Krafla - Hvíthólar, Jarðfræði- og jarðeðlisfræðileg könnun 1983. OS-84033/JHD-04. Unnið fyrir Rafmagnsveitur ríkisins - Kröfluvirkjun.

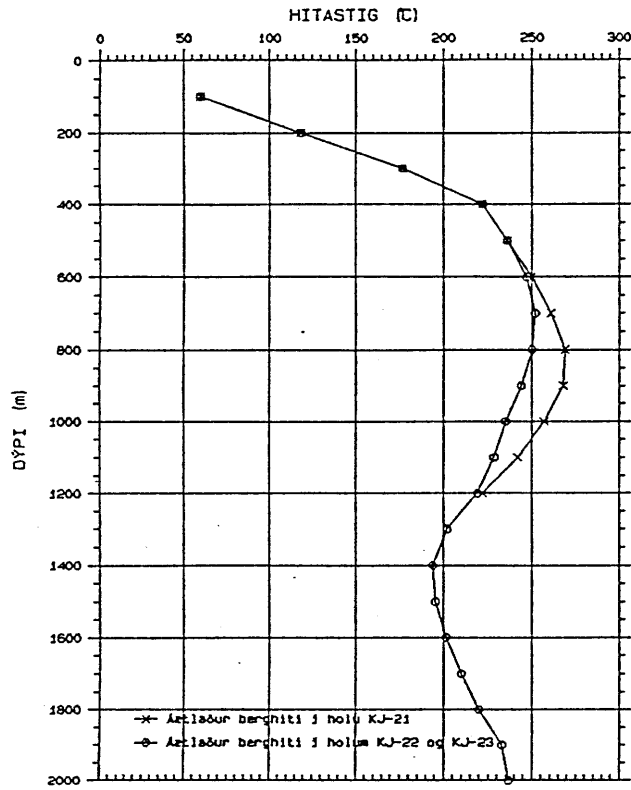
Pruess, K., Schroeder, R. C., 1980. SHAFT-79 User's Manual. LBL-10861 Lawrence Berkeley Laboratory,



Mynd 1 Afstöðumynd af Hvíthólasvæðinu.

### Krafla - Hvíthólar Berghiti

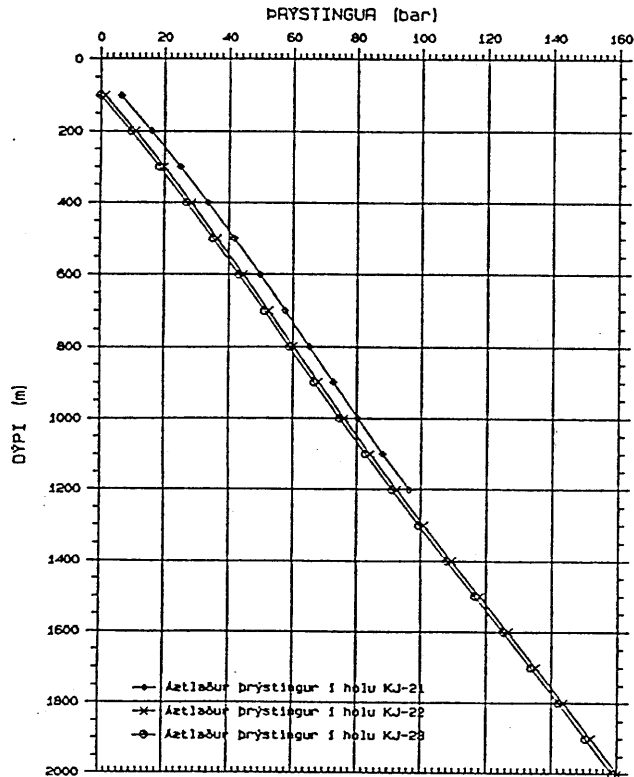
JHD-JED-6607. HTul.  
87.04. 0224. T



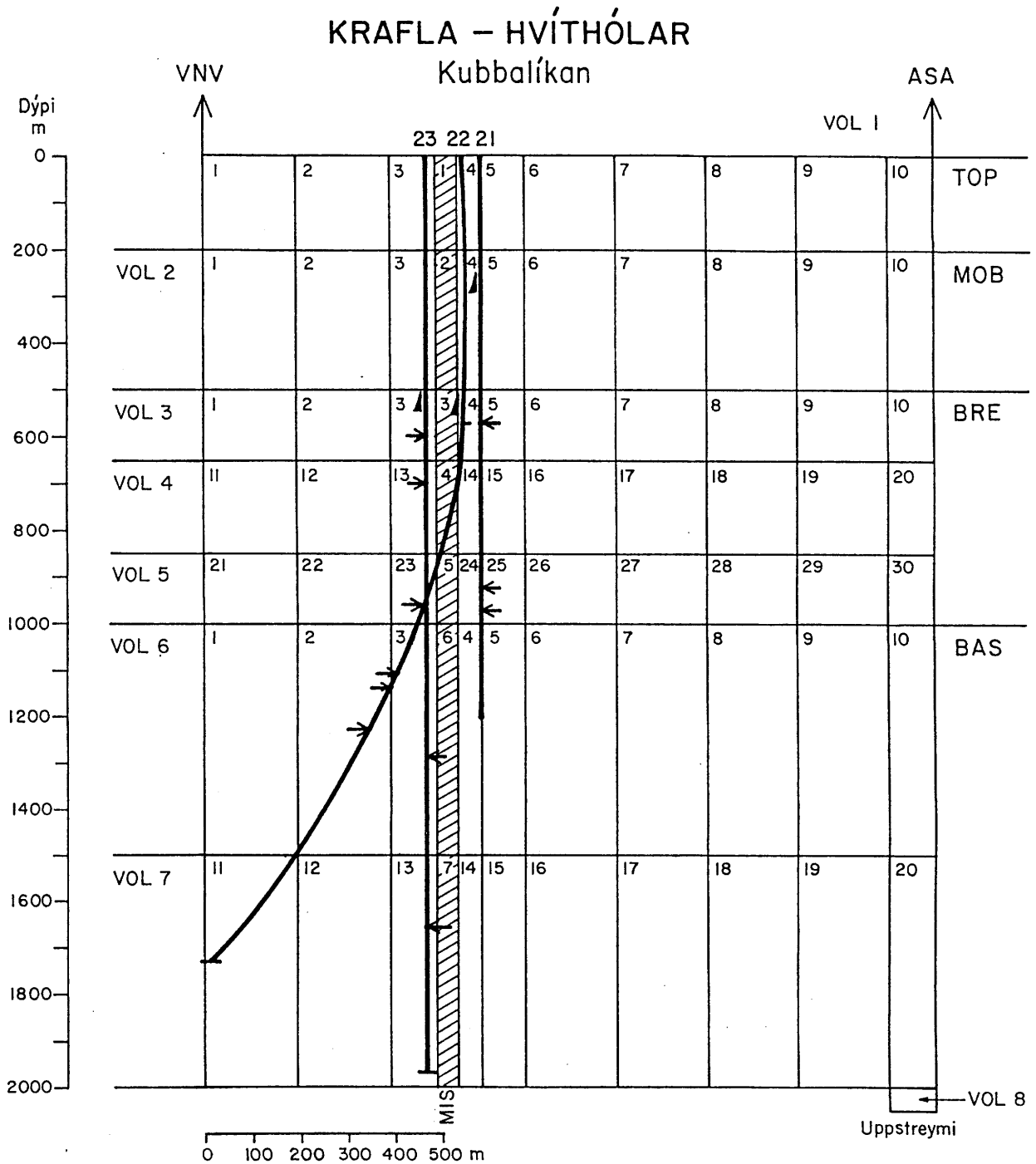
Mynd 2 Áætlaður berghiti út frá mælingum í holum KJ-21, KJ-22 og KJ-23.


### Krafla - Hvíthólar Upphafsprýstingur

JHD-JED-6607. HTul.  
88.04. 0225. T



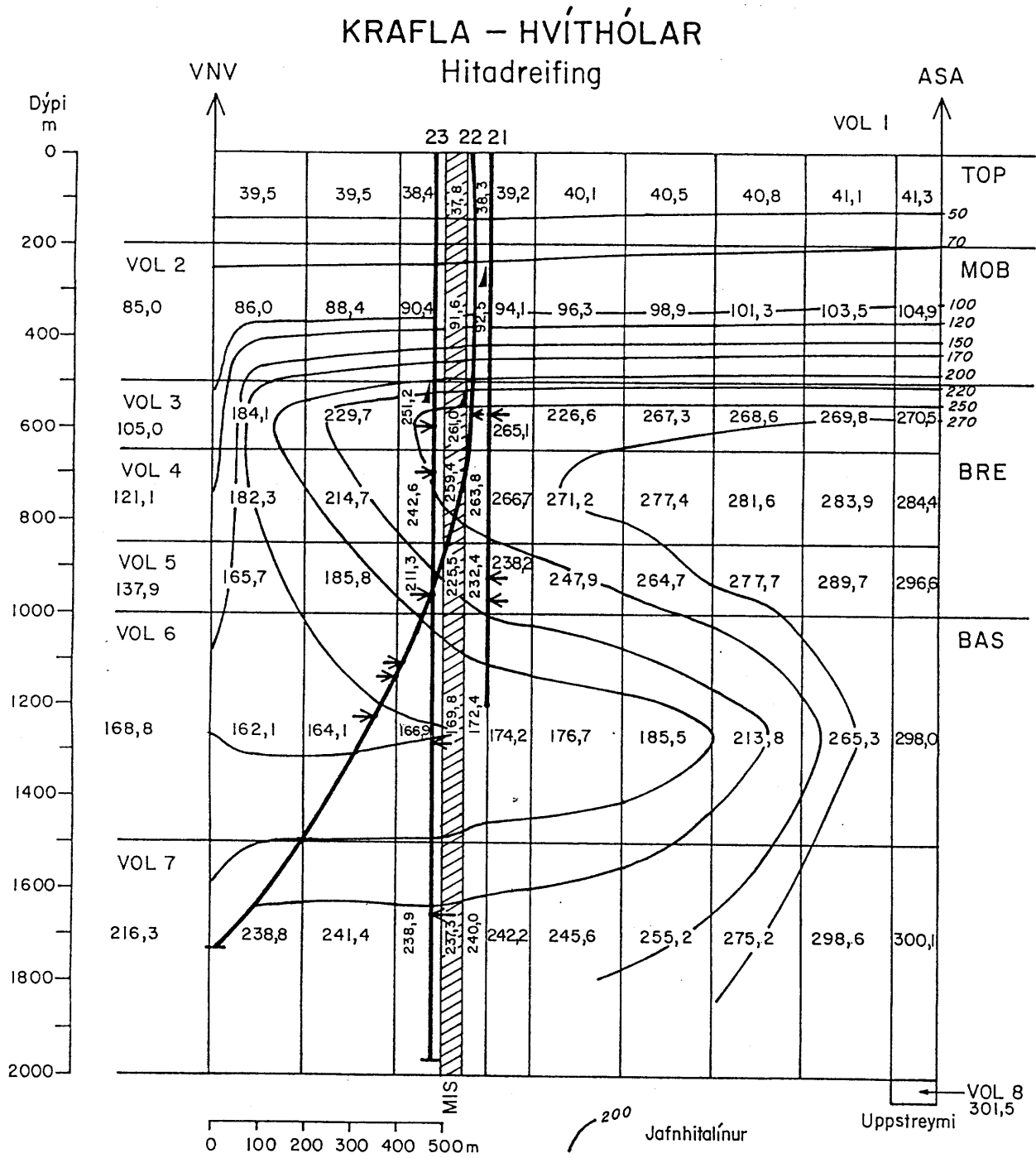
Mynd 3 Áætlaður upphafsprýstingur í holum KJ-21, KJ-22 og KJ-23.



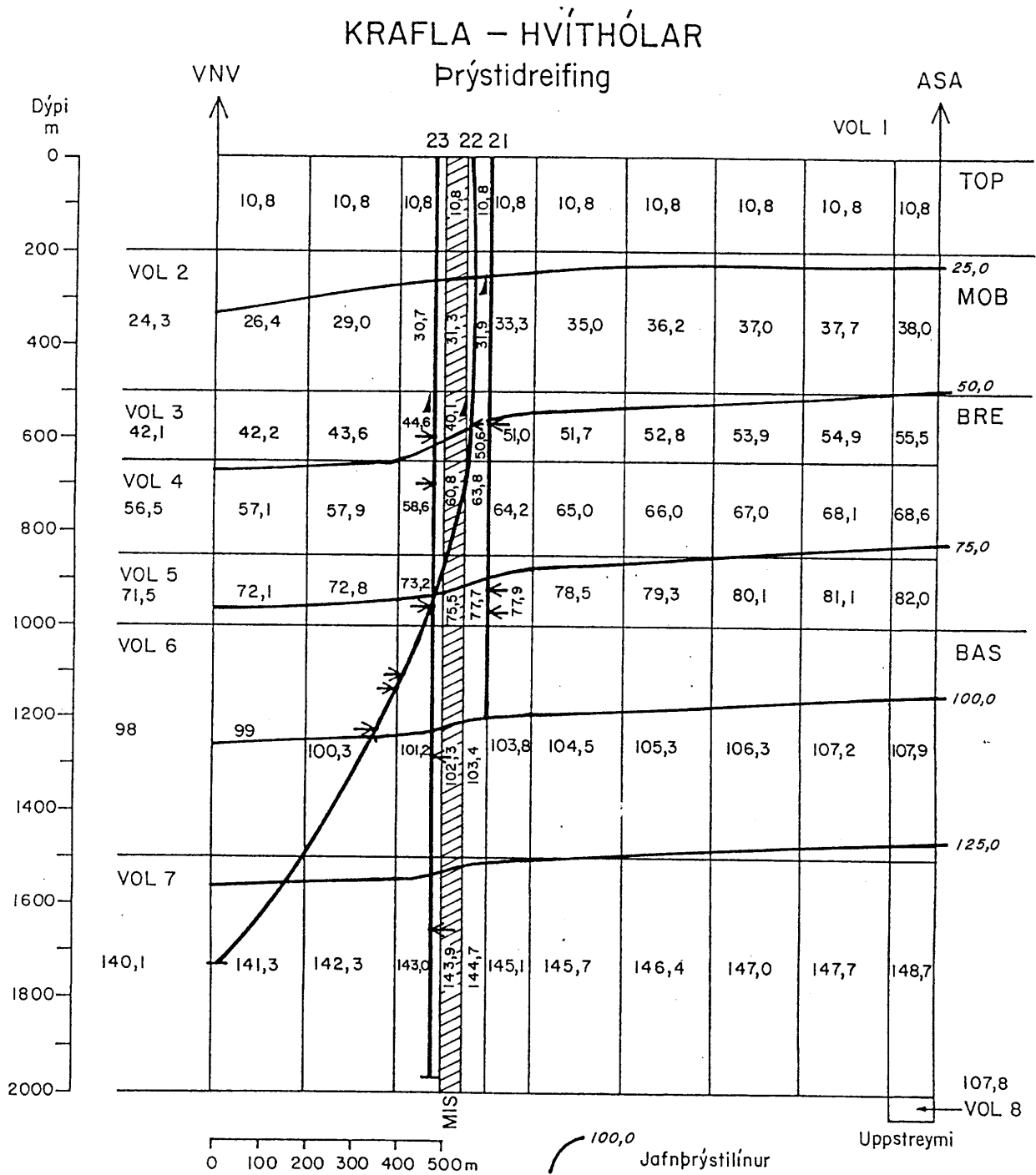
 JHD-BM-6607-HTul.  
88-03.-0136-Gyða

Mynd 4 X-Z kubbalíkanið.





Mynd 5 Reiknuð hitadreifing á Hvíthólasvæðinu fyrir vinnslu.

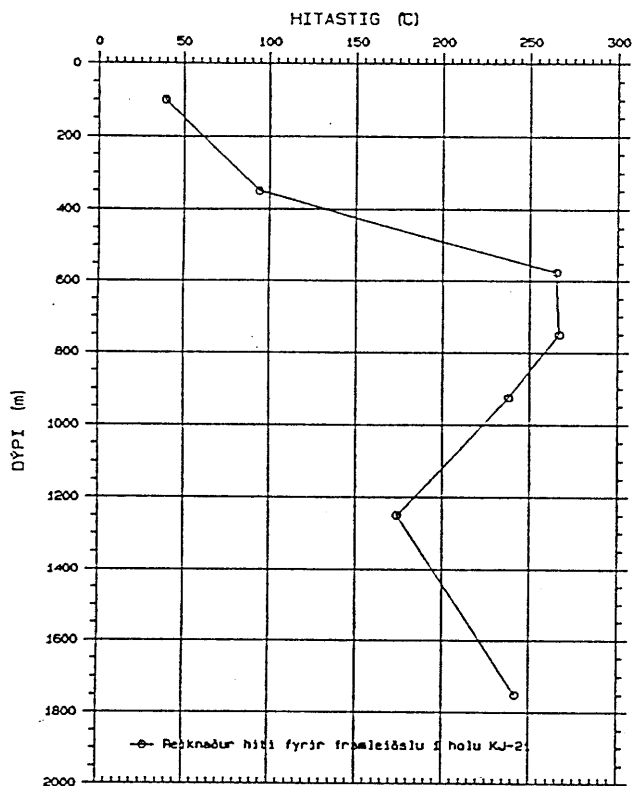


JHD-BM-6607-H.Tul.  
88.-04-0250-Gyða

Mynd 6 Reiknuð þrýstidreifing á Hvíthólasvæðinu fyrir vinnslu.

### Krafla hola KJ-21

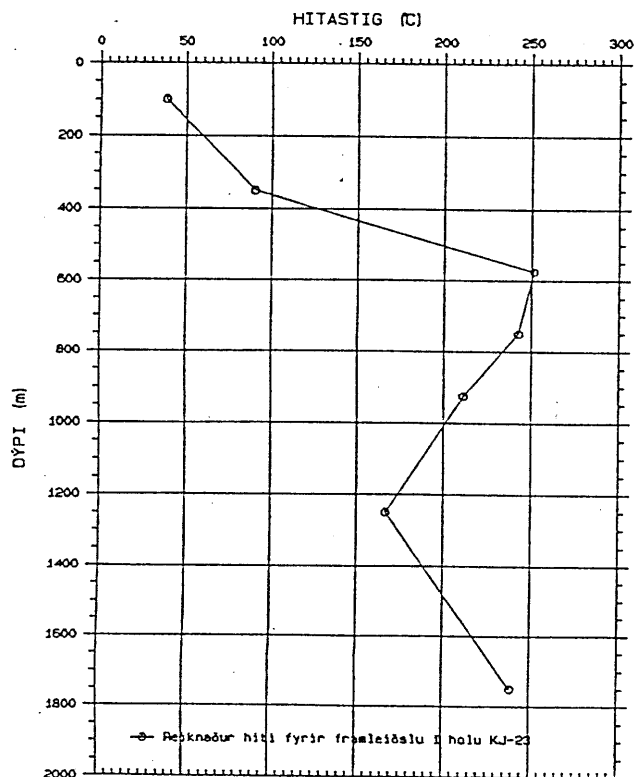
JHD-JED-6607. HTul.  
88.04. 0226. T



Mynd 7 Reiknaður berghiti í KJ-21 fyrir vinnslu.

### Krafla hola KJ-23

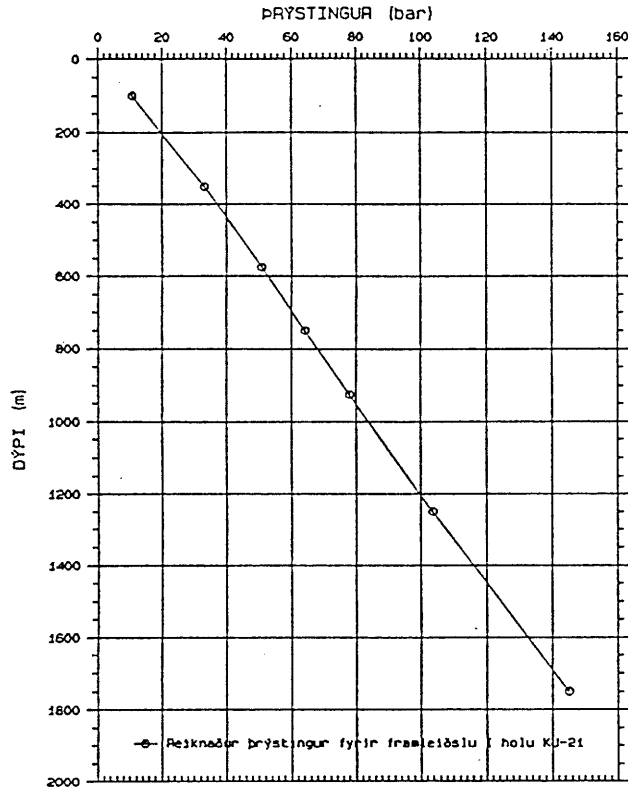
JHD-JED-6607. HTul.  
88.04. 0227. T



Mynd 8 Reiknaður berghiti í KJ-23 fyrir vinnslu.

### Krafla hola KJ-21 Reiknaður þrýstingur

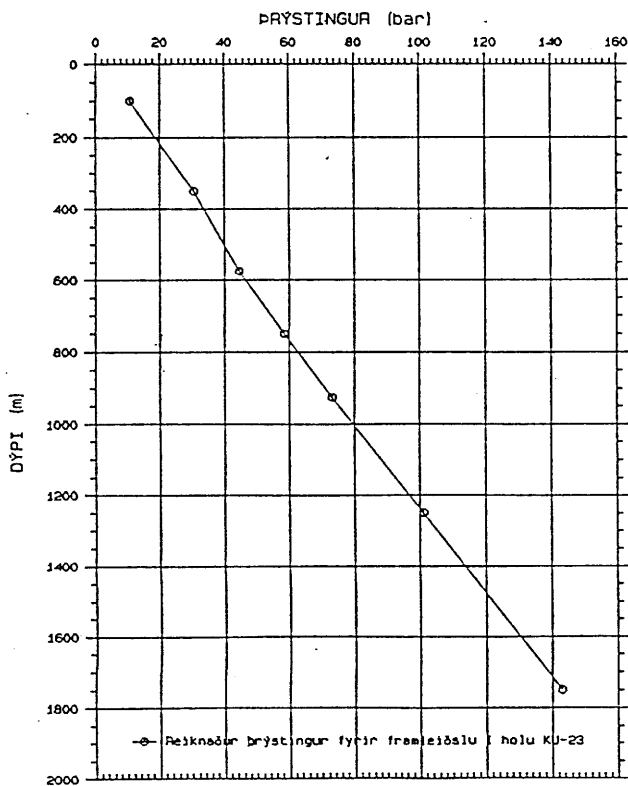
JHD-JED-6607. HTul.  
88.04.0228. T



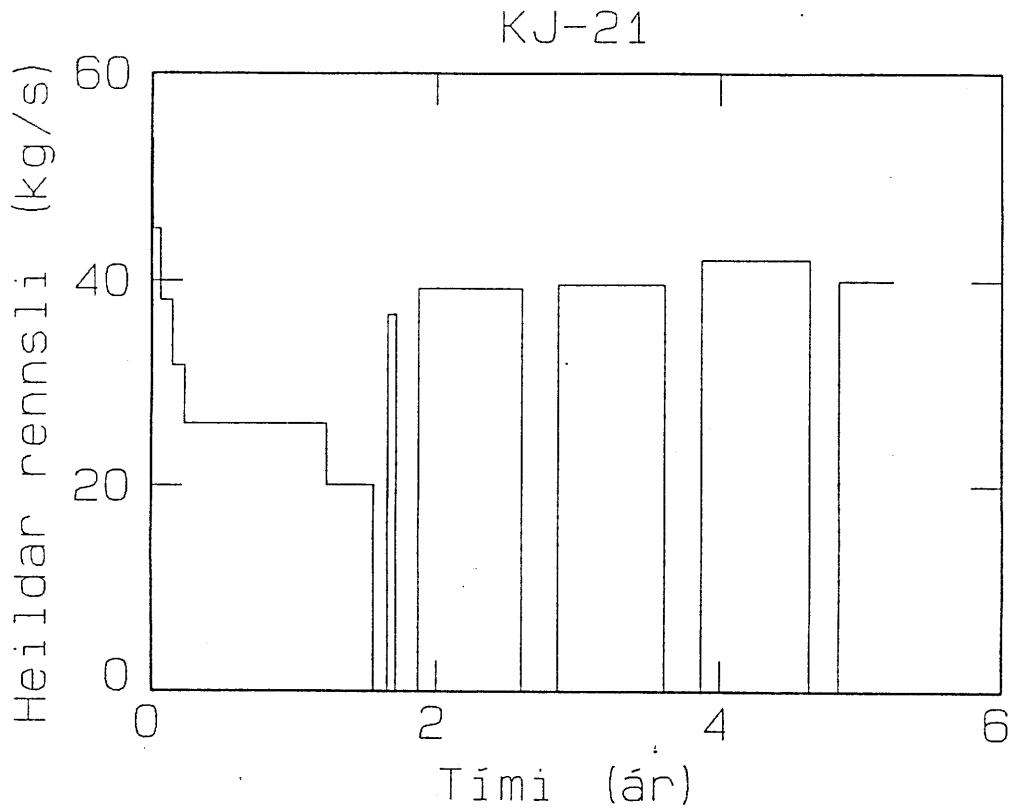
Mynd 9 Reiknaður þrýstingur í KJ-21 fyrir vinnslu.

### Krafla hola KJ-23 Reiknaður þrýstingur

JHD-JED-6607. HTul.  
88.04.0229. T

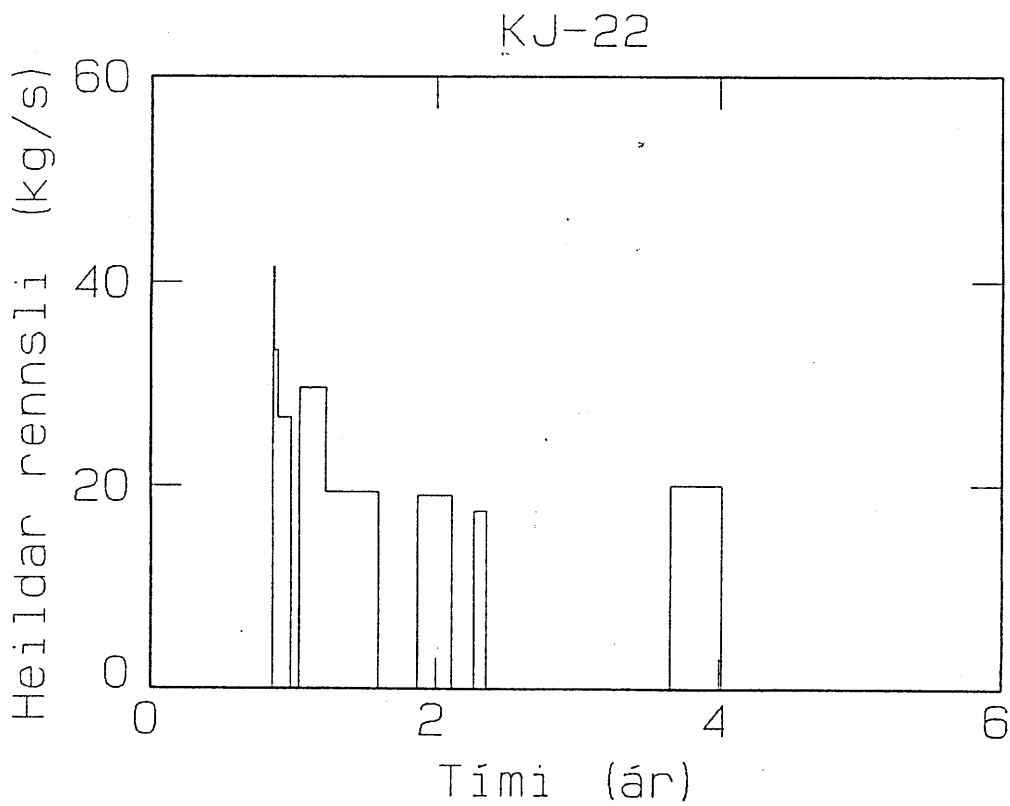


Mynd 10 Reiknaður þrýstingur í KJ-23 fyrir vinnslu.



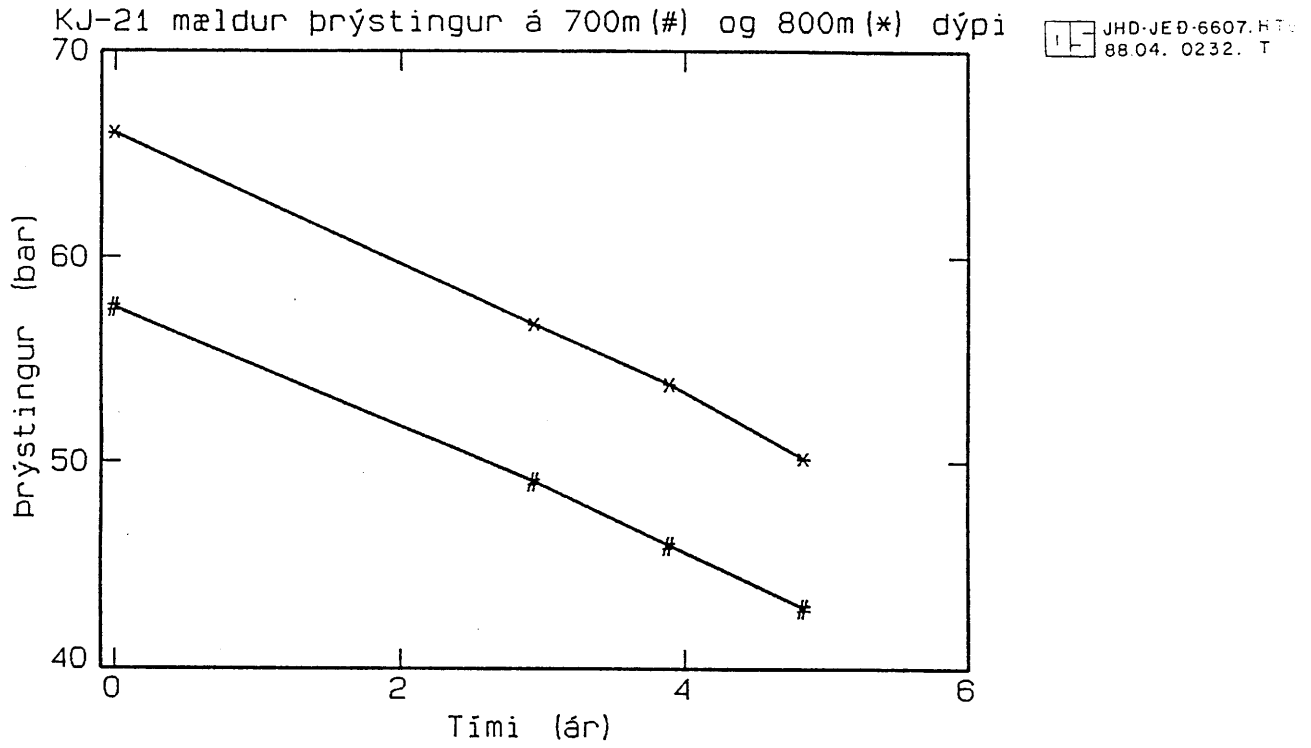
JHD-JED-6607. HTul.  
88.04. 0230. T

Mynd 11 Vinnslusaga KJ-21 tímabilið 1982.10.09 - 1987.12.31.

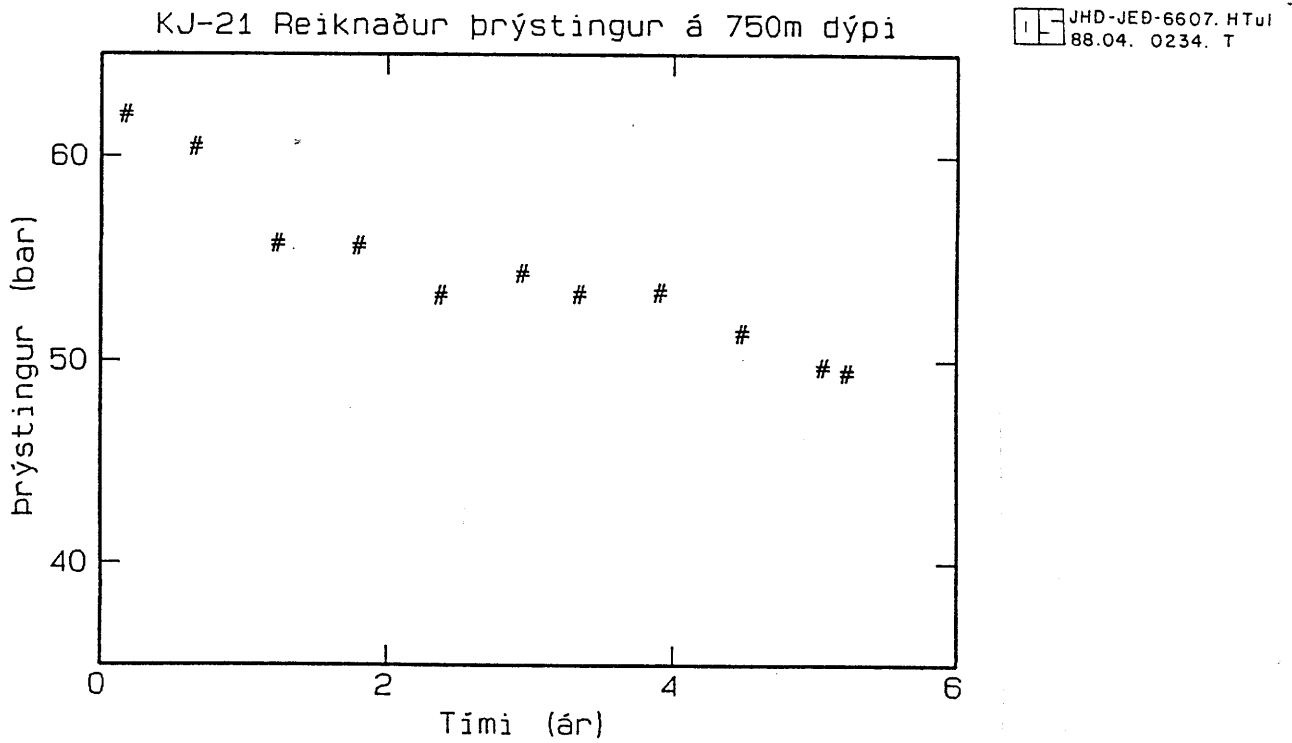


JHD-JED-6607. HTul.  
88.04. 0231. T

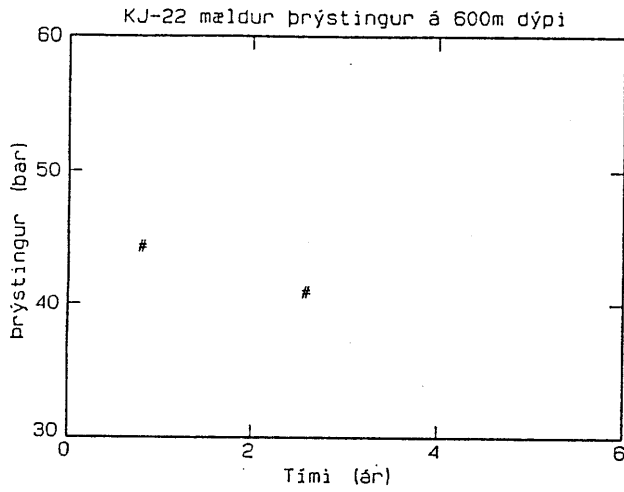
Mynd 12 Vinnslusaga KJ-22 tímabilið 1982.10.09 (1983.08.19) - 1987.12.31.



Mynd 13 Mældur þrýtingur í holu KJ-21 á 700 m og 800 m dýpi frá 1982.10.09 -1987.12.31.

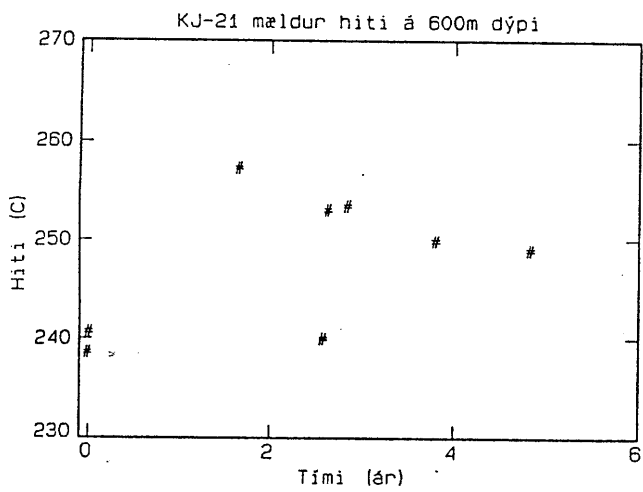


Mynd 14 Reiknaður þrýstingur á 750 m dýpi í holu KJ-21.



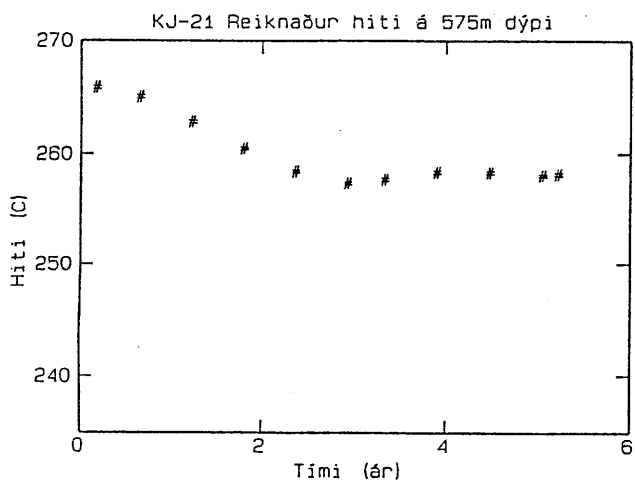
JHD-JED-6607.HTul.  
88.04. 0233. T

Mynd 15 Mældur þrýstingur í holu KJ-22 á 600 m dýpi frá 1982.10.09 (1983.08.19) - 1987.12.31.



JHD-JED-6607.HTul.  
88.04. 0235. T

Mynd 16 Mældur hiti í holu KJ-21 á 600 m dýpi.

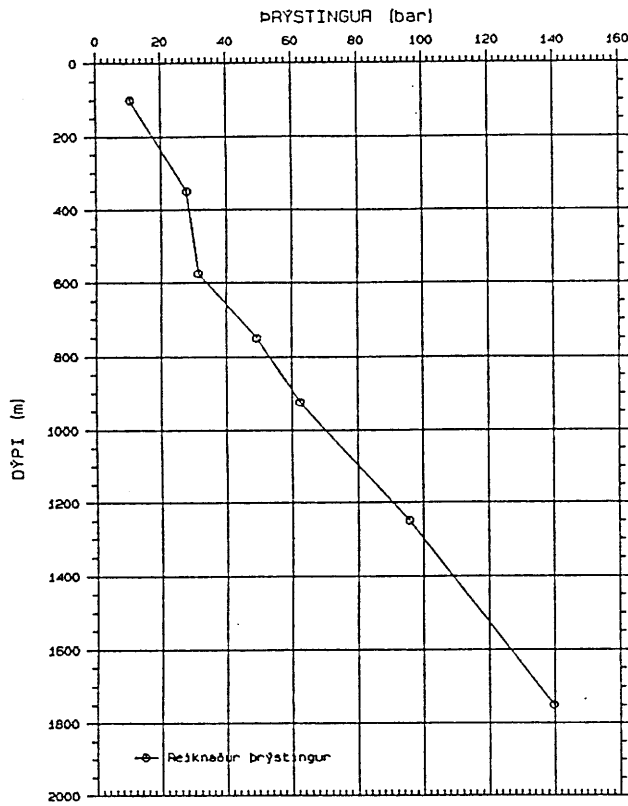


JHD-JED-6607.HTul.  
88.04. 0236. T

Mynd 17 Reiknaður hiti í holu KJ-21 á 575 m dýpi.

Krafla hola KJ-21  
Reiknaður þrýstingur 31.12.87

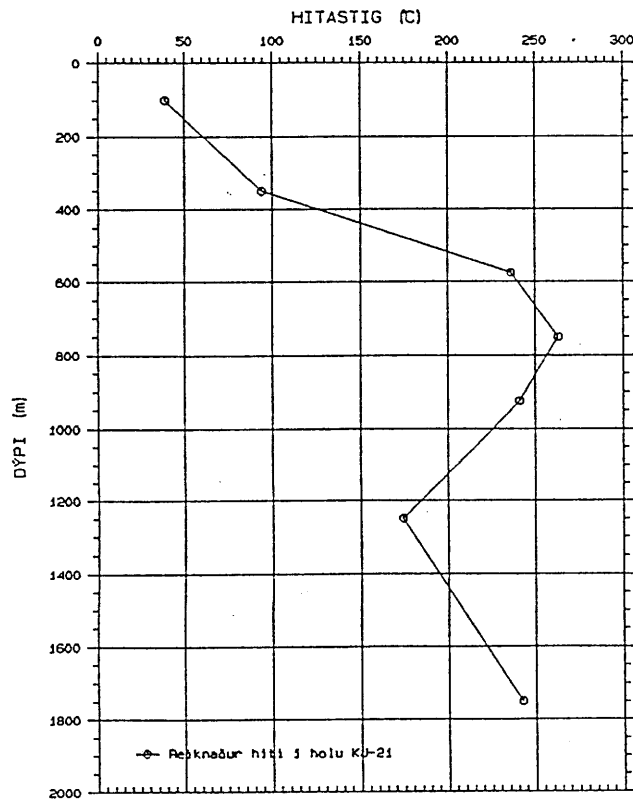
JHD-JED-6607.HTul.  
88.04. 0237. T



Mynd 18 Reiknaður þrýstingur 31.12.87 í holu KJ-21.

Krafla hola KJ-21  
Reiknaður hiti

JHD-JED-6607.HTul.  
88.04. 0239. T

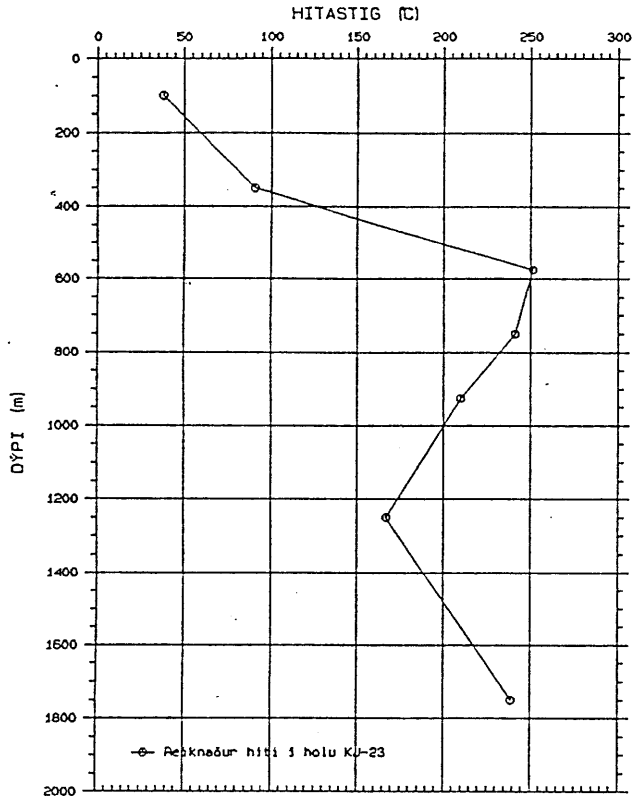


Mynd 19 Reiknaður hiti 31.12.87 í holu KJ-21.

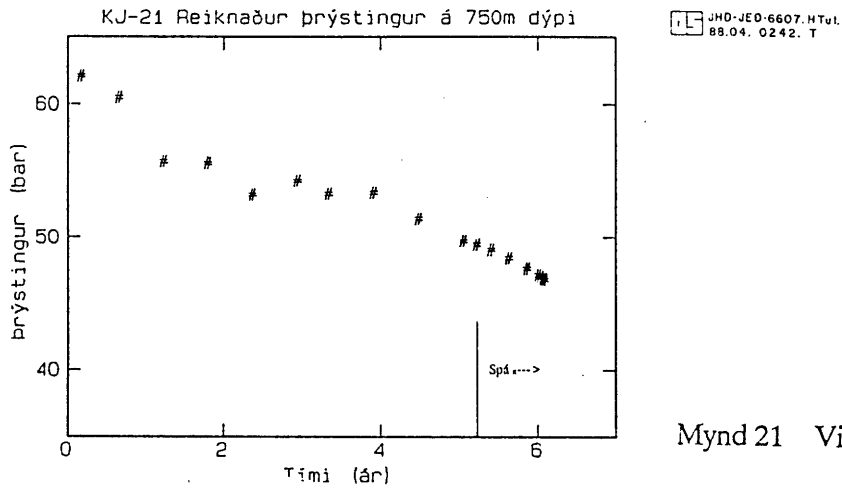


Krafla hola KJ-23  
Reiknaður hiti 31.12.87

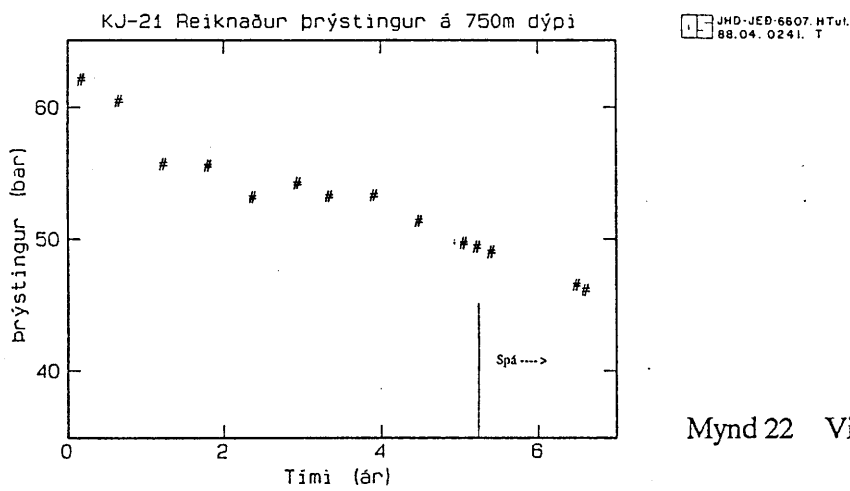
JHD-JED-6607. HTul.  
88.04.0238. T



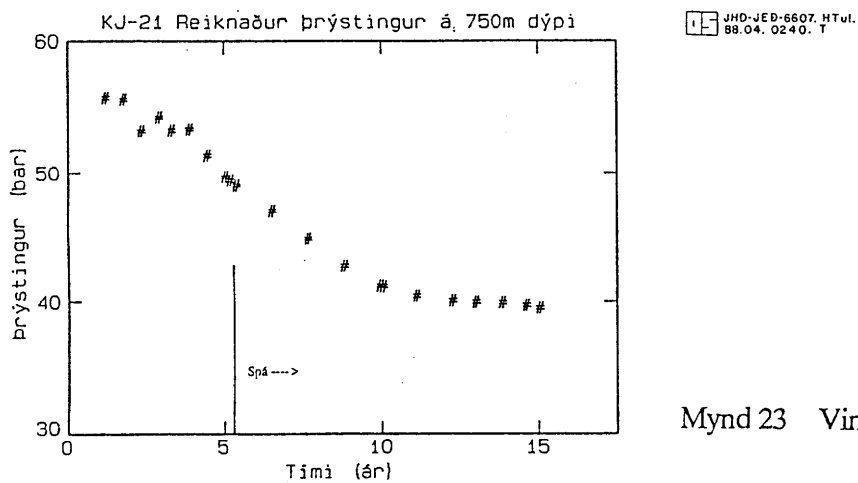
Mynd 20 Reiknaður hiti 31.12.87 í holu KJ-23.



Mynd 21 Vinnsuspá 1.



Mynd 22 Vinnsuspá 2.



Mynd 23 Vinnsuspá 3.