



ORKUSTOFNUN  
Jarðhitadeild

**Jarðhitakerfi Hvíthóla við Kröflu  
Líkanreikningar**

Ómar Sigurðsson

OS-92008/JHD-02 B

Febrúar 1992



**ORKUSTOFNUN**  
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verknr. 512000

**Jarðhitakerfi Hvíthóla við Kröflu**  
**Líkanreikningar**

Ómar Sigurðsson

OS-92008/JHD-02 B

Febrúar 1992

## EFNISYFIRLIT

1. INNGANGUR	3
2. FORRITID TOUGH	4
3. HVÍTHÓLASVÆÐIÐ	4
4. AÐDRAGANDI LÍKANGERÐAR	7
5. GERÐ ÞRÍVÍÐS REIKNILÍKANS	7
6. RANDSKILYRÐI OG KEYRSLUTÍMI	12
7. NÁTTÚRULEGT ÁSTAND HVÍTHÓLASVÆÐISINS	13
8. VINNSLUSAGA HVÍTHÓLA	21
9. NIÐURSTÖÐUR	26
10. ENDURBÆTUR REIKNILÍKANS HEIMILDIR	26 27

## TÖFLUSKRÁ

1. Grophlutfall og lekt	10
2. Innri skipting líkananna	14

## MYNDASKRÁ

1. Afstöðumynd af Hvíthólasvæðinu	6
2. Áætlaður berghiti við holur KJ-21, KJ-22 og KJ-23	7
3. Áætlaður upphafsþrýstingur við holur KJ-21, KJ-22 og KJ-23	7
4. Bútun og lektardreifing móbergssyrpu á 200-500 m dýpi	10
5. Bútun og lektardreifing breksúsyrpu á 500-750 m dýpi	11
6. Bútun og lektardreifing breksúsyrpu á 750-1000 m dýpi	11
7. Bútun og lektardreifing basaltsyrpu á 1000-1500 m dýpi	12
8. Bútun og lektardreifing basaltsyrpu á 1500-2000 m dýpi	12
9. Reiknuð hita- og þrýstingsdreifing á 350 m dýpi fyrir vinnslu	16
10. Reiknuð hita- og þrýstingsdreifing á 625 m dýpi fyrir vinnslu	16
11. Reiknuð gufumettun á 625 m dýpi fyrir vinnslu	17
12. Reiknuð hita- og þrýstingsdreifing ásamt gufumettun á 875 m dýpi fyrir vinnslu	17
13. Reiknuð hita- og þrýstingsdreifing ásamt gufumettun á 1250 m dýpi fyrir vinnslu	18
14. Reiknuð hita- og þrýstingsdreifing ásamt gufumettun á 1750 m dýpi fyrir vinnslu	18
15. Samanburður á áætluðum og reiknuðum berghita við holu KJ-21	19
16. Samanburður á áætluðum og reiknuðum upphafsþrýstingi við holu KJ-21	19
17. Samanburður á áætluðum og reiknuðum berghita við holu KJ-22	20
18. Samanburður á áætluðum og reiknuðum upphafsþrýstingi við holu KJ-22	20
19. Samanburður á áætluðum og reiknuðum berghita við holu KJ-23	21
20. Samanburður á áætluðum og reiknuðum upphafsþrýstingi við holu KJ-23	21
21. Vinnsla úr holu KJ-21	23
22. Vinnsla úr holu KJ-22	23
23. Nálgun líkans við vermi holu KJ-21	24
24. Nálgun líkans við þrýsting á 625 m og 875 m dýpi í holu KJ-21	24
25. Nálgun líkans við hita á 625 m og 875 m dýpi í holu KJ-21	25
26. Nálgun líkans við vermi holu KJ-22	25
27. Nálgun líkans við þrýsting á 625 m og 1250 m dýpi í holu KJ-22	26
28. Nálgun líkans við hita á 625 m og 1250 m dýpi í holu KJ-22	26

## 1. INNGANGUR

Snemma árs 1988 kom út skýrsla um hermireikninga fyrir jarðhitasvæðið við Hvíthóla (Helga Tulinius og Ómar Sigurðsson, 1988a). Í skýrslunni er lýst niðurstöðum tvívíðs reiknilíkans af jarðhitakerfinu þar og var afrakstur átaks til eflingar þekkingar í forðafræði innan Orkustofnunar, sem fram fór á árunum 1987 og 1988. Hermireikningarnir voru gerðir með forritinu SHAFT-79 (Pruess og Schroeder, 1980) og alfarið kostaðir af Orkustofnun.

Meðal niðurstaðna úr tvívíðu líkanreikningunum var að miðað við vinnslustýringu Hvíthólasvæðisins síðustu ár myndi jarðhitakerfið aðeins endast í um 10 ár. Vegna einfaldleika getur tvívíða líkanið ekki, nema að takmörkuðu leiti, tekið tillit til margátta aðstreymis að vinnslusvæði Hvíthóla og afkastamatið því líklega í lægra lagi. Hins vegar eru 10 ár skammur vinnslutími fyrir rekstur virkjunar, jafnvel þó gert sé ráð fyrir einhverjum skekkjumörkum í því mati. Landsvirkjun hafði því áhuga á að afköst Hvíthólasvæðisins yrðu könnuð frekar, en það kallaði á að breyta tvívíða líkaninu í þrívítt líkan. Tillögur og áætlun þar um voru settar fram síðla árs 1988 (Helga Tulinius og Ómar Sigurðsson, 1988b). Landsvirkjun samdi síðan við Orkustofnun um að verkið skyldi unnið fyrri hluta árs 1990.

Í millitíðinni, eða á árinu 1989, eignaðist Orkustofnun forritið TOUGH (K. Pruess, 1986), sem leysti af hólmi forritið SHAFT-79 við hermireikninga fyrir sjóðandi jarðhitakerfi. Síðla vetrar 1989 var farið að keyra forritið TOUGH á tölvu Orkustofnunar fyrir prófunardæmi sem fylgdu því. Landsvirkjun óskaði eftir að niðurstöður þrívíðra líkanreikninga af Hvíthólasvæðinu lægju fyrir í sumarbyrjun 1990 og verkinu skyldi því hraðað eins og kostur væri á. Fyrri hluta árs 1990 var höfundur skýrslunnar, sem var með við gerð tvívíða líkansins, bundinn við erlend verkefni og tók því lítinn þátt í gerð þrívíða líkansins eða keyrslu þess. Fljótlega í byrjun verksins komu hins vegar í ljós fjölmörg vandamál, sem rekja mátti beint til forritsins, við keyrslu raunverulegs líkans í fullri stærð. Þessi vandamál voru ekki yfirstigin fyrr en um sumarið 1990.

Tafir voru orðnar á verkinu og ljóst að Landsvirkjun fengi ekki niðurstöður til að byggja aðgerðir á sumarið 1990. Verkinu miðaði hægt þrátt fyrir að erlendir sérfræðingur legði um sumarið fram ráðgjöf við líkangerðina og keyrslu þess. Greinarhöfundur var ekki sammála uppbyggingu þrívíða líkansins fyrir jarðhitakerfi Hvíthóla og gerði því í nóvember 1990 annað reiknilíkan hér eftir nefnt líkan (b), sem síðan lá í geymslu fram í miðjan febrúar 1991. Um miðjan febrúar 1991 kom greinarhöfundur síðan inn í verkefnið um þrívíða líkangerð af Hvíthólasvæðinu. Var þá lokið við gerð líkans (b), sem lýst verður í þessari skýrslu. Líkan (b) var síðan keyrt samhliða hinu líkaninu, sem hér verður kallað líkan (a). Í apríl 1991 var líkan (a) valið til að fá niðurstöður um afköst Hvíthólasvæðisins fyrir sumarið, en það þótti þá herma betur seinni hluta vinnslusögu svæðisins, heldur en líkan (b) (Helga Tulinius og Ómar Sigurðsson, 1991). Reikningslegar niðurstöður líkans (a) lágu svo fyrir í maí 1991.

Í þessari skýrslu er lýst gerð þrívíðs reiknilíkans af jarðhitakerfinu við Hvíthóla. Lýst er að nokkru mismuninum milli þessa líkans (líkan b) og líkans (a) sem lýst er í skýrslu Helgu Tulinius og Ómars Sigurðssonar 1991, en hann er að mestu fólgin í meðhöndlun randskilyrða í líkónunum. Þá er greint frá tölvukeyrslum líkans (b) og þeim niðurstöðum sem það hafði skilað í maí 1991. Að lokum er minnst á nokkrar breytingar sem æskilegt væri að gera til að bæta reiknilíkanið.

## 2. FORRITIÐ TOUGH

Forritið TOUGH er svipað að ásýnd og forritið SHAFT-79, sem notað var til hermunar tvíviða líkansins af Hvíthólum. Innri gerð þess er þó að mörgu ólík. Forritið er byggt upp af fjölda undirforrita sem vinna ákveðna reikninga. Sum þessara undirforrita eru þau sömu eða svipuð undirforritum forritsins SHAFT-79. Einnig er inntaks- og úttaksskrá þeirra svipuð þannig að ásýnd þeirra er svipuð. Hins vegar voru ástandsstærðir vatns og gufu hafðar í töflu, sem forritið SHAFT-79 fletti stöðugt upp í við reikningana. Forritið SHAFT-79 tók því mikið diskarými á tölvu og töfluuppfluttunin dró úr reiknihraða þess. Í forritinu TOUGH, en nafn þess er stytting úr orðunum "Transport Of Unsaturated Groundwater and Heat", er undirforrit sem notar jöfnur til að reikna ástandsstærðir vatns og gufu með sömu nákvæmni og gefin er í gufutöflum (International Formulation Committee, 1967). Í raun er forritið TOUGH sérhæfð útgáfa af forritinu MULKOM til hermunar á vatnskerfum. Aðalmunurinn er að forritið MULKOM inniheldur undirforrit með ástandslíkingum fyrir margskonar vökvakerfi. Þá býður forritið TOUGH upp á reikninga fyrir ýmis sértílfelli, sem ekki var kostur á með forritinu SHAFT-79. Má þar nefna reikninga á vatnsstreymi um opið vatnskerfi, en þar er sérstaklega nauðsynlegt að taka tillit til hárpípukrafta, þar sem loft og vatn mætast. Þá eru gefnir ýmsir möguleikar á meðhöndlun hlutlektar vatns og gufu, og að láta rennsli borholu stjórna af föstum botnþrýstingi.

Í forritinu TOUGH er, eins og í forritinu SHAFT-79, efninu skipt upp í misstóra búta, sem hver um sig er meðhöndlaður sem gropið efni. Í raun geta holrýmin í jarðlögunum við Hvíthóla að mestu verið í stórum og smáum sprungum. Lektin er þá mest um sprungurnar, en vatnsrýmdin er hins vegar í berginu sem er miklu minna lekt. Það hefur hins vegar sýnt sig við hermireikninga á öðrum svæðum (Leirbotnar og Suðurhlíðar Kröflu, Nesjavellir o.fl.), að hægt er að fá viðunandi samræmi milli mældra gagna og reikninga líkans fyrir gropið efni eins og hér er notað (K. Pruess o.fl., 1984; Guðmundur S. Böðvarsson 1987). Ástæðan er sú að með auknum þéttleika smásprungna innan hvers búts nálgast eiginleikar hans eiginleika gropins bergs, þar sem holrýminu er nokkuð jafn dreift um bergmassann (J.C.S. Long o.fl., 1982). Forrit fyrir gropið efni eru yfirleitt einfaldari í notkun og reikningar með þeim því auðveldari, hraðvirkaðri og ódýrari.

Þá er sú einföldun gerð í þeirri útgáfu forritsins TOUGH sem nú er í notkun hjá Orkustofnun, að vökvinn í jarðhitakerfinu er meðhöndlaður sem hreint vatn. Þannig er ekki tekið tillit til gasa eða uppleystra efna í jarðhitavatninu. Í jarðhitavatninu frá Hvíthólasvæðinu er gasstyrkur fremur lítill þannig að áhrif þeirra á eðliseiginleika vatnsins ættu að vera hverfandi og sú einföldun því réttlætanager. Áhrifum uppleystra efna er oftast hægt að sleppa, þar sem í flestum tilvikum hafa þau lítil áhrif á þá eiginleika vatns sem unnið er með í hermireikningum. Það er ekki fyrr en magn uppleystra salta og annarra efna verður verulegt (>50000 ppm) að sú einföldun hættir að gilda.

## 3. HVÍTHÓLASVÆÐIÐ

Þrjár holur voru boraðar á Hvíthólasvæðinu á árunum 1982 og 1983 þ.e. holur KJ-21, KJ-22 og KJ-23 (mynd 1). Hóla KJ-21 er 1200 m djúp og sker nokkrar vatnsæðar. Þær stærstu eru á 630 m dýpi og kringum 975 m dýpi. Holan hefur gefið um 40 kg/s í heildarrennsli og er áætlað að um 60-70% rennslisins komi úr efri æðinni, en 30-40% úr þeirri neðri. Hóla KJ-22 var skáboruð til vesturs í 1877 m, sem svarar til um 1740 m raundýpis. Heildarhlíðrun holunnar miðað við holutopp er um 540 m við holubotn. Holan skar nokkrar æðar, þær helstu á 600 m, 960 m, 1270 m og 1750-1800 m. Stærstar eru taldar æðarnar í 600 m og 1270 m. Áætlað er að um

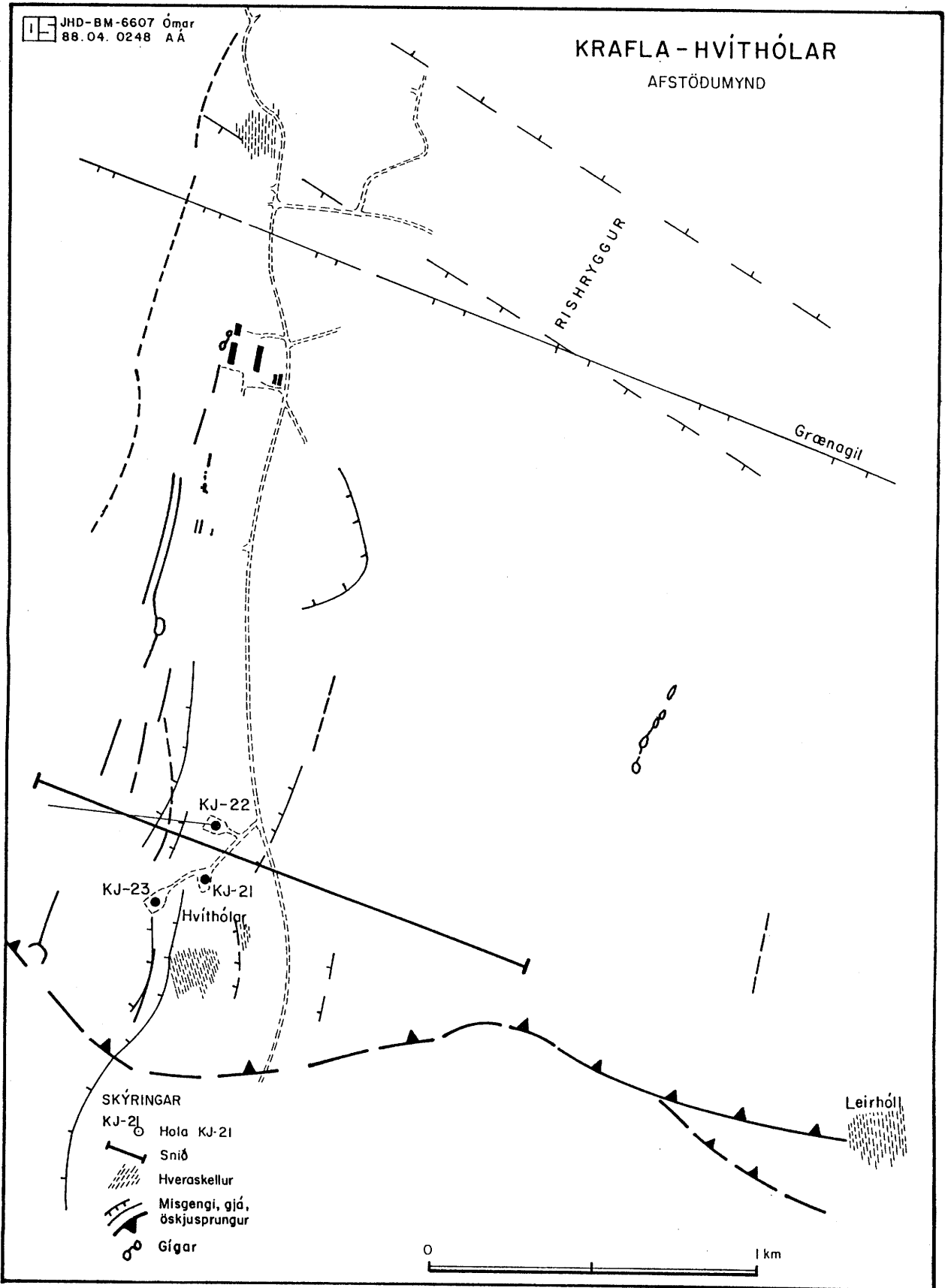
40% af heildarrennsli holunnar komi frá efstu æðunum og um 60% þess úr neðri æðunum, en heildarrennsli holunnar er um 20 kg/s. Engin framleiðsla hefur verið úr holu KJ-22 síðan síðla árs 1986. Hóla KJ-23 var boruð í 1968 m dýpi og skar fáar og lítt gæfar vatnsæðar. Helstu æðarnar eru á 600 m og 700 m dýpi, en of tregar fyrir virkjun holunnar. Hóla KJ-23 er staðsett vestan við gossprungu og misgengi, sem liggur um Hvíthólasvæðið, en hóla KJ-21 og efri hluti holu KJ-22 eru austan við það.

Áætlaður berghiti og upphafsþrýstingur við holur á Hvíthólasvæðinu er sýndur á myndum 2 og 3. Berghitinn við allar holurnar vex hratt niður á rúmlega 500 m dýpi og er hann svipaður við holur KJ-21 og KJ-22 niður á það dýpi, en heldur lægri við holu KJ-23. Berghiti við holu KJ-21 nær hámarki á um 600 m dýpi (262°C) og helst svipaður niður á tæplega 900 m dýpi, en þar lækkar hann og er kominn niður fyrir 220°C við holubotn. Berghiti við holu KJ-22 er svipaður og við holu KJ-21 niður á um 800 m dýpi, en þar lækkar hann er holan sveigir til vesturs. Á um 950 m dýpi sker hóla KJ-22 misgengi/sprungu, sem líklega virkar sem stemmir gagnvart vatnsrennsli, og fer út úr jarðhitakerfi Hvíthóla og í kaldara vatnskerfi tengt Leirhnjúksprungusveimnum. Samfara lækkar berghiti við holu KJ-22 mikið og nær lágmarki á um 1400 m dýpi, þar sem hiti er kominn niður fyrir 180°C. Berghiti við holu KJ-22 hækkar svo um nokkrar gráður niður til botns. Berghiti við holu KJ-23 sýnir svipaða hegðun og berghiti við holu KJ-21 en er nokkru lægri, enda holan rétt vestan misgengis/sprungu (stemmis) sem áður er nefnt. Neðan 1200 m dýpis heldur berghiti við holu KJ-23 áfram að lækka og nær lágmarki á um 1400 m dýpi, tæplega 195°C. Berghitinn hækkar síðan til botns í um 245 °C.

Nokkur þrýstingsmunur er milli holanna. Þrýstingurinn er hæstur í KJ-21 og um 7 bar lægri í KJ-23. Þetta þrýstifall er talið stafa af gossprungu og/eða misgengi, sem virki sem stemmir og liggur um Hvíthóla á milli hola KJ-21 og KJ-23 (mynd 3). Upphafsprýstingur holu KJ-22 er svipaður og í holu KJ-21 niður á um 700 m dýpi, en þar lækkar hann miðað við holu KJ-21 og nálgast þrýstiferil holu KJ-23. Eins og áður segir var hóla KJ-22 stefnuboruð til vesturs og sker hún gossprunguna á um 950 m dýpi. Holan sker fleiri misgengi/sprungur og virðist þrýstingur hækka aftur er holan dýpkar vestar inn í sprungusveiminn. Þegar þrýstimunurinn milli holanna er skoðaður ber að hafa hugfast að hóla KJ-21 var boruð fyrst og gæti framleiðsla úr henni haft áhrif til þrýstingslækkunar við hinar holur.

Hitaferlar í holunum eru viðsnúnir og þeir ásamt þrýstiferlunum gefa til kynna að heitur vökvi streymi að austan inn í jarðhitakerfi Hvíthóla. Staðsetning uppstreymisrásar aðstreymisins að Hvíthólum er óákveðin, en er líklega skammt austan við holu KJ-21. Hóla KJ-22 tekur hluta af heildarrennsli sínu úr þessu kerfi og hluta úr kaldara vatnskerfi neðan 1000 m dýpis, sem tengt er norður-suður sprungusveimnum vestan við Hvíthóla.

Svarfgreiningar úr holunum á Hvíthólasvæðinu skipta berginu í ákveðnar jarðlagasyrpur. Til einföldunar fyrir líkangerð má skipta jarðlögum í fjórar nær láréttar meginsyrpur (Helga Tulinius og Ómar Sigurðsson, 1988a). Efst er frekar ferskt og lítið ummyndað lag, ummyndun nær þó til yfirborðs umhverfis holur KJ-21 og KJ-23. Þetta lag er talið vel lekt og nær niður á um 200 m dýpi. Á 200-500 m dýpi er móbergssyrpa, sem talin er vera tiltölulega þétt og virkar sem nokkurskonar þak á jarðhitakerfinu. Neðan móbergsins taka við lekari jarðlög, sem samstanda aðallega af basalt breksíu. Þessi syrpa er um 500 m þykk og nær niður á um 1000 m dýpi. Í henni eru þær vatnsæðar sem fá vatn úr heitari hluta jarðhitakerfis Hvíthóla. Fyrir neðan 1000 m dýpi þéttist bergið aftur og innskotatiðni eykst. Meginbergtegund þessarar syrpu er basalt og er lítið um vatnsæðar í henni 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 hola KJ-21 og KJ-23 og virka sem stemmir fyrir vökvarensli þar á milli.

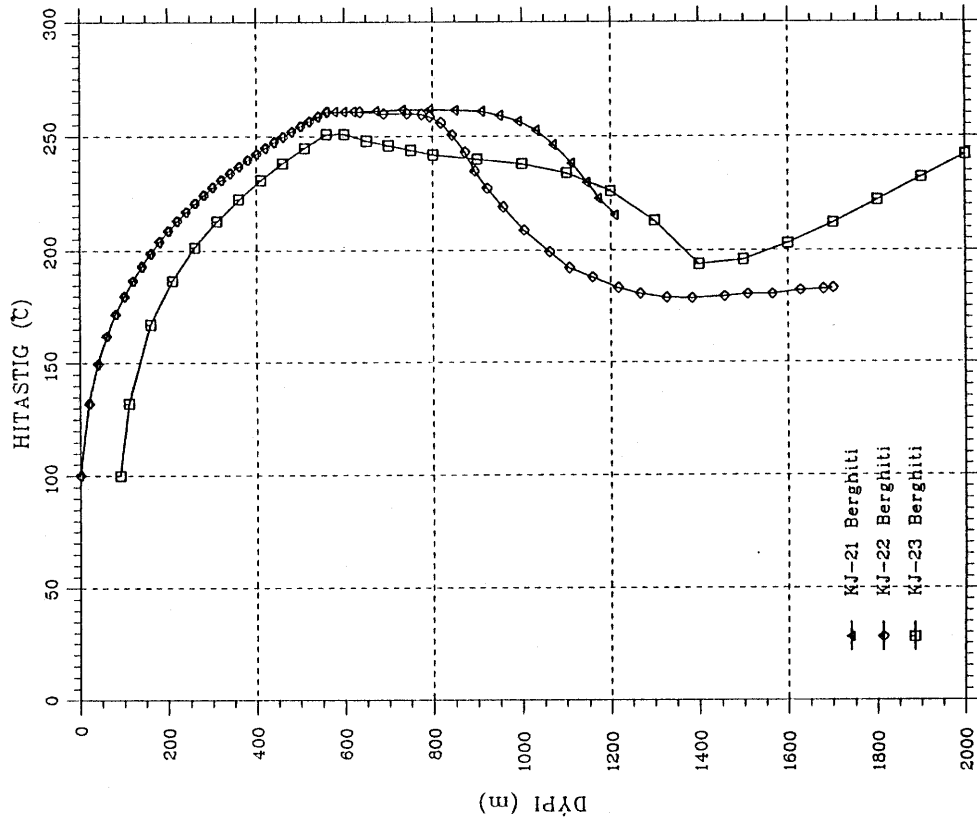


Mynd 1. Afstöðumynd af Hvíthólasvæðinu



3. feb. 1992 Ómar  
Oracle

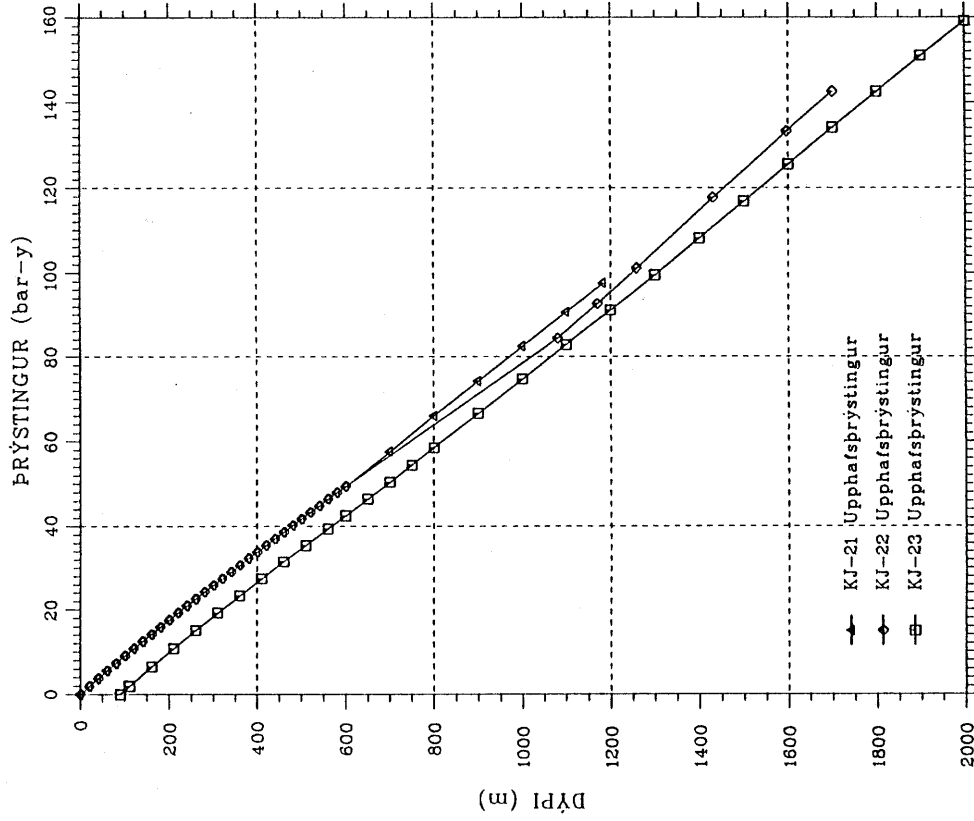
### KRAFLA HVÍTHÓLAR Áætlaður bergþiti



Mynd 2. Áætlaður bergþiti við holur KJ-21, KJ-22 og KJ-23

3. feb. 1992 Ómar  
Oracle

### KRAFLA HVÍTHÓLAR Áætlaður upphafsþrýstingur



Mynd 3. Áætlaður upphafsþrýstingur við holur KJ-21, KJ-22 og KJ-23

#### 4. AÐDRAGANDI LÍKANGERÐAR

Út frá fyrirliggjandi upplýsingum um jarðhitakerfi Hvíthóla, sem í aðalatriðum eru taldar upp í kaflanum hér á undan, var gert tvívítt reiknilíkan af því (Helga Tulinius og Ómar Sigurðsson, 1988a). Tvívíða líkanið var síðan notað til að herma náttúrulegt ástand jarðhitakerfisins áður en vinnsla hófst úr því og síðan vinnslusögu svæðisins fram að áramótum 1987/88. Að lokum var það notað til að gera vinnsluspár fyrir ákveðin vinnslutilfelli. Nokkrir annmarkar voru á tvívíða líkaninu, eins og bent var á, auk þess sem tvívítt (X-Z) líkan getur aðeins að takmörkuðu leiti hermt vinnslusögu eða gert vinnsluspár vegna einfaldleika líkansins. Þar sem niðurstöður tvívíðu líkanreikninganna bentu til mjög takmarkaðrar afkastagetu Hvíthólasvæðisins var mælt með að gert yrði þrívítt reiknilíkan svo sannreyna mætti niðurstöðurnar.

Í greinargerð seinni hluta árs 1988 eru settar fram tillögur í þrem liðum sem fólu í sér lagfæringu á tvívíða líkaninu, breytingu yfir í þrívítt líkan og endurskoðun vinnsluspáa (Helga Tulinius og Ómar Sigurðsson, 1988b). Í greinargerðinni er einnig sett fram beinagrind að verktilhögun. Skilningur greinarhöfundar var að verkið skyldi vinnast eins hratt og kostur væri á, svo sannreyna mætti sem fyrst afkastamat Hvíthólasvæðisins og út frá niðurstöðum þess grípa til viðeigandi aðgerða. Þannig yrði tvívíða líkanið þanið lítið breytt til norðurs og suðurs og mat þess á eðlisstærðum jarðhitakerfisins notað sem fyrsta ágiskun í þrívíða líkaninu. Til að halda verklokum innan tímamarka yrðu kröfur um samsvörun reiknilíkans við mældar stærðir metnar hlutlægt, þar sem meginmarkmiðið var að kanna áreiðanleika eða næmni vinnsluspánna gagnvart líkangerðinni. Það dróst hins vegar í heilt ár að samningur kæmist á milli Landsvirkjunar og Orkustofnunar um framkvæmd verksins.

Tvívíða reiknilíkanið var unnið með forritinu SHAFT-79, sem verið hafi í eigu Orkustofnunar um nokkurra ára skeið. Forritið TOUGH kom í stað SHAFT-79 á árinu sem leið á milli þess er byrjað var á gerð þrívíða líkansins. Það hafði ekki verið notað áður við líkangerð hér á landi, enda urðu verulegir byrjunarörðugleikar þegar gera átti strax fullvaxið þrívítt reiknilíkan með því. Notkun hjálparforritsins DMESH, sem fylgdi með TOUGH, til bútnar líkansins og vandræðin við keyrslu þess á tölvu Orkustofnunar má segja að hafi mótað þróun þrívíða líkansins sem unnið var að samkvæmt samningi við Landsvirkjun (Helga Tulinius og Ómar Sigurðsson, 1991). Upphaflegu markmiðin, skv. skilningi greinarhöfundar, með gerð þrívíða líkansins týndust því að nokkru leyti. Seint á árinu 1990 stefndi vinna við þetta þrívíða líkan í þrot, án þess að markmiðin með gerð þess væru í sjónmáli. Eðlisstærðir líkansins voru komnar vel frá upphaflegum ágiskunum, reiknitími þess var mjög langur og líkanið virtist ekki svara breytingum á þann hátt sem búast mátti við. Hins vegar var búið að leysa vandamál með keyrslu forritsins á tölvu Orkustofnunar. Höfundur fékk þá leyfi til að prófa eigin hugmyndir við gerð þrívíðs reiknilíkans af Hvíthólasvæðinu.

#### 5. GERÐ ÞRÍVÍÐS REIKNILÍKANS

Við gerð þrívíða reiknilíkansins (líkan b) var stuðst eins mikið og hægt var við tvívíða líkanið, sem þegar var til, og upplýsingar sem lágu til grundvallar því. Þá var bætt inn upplýsingum um norðurjaðar þess svæðis sem líkangerðin nær til. Stærð þess svæðis sem líkanið tekur aðallega til er rúmir 4,6 km<sup>2</sup> og nær það frá öskjurímanum í suðri að Grænagili í noðri og frá fjallsrananum sunnan Þríhyrningadals í vestri upp á Sandabotnafjall í austri (mynd 1). Líkaninu er skipt upp í fjórar syrpur, sem taka mið af jarðlagaskiptingu svæðisins, á sama hátt og gert var í tvívíða líkaninu. Gert er ráð fyrir að syrturnar séu nær láréttar, þar sem sambærileg jarðlög finnast á svipuðu dýpi við norðurhluta svæðisins (KJ-6) (Guðmundur Ó. Friðleifsson, 1984).

Nú verður uppbyggingu þrívíða reiknilíkansins (líkan b) lýst nánar og bent á mismun milli þess og tvívíða líkansins og líkans (a), sem notuð hafa verið til hermunar fyrir Hvíthólasvæðið. Efsta syrpan er 200-300 m þykk eftir landslagi svæðisins og nær niður á 200 m dýpi. Hún samsvarar TOP í tvívíða líkaninu. Syrpanni er ekki skipt í smærri einingar og er því ein eining (bútur), þar sem massaskipti milli hennar og dýpri hluta líkansins eru mjög lítil. Berg hennar er vel lekt (20 md) og grophlutfall þess hátt (15%). Líkt er eftir varmatapi til yfirborðs með hitasvelg í þessari syrpu. Hitasvelgurinn var stilltur þannig að hiti í syrpanni hélst nær stöðugur í gegnum þróunarsögu jarðhitakerfisins. Varmaflæðið til yfirborðs fékkst þannig að meðaltali um  $0,41 \text{ W/m}^2$ . Í tvívíða líkaninu er varmatapið til yfirborðs nálgæð með því að setja stóran jaðarbút ofan á TOP-lagið, sem skipt var í smærri búta. Aðferðin sem notuð er hér einfaldar því líkanið með fækkun búta.

Önnur syrpan tekur við á 200 m dýpi og nær niður á 500 m dýpi. Hún samsvarar MOB í tvívíða líkaninu. Syrpan er höfð sem eitt lag og er lekt bergsins lítil (0,02 md), en grophlutfall haft svipað og fyrir dýpri syrpu líkansins (5%). Þessi syrpa virkar sem nokkurs konar þak á jarðhitakerfið, þar sem mjög lítið massastreymi er um hana vegna lítillar lektar. Syrpanni er skipt upp í 12 búta. Þar af tilheyra 2 þeirra lóðréttri einingu, sem líkir eftir norður-suður stemmi milli hola KJ-21 og KJ-23 (mynd 4). Stemmirinn, sem samsvarar MIS í tvívíða líkaninu, nær gegnum dýpri syrpu líkansins. Hann er ekki alveg þéttur því lekt hans er höfð 0,2-0,3 md og grophlutfall 5%. Hér eru notaðir 13 bútar til að líkja eftir hita- og þrýstidreifingu í efstu 500 m auk eins (1) hitasvelgs til að líkja eftir varmatapi kerfisins. Í líkani (a), er efstu tveim syrpanum sleppt. Þá notar það 138 hitasvelgi í efra lagi þriðju syrpu til að herma varmatapið til yfirborðs.

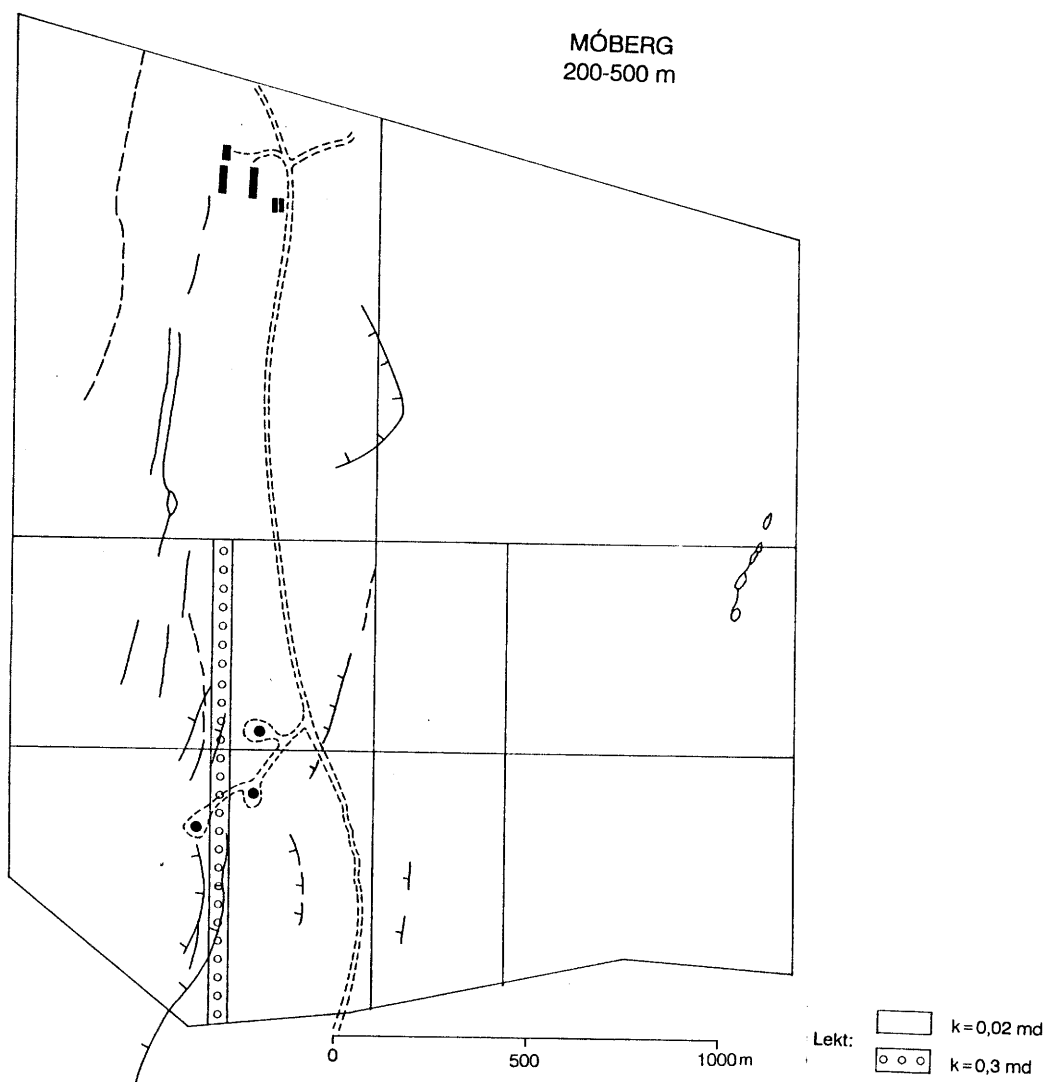
Þriðja syrpan nær frá 500 m dýpi í 1000 m dýpi og samsvarar BRE í tvívíða líkaninu. Hér er syrpanni skipt í tvö jafnþykk lög, en var skipt í þrjú lög í tvívíða líkaninu. Þessi einföldun er gerð til að takmarka heildarfjölda smábúta í reiknilíkaninu. Eins einföldun var gerð í líkani (a). Í þessari syrpu, sem aðallega samanstendur af basaltbreksú, eru helstu vatnsæðar holanna á Hvíthólum. Vatnslekt og grophlutfall eru því með betra móti (sjá töflu 1). Lögum syrpannar er hvoru um sig skipt upp í 64 búta. Þar af tilheyra 5 bútar í hvoru lagi stemminum (MIS) og 2 að- og uppstreymisrás jarðhitakerfisins (myndir 5 og 6). Ekki var hægt að komast af með færri en tvö lög innan þessarar syrpu til að herma hita- og þrýstidreifinguna. Í reynd gæti þurft að skipta syrpanni í þrjú lög til að auðvelda nálgun við vinnslusögu Hvíthólasvæðisins. Þegar líkt er eftir vinnslusögunni eru settir svelgir í efra lagið til að líkja efir massatöku efri æða hola KJ-21 og KJ-22. Eins er settur svelgur í neðra lagið til að líkja eftir massatöku neðri æðar holu KJ-21. Eins og áður sagði, er þessari syrpu skipt í tvö lög í líkani (a) og hvoru lagi síðan í 138 búta. Þar af eru um 70 bútar í hvoru lagi sem ná yfir það svæði sem líkanreikningarnir fjalla um, en 68 bútar eru notaðir til að meðhöndla randskilyrði og verður fjallað nánar um það síðar. Þá hefur líkan (a) ekki stemmi, heldur er allt svæðið vestan Hvíthóla skilgreint með lægri lekt en annars staðar. Þetta veldur því að ekki kemur fram mikið þrýstifall milli hola KJ-21 og KJ-23 í því líkani, þó ætlaður hitamunur náist milli holanna.

Neðan 1000 m dýpis þéttist berg og innskota tíðni eykst. Þar tekur fjórða syrpan við og er látin ná niður á 2000 m dýpi. Hún samsvarar BAS í tvívíða líkaninu og líkt og þar er henni hér skipt í tvö 500 m þykk lög. Efra laginu er svo skipt í 44 búta, en þar af tilheyra 5 stemminum (MIS) og 2 að- og uppstreymisrásinni (mynd 7). Neðra laginu er skipt í 36 búta, þar af 5 sem tilheyra stemminum (MIS) og 4 að- og uppstreymisrásinni (mynd 8). Lekt þessarar syrpu er frekar lítil (1 md) og grophlutfall er einnig haft minna en í öðrum lögum (3%). Í efra laginu vestan við stemminn er settur svelgur til að líkja eftir massatöku neðri æða holu KJ-22. Í neðra lagið eru settir 27 hitagjafir til að líkja eftir náttúrulegu varmastreymi út frá jörðinni. Samkvæmt hitastigli í neðri hluta holu KJ-23 fæst að náttúrulegt varmaflæði út frá jörðinni er um  $0,2 \text{ W/m}^2$  á Hvíthólasvæðinu. Sama varmaflæði er látið vera til alls neðra lagsins, en í raun hækkar það í

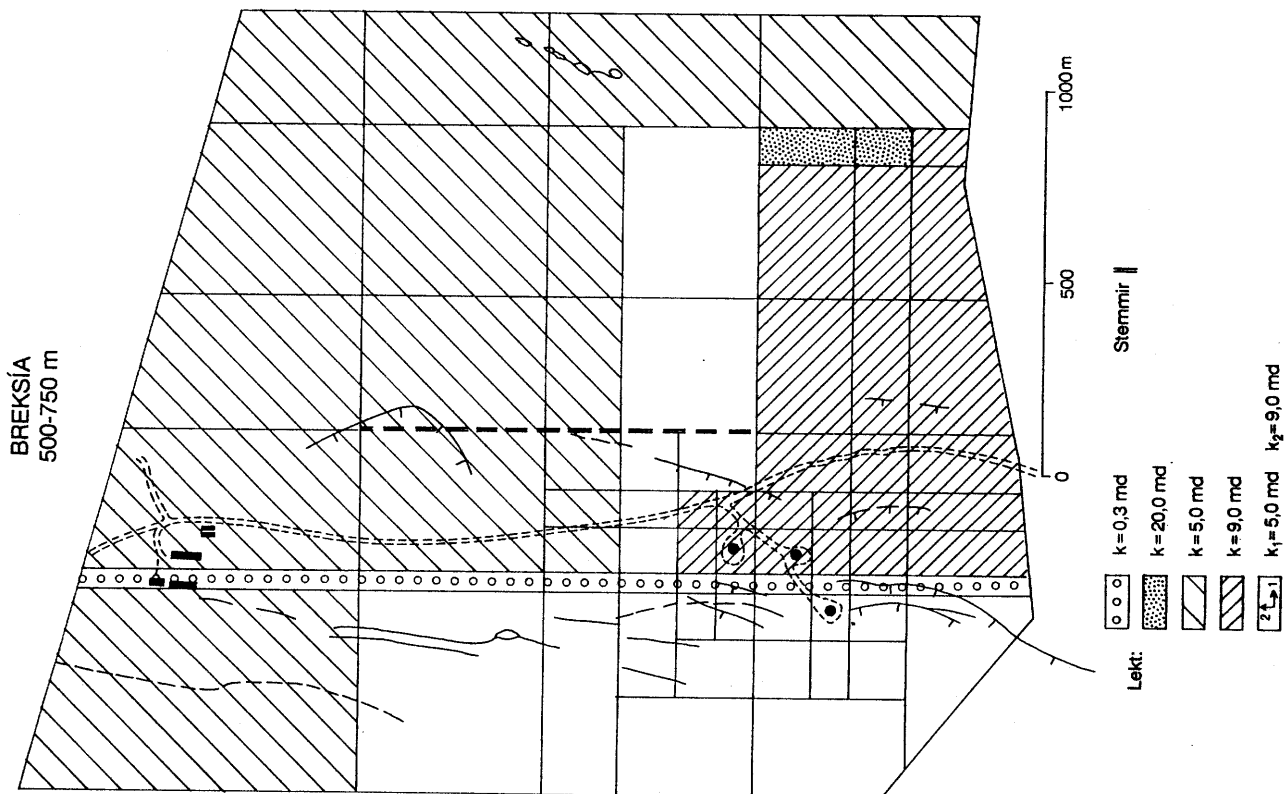
átt að Leirbotnum-Suðurhlíðum (Guðmundur S. Böldvarsson o.fl., 1984). Fyrir það svæði sem líkan gerðin beinist hér aðallega að hefur náttúrulega varmaflæðið lítil áhrif á hegðun jarðhitakerfisins og þessi einföldun því réttlætunleg. Hins vegar er vitað að hátt varmaflæði getur aukið útbreiðslu tveggja fasa ástands í jarðhitakerfi. Í líkani (a) er neðra laginu sleppt í þessari syrpu og laginu, sem eftir er, skipt í 138 búta eins og efri lögum þess líkans. Þar er á sama hátt líkt eftir náttúrulegu varmaflæði með 138 hitagjöfum til þess lags.

Tafla 1. Grophlutfall og lekt

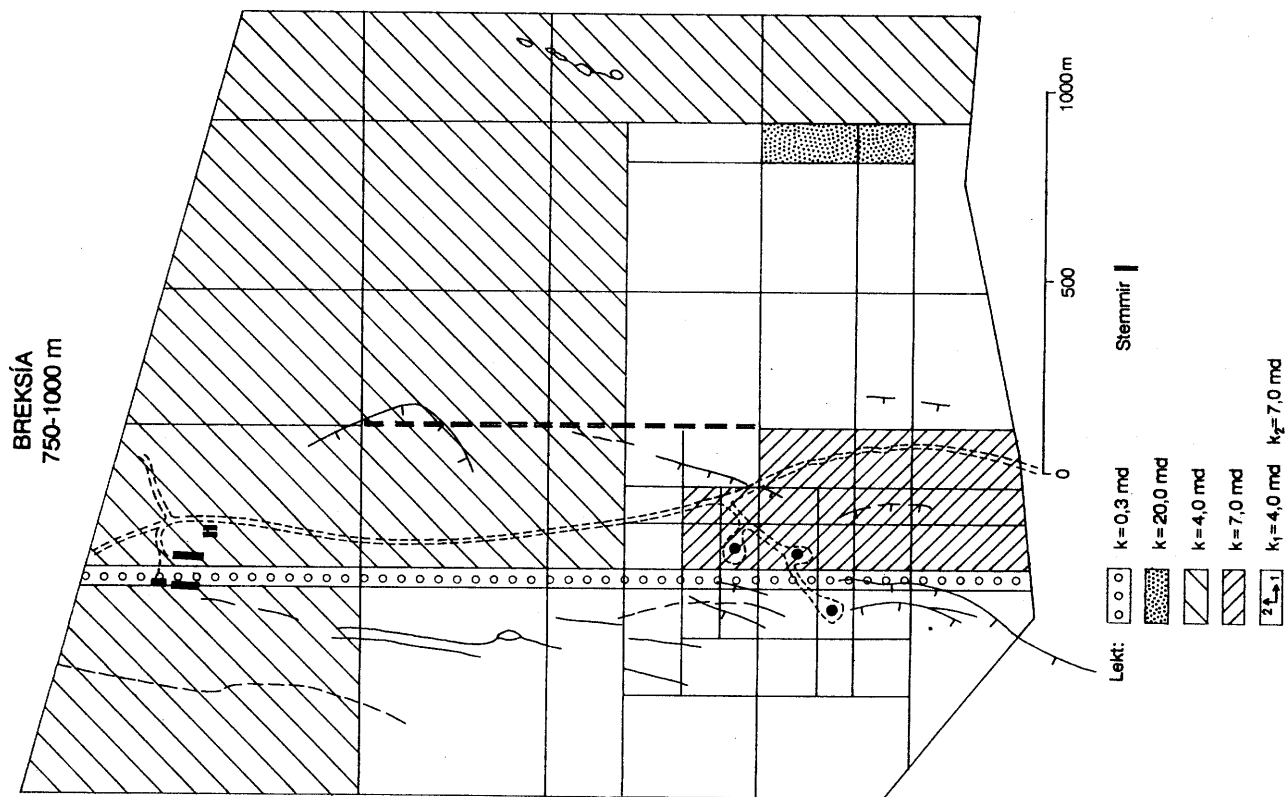
Syrpa	Grop (%)	Lekt (md)		
		k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>
móberg	5	0.02	0.02	0.02
breksía <sub>u</sub>	5	5.0	9.0	15.0
breksía <sub>n</sub>	5	4.0	7.0	14.0
basalt <sub>u</sub>	3	0.6	0.9	0.9
basalt <sub>n</sub>	3	0.8	1.2	1.0
misgengi	5	0.3	0.2	0.2
renna	10	20.0	50.0	25.0
jaðrar	15	100.0	100.0	20.0



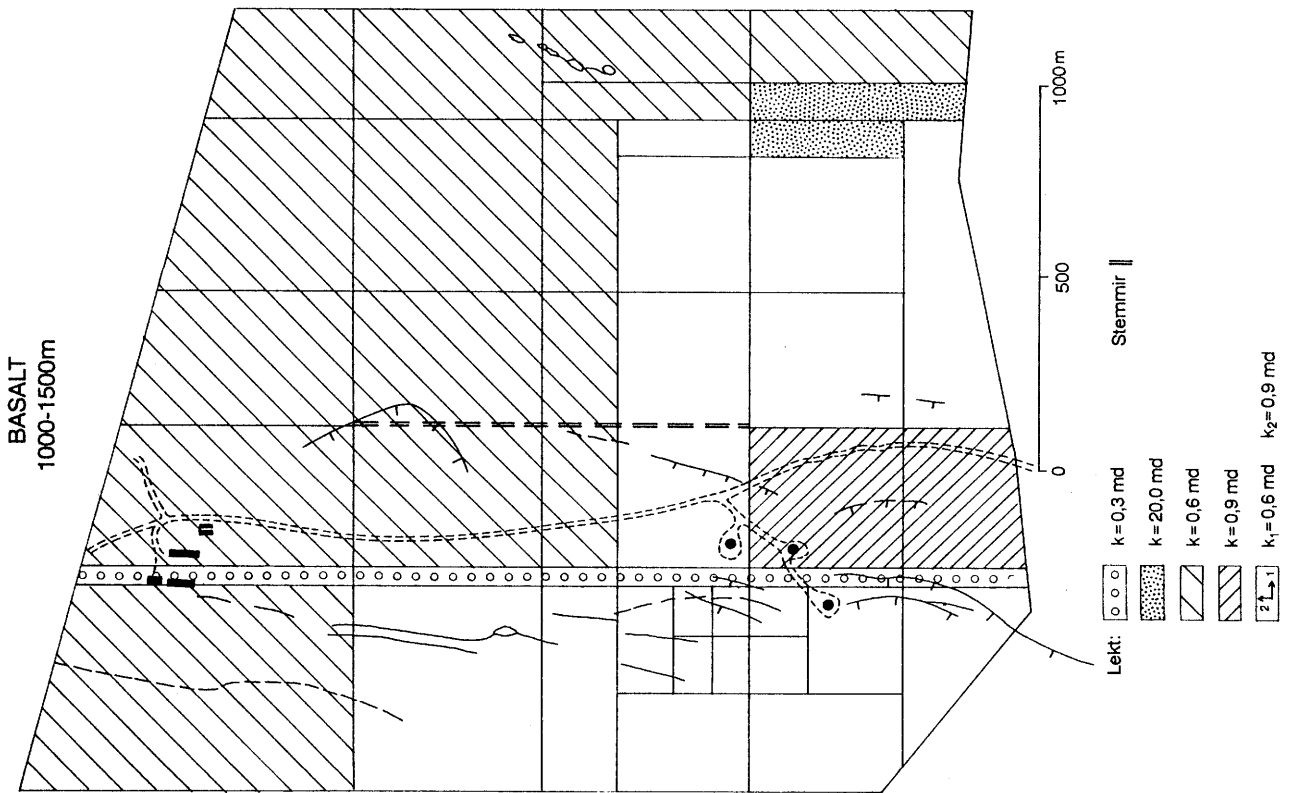
Mynd 4. Búton og lektardreifing móbergssyrpu á 200-500 m dýpi



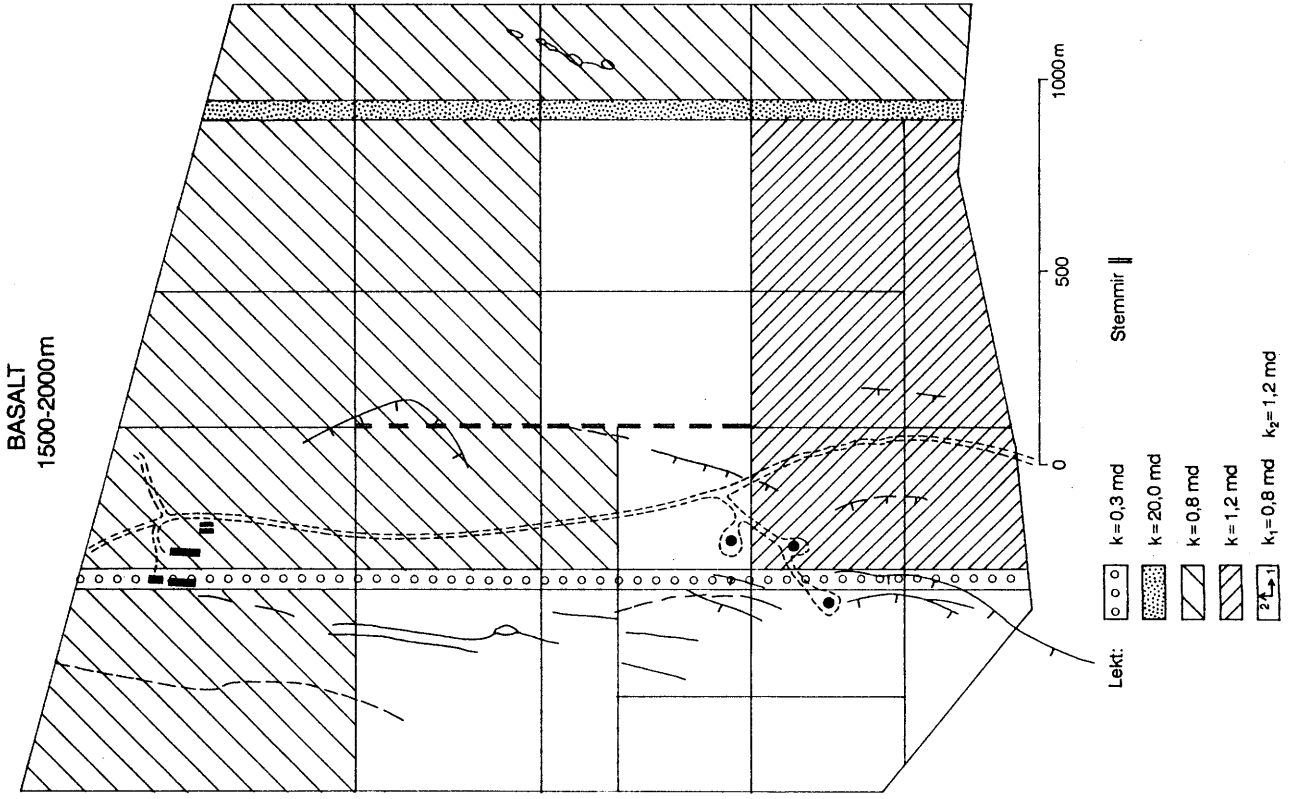
Mynd 5. Bútun og lektardreifing breksíusyrpu á 500-750 m dýpi



Mynd 6. Bútun og lektardreifing breksíusyrpu á 750-1000 m dýpi



Mynd 7. Búton og lektardreifing basaltsyrpu á 1000-1500 m dýpi



Mynd 8. Búton og lektardreifing basaltsyrpu á 1500-2000 m dýpi

## 6. RANDSKILYRÐI OG KEYSRLUTÍMI

Gert er ráð fyrir að öskjuriminn virki sem þéttur stemmir og takmarki jarðhitakerfið til suðurs. Í vestri liggur Leirhnjúks-sprungusveimurinn, en upplýsingar úr holu KJ-22 benda til að verulegrar kólnunar til vesturs. Þá er talið ólíklegt að vinnsla eða niðurdæling á Hvíthólasvæðinu hafi merkjanleg áhrif á vatnskerfið tengt N-S sprungusveimnum. Hvert lag í reiknilíkaninu er því tengt stórum bútum við vesturjaðarinn, þannig að hita- og þrýstistigull helst þar fastur. Hita- og þrýstistigull vesturjaðarsins er notaður sem upphafsástand alls staðar í líkaninu, þegar það er sett af stað, til að herma þróun jarðhitakerfisins í það ástand sem er þekkt fyrir byrjun vinnslu úr kerfinu. Norðurjaðarinn liggur um Grænagil og er látinn fylgja áætluðum suður-mörkum rishryggjar (Ásgrímur Guðmundsson, 1983). Hvert lag líkansins er tengt stórum bútum við norðurjaðarinn og tekur upphafsástand þeirra mið af hita- og þrýstistigli við holu KJ-6. Jaðarbúturnir við norðurjaðar líkansins eru ekki hafðir það stórir að þeir haldi upphafsástandi sínu óbreyttu, heldur getur það breyst orlítið. Þannig virka þeir meir eins og kerfið sé ótakmarkað (óendanlega stórt) til norðurs. Oft eru notaðir margir bútar, til að herma þannig randskilyrði, og stækka þeir stöðugt með aukinni fjarlægð frá svæðinu sem reikningar beinast að. Til að takmarka heildarfjölda búta í reiknilíkaninu er hér í reynd aðeins notaður einn jaðarbútur fyrir hvert lag til þessa. Einföldunin er réttlætt með því að við ytri jaðar þessarra búta eru breytingar svo litlar og hægar að þær hafi hverfandi áhrif á niðurstöður líkanreikninganna. Austurjaðar líkansins, sem liggur um Sandabotnafjall er hafður lokaður, sem getur eins þýtt að líkanið hafi samhverfu um jaðarinn til austurs.

Í líkani (a) eru notaðir um 68 bútar í hverju lagi til að líkja eftir randskilyrðunum. Þar eru randskilyrðin á öllum jöðrum látin samsvara ótakmörkuðu (óendanlega stóru) kerfi. Jaðrar þess svæðis sem verið er að herma geta þannig haft takmörkuð áhrif á hegðun þess og breytingar geta auðveldlega dreifst yfir jaðrana. Það ræðst svo af lekt innan svæðisins og í jaðarbútnum, ásamt tengingum milli bútana, hversu mikið breytingar dreifast til þeirra. Óvirkir jaðarbútar eru í raun til óþurftar í líkani. Randskilyrði sem samsvara ótakmörkuðu kerfi setja minni hömlur á kerfið, en jaðrar sem eru lokaðir eða halda föstum þrýstingi. Lokaðir jaðrar geta til lengri tíma litið takmarkað afköst kerfisins, en jaðrar með föstum þrýstingi haldið afköstum þess uppi. Aftur á móti, ef líkangerð leyfir notkun þannig randskilyrða, er hægt að takmarka mjög fjölda jaðarbúta. Takmörkun búta og tenginga milli þeirra í reiknilíkaninu einfaldar líkanið og eykur keyrsluhraða þess.

Þrívíða reiknilíkanið, sem hér hefur verið lýst, nær yfir 4,6 km<sup>2</sup> svæði. Það líkist tvívíða líkaninu í öllum megin atriðum og samanstendur af 4 syrþum (6 lögum) sem skipt er niður í 221 búta (tafla 2). Auk þess eru 14 jaðarbútar notaðir til að meðhöndla randskilyrðin við vestur- og norðurjaðra svæðisins. Þá er lítill jaðarbútur tengdur neðsta laginu við norðurjaðarinn með uppsprettu fyrir náttúrulegt innstreymi jarðhitavatns til jarðhitakerfisins. Heildarfjöldi búta í líkaninu er því 236. Auk uppsprettu fyrir náttúrulegt innstreymi jarðhitavatns notar líkanið 1 hitasvelg og 27 hitagjafa til að líkja eftir varmatapi og varmaflæði frá og til kerfisins. Hitt þrívíða líkanið (líkan a) samanstendur af 2 syrþum (3 lögum), sem skipt er í um 414 búta með jaðarbútnum. Þá notar það líkan um 276 hitasvelgi/gjafa fyrir varmastreymi frá og til kerfisins auk uppsprettu fyrir náttúrulegt innstreymi jarðhitavatnsins.

**Tafla 2.** Innri skipting líkananna

Syrpur	Lagskipting og búturn								
	Tvívítt líkan			Líkan (a)			Líkan (b)		
	Lög	Svæði	Jaðrar	Lög	Svæði	Jaðrar	Lög	Svæði	Jaðrar
Ferskt	0-200m	11	1				0-200m	1	0
Móberg	200-500m	11	1				200-500m	12	2
Breksía	500-650m	11	1	500-750m	70	68	500-750m	64	3
	650-850m	11	1	750-1000m	70	68	750-1000m	64	3
	850-1000m	11	1						
Basalt	1000-1500m	11	1	1000-1500m	70	69	1000-1500m	44	3
	1500-2000m	11	2				1500-2000m	36	4

Fyrir hvern bút í líkani eru að meðaltali 2-3 tengingar yfir í aðliggjandi búta. Tengingum fjölga því verulega með fjölgun búta og reiknitími eykst að sama skapi. Þá eykst reiknitími einnig eitthvað með fjölgun svelgja/gjafa í líkani. Þrívíða líkanið, sem hér hefur verið lýst (líkan b), notar um tvöfalt færri búta og um tífalt færri svelgi/gjafa en líkan (a) og þarf því um 4-5 sinnum minni reiknitíma en líkan (a) á sömu tölvu. Þetta reiknilíkan er því mun hraðvirkara og að ýmsu leiti sveigjanlegra til breytinga og aðlögunar en líkan (a).

Keyrsla fyrir hermun á náttúrulegu ástandi jarðhitakerfisins þ.e. þróunarsögu þess tók með þessu líkani (líkani b) 6-10 CPU-tíma á tölvu Orkustofnunar (Strokk). Þar skipti miklu máli að kveikja og slökkva á flagginu MOP-17 í forritinu TOUGH á réttum tímum, en flaggið hefur áhrif á innbyggða uppsetningu fyrir fylkjareikninga í forritinu. Ef ekki var kveikt eða slökkt á flagginu á heppilegum tíma í reikningunum dró verulega úr samleitni fylkjareikninganna (Tómas Jóhannesson, 1990). Forritið brást við þessu með því að minnka tímaskrefin, en á móti jókst keyrslutíminn. Litlar upplýsingar um innri gerð forritsins og virkni flagga sérstaklega flaggs MOP-17 átti þátt í gífurlegum tögum og vandræðum við gerð líkans (a). Svo virtist sem keyrslutími væri stýstur ef kveikt var á flaggi MOP-17 fyrsta þriðjung til helming þess tíma sem það tók líkanið að herma nær æstætt náttúrulegt ástand jarðhitakerfisins.

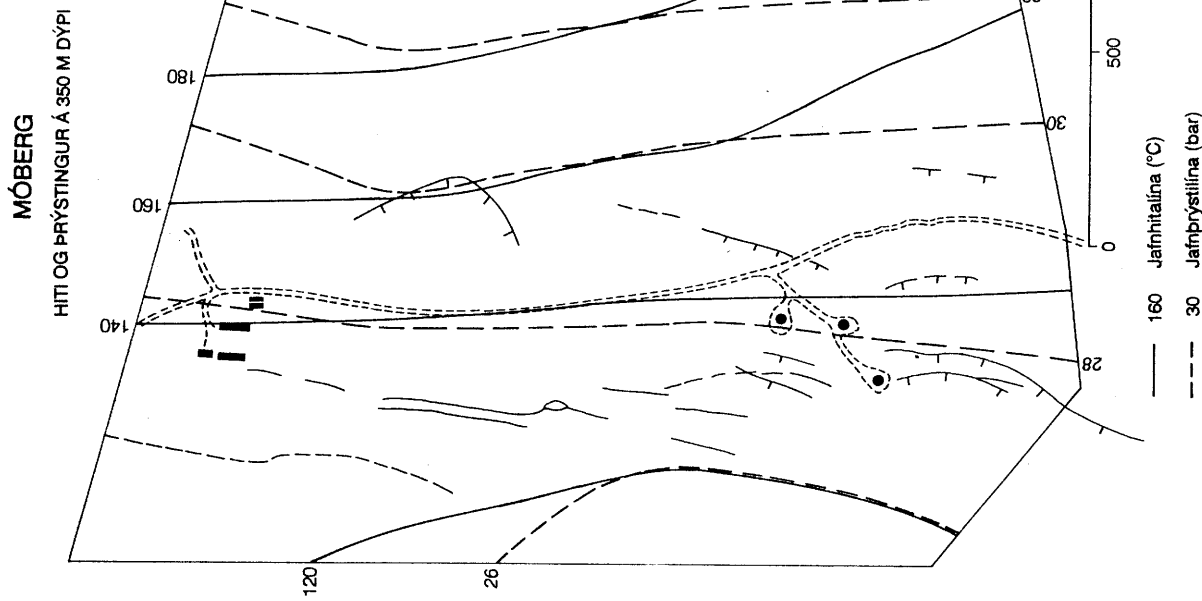


## 7. NÁTTÚRULEGT ÁSTAND HVÍTHÓLASVÆÐISINS

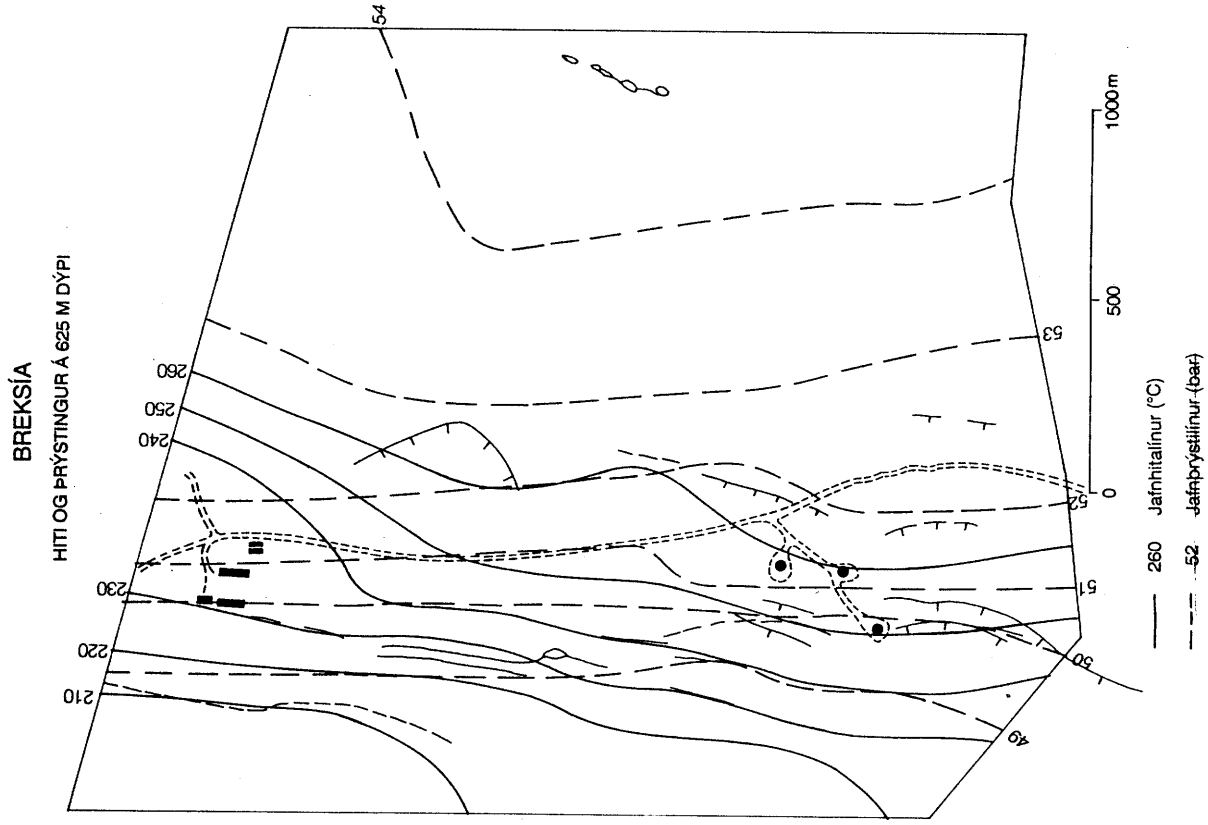
Byrjað er á að gefa reiknilíkaninu sama hita- og þrýstingsstigul og hafður er við vesturjaðar þess. Þá er kveikt á náttúrulegu innstreymi við norðaustur jaðarinn og jarðhitavatninu hleypt eftir sprungu á 1500-2000 m dýpi suður líkanið (mynd 8). Til að stjórna dreifingu þess um líkanið er lekt og grophlutfalli einstakra búta breytt, en sem fyrstu ágiskun fyrir þessa eiginleika voru notað gildi frá tvívíða líkaninu. Þannig var reynt að nálgast þá hita- og þrýstingsdreifingu sem talið er að hafi ríkt í kerfinu áður en vinnsla hófst á Hvíthólum. Á þann hátt er jarðhitakerfinu leyft að þróast í það ástand sem ríkir í því fyrir vinnslu, en það er oft kallað náttúrulegt ástand þess. Þessi hluti hermireikninganna grófstillir lekt, grophlutfall og tengingar einstakra búta þannig að rennislíleiðir um líkanið afmarkast. Þá fæst stærðarmat á lekt og grophlutfalli auk dreifingar þeirra um jarðhitakerfið, en fyrir hermireikninga eru oftast aðeins til óbeinar áætlanir á þeim fyrir jarðhitakerfi. Einnig er gerð sú krafa að við náttúrulegt ástand sé kerfið nær ætætt ("steady state") þ.e. að hiti og þrýstingur breytist mjög lítið alls staðar í kerfinu yfir ákveðið tímabil. Hér var krafan að hiti og þrýstingur breyttist um minna en 0,5°C og 0,5 bar alls staðar í kerfinu á yfir 30 ára tímabili. Í líkani (b), sem hér er notað, eru þessar breytingar meir en fjórfalt minni. Það tók reiknilíkanið 20280 ár (reiknitíma) að nálgast náttúrulegt ástand kerfisins eða 212 tímabrep (reikniþrep) þar sem lengsta þrepíð var tæp 120 ár.

Hermun á náttúrulegu ástandi kerfisins með þessu líkani var hætt í apríl 1991. Líkanið hafði þá verið keyrt sex sinnum með ýmsum breytingum milli hveirrar keyrslu og gaf orðið viðunandi samsvörun við þekkta hita- og þrýstingsdreifingu í jarðhitakerfinu. Í líkaninu eru um 9 kg/s af 340°C heitu vatni látin streyma inn í kerfið við norðurjaðar þess skammt suður af holu KJ-14. Jarðhitavatnið er látið streyma eftir sprungu á 1500-2000 m dýpi suður kerfið og fer svo að rísa til efri laga þess austur af Hvíthólum, en hefur þá kólnað í rúmar 306°C. Ljóst er af reikningum með þessu líkani og eins með líkani (a) að uppstreymi til Hvíthólasvæðisins þarf að vera austan við það og fjarlægðin til þess innan við 1 km. Á því svæði sem líkanið nær yfir er hiti og þrýstingur aðeins þekktur við holurnar á Hvíthólum og að nokkru við norðurjaðar þess. Þar sem upplýsingar um hita- og þrýstingsdreifingu innan kerfisins eru mjög takmarkaðar geta mismunandi reiknilíkon gefið sambærilega samsvörun við þau gögn sem til eru. Þá er hér gert ráð fyrir að kerfið sé ótruflað af vinnslu frá Leirbotna og Suðurhlíða svæðunum. Reiknuð hita- og þrýstingsdreifing í hverju lagi líkansins er sýnd á myndum 9 til 14 ásamt gufumettun í laginu. Þá sýna myndir 15 til 20 áætlaðan berghita og upphafsþrýsting við Hvíthólaholurnar ásamt reiknuðum hita og þrýstingi. Af myndunum sést að hiti er of lágur í móbergssyrpunni yfir Hvíthólum, en hann mætti hækka þar með því að leyfa smá gufustreymi til yfirborðs á litlu svæði kringum holurnar. Hiti í breksíusyrpunni á 500-1000 m dýpi er í lagi, en meginhluti jarðhitakerfis Hvíthóla fellur innan þeirrar syrpu. Dýpra gefur núverandi líkan (b) of háan hita sem stafar að nokkru af of háum hitastigli við vesturjaðar líkansins. Viðunandi nálgun er við þrýsting við holur KJ-21 og KJ-22, þó gæti þrýstingsstigullinn verið aðeins of lágur neðan 1200 m dýpis sem stafar að nokkru af of háum hita á því dýpi. Þrýstingur við holu KJ-23 er aðeins of hár aðallega ofantil. Þetta getur bent til að stemmirinn (MIS) um Hvíthóla milli hola KJ-21 og KJ-23 ætti að vera mun þéttari en í núverandi líkani þ.e. lekt hans töluvert minni en 0,3 md. Til að lækka þrýsting við holu KJ-23, en halda honum nær óbreyttum við holu KJ-22, gæti þurft að setja stemma sem loka nær af suðvestur hluta svæðisins umhverfis holu KJ-23.

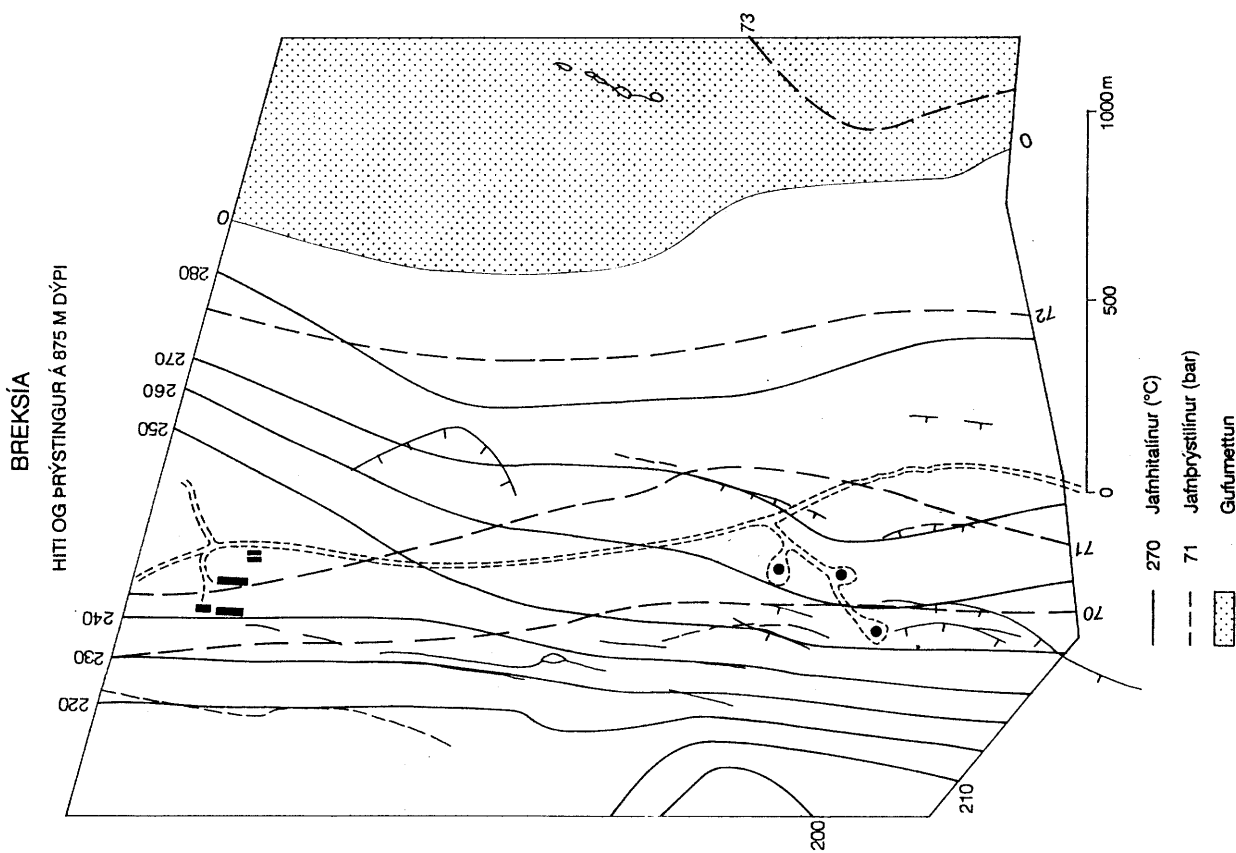
Myndir 4 til 8 sýna bútnun hvers lags ásamt lekt þeirra. Einnig má sjá á myndunum leka stemma sem settir voru í líkanið til að hægja á rennsli þvert á þá. Lektin er víðast höfð eins til allra átta í fletinum, en lóðrétt lekt er höfð hærri í breksíu-syrpunni (500-1000 m dýpi). Þá er lektin höfð breytileg um misgengið og í aðstreymisrásinni. Í töflu 1 eru birtar tölur yfir lekt sem notaðar voru í hverju lagi. Grophlutfall var haft 5% alls staðar, nema í basalt-syrpunni (1000-2000 m dýpi), þar sem grophlutfall var haft 3%.



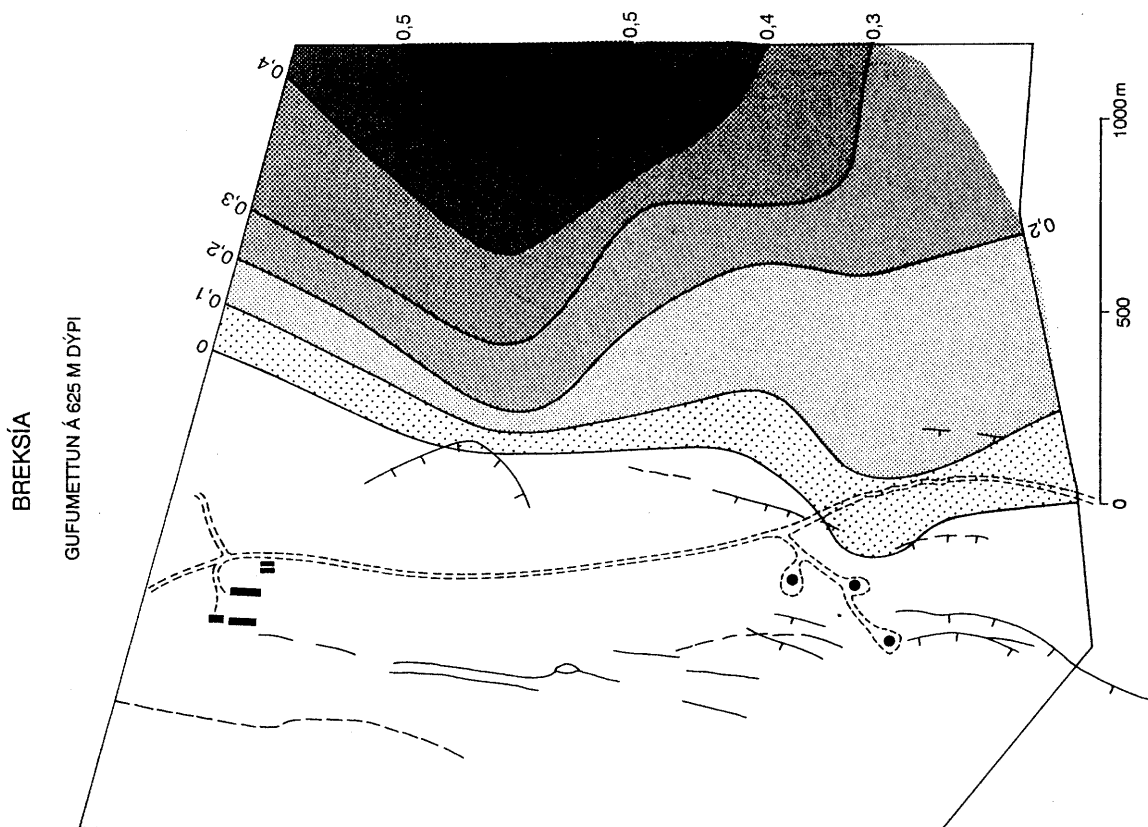
Mynd 9. Reiknuð hita- og prýstingsdreifing á 350 m dýpi fyrir vinnslu



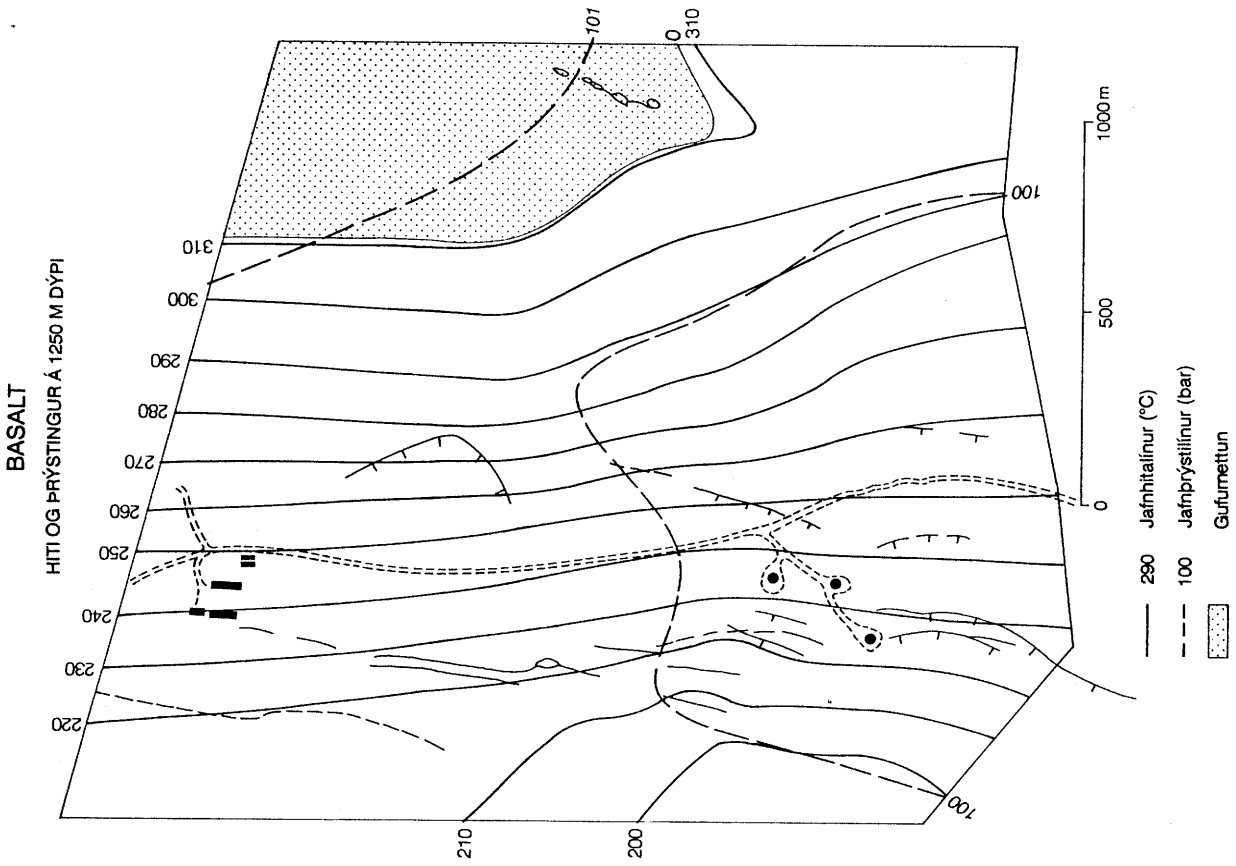
Mynd 10. Reiknuð hita- og prýstingsdreifing á 625 m dýpi fyrir vinnslu



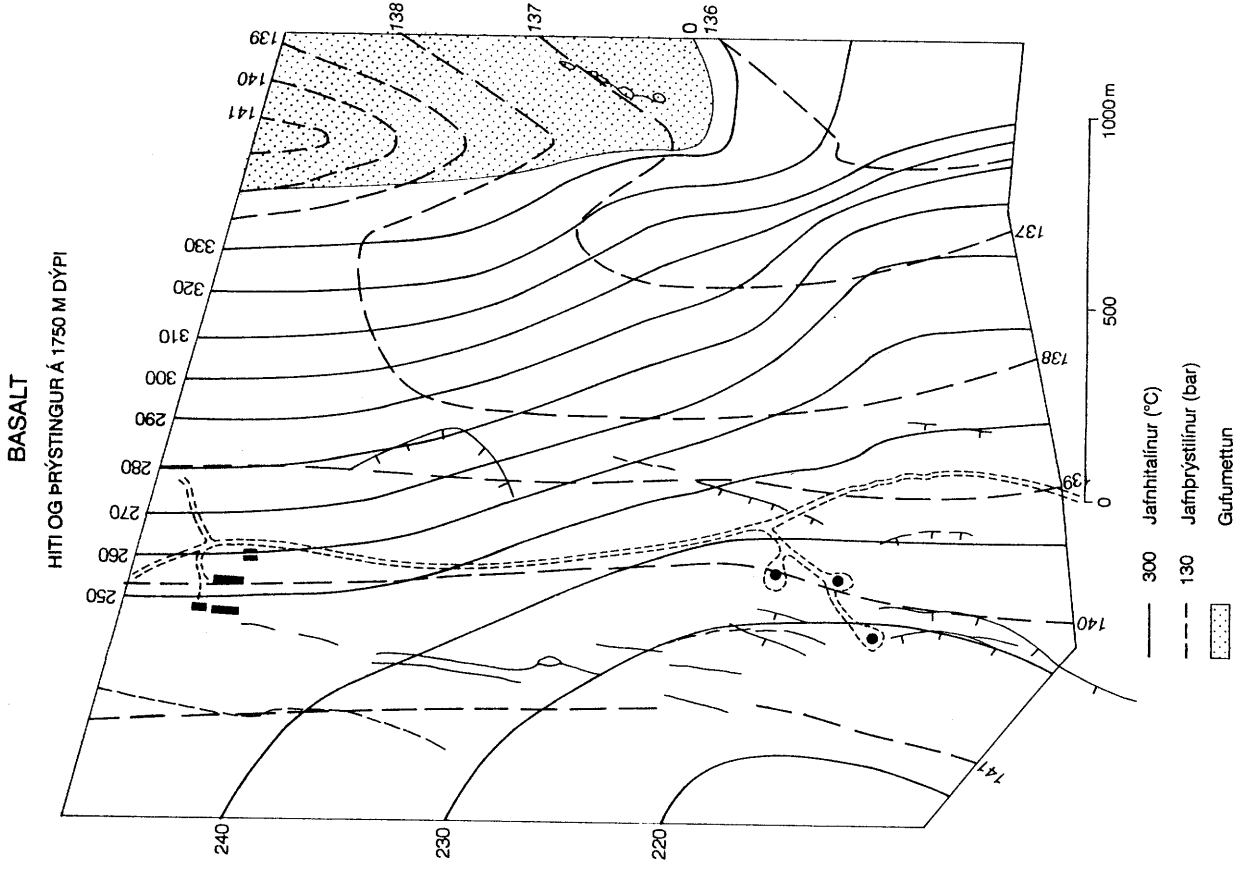
**Mýnd 12.** Reiknuð hita- og þrýstingsdreifing ásamt gufumettun á 875 m dýpi fyrir vinnslu



**Mýnd 11.** Reiknuð gufumettun á 625 m dýpi fyrir vinnslu



**Mynd 13.** Reiknuð hita- og þrýstingsdreifing ásamt gufumettun á 1250 m dýpi fyrir vinnslu

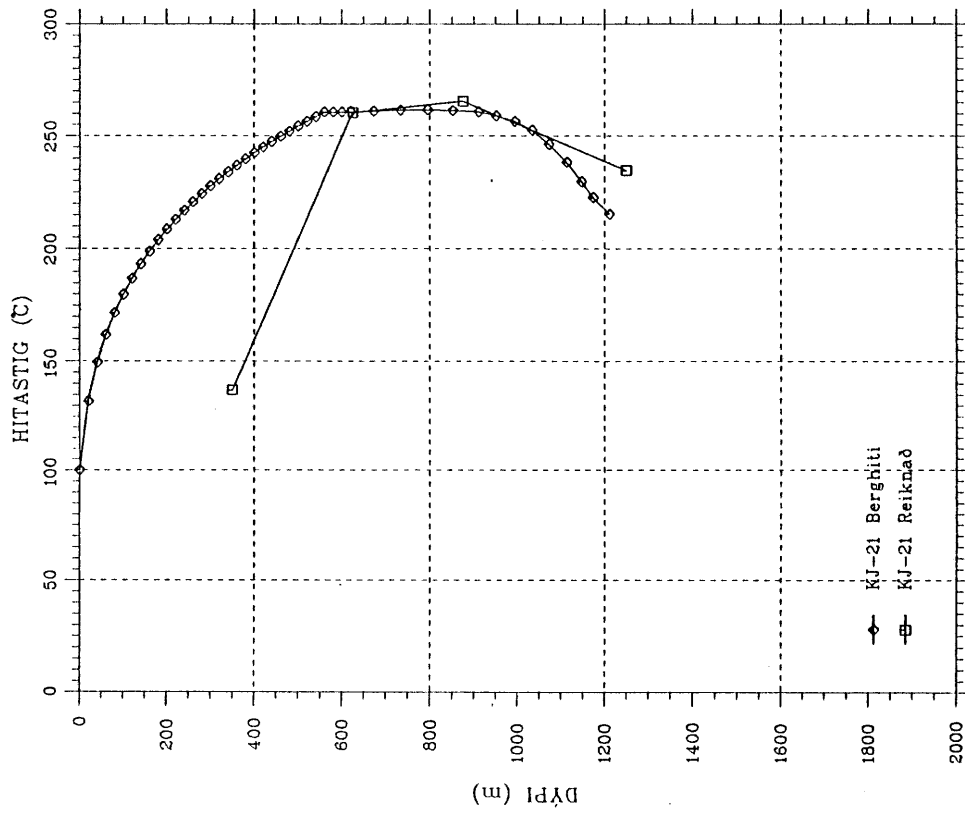


**Mynd 14.** Reiknuð hita- og þrýstingsdreifing ásamt gufumettun á 1750 m dýpi fyrir vinnslu

JHD-BM-6607-Ómar  
92.02.0028 T

### KRAFLA HVÍTHÓLAR

Hiti við holu KJ-21

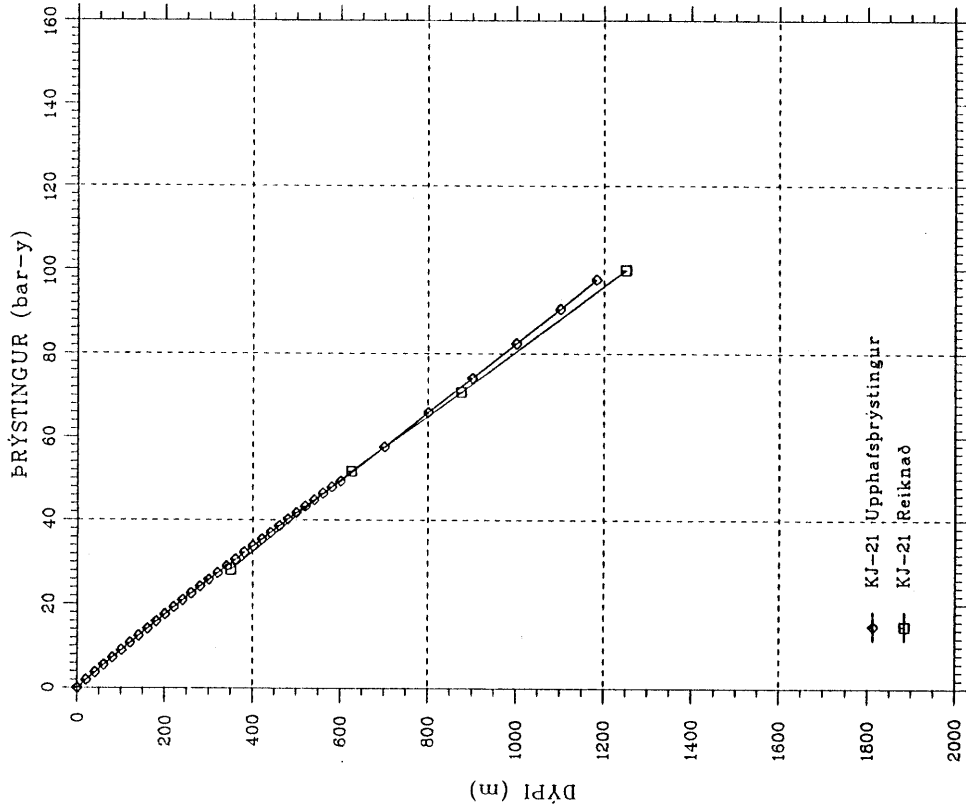


Mynd 15. Samanburður á áætluðum og reiknuðum berghita við holu KJ-21

JHD-BM-6607-Ómar  
92.02.0029 T

### KRAFLA HVÍTHÓLAR

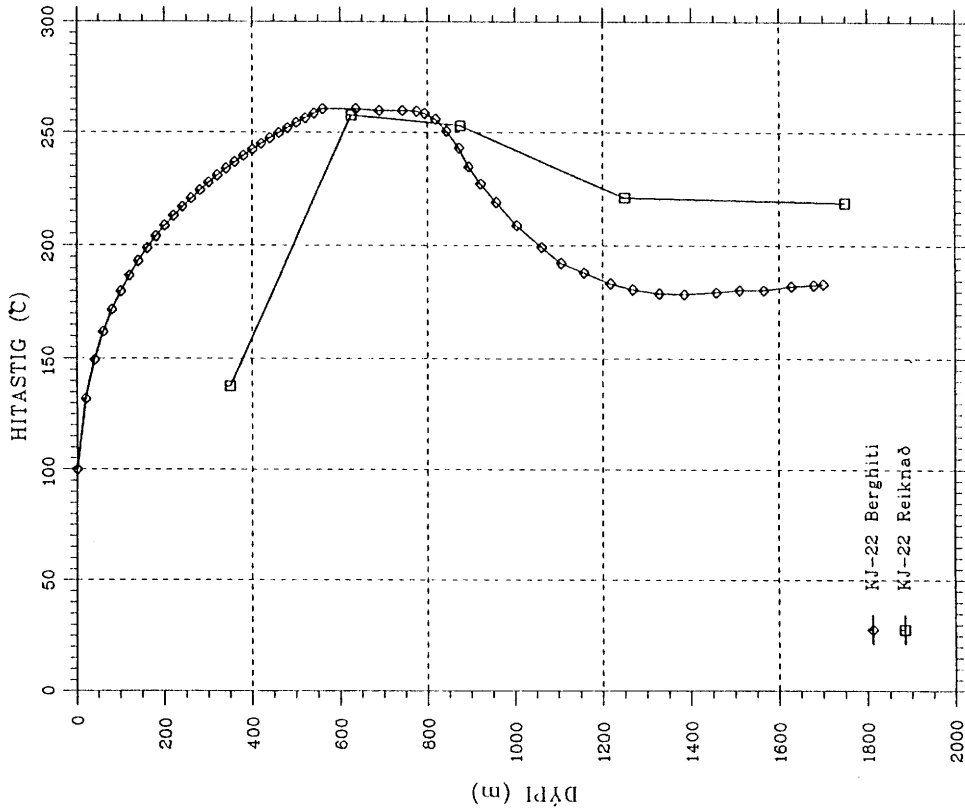
Þrýstingur við holu KJ-21



Mynd 16. Samanburður á áætluðum og reiknuðum upphafsþrýstingi við holu KJ-21

JHD-BM-6607-Ómar  
92.02.0030 T

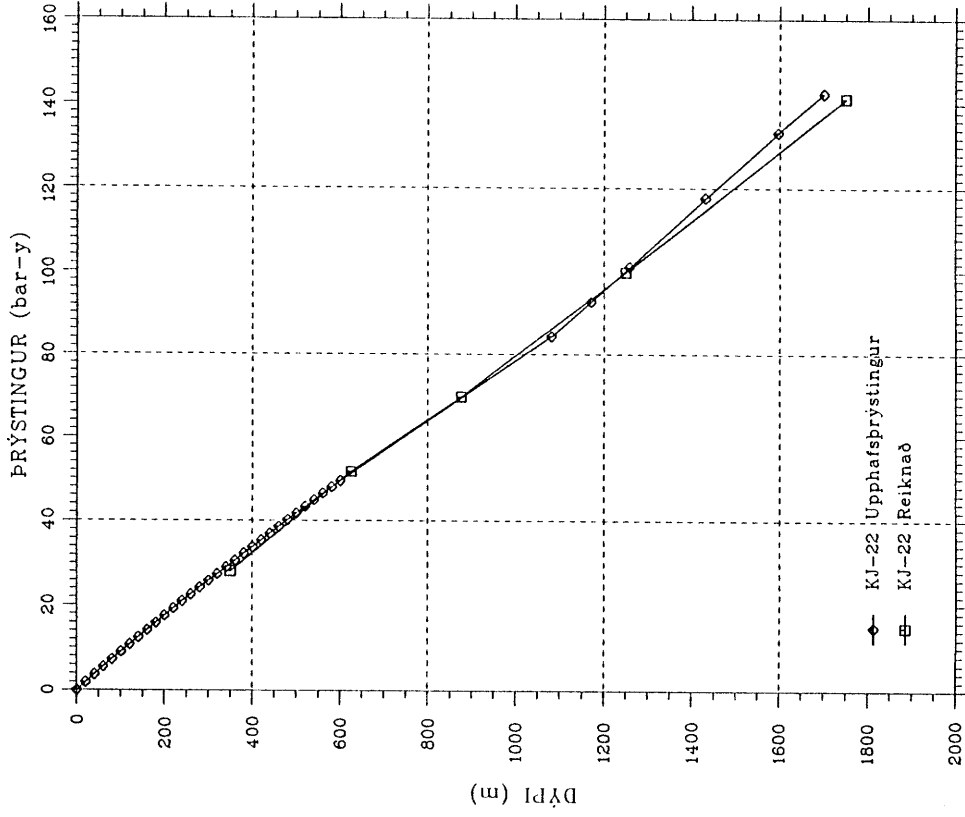
### KRAFLA HVÍTHÓLAR Hiti við holu KJ-22



Mynd 17. Samanburður á áætluðum og reiknuðum berghita við holu KJ-22

JHD-BM-6607-Ómar  
92.02.0031 T

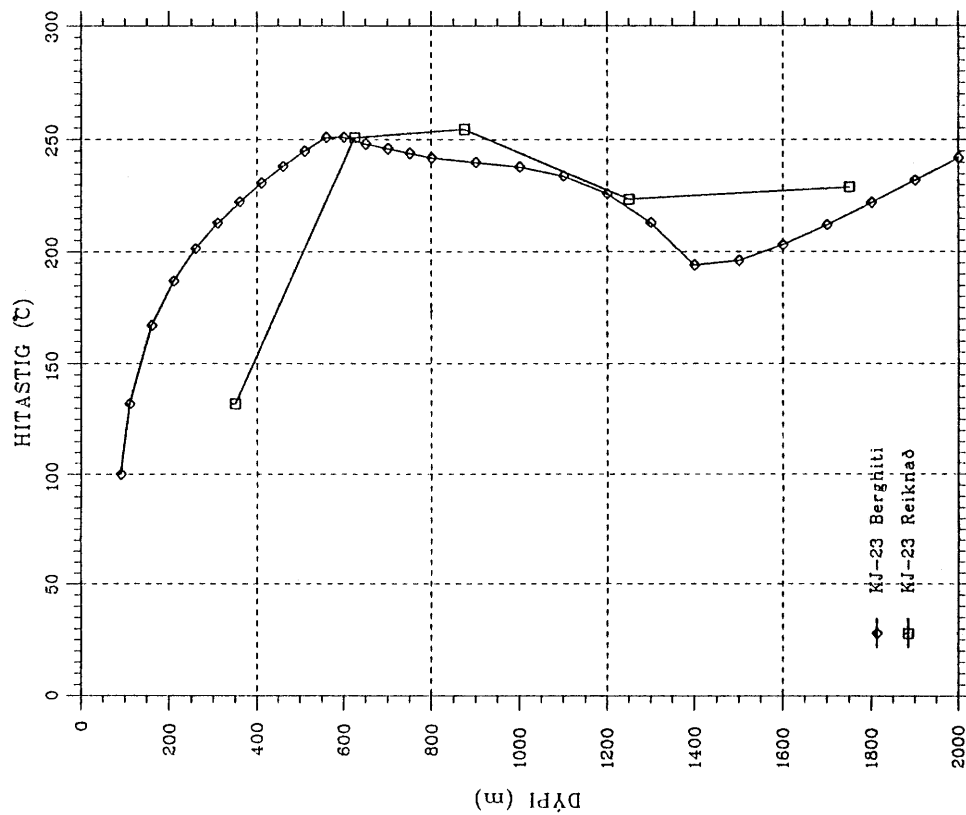
### KRAFLA HVÍTHÓLAR Þrýstingur við holu KJ-22



Mynd 18. Samanburður á áætluðum og reiknuðum upphafsprýstingi við holu KJ-22

JHD-BM-6607-Ómar  
92.02.0032 T

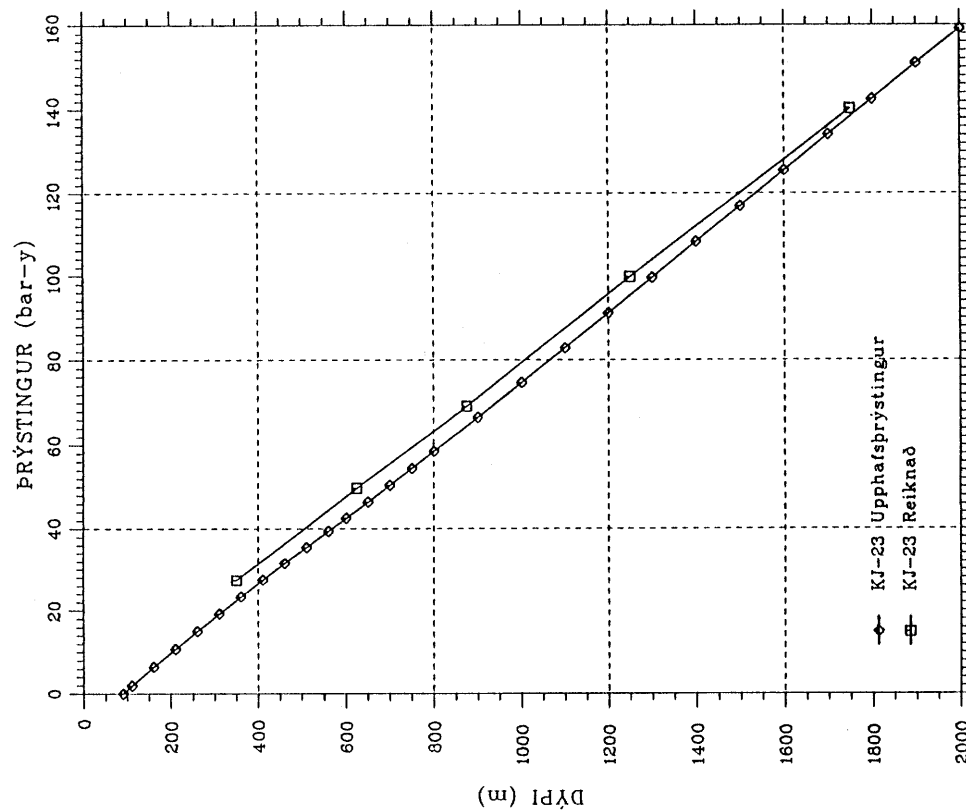
### KRAFLA HVÍTHÓLAR Híti við holu KJ-23



**Mynd 19.** Samanburður á áætluðum og reiknuðum berghita við holu KJ-23

JHD-BM-6607-Ómar  
92.02.0033 T

### KRAFLA HVÍTHÓLAR Þrýstingur við holu KJ-23



**Mynd 20.** Samanburður á áætluðum og reiknuðum upphafsprýstingi við holu KJ-23

## 8. VINNSLUSAGA HVÍTHÓLA

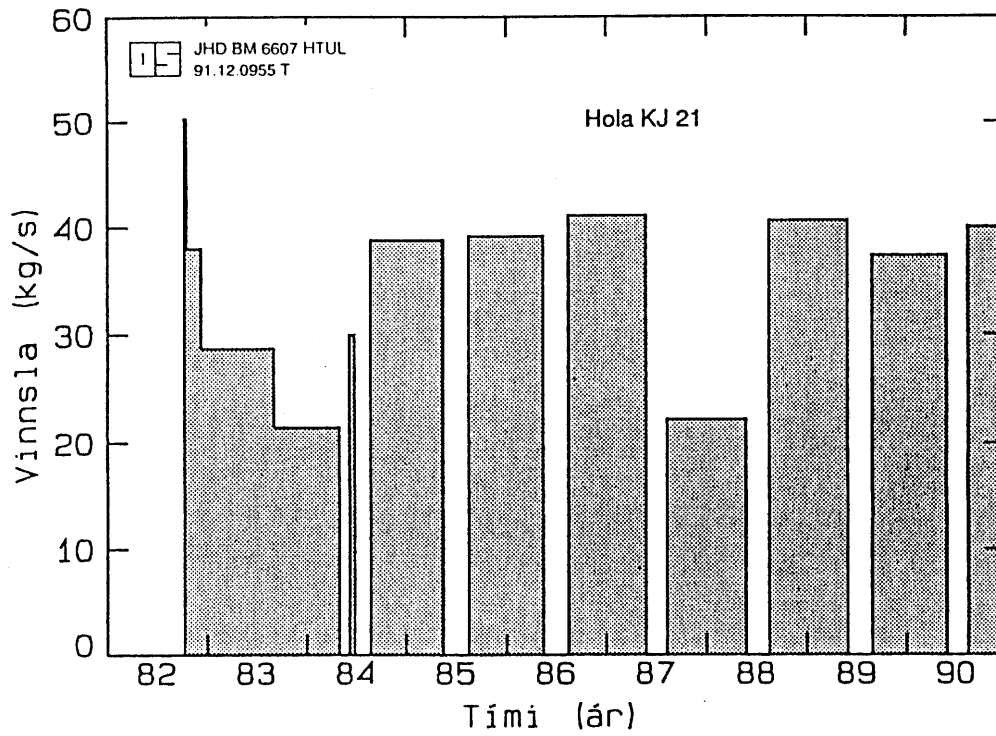
Myndir 21 og 22 sýna vinnslu úr holum á Hvíthólum fram til áramóta 1990/91, en vinnsla hófst þar 9. október 1982 er holu KJ-21 var hleypt upp. Vinnsla úr holu KJ-22 hófst um ári seinna eða 19. ágúst 1983. Líkanið sem notað var til að herma náttúrulegt ástand jarðhitakerfisins er notað áfram til að herma vinnslusögu þess. Náttúrulega ástand kerfisins er þá tekið sem upphafsástand þess fyrir vinnslu. Bætt er inn svelgjum í þá búta þar sem vatnsæðar holanna myndu vera. Massi er því tekinn úr þeim bútum í samræmi við vinnslu holanna. Þannig er líkanið keyrt áfram og reynt að fá fram svipað þrýstifall í líkaninu og mælt er við holurnar. Einnig er reynt að fá svipað vermi úr svelgjunum og mælist frá holunum. Þar sem fleiri en ein æð er virk í holunum þarf að skipta vinnslunni milli æða. Áætlað er að um 65% massastreymis holu KJ-21 komi að jafnaði úr efri æð holunnar á um 630 m dýpi en um 35% þess úr neðri æðum á um 975 m dýpi. Fyrir holu KJ-22 er áætlað að um 40% massastreymisins komi úr efri æðum holunnar og þá aðallega æðinni á um 600 m dýpi, en um 60% þess úr dýpri æðum aðallega úr æðinni á 1270 m dýpi. Hermun vinnslusögunnar setur þannig frekari skorður á lekt og grophlutfall í þeim hluta kerfisins sem vinnslan hefur áhrif á. Ef hermun vinnslusögunar kallar á breytingar fyrir þessar eðlisstærðir þá þarf að keyra líkanið aftur frá byrjun í náttúrulegt ástand og svo áfram. Þannig getur þurft að fara fram og aftur mörgum sinnum til að fá viðunandi samsvörun við mældar stærðir og ferlið því tímafrekt.

Auk ofangreinds voru settir tveir sammiðja hringir inn í búтана sem innihalda æðar holu KJ-21. Hringirnir hafa ræðusana 20 m og 40 m, en ef bútarnir sem þeir eru í væru hringir hefðu þeir ræðus um 80 m. Með því að setja þessa hringi inn í líkanið er reynt að líkja betur eftir þrýstifallinu næst holunni. Myndir 23 til 28 sýna hvernig líkaninu hefur tekist að herma vinnslusögu hola KJ-21 og KJ-22. Samsvörun við mældan þrýsting í holunum er góð. Þá fæst góð samsvörun við vermi holu KJ-22, en reiknað vermi holu KJ-21 er nokkuð of lágt sérstaklega seinni hluta vinnslusögunnar. Þetta lágt vermi stafar af mikilli þrýstingsjöfnun umhverfis holu KJ-21 er vinnslan úr henni minnkar um nærri helming veturinn 1987-88, en hér er vetrarvinnslan áætluð út frá aflmælingum gerðum við upphleypingu og lokun holunnar. Veturinn 1989-90 var holan keyrð þannig við upphleypingu að hún skilaði sem mestri gufu, t.d. með því að lækka toppþrýsting hennar sem mest. Líklegt er að suða hafi þá orðið við neðri æð holunnar þannig að rennslislutföll æðanna geta hafa breytst frá því sem áætlað er (65/35). Þá er vinnsla holanna ekki eins jöfn og áætlað er, heldur oft meiri er holunum er hleypt upp á haustin og dalar svo aðeins þar til þeim er lokað á vorin. Suða myndast því fljótt við holurnar og vermi þeirra hækkar mun fyrr en líkanreikningarnir sýna. Einnig verður vermið þá að jafnaði hærra en fæst úr líkanreikningunum.

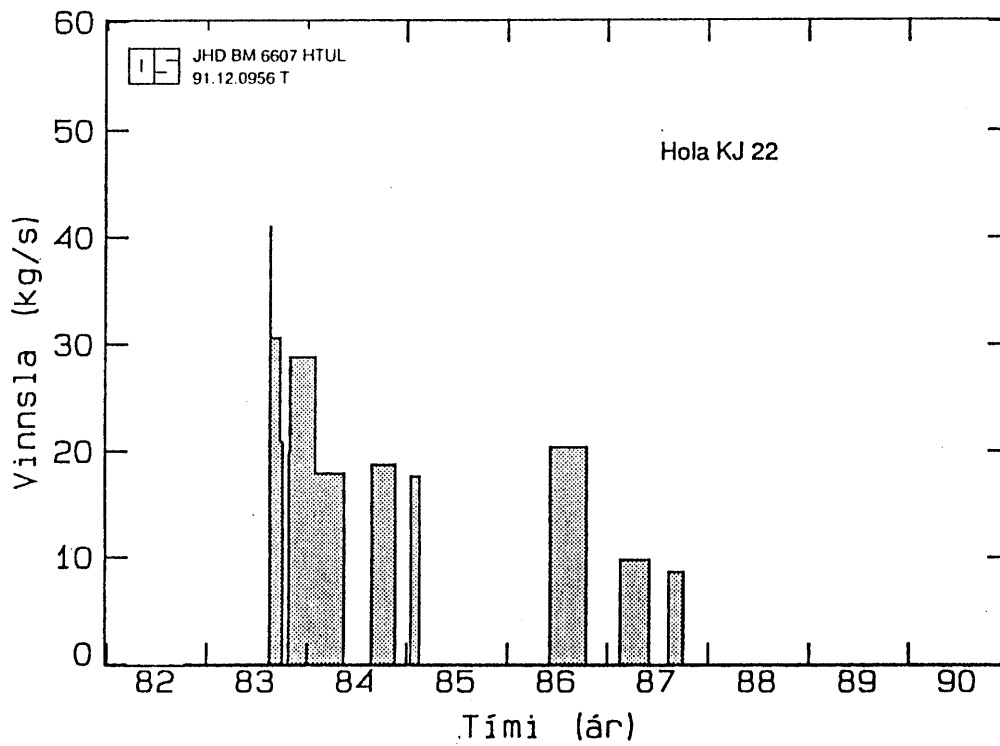
Samsvörun við mældan hita í holunum verður að teljast góð fyrir holu KJ-21 og efri hluta holu KJ-22. Fyrir neðri hluta holu KJ-22 er reiknaður hiti hins vegar um 20-30°C of hár eins og áður er komið fram. Fáar mælingar eru til úr holu KJ-22 og flestar mældar fáum klukkustundum eftir blástur holunnar og því oft töluvert truflaðar af blæstrinum. Samanburður við þá holu er því erfiður. Athugandi er hvort ekki eigi að mæla holur KJ-22 og KJ-23 með sömu tíðni og holu KJ-21 í reglulegu vinnslueftirliti.

Búton líkans (a) er önnur og aðeins öðruvísi við holurnar auk þess sem uppstreymið að Hvíthólasvæðinu er nær Hvíthólum en í líkani (b). Líkan (a) nær ekki að herma fyrri hluta vinnslusögunar eins vel og líkan (b) hér að ofan, þar sem suða eykst hægt í stórum bútum líkans (a) austan Hvíthóla þegar vinnsla frá Hvíthólum hefst. Hins vegar verður þrýstingsjöfnun hægari í stórum bútum þegar vinnsla er minnkuð og suða minnkar þá lítið í þeim. Þannig nær líkan (a) að nálgast vinnslusöguna betur undir lok tímabilsins en líkan (b).





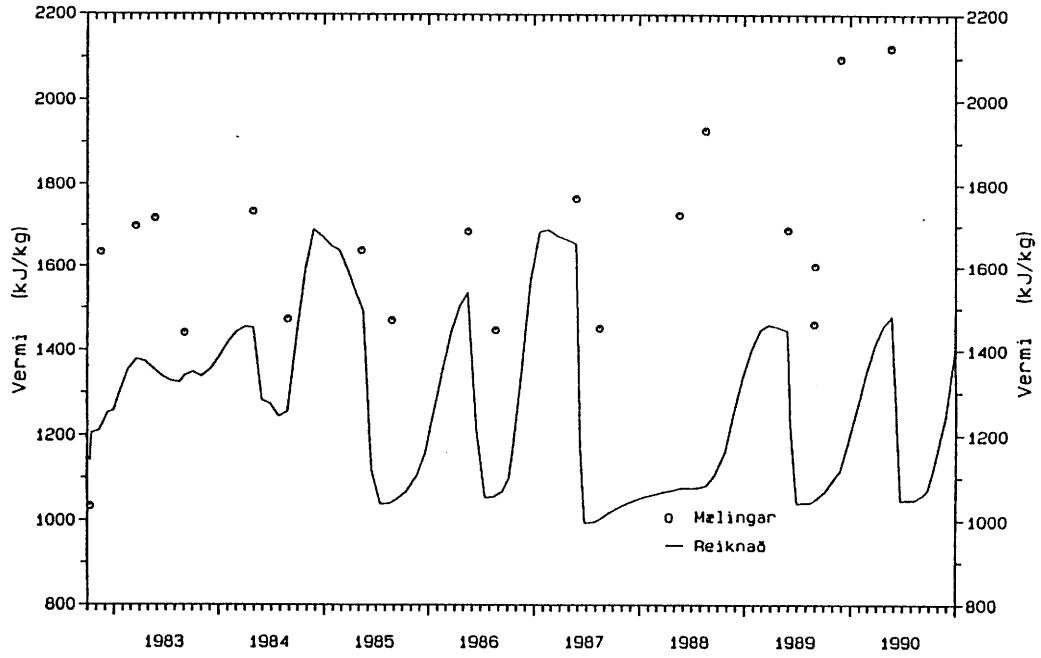
Mynd 21. Vinnsla úr holu KJ-21



Mynd 22. Vinnsla úr holu KJ-22

JHD-BM-6607-Omar  
92.02.0022 T

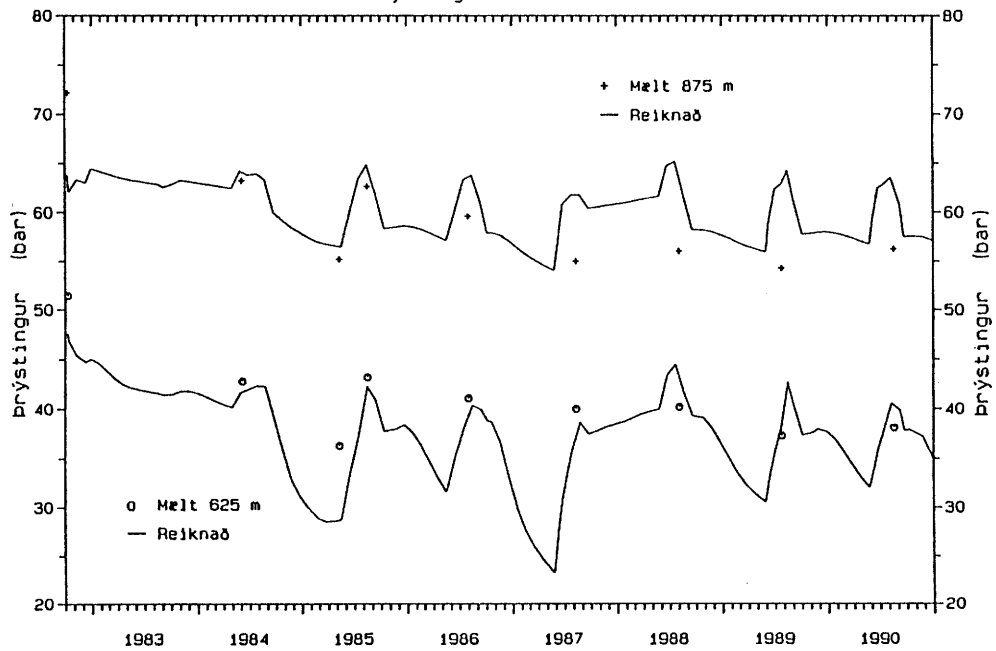
KRAFLA HVITHÖLAR  
Vermi holu KJ-21



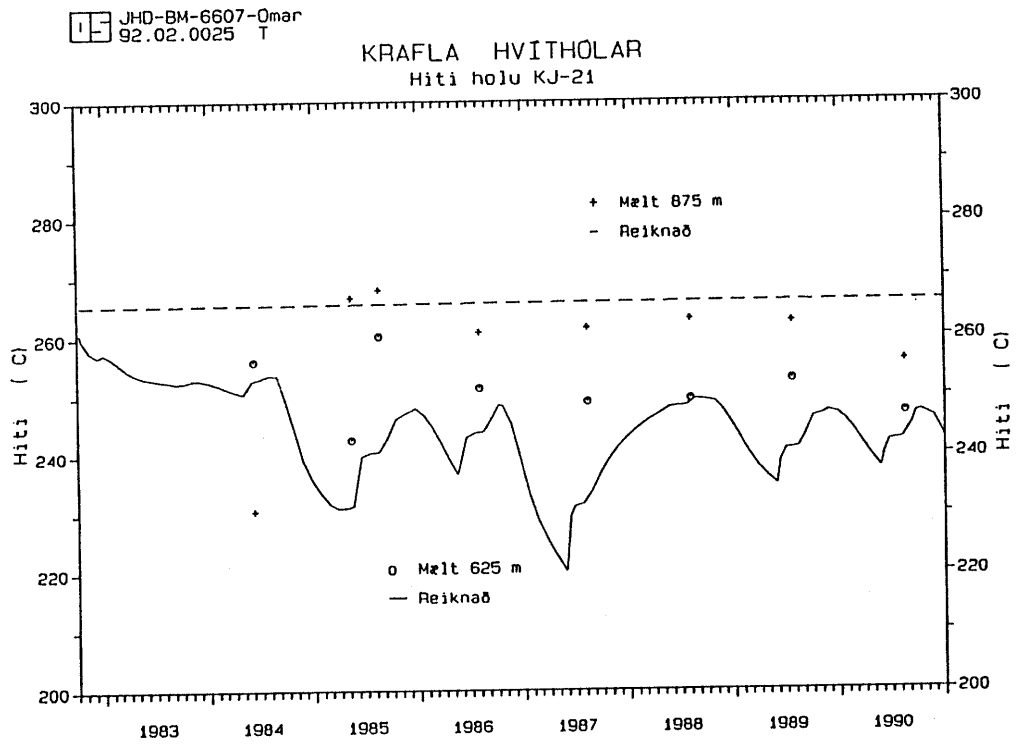
Mynd 23. Nálgun líkans við vermi holu KJ-21

JHD-BM-6607-Omar  
92.02.0024 T

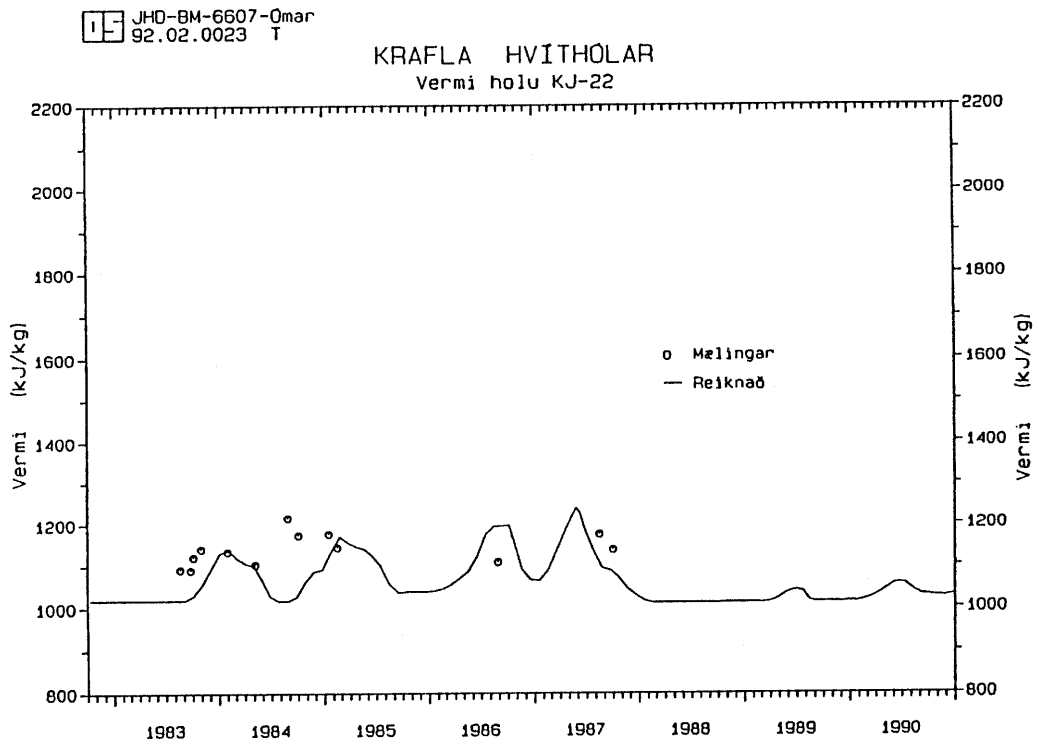
KRAFLA HVITHÖLAR  
Þrýstingur holu KJ-21



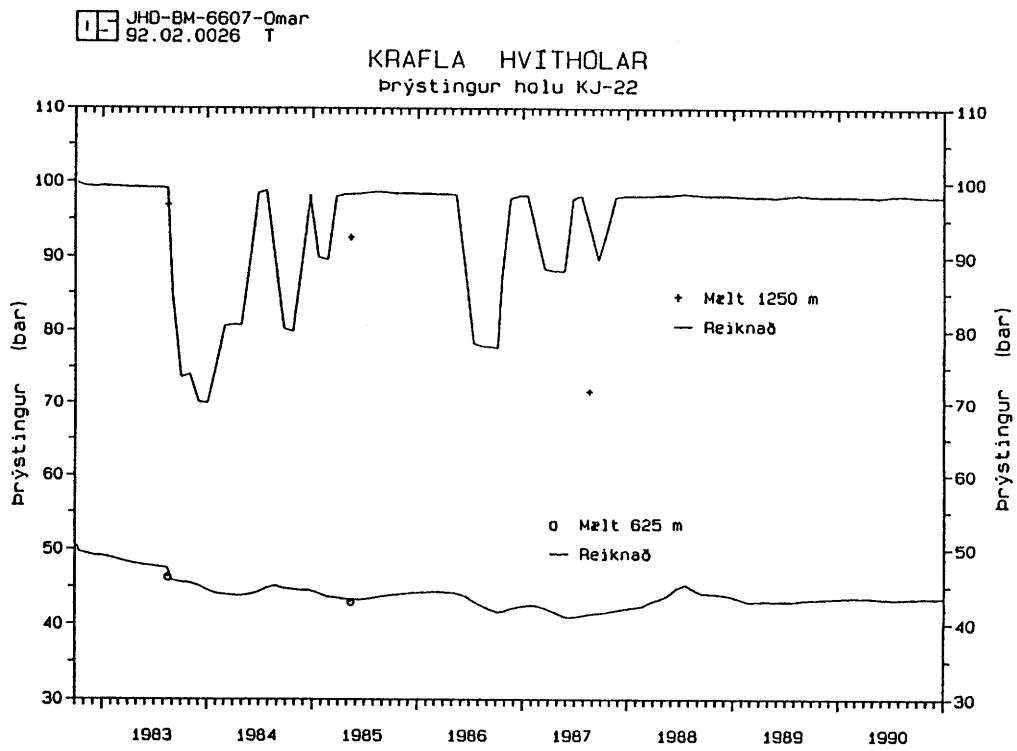
Mynd 24. Nálgun líkans við þrýsting á 625 m og 875 m dýpi í holu KJ-21



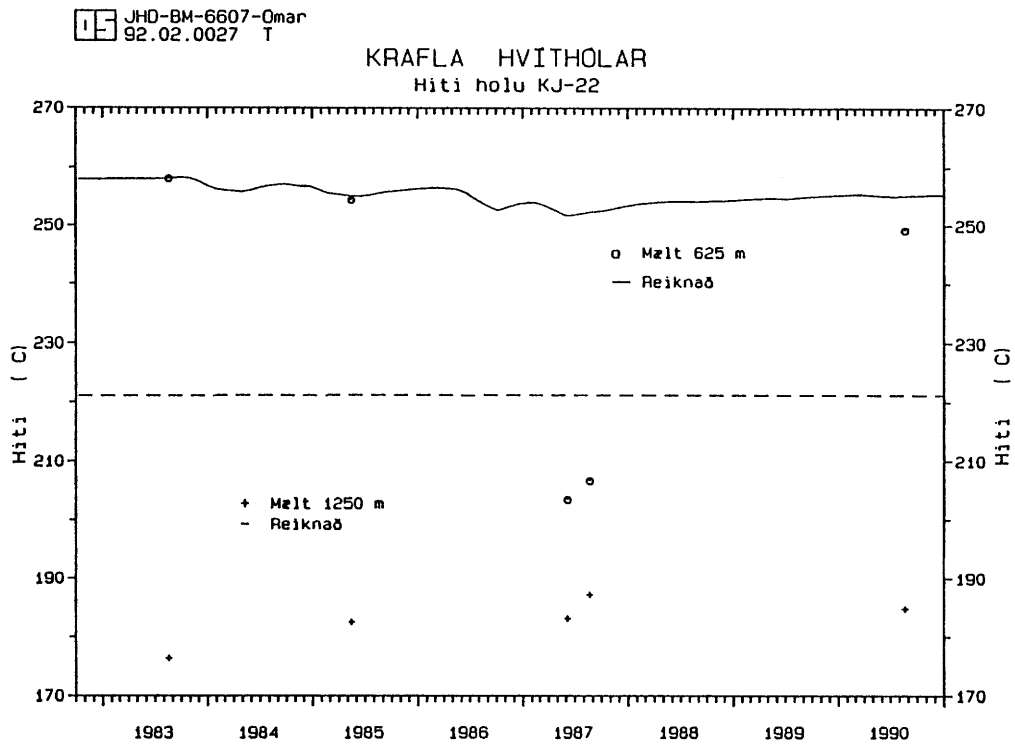
Mynd 25. Nálgun líkans við hita á 625 m og 875 m dýpi í holu KJ-21



Mynd 26. Nálgun líkans við vermi holu KJ-22



Mynd 27. Nálgun líkans við þrýsting á 625 m og 1250 m dýpi í holu KJ-22



Mynd 28. Nálgun líkans við hita á 625 m og 1250 m dýpi í holu KJ-22

## 9. NIÐURSTÖÐUR

Hér hefur verið lýst gerð þrívíðs reiknilíkans af jarðhitakerfi Hvíthóla. Líkanið líkir eftir hita- og þrýstingsdreifingu í kerfinu við náttúrulegar aðstæður og má nota til að gera spáreikninga fyrir ákveðin vinnslutilfelli. Líkaninu svipar til annars reiknilíkans (líkan a) af Hvíthólum (Helga Tuliníus og Ómar Sigurðsson, 1991), en tekur meira tillit til hita- og þrýstingsdreifingar við norðurjaðar svæðisins. Þá er þetta líkan á vissan hátt einfaldara að gerð en líkan (a) og því um fjórfallt til fimmfallt hraðvirkara en það.

Náttúrulegt innstreymi í kerfið er áætlað um eða innan við 9 kg/s af 340 °C vatni. Þá benda reikningar til að uppstreymi vatnsins til efri laga líkansins verði að vera austur af Hvíthólum. Sama niðurstaða fæst með hinu líkaninu og benda líkönin til að fjarlægð til uppstreymisins sé um 500-1000 m.

Að meðaltali er áætlað að um 65% massaflæðis holu KJ-21 komi úr efri æðum (630 m) holunnar og um 35% úr neðri æðum (975 m) hennar. Fyrir holu KJ-22 er áætlað að um 40% massaflæðisins komi úr efri æðum (600 m) holunnar og um 60% úr neðri æðunum (1270 m).

Flestar hita- og þrýstimælingar sem til eru úr holu KJ-22 eru truflaðar af blæstri holunnar. Þá eru fáar mælingar til úr holu KJ-23. Því er æskilegt að holur KJ-22 og KJ-23 verði mældar með sömu tíðni og hola KJ-21 í reglulegu vinnslueftirliti svæðisins.

## 10. ENDURBÆTUR REIKNILÍKANS

Gildi á lekt í kerfinu gæti þurft að stilla betur af og þá sérstaklega til að minnka suðu í norð-austur hluta kerfisins. Kanna þyrfti næmni líkansins fyrir breytingum á einstaka þáttum. Þar má nefna að náttúrulegt innstreymi er illa ákvarðað, en í reikningum var því breytt milli 8-10 kg/s án þess að það hefði mikil áhrif á aðrar stærðir. Þannig ætti einnig að kanna mismunandi grophlutfall, en það hefur lítið verið stillt af í líkaninu.

Minnka þarf lekt stemmisins sem liggur milli hola KJ-21 og KJ-23 um Hvíthóla til að auka þrýstifall milli holanna. Þá þarf að laga hita- og þrýstingsstigla sem notaðir eru sem randskil-yrði á vesturjaðri líkansins, en hitastigull er þar minni en notaður er í núverandi líkani. Þá gæti þurft að takmarka rennslissvið holu KJ-23 til að ná betur fram mældum þrýstingsmun milli holanna. Þessar athugasemdir gilda einnig fyrir hitt þrívíða líkanið (líkan a).

Í þessu líkani er fjarlægðin að uppstreyminu um 1000 m, en í líkani (a) er uppstreymið látið koma í mjög stóran búi sem nær frá um 350 m til um 800 m frá holu KJ-21 á Hvíthólum. Búturinn er um 0,18 km<sup>2</sup> eða um 4% af flatarmáli þess svæðis sem líkanreikningarnir taka til. Undir lok þekkrar vinnslusögu er líkan (a) farið að nálgast vermi holu KJ-21 betur en líkan (b), sem hermir fyrri hluta vinnslusögunnar betur. Ástæðan er að suða minnkar það mikið við Hvíthóla vegna þrýstingsjöfnunar er vinnsla úr holu KJ-21 minnkar um nær helming, að það tekur líkan (b) um tvö ár að ná upp svipaðri suðu aftur á svæðinu. Í líkani (a) gerist þrýstingsjöfnunin í mun stærri bótum og því hægari og minna dregur úr suðunni. Þar er uppstreymið einnig nær svo líkanið er fljótar að komast í fyrra ástand. Þetta getur bent til að færa þurfi staðsetningu uppstreymisins í líkani (b) nær Hvíthólum, þannig að fjarlægðin til þess sé ekki meiri en 700-800 m.

## HEIMILDIR

- Ásgrímur Guðmundsson, 1983: *Jarðfræði suðurhlíða Kröflu*. Hrafnáþing um stöðu Kröfluvirkjunar, Rafmagnsveitur Ríkisins Kröfluvirkjun, 25s.
- Guðmundur S. Böðvarsson, K. Pruess, V. Stefansson and E.T. Eliasson, 1984: The Krafla Geothermal Field, Iceland. 2. The natural state of the system. *Water Resources Research*, Vol. 20, No. 11, 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, 186s.
- Guðmundur Ó. Friðleifsson, 1984: *Borrannsóknir á Hvíthólasvæðinu*. Hrafnáþing um stöðu Kröfluvirkjunar, Rafmagnsveitur Ríkisins Kröfluvirkjun, 30s.
- Helga Tulinius og Ómar Sigurðsson, 1988a: *Jarðhitasvæðið við Hvíthóla. Hermireikningar og vinnsluspá*. Orkustofnun, OS-88007/JHD-03 B, 24s.
- Helga Tulinius og Ómar Sigurðsson, 1988b: *Hvíthólar - Tillögur að framhaldsverkefni við hermun á Hvíthólasvæðinu*. Greinargerð Orkustofnunar, HTul/Ómar-88/02, 2s.
- Helga Tulinius og Ómar Sigurðsson, 1991: *Krafla. Þrívíð hermun fyrir vinnslusvæði á Hvíthólum*. Orkustofnun, OS-91046/JHD-07 B, 37s.
- Long, J.C.S., J.S. Remer, C.R. Wilson and P.A. Witherspoon, 1982: Porous media equivalents for network of discontinuous fractures. *Water Resources Research*, Vol. 18, 645-658.
- Pruess, K. and R.C. Schroeder, 1980: *SHAFT-79 User's Manual*. LBL 10861, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, Berkeley, California, U.S.A. 47s.
- Pruess, K., G.S. Bodvarsson, V. Stefansson and E.T. Eliasson, 1984: The Krafla Geothermal Field, Iceland. 4. History match and prediction of individual well performance. *Water Resources Research*, Vol. 20, No. 11, 1561-1584.
- Pruess, K., 1986: *TOUGH User's guide*. LBL-20700, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, Berkeley, California, U.S.A. 85s.
- Tómas Jóhannesson, 1990: *Prófanir á TOUGH*. Greinargerð Orkustofnunar, TJ-90/02, 10s.