



ORKUSTOFNUN
Jarðhitadeild

Helga Tulinius
Ómar Sigurðsson

KRAFLA

Þrívíð hermun fyrir vinnslusvæði á Hvíthólum

OS-91046/JHD-07

Reykjavík, desember 1991

ISBN 9979-827-02-5

Unnið fyrir
Landsvirkjun



ORKUSTOFNUN

Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

**Helga Tulinius
Ómar Sigurðsson**

KRAFLA

Þrívíð hermun fyrir vinnslusvæði á Hvíthólum

OS-91046/JHD-07

Reykjavík, desember 1991

ISBN 9979-827-02-5

**Unnið fyrir
Landsvirkjun**

EFNISYFIRLIT

1. INNGANGUR	5
2. FRAMKVÆMD	6
2.1 Forritið TOUGH	6
2.2 Hvíthólasvæðið	6
2.3 Reiknilíkan af Hvíthólasvæðinu	8
3. NÁTTÚRULEGT ÁSTAND HVÍTHÓLASVÆÐISINS	15
4. VINNSLUGÖGN OG VINNSLUSAGA	20
5. VINNSLUSPÁ	25
6. UMRÆÐA	35
7. NIÐURSTÖÐUR	35
HEIMILDIR	36

TÖFLUSKRÁ

1. Reiknaður og mældur þrýstingur og hiti	19
---	----

MYNDASKRÁ

1. Afstöðumynd af Hvíthólasvæðinu	7
2. Áætlaður berghiti út frá mælingum í holum KJ-21, KJ-22 og KJ-23	9
3. Áætlaður upphafsþrýstingur í holum KJ-21, KJ-22 og KJ-23	9
4. Kubballíkan af vinnslusvæðinu, a) lag 1 - varmastreymi til yfirborðs, b) lag 1 og 2 - lekt og poruhluti, c) lag 3 - lekt og poruhluti	11-12
5. Lagskipting tví- og þrívíðu líkananna	13
6. Hlutlekt gufu og vatns	14
7. Reiknuð hitadreifing á 625 m dýpi í Hvíthólasvæðinu; fyrir vinnslu	16
8. Reiknuð hitadreifing á 875 m dýpi í Hvíthólasvæðinu; fyrir vinnslu	16
9. Reiknuð hitadreifing á 1250 m dýpi í Hvíthólasvæðinu; fyrir vinnslu	17
10. Reiknuð þrýstidreifing á 625 m dýpi í Hvíthólasvæðinu; fyrir vinnslu	17
11. Reiknuð þrýstidreifing á 875 m dýpi í Hvíthólasvæðinu; fyrir vinnslu	18
12. Reiknuð þrýstidreifing á 1250 m dýpi í Hvíthólasvæðinu; fyrir vinnslu	18
13. Vinnslusaga holu KJ-21 tímabilið 1982.10.09 - 1990.12.31	21
14. Vinnslusaga holu KJ-22 tímabilið 1982.10.09 (1983.08.19) - 1990.12.31	21
15. Reiknaður og mældur þrýstingur á 625 m dýpi í holu KJ-21 frá 1982.10.09.	22
16. Reiknaður og mældur þrýstingur á 875 m dýpi í holu KJ-21 frá 1982.10.09.	22
17. Reiknað og mælt vermi vatns úr holu KJ-21 frá 1982.10.09.	23
18. Reiknaður og mældur hiti á 625 m dýpi í holu KJ-21 frá 1982.10.09.	24
19. Reiknaður og mældur hiti á 875 m dýpi í holu KJ-21 frá 1982.10.09.	24
20. Vinnsluspá 1. Þrýstingur og vermi fram til 2010	27
21. Vinnsluspá 2. Þrýstingur og vermi fram til 2010	28
22. Vinnsluspá 3. Þrýstingur og vermi fram til 2010	29
23. Vinnsluspá 4. Þrýstingur og vermi fram til 2000	30
24. Vinnsluspá 5. Þrýstingur og vermi fram til 2000	31
25. Vinnsluspá 6. Þrýstingur og vermi fram til 2000	32
26. Vinnsluspá 8. Þrýstingur og vermi fram til 2010	33
27. Vinnsluspá 9. Þrýstingur og vermi fram til 2010	34

1. INNGANGUR

Á árunum 1987 og 1988 var gert á Orkustofnun átak til eflingar á þekkingu í forðafræði jarðhitasvæða. Orkustofnun hafði nokkru áður eignast tölvuforrit til hermireikninga fyrir jarðhitakerfi. Liður í ofangreindu átaki var að þjálfa starfsmenn í notkun þessara forrita og voru í þeim tilgangi m.a. valin tvö hérlend jarðhitakerfi til hermunar. Annað þeirra var lághitakerfi, en hitt háhitakerfi. Fyrir valinu sem háhitakerfi varð Hvíthólasvæðið í Kröflu, þar sem það þótti hæfilega stórt og afmarkað til að henta fyrir ofangreinda þjálfun. Jarðhitakerfið var nálg- að með tvívíðu líkani og náttúrulegt ástand þess og breytingar með tíma hermdar með forritinu SHAFT-79 (Helga Tulinius og Ómar Sigurðsson, 1988a). Allan kostnað af því verki bar Orkustofnun.

Meðal niðurstaðna úr ofangreindum líkanreikningum má nefna að miðað við vinnslustýringu Hvíthólasvæðisins síðustu ára myndi jarðhitakerfið aðeins endast í um 10 ár. Vegna þess hve tvívíða líkanið var einfalt að gerð gat það ekki nema að takmörkuðu leyti tekið tillit til að- streymis að Hvíthólasvæðinu úr norðri og suðri. Landsvirkjun hafði hins vegar áhuga á að fá betra afkastamat fyrir jarðhitakerfi Hvíthóla. Til þess varð að gera þrívítt líkan af Hvíthólum, en hermireikningarnir voru þannig orðnir of viðamiklir til að rúmast innan ofangreindst átaks- verkefnis. Á árinu 1990 samdi Landsvirkjun því við Orkustofnun um að gera þrívítt reiknilíkan af Hvíthólasvæðinu og endurskoða afkastamat jarðhitakerfisins.

Á árunum 1990 og 1991 var unnið með nokkrum hléum að gerð þrívíðs reiknilíkans af jarð- hitakerfinu við Hvíthóla og umhverfi þess. Í meginatriðum var fylgt áætlun, sem sett var fram í greinargerð Orkustofnunar (Helga Tulinius og Ómar Sigurðsson, 1988b) um lagfæringar á tvívíða líkaninu og breytingu þess yfir í þrívítt líkan. Skýrslan fjallar um gerð líkansins og hermun náttúrulegs ástands jarðhitakerfisins ásamt breytingum sem orðið hafa vegna vinnslu síðustu ára. Að lokum eru settar fram spár um hegðun jarðhitakerfisins fyrir mismun- andi vinnslutilfelli og afköst kerfisins áætluð.

Rétt fyrir upphaf verksins var keypt til Orkustofnunar nýtt forrit til hermireikninga fyrir sjóð- andi jarðhitakerfi. Forritið, sem kallast TOUGH (Karsten Pruess, 1986), leysti af hólmi forrit- ið SHAFT-79 (Pruess og Schroeder, 1980), sem notað var við fyrri reikningana. Forritið TOUGH tekur minna diskarými á tölvu, er hraðvirkara og býður upp á fleiri möguleika en forritið SHAFT-79. Hins vegar fór töluverður tími í að setja forritið upp og fá það til að vinna rétt, eftir að þrívíða líkanið fyrir Hvíthóla hafði verið sett upp. Þá fór mikill tími í að ná upp eðlilegum keyrsluhraða á tölvu Orkustofnunar fyrir líkanreikninga, þar sem leiðbeiningar um innri gerð forritsins eru takmarkaðar. Varð jafnvel að skrifa til höfundar forritsins og fá hann til að kanna hvað ylli óvenju hægverkri samleitni í fylkjareikningi forritsins. Þetta varð til þess að allar tímaáætlanir, sem settar höfðu verið fram um hermun Hvíthólasvæðisins, fóru alger- lega úr böndunum. Eftir að þessir örðugleikar höfðu verið yfirstignir fór nokkuð meiri tími í að læra á forritið og að nálgast vandamálið en ráðgert var, enda er þetta í fyrsta skipti hér á landi sem hermireikningum er beitt á tveggja fasa jarðhitakerfi í þremur víddum.

2. FRAMKVÆMD

2.1 Forritið TOUGH

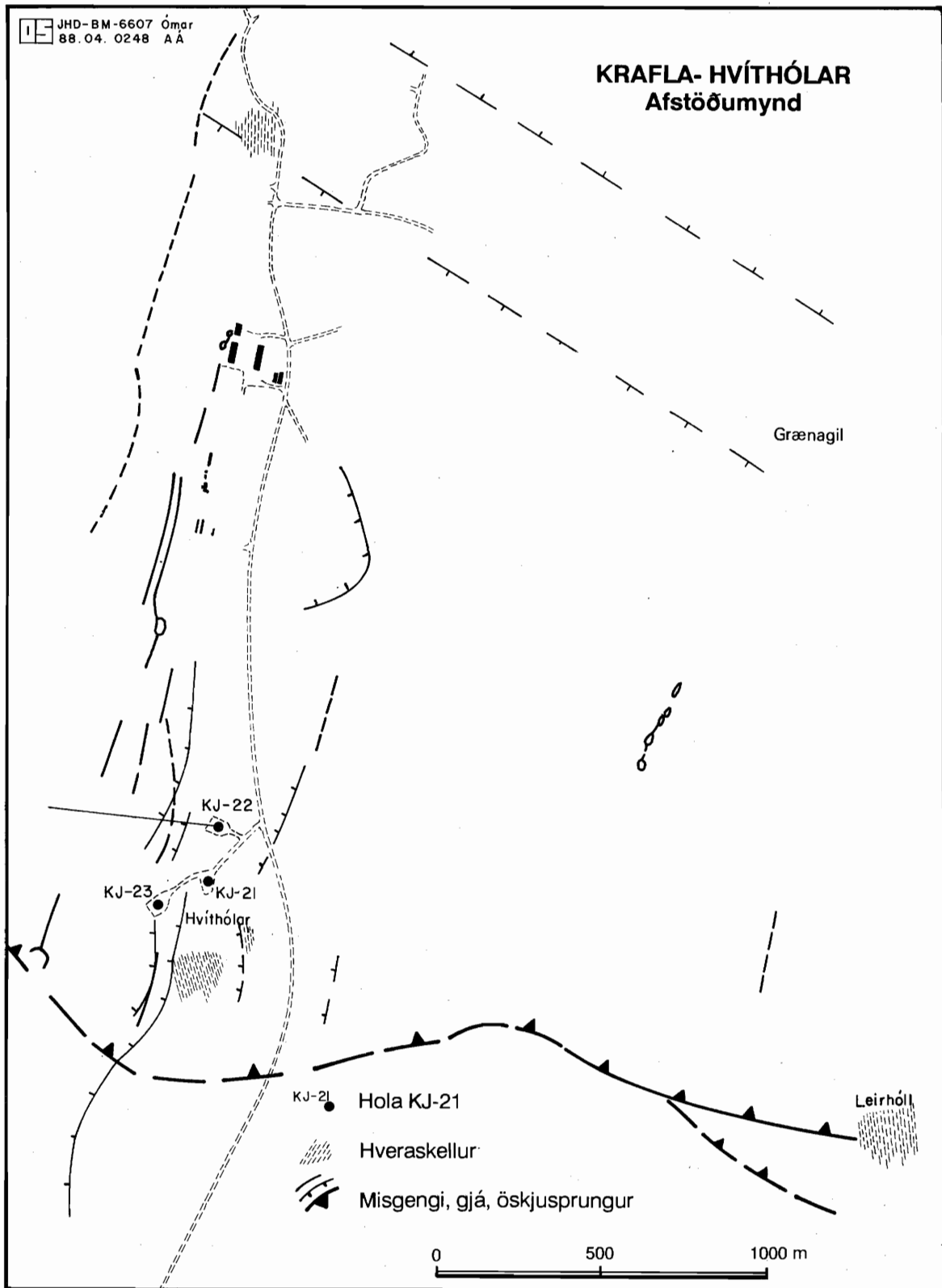
Forritið TOUGH er sérhæfð útgáfa af forritinu MULKOM til hermunar á vatnskerfum. Nafn þess er stytting úr "transport of unsaturated groundwater and heat". Hjá Orkustofnun kemur það í stað forritsins SHAFT-79 til að herma eftir hita- og þrýstibreytingum í sjóðandi jarðhitakerfum. Forritið leysir jöfnur fyrir flæði massa og orku í smákubbalíkani af jarðhitakerfi með svokallaðri "integrated finite difference" aðferð. Helsti munur á forritunum er sá að SHAFT-79 notaði töflur fyrir ástandsstærðir vatns og gufu, en TOUGH notar jöfnur sem gefa stærðirnar með sömu nákvæmni og gufutöflur (International Formulation Committee, 1967). Auk þessa býður forritið TOUGH upp á reikninga fyrir ýmis sértilfelli t.d. á vatnsstreymi um ómettaðan jarðveg, þar sem tekið er tillit til hárpípukrafta, en þeir eru miklir þar sem vatn og loft mætast.

Í forritinu er farið með hvern kubb eins og hann sé gropið efni. Jarðhitakerfið á Hvíthólum er dæmigert sprungukerfi. Holrýmd er að mestu bundin við bergið sem er lítið lekt, en jarðhitavökvinn berst um kerfið eftir sprungum. Í forritinu er sprungum ekki lýst nákvæmlega heldur gert ráð fyrir að hver kubbur sé úr gropnu efni. Það hefur hins vegar sýnt sig við hermireikninga á öðrum svæðum (Leirbotnar og Suðurhlíðar í Kröflu, Nesjavellir o.fl.) að þetta misræmi milli reiknilíkans og náttúrunnar er í lagi og hefur fengist viðunandi samræmi milli líkans og gagna með forritum eins og hér er notað, þar sem reikningar miðast við gropið efni (Guðmundur S. Böðvarsson, 1987 og Guðmundur S. Böðvarsson o.fl., 1984). Ástæðan er sú að með auknum þéttleika smásprungna innan hvers kubbs nálgast eiginleikar hans eiginleika gropins bergs, þar sem holrýmið er nokkuð jafndreift um bergmassann (Pinder 1979 og Long o.fl. 1982). Þessi forrit eru yfirleitt einfaldari í notkun en forrit fyrir sprunginn bergmassa og reikningar með þeim því auðveldari og ódýrari.

Í forritinu TOUGH er eins og í forritinu SHAFT-79 sú einföldun gerð að vökvinn í jarðhitakerfinu er meðhöndlaður eins og um hreint vatn væri að ræða. Því er ekki tekið tillit til gasa eða uppleystra efna í jarðhitavatninu. Í jarðhitavatninu frá Hvíthólasvæðinu er styrkur gass og uppleystra efna fremur lítill þannig að áhrif þeirra á eðliseiginleika vatnsins ættu að vera hverfandi og þessi einföldun því réttlætanager.

2.2 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; Benedikt Steingrímsson og Grímur Björnsson, 1990; Grímur Björnsson o.fl., 1989; 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. Hólan hefur gefið um 40 kg/s í heildarrennsli og er áætlað að um 60-70% rennslisins komi úr efri æðinni. Hóla KJ-22 var skáboruð í 1877 m dýpi sem svarar til um 1740 m raundýpis, en heildarhliðrun hennar er um 540 m í botni. Hólan skar nokkrar æðar, þær helstu í 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 hóla KJ-22 komi úr efstu æðunum, en neðri æðarnar gefi um 60% af heildarrennslinu sem er alls um 20 kg/s. Hóla KJ-22 hefur ekki verið nýtt síðan síðla árs 1986 og hefur hún staðið að mestu lokuð. 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 eru of tregar fyrir virkjun holunnar. Hóla KJ-23 er vestan gossprungu og misgengis sem liggja um Hvíthólasvæðið, en hóla KJ-21 er austan þess.



MYND 1. Afstöðumynd af Hvíthólasvæðinu

Myndir 2 og 3 sýna áætlaðan berghita og upphafsþrýsting í jarðhitakerfinu við holurnar. Berghitinn í öllum holunum vex hratt niður fyrir 500 m dýpi og er hann nánast eins í holum KJ-21 og KJ-22 niður á 800 m dýpi, en heldur lægri í KJ-23. Berghitinn í holu KJ-21 nær hámarki á um 550 m dýpi (260°C) og breytist óverulega niður í 900 m dýpi, en þar lækkar hann og er komin niður fyrir 220°C í botni á 1200 m dýpi. Berghitaferli í holu KJ-23 svipar til berghita í KJ-21 nema hvað hann er allur um 15-20°C lægri. Hann nær lágmarki í 1400 m, 195°C, en þaðan hækkar hann til botns í 245°C. Eins og fyrr segir er berghiti eins í holu KJ-22 og holu KJ-21 niður í 800 m, en þar kólnar hola KJ-22 mun hraðar en KJ-21 og nær lágmarki í um 1400 m dýpi þar sem hiti er komin niður fyrir 180°C. Berghiti í holu KJ-22 hækkar síðan um nokkrar gráður niður til botns. Lágur berghiti djúpt í KJ-22 stafar sennilega af því að holan, sem er skáboruð, er komin út fyrir jarðhitakerfi Hvíthóla og inn í kaldara vatnskerfi tengt norður-suður sprungusveimi sem liggur vestan við borsvæðið.

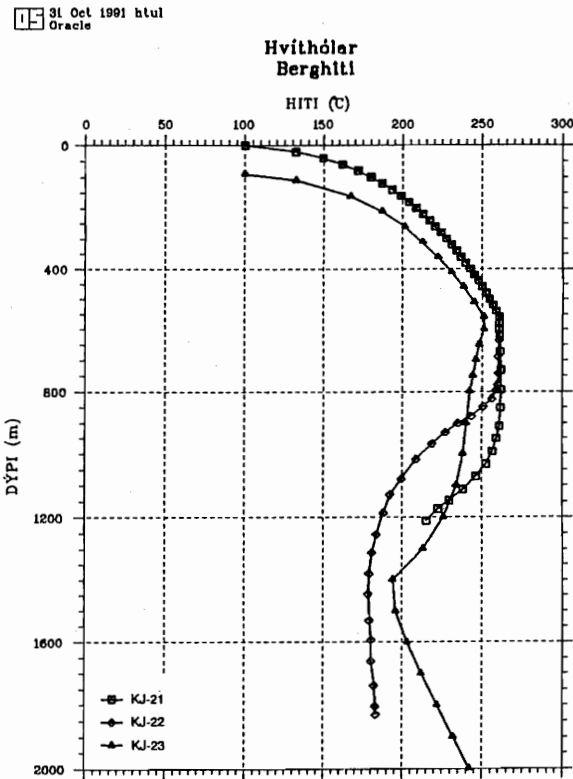
Áður en vinnsla hófst er talið að nokkur þrýstingsmunur hafi verið milli holanna og var þrýstingurinn hæstur í KJ-21, rúmlega 6 bar hærra en í holu KJ-23. Er þetta þrýstifall í svæðinu skýrt á þann veg að gossprungu og/eða misgengi, sem liggur um Hvíthóla á milli hola KJ-21 og KJ-23 (mynd 1), virki sem stemmir fyrir vatnsrennsli. Upphafsprýstingur í holu KJ-22 er svipaður og í holu KJ-21 niður í um 700 m dýpi, en þar lækkar hann miðað við holu KJ-21 og nálgaast þrýstiferil holu KJ-23. Hola KJ-22, sem eins og áður segir var skáboruð til vesturs, sker áður-urnefnda gossprungu á um 950 m dýpi. Þegar þessi þrýstimunur innan svæðisins er skoðaður ber að hafa í huga að hola KJ-21 var boruð ári fyrr en hinar holurnar og gæti vinnsla úr henni hafa lækkað þrýstinginn umhverfis holu KJ-23, áður en hún var boruð.

Hita- og þrýstiferlarnir gefa til kynna að heitur vökvi 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 rennsli sitt úr þessu kerfi, en einnig að hluta úr kaldara vatnskerfi neðan 1000 m dýpis sem tengt er norður-suður sprungusveimnum.

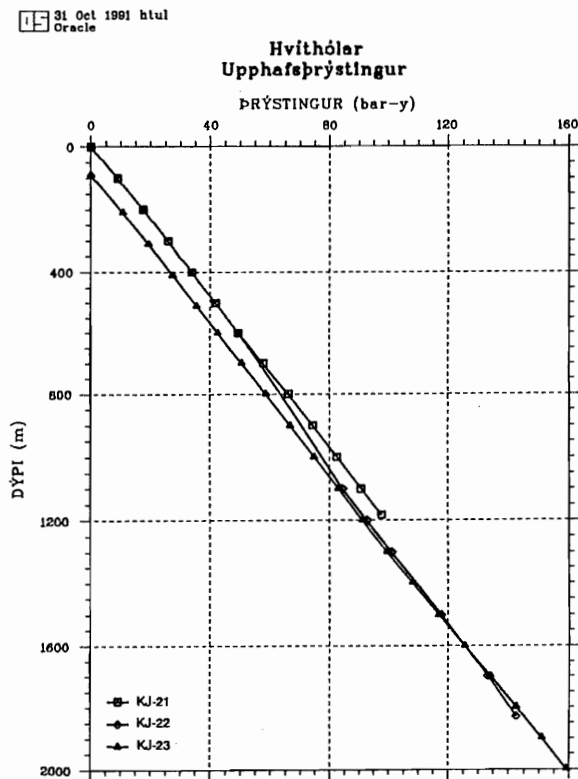
Þegar litið er á svarfgreiningar úr holunum er hægt að skipta berginu undir Hvíthólasvæðinu upp í láréttar syrpur (Ásgrímur Guðmundsson, munnlegar upplýsingar). Efst er frekar ferskt (lítið ummyndað) og lekt lag að undanskildu afmörkuðu svæði kringum holur KJ-21 og KJ-23, en þar nær ummyndun til yfirborðs. Þetta lag er 200 m þykkt. Neðan 200 m dýpis tekur við móberg sem er tiltölulega þétt og virkar sem nokkurs konar lok á jarðhitageyminn. Fyrir neðan móbergið í um 500 m dýpi taka við lekari jarðlög sem samanstanda aðallega af basaltbreksíu og eru þessi lög um 500 m þykk, þ.e. ná niður í um 1000 m. Í þessari syrpu eru æðarnar sem taka vatn úr heitari hluta jarðhitakerfisins. Í um 1000 m þéttist bergið og innskotatíðni 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 milli holanna.

2.3 Reiknilíkan af Hvíthólasvæðinu

Allar fyrirbyggjandi upplýsingar um jarðhitakerfið við Hvíthóla voru notaðar við gerð reiknilíkansins. Einnig var stuðst við niðurstöður fyrri hermireikninga af svæðinu (Helga Tulinius og Ómar Sigurðsson, 1988a). Í þeim reikningum var notað tvívítt líkan en eins og fram kemur í tillögum að framhaldi hermunar Hvíthólasvæðisins var þriðju víddinni bætt við í þessu verkefni. Eins og áður var leitast við að hafa líkanið eins einfalt og kostur var, þó þannig 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 þrýstingur í hverri holu og þrýstimun á milli holna. Holurnar eru hins vegar nálægt hver annarri og upplýsingar um breytingar í láréttum fleti því takmarkaðar við svæðið á milli þeirra.



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



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

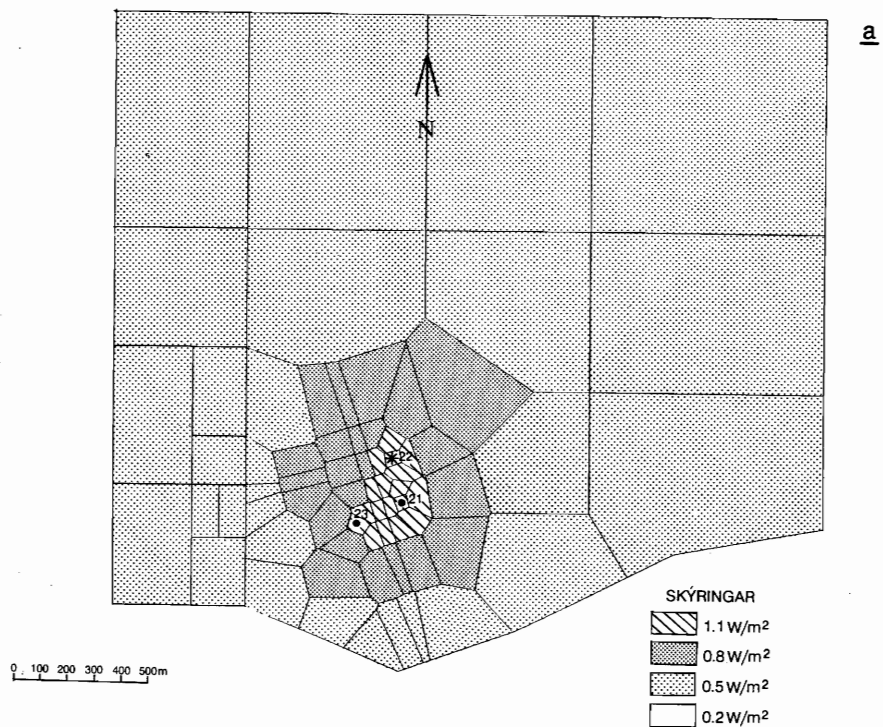
Þrívíða líkanið, sem notað var hér, er þriggja laga með 138 kubbum í hverju lagi. Á mynd 4 sést sá hluti netsins sem næstur er holunum. Kubbarnar fara stækkandi eftir því sem þeir eru lengra frá vinnslusvæðinu og eru 10 ystu kubbarnar hafðir það stórir að jaðaráhrifa gæti ekki í reikningunum yfir þann tíma sem þurfti til að fá fram náttúrulegt ástand kerfisins, þ.e. kerfið virðist vera óendanlega stórt. Forritið DMESH var notað til að búa til þann hluta líkansins sem næstur er holunum, þ.e. vinnslusvæðið (61 kubbur, 4,6 km²). Níu kubbum (62-70) var síðan bætt við vinnslusvæðið og er það því 5,7 km². Að öðru leyti var líkanið handunnið.

Tvívíða líkaninu, sem upphaflega var gert af Hvíthólum, var skipt í sjö lög, en þegar þriðju víddinni var bætt við varð líkanið óþarflega flókið og keyrslutími þess á tölvu of langur. Því var reynt að einfalda líkanið og lögnum fækkað niður í þrjú (mynd 5). Þannig nær þrívíða líkanið yfir dýptarbilið 500 m - 1500 m, í stað 0 m - 2000 m í tvívíða líkaninu. Allar vatnsæðarnar í holunum eru á dýptarbili þrívíða líkansins og er það því sá hluti jarðhitakerfisins sem mestu máli skiptir fyrir vinnsluna. Til að líkja eftir náttúrulegu varmasteymi til yfirborðs voru settir hitasvelgir í lag 1, en í tvívíða líkaninu voru notuð tvö lög til að líkja eftir hitatapi jarðhitakerfisins til yfirborðs. Neðra lagið (200 m - 500 m) í tvívíða líkaninu hafði litla lekt, þannig að massastreymi var nær ekkert upp til yfirborðs. Lag 1 í þrívíða líkaninu nær frá 500 m í 750 m og það næsta (lag 2) frá 750 m í 1000 m. Í tvívíða líkaninu var þessu dýptarbili skipt í þrjú lög. Lag 3 nær svo frá 1000 m í 1500 m. Tvívíða líkanið hafði einnig lag frá 1500 m til 2000 m, en því er sleppt í þrívíða líkaninu, þar sem engin vatnstaka er úr þessu dýptarbili og varmastraumurinn þar því nálgaður með hitagjöfum í lagi 3.

Eins og áður sagði voru settir hitasvelgir í lag 1, til að líkja eftir varmatapi jarðhitakerfisins til yfirborðs. Á sama hátt voru settir hitagjafir í lag 3, til að líkja eftir náttúrulegu varmastreymi að neðan. Varmaflæðið til neðsta lagsins var haft 0,2 W/m², sem er nokkurn veginn það sama og varmaflæðið frá meginhluta efsta lagsins. Varmatap til yfirborðs var haft breytilegt (mynd 4a), mest næst holunum (1,1 W/m²), en lækkaði út frá þeim í 0,8 W/m², þá 0,5 W/m² og að lokum í 0,2 W/m² umhverfis vinnslusvæðið. Til að líkja eftir innstreymi heits vatns inn í jarðhitakerfið var sett ein uppspretta undir kubb 8 í lagi 3 (mynd 4c).

Varmaleiðni bergs var höfð eins í öllu kerfinu eða 2,0 W/m°C og eins eðlismassi þess 2650 kg/m³. Hlutlekt gufu og vatns var látin breytast línulega með mettunarstigi. Vatn nær þannig ekki að streyma um bergið fyrr en vatnsmettunin nær 30%. Hlutlekt vatns verður svo 1 við 100% vatnsmettun. Gufa verður hreyfanleg um bergið við 5% gufumettun, en það samsvavar 95% vatnsmettun. Eftir nokkrar prófanir var ákveðið að hlutlekt gufu ykist línulega upp í 1 við 70% gufumettun (30% vatnsmettun, mynd 6).

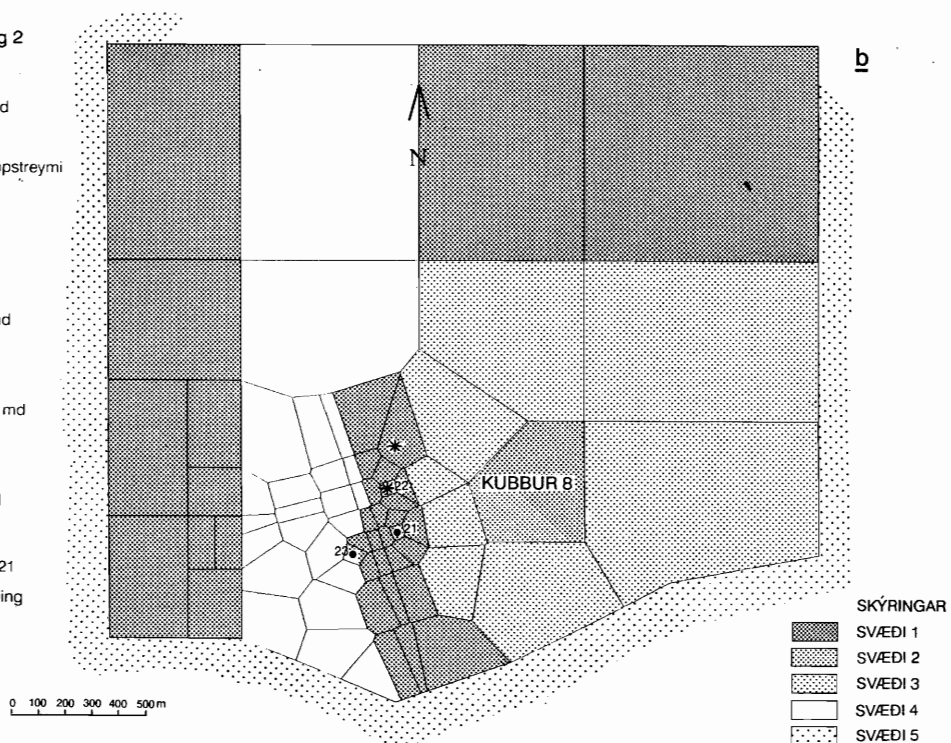
Lag 1



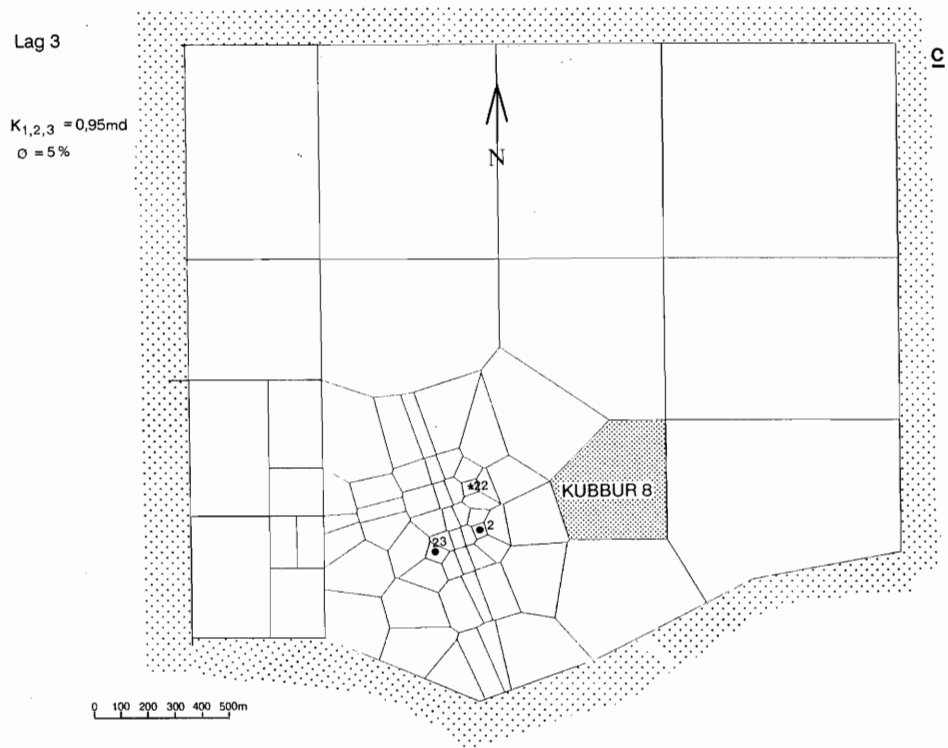
MYND 4a. Kubbálíkan af vinnslusvæðinu, lag 1 - varmastreymi til yfirborðs

Lag 1 og 2

- SVÆDI 1
- $K_{1,2,3} = 10 \text{ md}$
- $\emptyset = 5\%$
- SVÆDI 2 - Uppstreymi
- $K_{1,2} = 10 \text{ md}$
- $K_3 = 30 \text{ md}$
- $\emptyset = 9\%$
- SVÆDI 3
- $K_{1,2,3} = 10 \text{ md}$
- $\emptyset = 9\%$
- SVÆDI 4
- $K_{1,2,3} = 0.95 \text{ md}$
- $\emptyset = 5\%$
- SVÆDI 5
- $K_{1,2,3} = 5 \text{ md}$
- $\emptyset = 5\%$
- 21. Hóla KJ-21
- * Niðurdæling

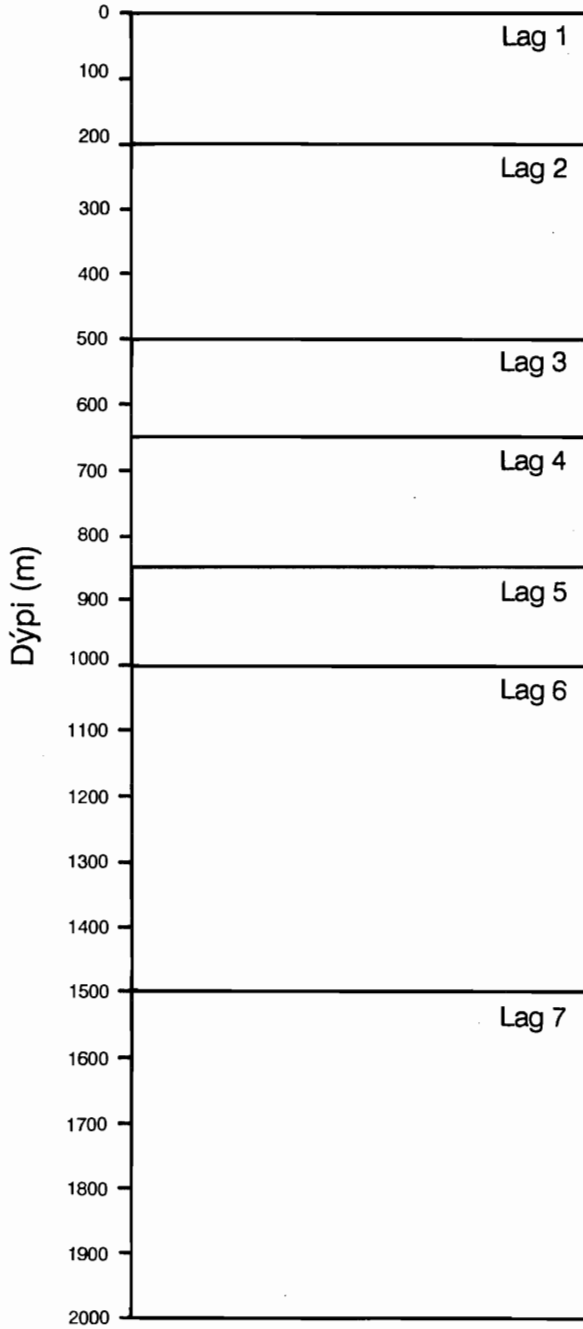


MYND 4b. Kubbálíkan af vinnslusvæðinu, lag 1 og 2 - lekt og poruhluti

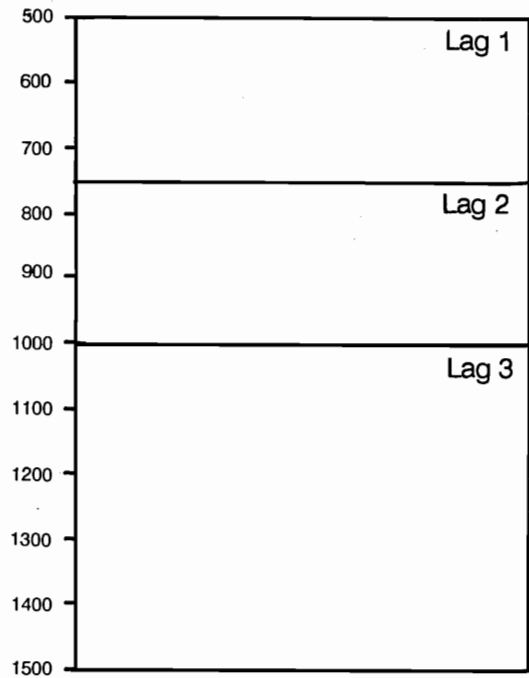


MYND 4c. Kubballikan af vinnslusvæðinu, lag 3 - lekt og poruhluti

JHD BM 6607 HTUL
91.12.0984 ÓÐ

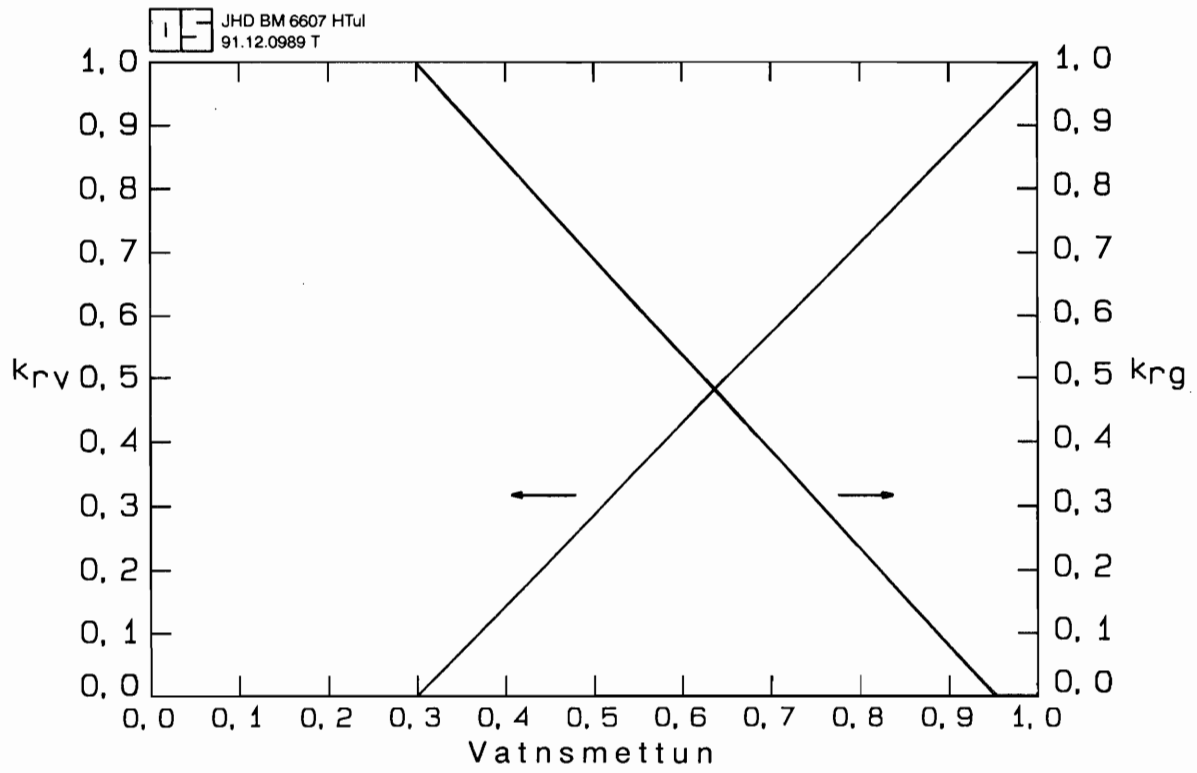


TVÍVITT LÍKAN



ÞRÍVITT LÍKAN

MYND 5. Lagskipting tví- og þrívíðu líkananna



MYND 6. Hlutlekt gufu og vatns

3. NÁTTÚRULEGT ÁSTAND HVÍTHÓLASVÆÐISINS

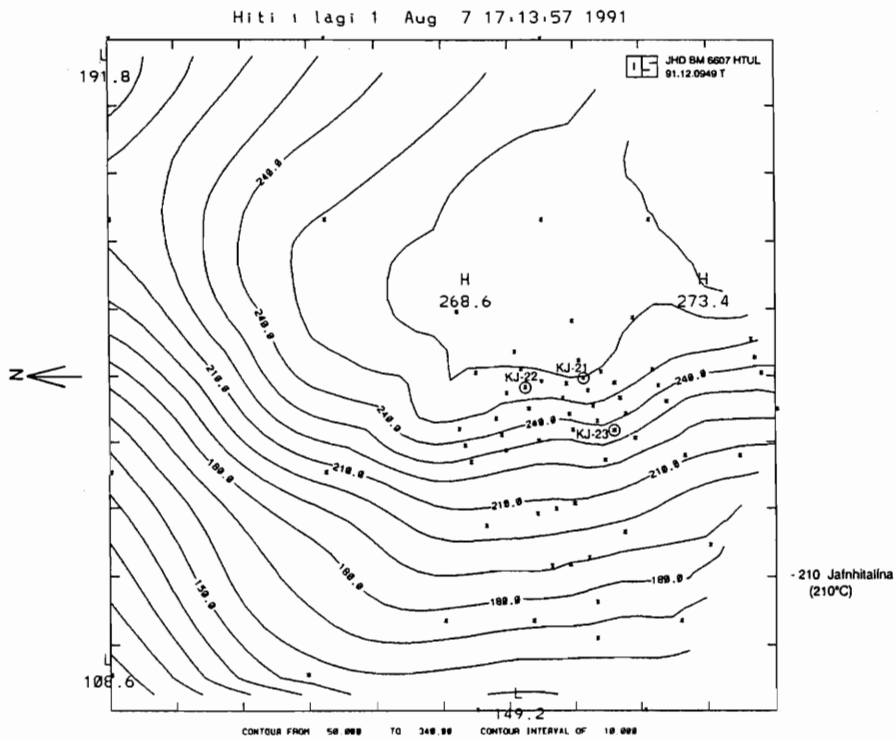
Reynt var að fá fram upprunalegt ástand í jarðhitakerfinu, þ.e. hita- og þrýstidreifinguna í því áður en vinnsla hófst á Hvíthólum. Gert var ráð fyrir því að þá hafi hita- og vatnsþrýstingsstigull í kerfinu verið ótruflaður af vinnslu frá Leirbotna- og Suðurhlíðasvæðunum. Uppstreymi af heitu vatni er látið koma inn í kerfið austan við holu KJ-21 inn í kubb 8 í lagi 3. 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 holurnar líktist mældum hita og þrýstingi fyrir vinnslu. Í "besta" líkaninu tók 9993 ár (reiknitími) að ná samsvörun við hita- og þrýstidreifinguna eða 250 tímabrep þar sem lengsta tímabrepið var tæp 46 ár. Í þessu ástandi er kerfið nær ætætt ("steady state") þannig að hiti og þrýstingur breytist um minna en 0,5°C og 0,5 bar alls staðar í því yfir 100 ára tímabil.

Fyrir "besta" líkanið fékkst að 9 kg/s af 310°C heitu vatni streyma inn í kerfið og upp í gegnum það austan við vinnslusvæði Hvíthóla (kubbar 8 í lögum 1-3). Í uppstreymisrásinni er lóðrétt lekt höfð meiri en annars staðar á svæðinu. Í "besta" líkaninu er lekt eins í efstu tveimur lögnum, þ.e. hún er 10 mD í vinnslusvæðinu (svæði 1-3 á mynd 4b, 3,3 km²). Fyrir vestan vinnslusvæðið á um 1,3 km² svæði (svæði 4) var lektin höfð mun minni (0,95 mD), til að líkja eftir sprungunni (stemminum) sem hola KJ-22 sker. Samtals er þetta um 5,7 km² svæði. Annars staðar er lektin 5 mD. Lektin er alls staðar eins í allar áttir nema í uppstreymiskubbum, en þar er lóðrétt lekt 30 mD, en lárétt 10 mD í lagi 1 og 2, en 0,95 í lagi 3 eins og í nágretta kubbum. Í neðsta laginu er 0,95 mD lekt í öllu vinnslusvæðinu (5,7 km²), en utan þess 5 mD eins og í hinum lögnum. Poruhlutinn í líkaninu er alls staðar hafður 5% nema á um 1,9 km² svæði í kringum uppstreymið (svæði 3 á mynd 4b), en þar er hann 9%.

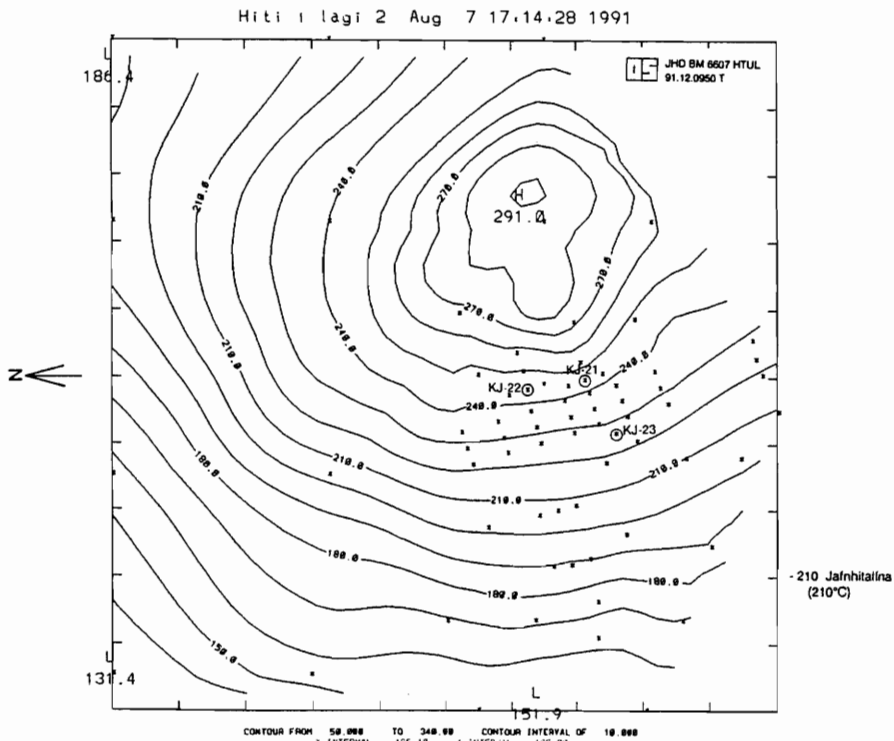
Hita- og þrýstidreifing í miðjum lögnum er birt á myndum 7-12. Í töflu 1 eru reiknuð og mæld gildi á hita og þrýstingi við holurnar.

Eins og sést á töflu 1 er allgott samræmi á milli reiknaðra og mældra gilda fyrir holu KJ-21, all sæmilegt fyrir holu KJ-22, en lakara fyrir holu KJ-23. Athyglisvert er að reiknaður hiti við holu KJ-23 er lægri en mældur, hins vegar er reiknaður þrýstingur hærri. Þetta er töluvert erfitt að eiga við, því ef hækka á reiknaða hitann við holuna þarf að auka massaflæði heita vatnsins til holunnar í þessu líkani, en það hefur einnig áhrif til hækkunar á þrýstingi.

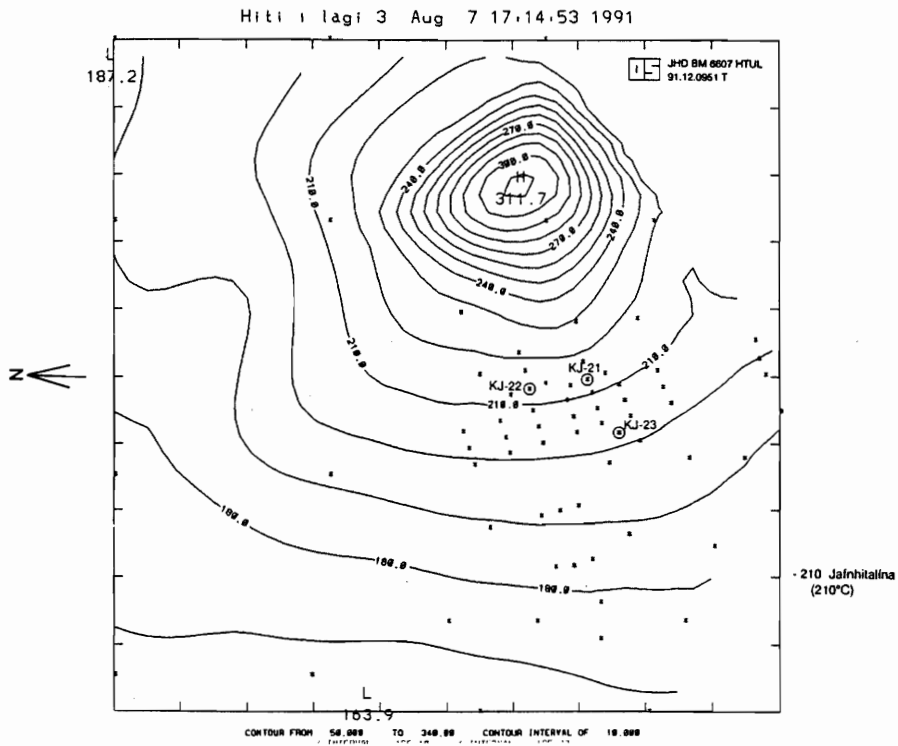
Í líkaninu, sem hér er sett fram, er komið tveggja fasa ástand í tveimur efstu lögnum. Í efsta laginu nær þetta ástand að holu KJ-21, þó ekki í kubbin sem hola er í. Í lagi 2 er suða aðeins í uppstreymisrásinni (kubb 8). Ekki er vitað til að tveggja fasa ástand hafi verið við holu KJ-21 á um 600 m dýpi fyrir upphaf vinnslu. Þó er víst að hiti og þrýstingur á þessu dýpi voru við suðumark.



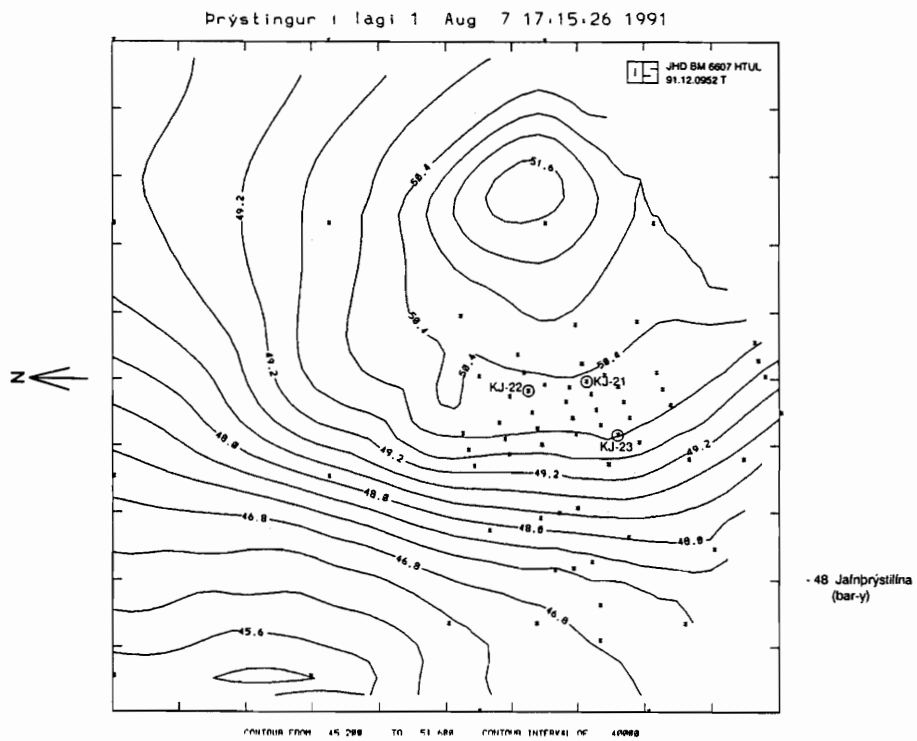
MYND 7. Reiknuð hitadreifing á 625 m dýpi í Hvíthólasvæðinu; fyrir vinnslu



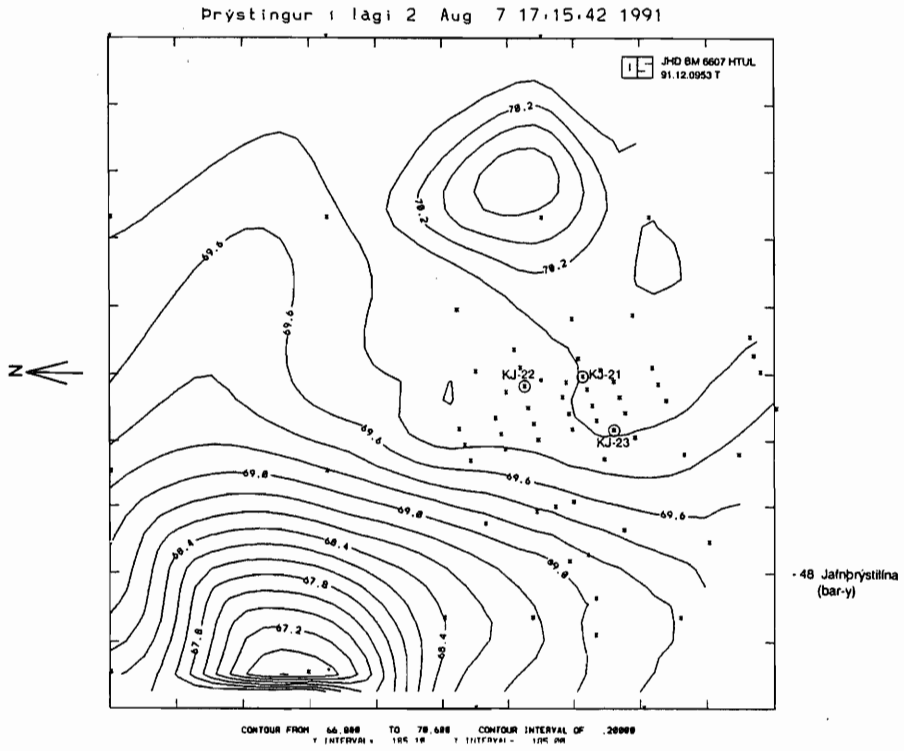
MYND 8. Reiknuð hitadreifing á 875 m dýpi í Hvíthólasvæðinu; fyrir vinnslu



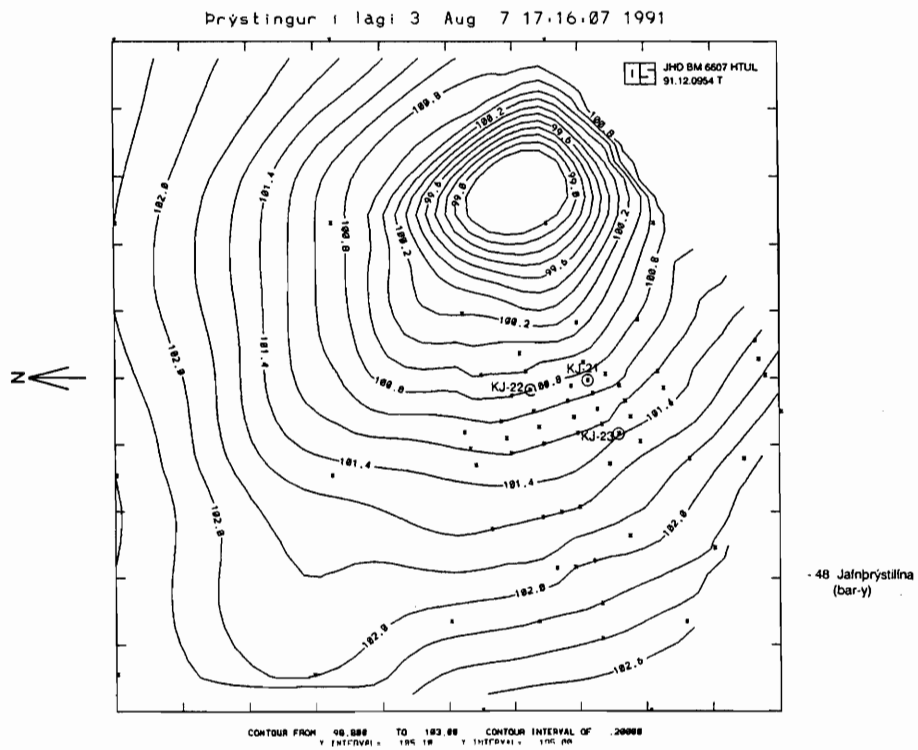
MYND 9. Reiknuð hitadreifing á 1250 m dýpi í Hvíthólasvæðinu; fyrir vinnslu



MYND 10. Reiknuð þrýstidreifing á 625 m dýpi í Hvíthólasvæðinu; fyrir vinnslu



MYND 11. Reiknuð þrýstidreifing á 875 m dýpi í Hvíthólasvæðinu; fyrir vinnslu



MYND 12. Reiknuð þrýstidreifing á 1250 m dýpi í Hvíthólasvæðinu; fyrir vinnslu

Tafla 1. Reiknaður og mældur þrýstingur og hiti.

Hóla Dýpi (m)	Upphafsprýstingur		Berghiti	
	Mældur Bar	Reiknaður Bar	Mældur °C	Reiknaður °C
KJ-21				
625	51,4	50,4	262	261
875	72,2	70,0	261	244
1250	(103,3)	100,9	(215)	213
KJ-22				
625	51,1	50,3	261	254
875	68,6	70,0	243	237
1250	96,9	101,2	184	192-203
KJ-23				
625	44,5	50,1	249	236
875	64,6	70,0	240	226
1250	95,3	101,4	220	202

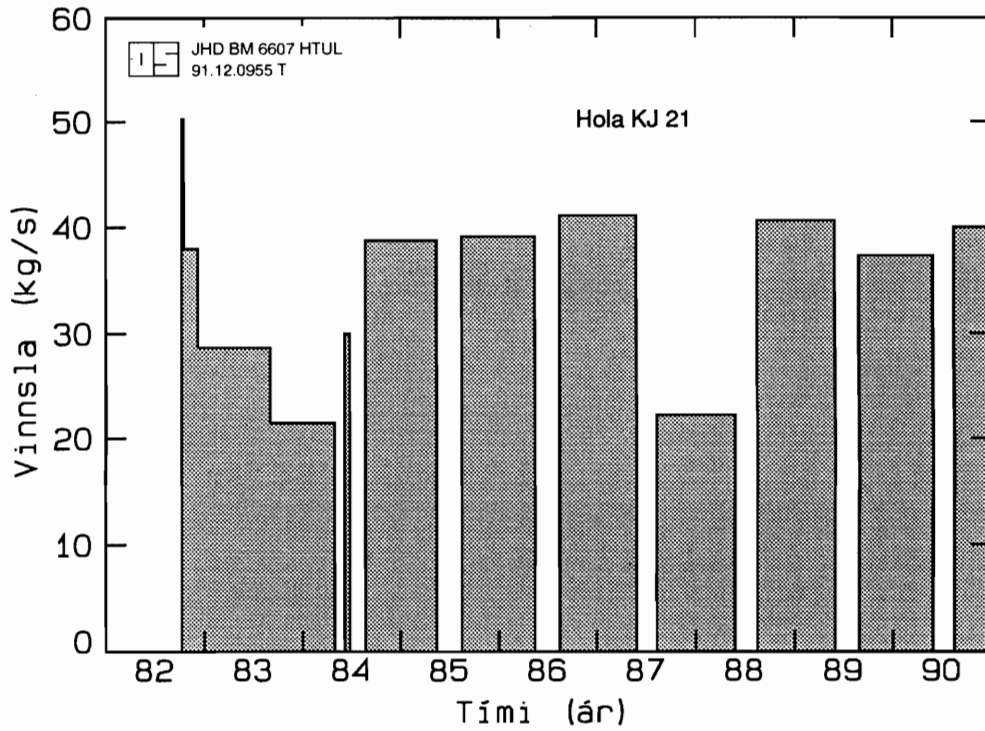
4. VINNSLUGÖGN OG VINNSLUSAGA

Myndir 13 og 14 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 1990/91. Holu KJ-22 var ekki hleypt upp fyrr en 19. ágúst 1983, en á myndunum er sami upphafstími notaður fyrir báðar holurnar. Það líkan sem "best" hermdi upphafsástand jarðhitakerfisins var keyrt áfram með vinnslugögnum hola KJ-21 og KJ-22. Hita- og þrýstíástandið, sem ríkti í lok keyrslunnar með grunnlíkaninu, var notað sem upphafsástand jarðhitakerfisins, þegar reynt var að herma eftir vinnslusögu þess.

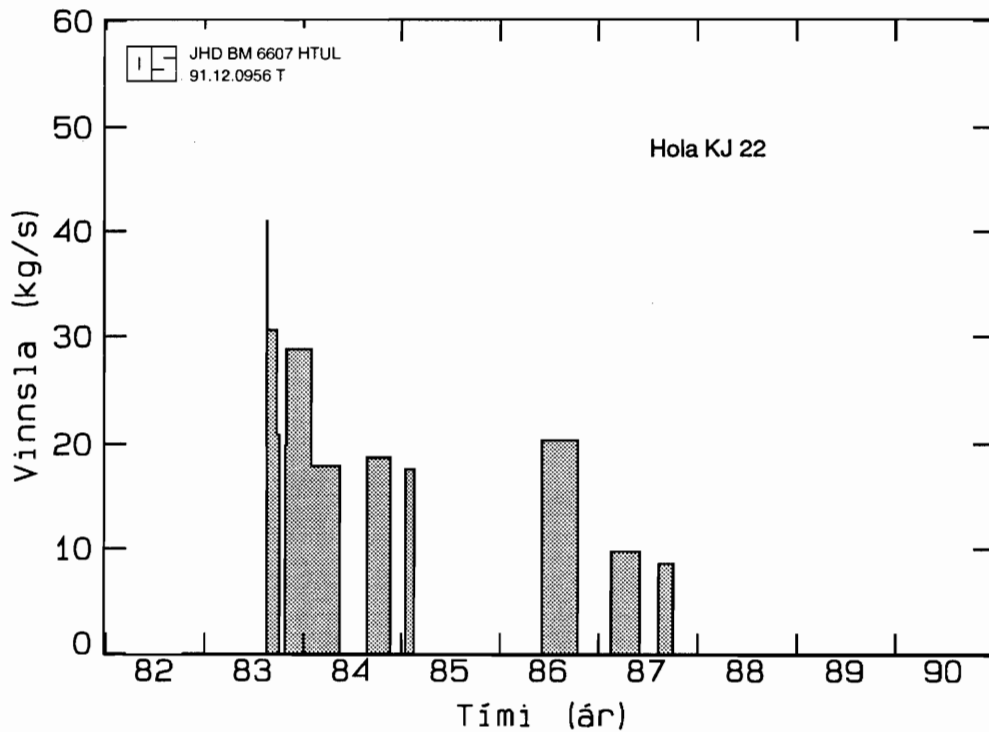
Til að líkja eftir vinnslu úr jarðhitakerfinu voru settir svelgir í nokkra smákubba líkansins, sem samsvara æðunum í holunum, þ.e. massi var tekinn úr þessum kubbum. Reynt var þannig að fá fram svipað þrýstifall í líkaninu við vinnslu og mælt er í holunum (myndir 15 og 16). Prófa varð sig áfram með því að skipta vinnslunni milli æða í vinnsluholunum, en í upphafi voru niðurstöður frá tvívíðu líkanreikningunum notaðar. Fyrir holu KJ-21 virtist 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 kubbum 50 í lögum 1 og 2 (mynd 4) og var vinnslunni skipt í hlutföllunum 60/40. Fyrir holu KJ-22 var niðurstaðan sú að um 40% komu úr efri og heitari æðunum en 60% úr neðri æðunum. Þetta svarar til 40/60 hlutfalls úr kubbi 53 í lagi 1 og kubbi 27 í lagi 3. Þegar leið á reikningana virtist réttara að nota hlutföllin 70/30 fyrir holu KJ-21, en sömu hlutföll og áður fyrir holu KJ-22.

Myndir 15 og 16 sýna reiknaðan og mældann þrýsting við æðarnar í holu KJ-21. Eins og sést er allgott samræmi þarna á milli fyrir efri æðina, þó er reiknaður þrýstingur aðeins of lágur í lok tímabilsins. Ekki fékkst eins gott samræmi fyrir neðri æðina, en þar er reiknaður þrýstingur aðeins of hár. Þetta gæti bent til þess að of mikið sé látið koma úr efri æðinni, þ.e. hlutfallið á milli æðanna sé nær 65/35.

Aðal vandamálið í þessum hluta verkefnisins var að fá gott samræmi á milli mælds og reiknaðs vermis (mynd 17). Það líkan sem hér var endað við og tekið sem besta líkan gefur aðeins of lágt vermi, sérstaklega framan af, en lagast eftir því sem líður á vinnslutímenn. Þetta endurspeglast í hitanum (myndir 18 og 19), sem er yfirleitt frekar of lágur framan af, sérstaklega fyrir neðri æðina í KJ-21, en nálgast mæld gildi er á líður.

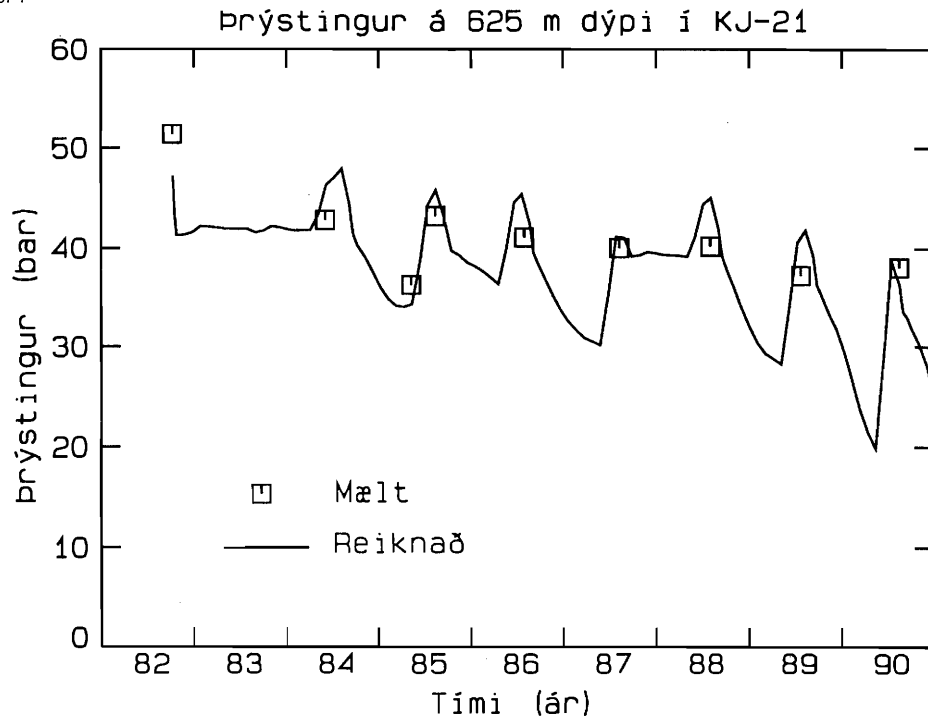


MYND 13. Vinnslusaga hólú KJ-21 tímabilið 1982.10.09 - 1990.12.31



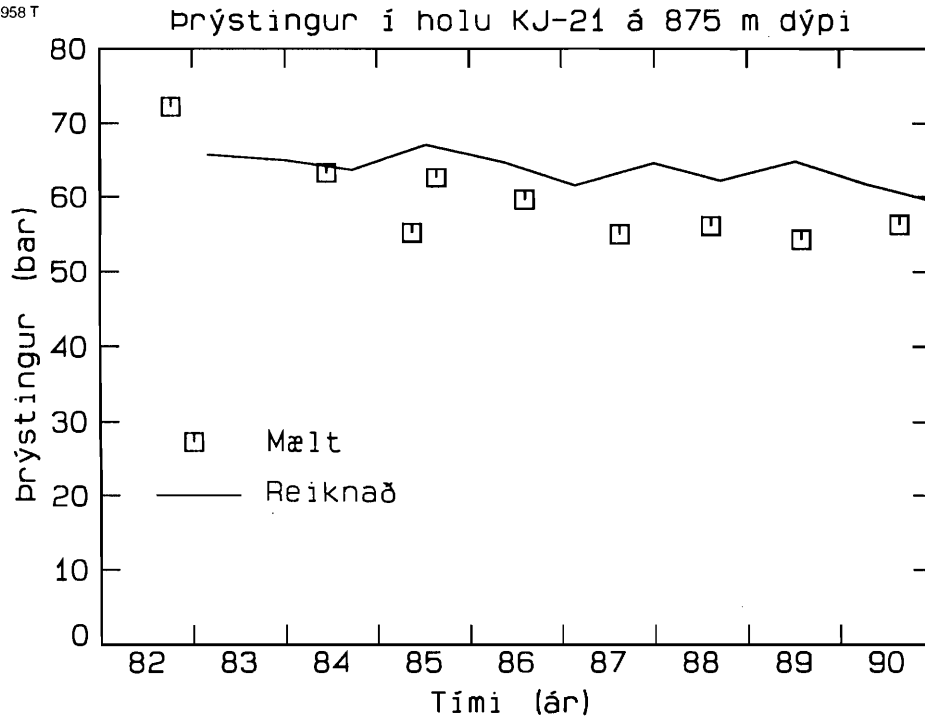
MYND 14. Vinnslusaga hólú KJ-22 tímabilið 1982.10.09 (1983.08.19) - 1990.12.31

JHD BM 6607 HTUL
91.12.0957 T



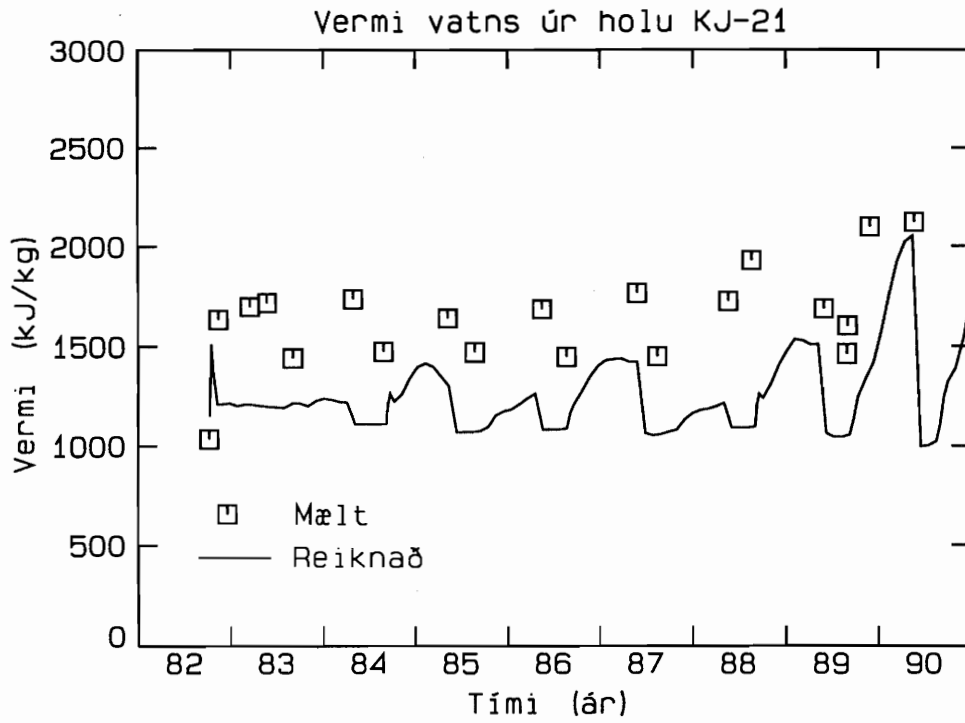
MYND 15. Reiknaður og mældur prýstingur á 625 m dýpi í holu KJ-21 frá 1982.10.09

JHD BM 6607 HTUL
91.12.0958 T



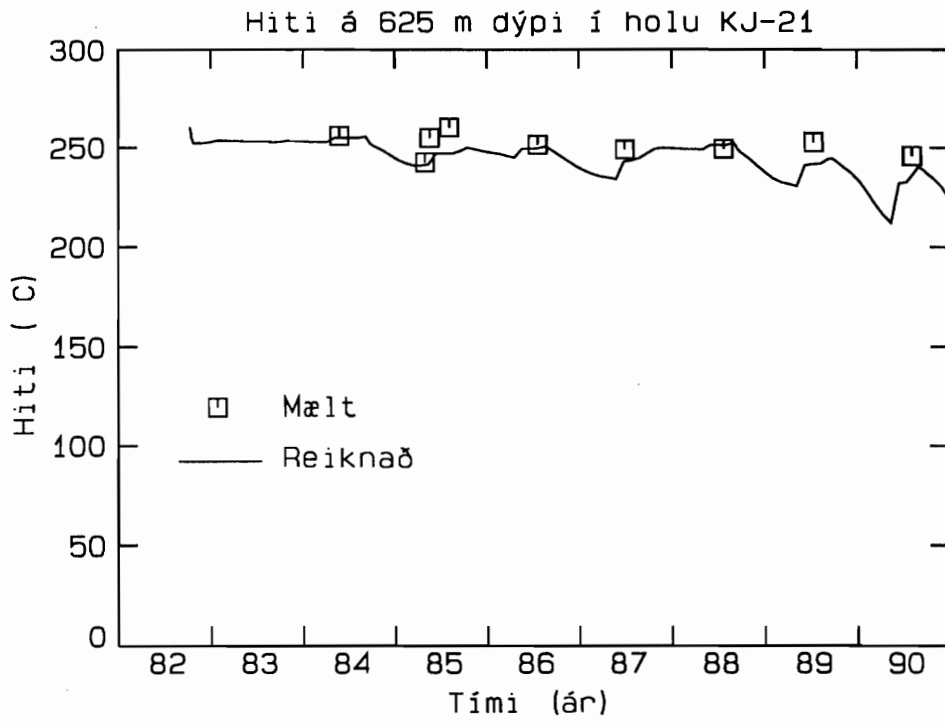
MYND 16. Reiknaður og mældur prýstingur á 875 m dýpi í holu KJ-21 frá 1982.10.09

JHD BM 6607 HTUL
91.12.0959 T



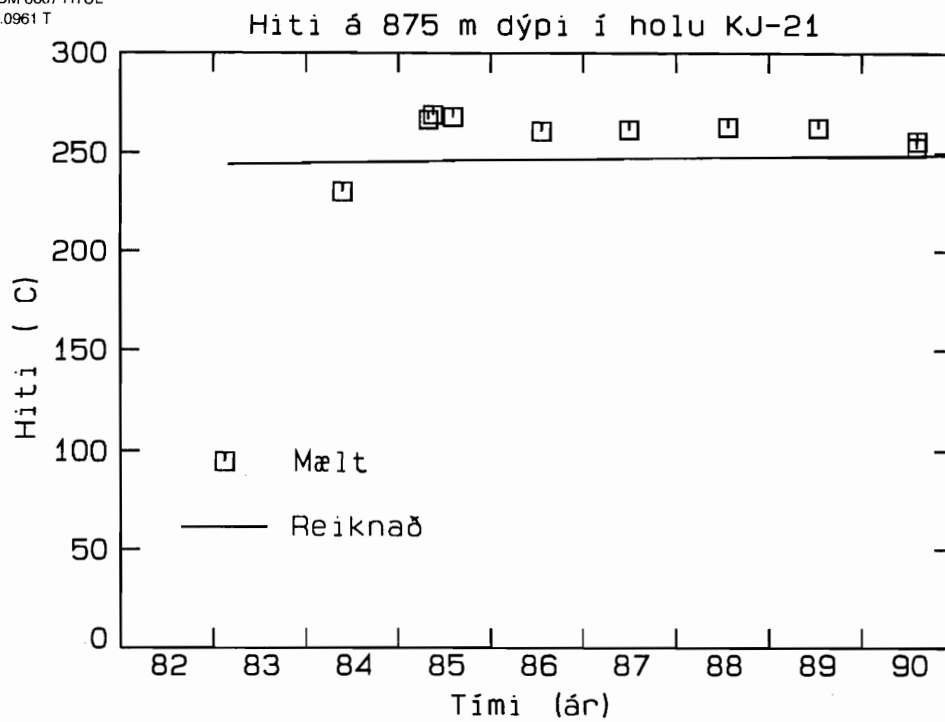
MYND 17. Reiknað og mælt vermi vatns úr holu KJ-21 frá 1982.10.09

JHD BM 6607 HTUL
91.12.0960 T



MYND 18. Reiknaður og mældur hiti á 625 m dýpi í holu KJ-21 frá 1982.10.09

JHD BM 6607 HTUL
91.12.0961 T



MYND 19. Reiknaður og mældur hiti á 875 m dýpi í holu KJ-21 frá 1982.10.09

5. VINNSLUSPÁ

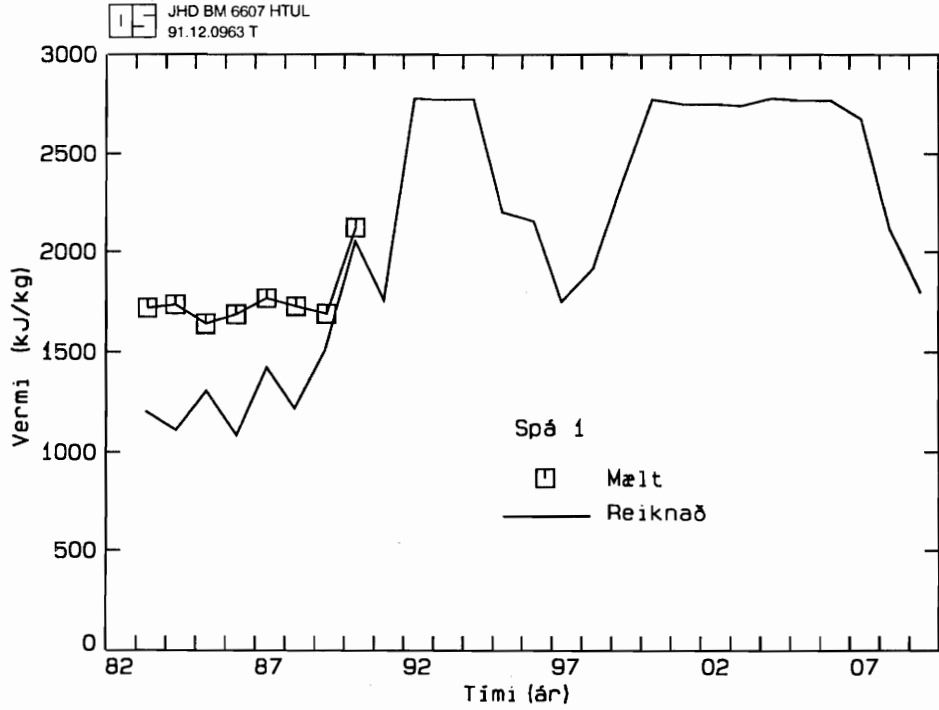
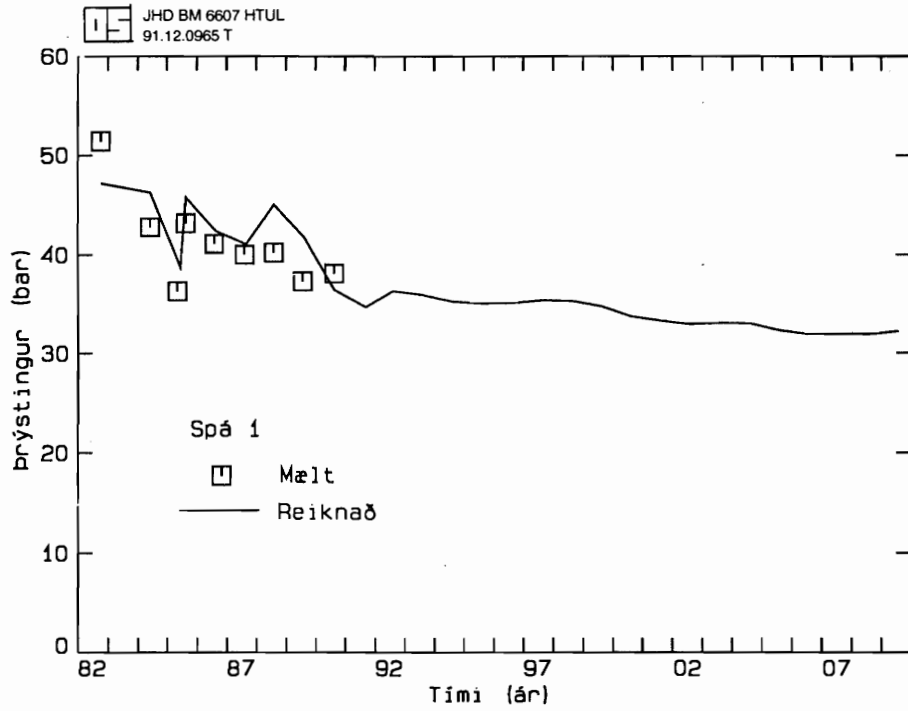
Eftir að búið var að fella líkanið eins vel og kostur var að mældum gögnum var það notað til að reikna hita-, þrýsti- og vermishreytingar við áframhaldandi vinnslu úr holu KJ-21. Ekki var reiknað með neinni vinnslu úr KJ-22, þar sem hún hefur ekki verið í notkun síðan seinni part árs 1986. Nokkur tilfelli voru tekin fyrir:

1. Gert er ráð fyrir svipaðri vinnslu og verið hefur, þ.e. tekin eru 40 kg/s úr holu KJ-21 í hlutföllunum 65/35 milli efri og neðri æðar í 9 mánuði á ári. Lokað er fyrir holuna í júní, júlí og ágúst. Engin vinnsla er úr holu KJ-22 (sjá mynd 20).
2. Sama og í lið 1 nema hola KJ-21 er lokað í 4 mánuði á ári, í maí, júní, júlí og ágúst (sjá mynd 21).
3. Sama og í lið 1 nema hola KJ-21 er lokað í 2 mánuði á ári, í júní og júlí og er vinnsla úr henni í 10 mánuði á ári (sjá mynd 22).
4. Gert er ráð fyrir 20 kg/s vinnslu allt árið úr holu KJ-21 (sjá mynd 23).
5. Gert er ráð fyrir 30 kg/s vinnslu allt árið úr holu KJ-21, sem er nálægt því að vera ársmeðaltal núverandi vinnslu (sjá mynd 24).
6. Gert er ráð fyrir 40 kg/s vinnslu allt árið úr holu KJ-21, sem er svipað og ef holunni væri ekki lokað yfir sumarmánuðina (sjá mynd 25).
7. Gert er ráð fyrir 50 kg/s vinnslu allt árið úr holu KJ-21.
8. Gert er ráð fyrir 20 kg/s niðurdælingu af 100°C heitu vatni í holu KJ-22 og 40 kg/s vinnslu úr holu KJ-21 í 9 mánuði á ári. Þetta er svipað vatnsmagn og nú fellur til við skiljun rennslis frá holu KJ-21 (sjá mynd 26).
9. Gert er ráð fyrir 20 kg/s niðurdælingu af 100°C heitu vatni í holu, sem boruð yrði um 300 m norður af holu KJ-21, og sömu vinnslu og áður úr KJ-21 þ.e. 40 kg/s í 9 mánuði á ári (sjá mynd 27).
10. Gert er ráð fyrir 20 kg/s niðurdælingu í holu KJ-22 og 60 kg/s vinnslu 9 mánuði á ári úr holu KJ-21, þ.e. gert er ráð fyrir að vinnslan úr holu KJ-21 aukist sem nemur niðurdælingunni.

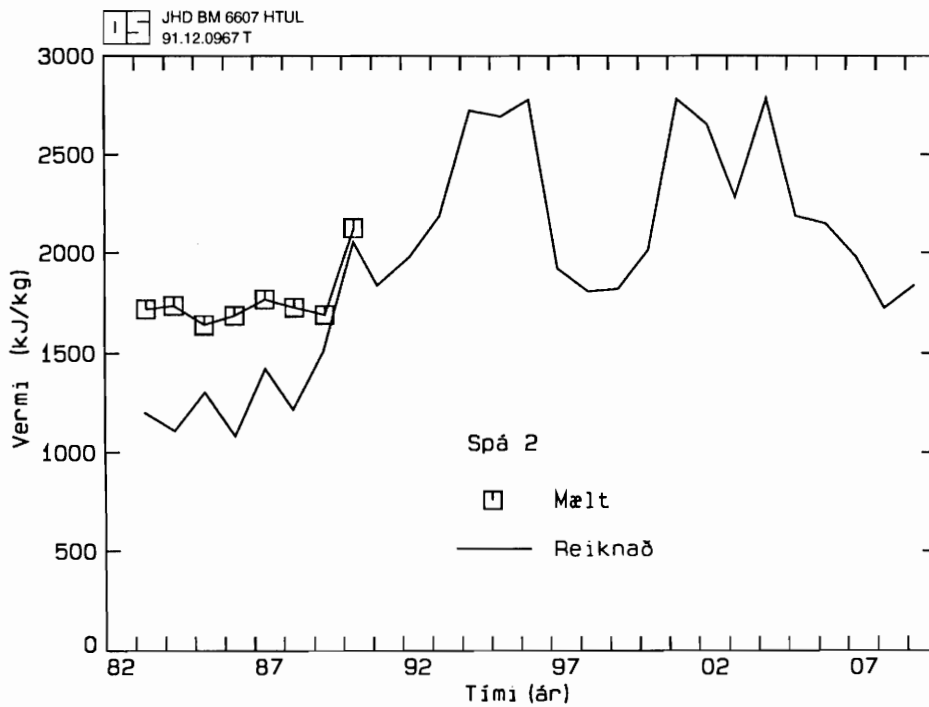
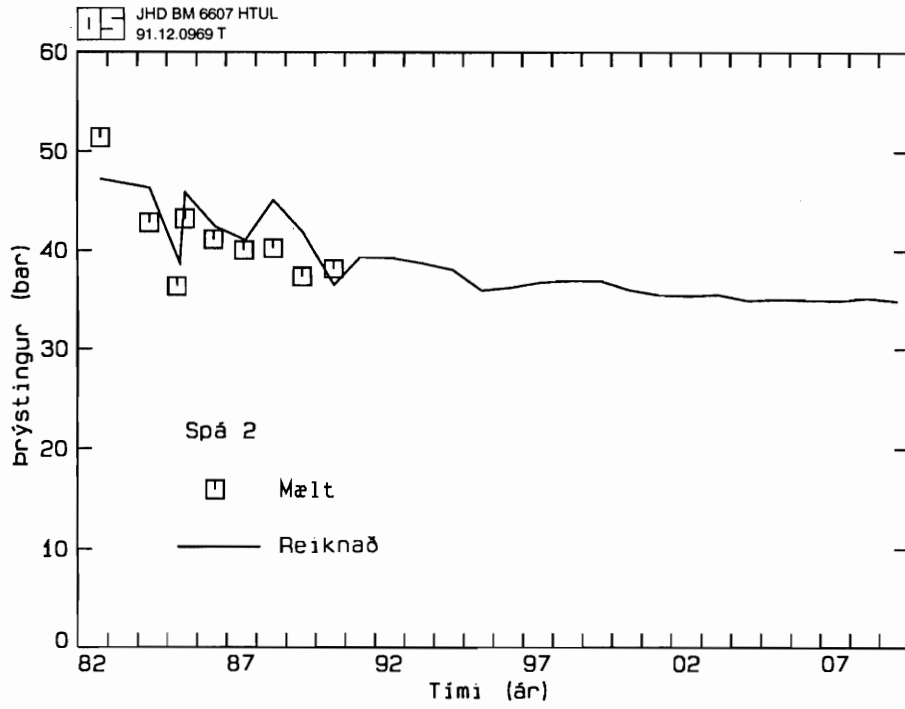
Myndir 20-27 sýna niðurstöður þessara reikninga. Eins og sést fyrir þrjú fyrstu tilfellin (myndir 20-22), sem öll voru keyrð í 20 ár, þá er best að keyra holuna í 8 mánuði á ári. Þá virðist í lagi að keyra hana áfram eins og hún er keyrð í dag. Þó gætu komið tímabil þar sem þrýstingur lækkar of mikið til að hægt sé að halda vinnslu áfram. Þegar gert er ráð fyrir 10 mánaða keyrslu á ári hrynur keyrslan eftir rúm 11 ár, því þá er þrýstingurinn í kerfinu í nágrenni holunnar kominn nærri núlli og vermið rokið upp í vermi hreinnar gufu.

Í tilfellum 4-7 (myndir 23-25) er hola KJ-21 keyrð allt árið með mismunandi vinnslu, frá 20 kg/s upp í 50 kg/s. Látið var nægja að keyra þessi dæmi í 10 ár. Við 20 kg/s vinnslu hækkar þrýstingur í kerfinu til að byrja með. Hann lækkar svo aðeins aftur eftir nokkra mánuði, en lækkar þó ekki í fyrri þrýsting á þessum 10 árum. Vermið helst frekar lágt allan tímann. Við 30 kg/s helst þrýstingur nokkuð stöðugur allan tímann og virðist sem hægt sé að halda uppi nægilegum þrýstingi í kerfinu við þessa vinnslu, en hún svarar til ársmeðalvinnslu úr svæðinu í dag. Við 40 kg/s stöðuga vinnslu lækkar þrýstingur við efri æðina niður fyrir 20 bar strax á fyrstu mánuðunum og er augljóst að ekki er hægt að fá þetta mikið úr holunni við stöðuga vinnslu. Fyrir 50 kg/s tæmdist svæðið umhverfis holuna á nokkrum dögum og þrýstingur datt niður, þannig að keyrslan hrundi.

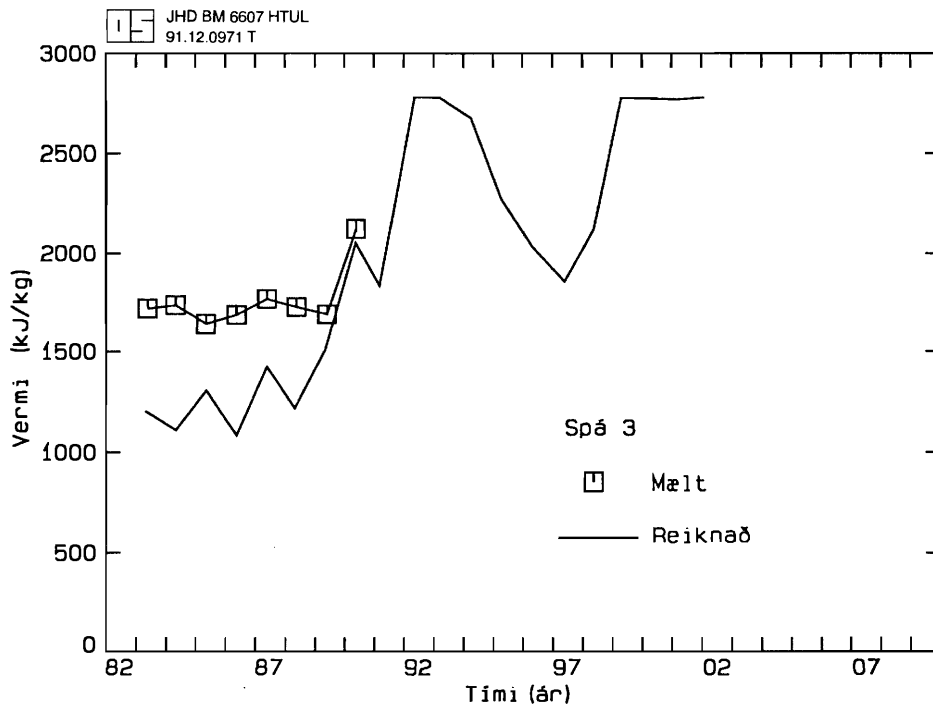
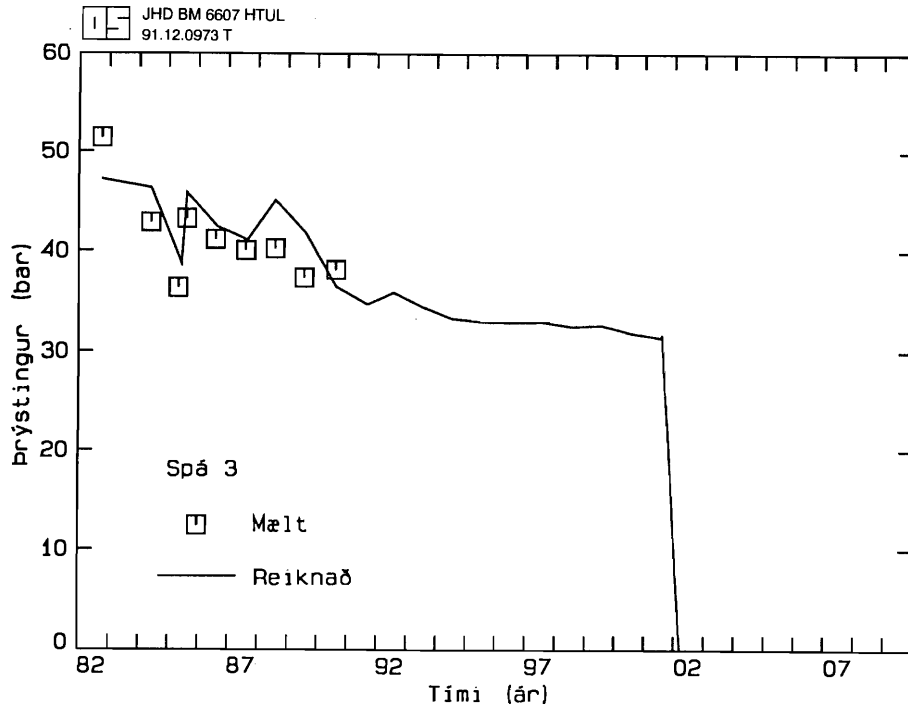
Að síðustu var líkanið keyrt við mismunandi niðurdælingu (myndir 26 og 27). Fyrst var gert ráð fyrir því að öllu vatni sem fellur til við skiljun rennslis frá holu KJ-21 sé dælt 100°C heitu niður í holu KJ-22. Gert var ráð fyrir sömu vinnslu úr KJ-21 eins og í spá 1. Reikningar sýna að við niðurdælingu í KJ-22, hækkar þrýstingur í KJ-21 verulega (10 bar) og fer aldrei niður fyrir 30 bar spátímann. Niðurdælingin dregur úr suðu í kerfinu og vermið helst um 1000 kJ/kg út spátímann, þ.e. nánast hreinn vatnsfasi. Þegar ljóst var hversu mikið vermið lækkaði, ef hola KJ-22 væri notuð sem niðurdælingarhola, var athugað hvaða áhrif það hefði að bora nýja holu 300 m norður af holu KJ-21 og dæla í hana. Mynd 27 sýnir niðurstöður þessara reikninga, en þar kemur í ljós að vermislækkun er mun minni. Það tekur hins vegar lengri tíma fyrir þrýstinginn við efri æðina í holu KJ-21 að hækka, en eftir nokkur ár er hann orðinn jafnhár og í spá 8. Að lokum var athugað hvað gerðist ef 20 kg/s væri dælt í holu KJ-22 og 60 kg/s tekin úr holu KJ-21 í 9 mánuði á ári, þ.e. gert er ráð fyrir að niðurdælingin bætist við það sem er tekið úr holu KJ-21 í dag. Í reikningunum hrundi þessi keyrsla fljótlega, því þrýstingur við efri æðina í KJ-21 lækkaði niður úr öllu valdi við það að kubburinn sem æðin er í tæmdist af vatni. Til að þessi möguleiki geti orðið raunhæfur þarf að bíða í nokkurn tíma frá því að niðurdæling hefst og þar til að aukið er við vinnslu úr KJ-21.



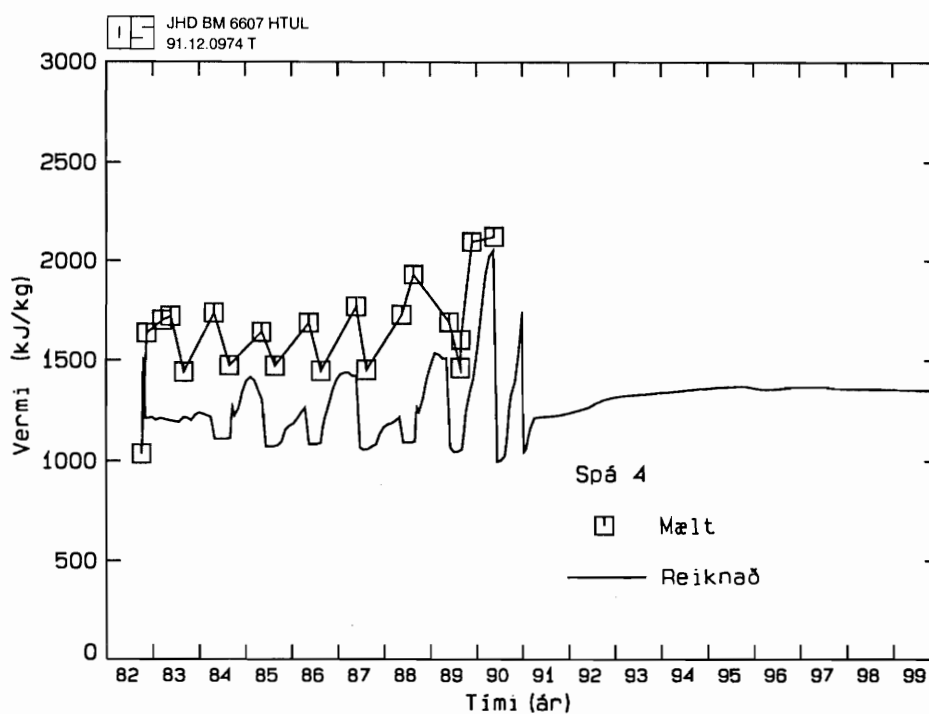
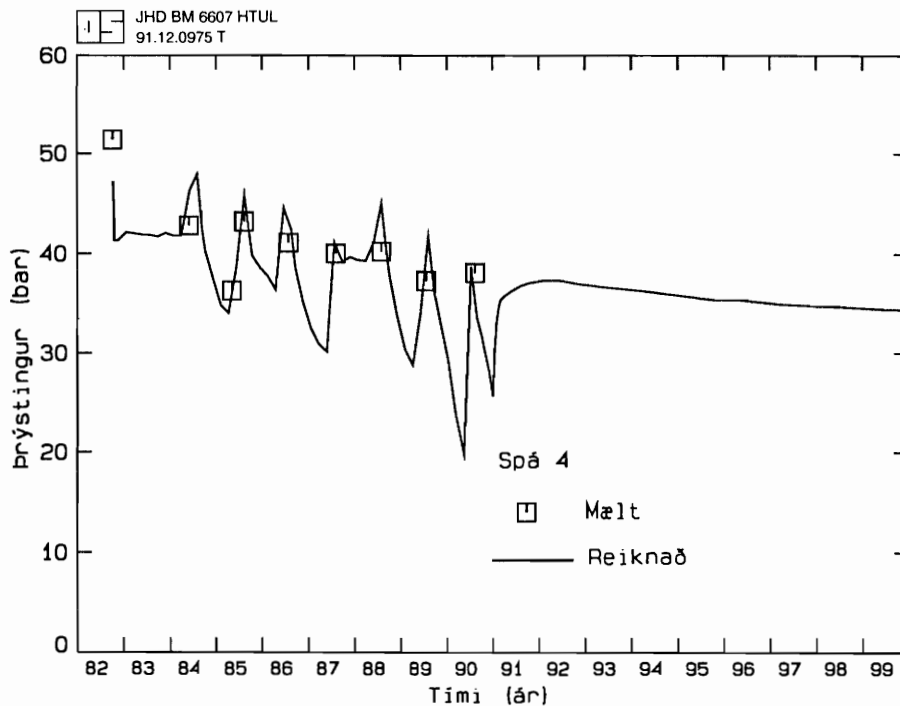
MYND 20. Vinnsluspá 1. Þrýstingur og vermi fram til 2010



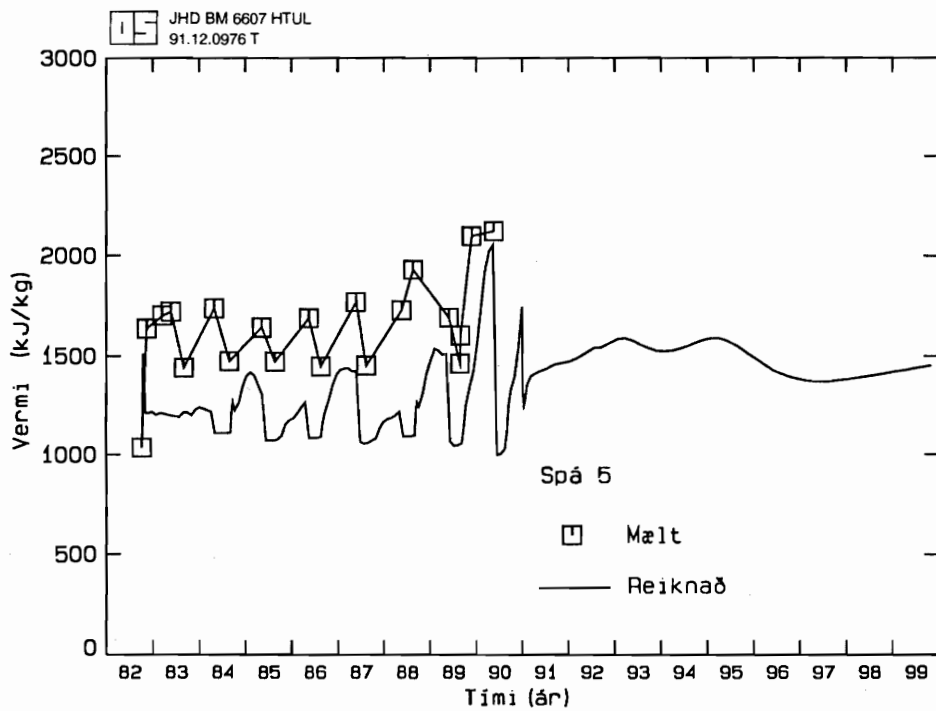
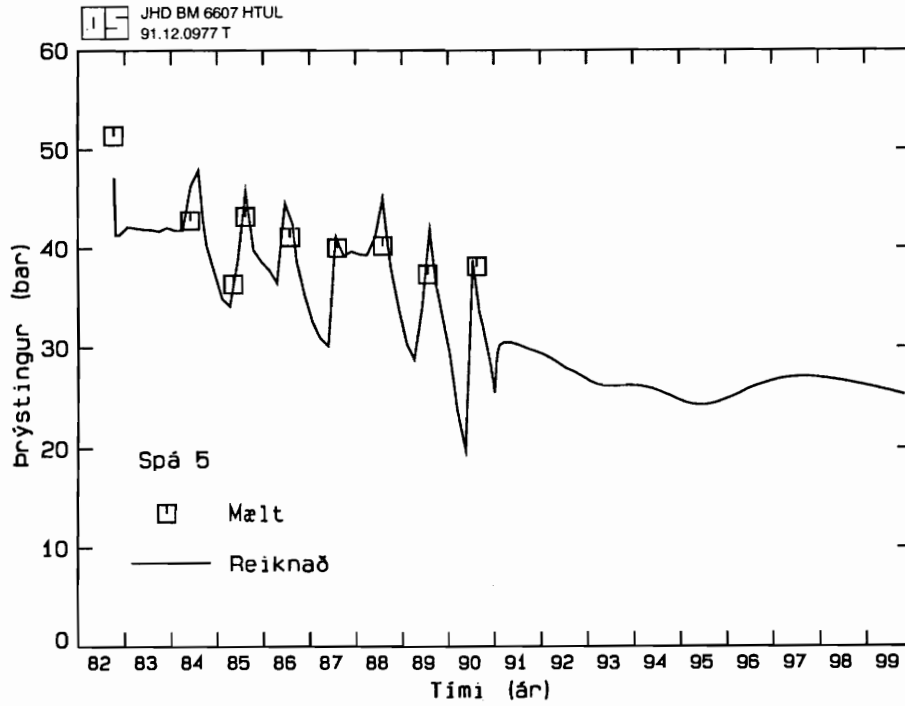
MYND 21. Vinnsluspá 2. Þrýstingur og vermi fram til 2010



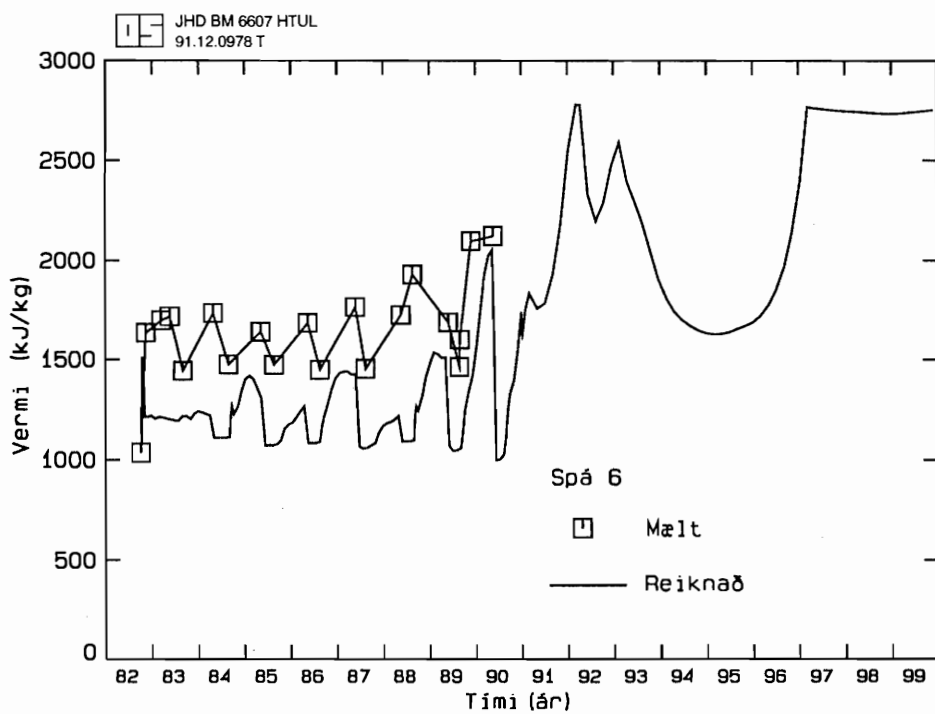
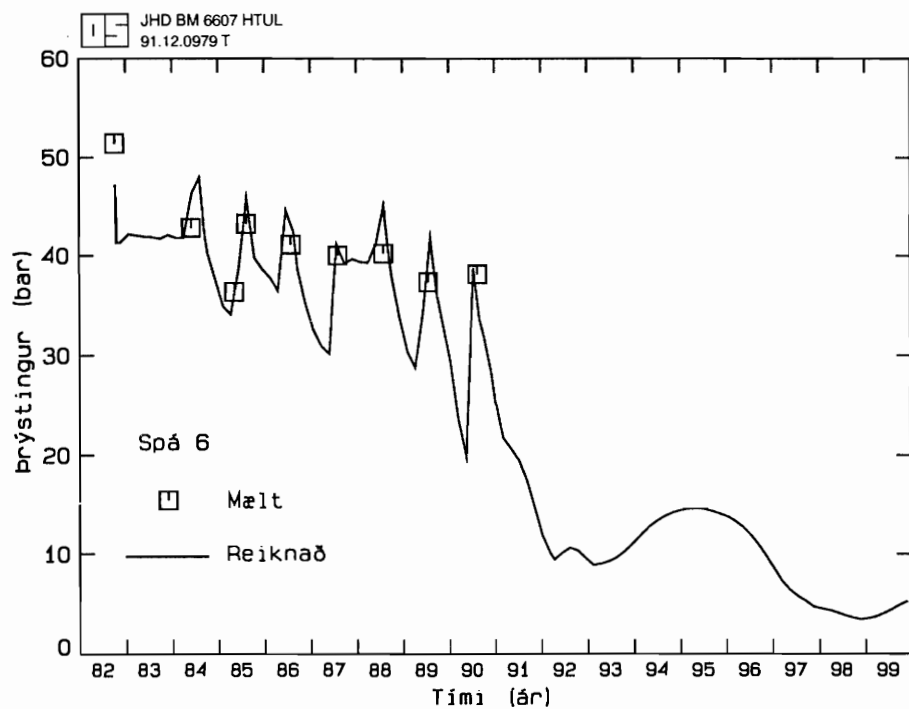
MYND 22. Vinnsluspá 3. Prýstingur og vermi fram til 2010



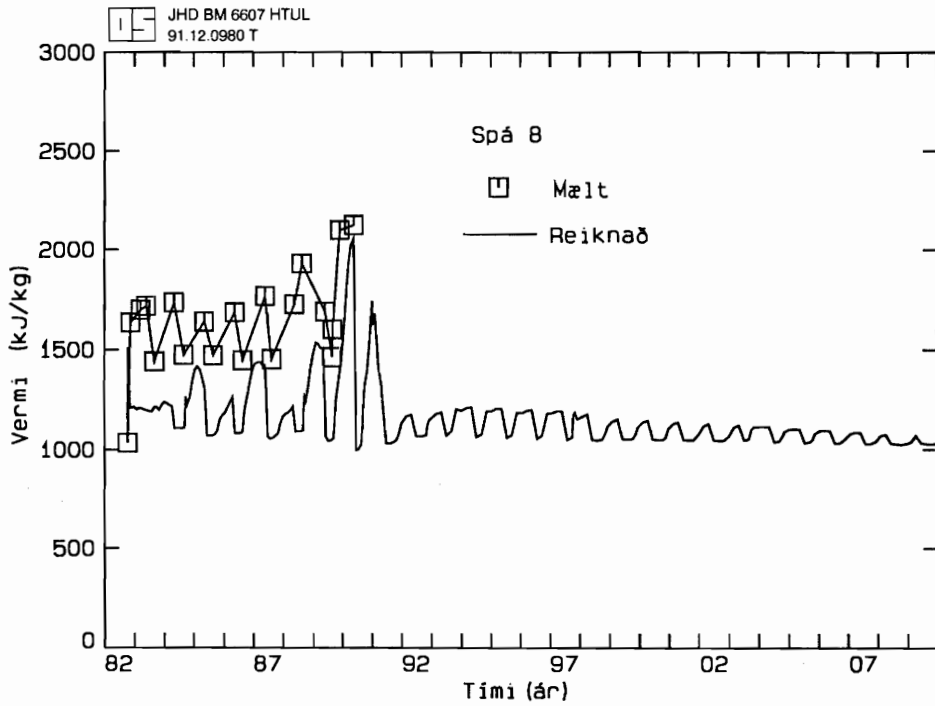
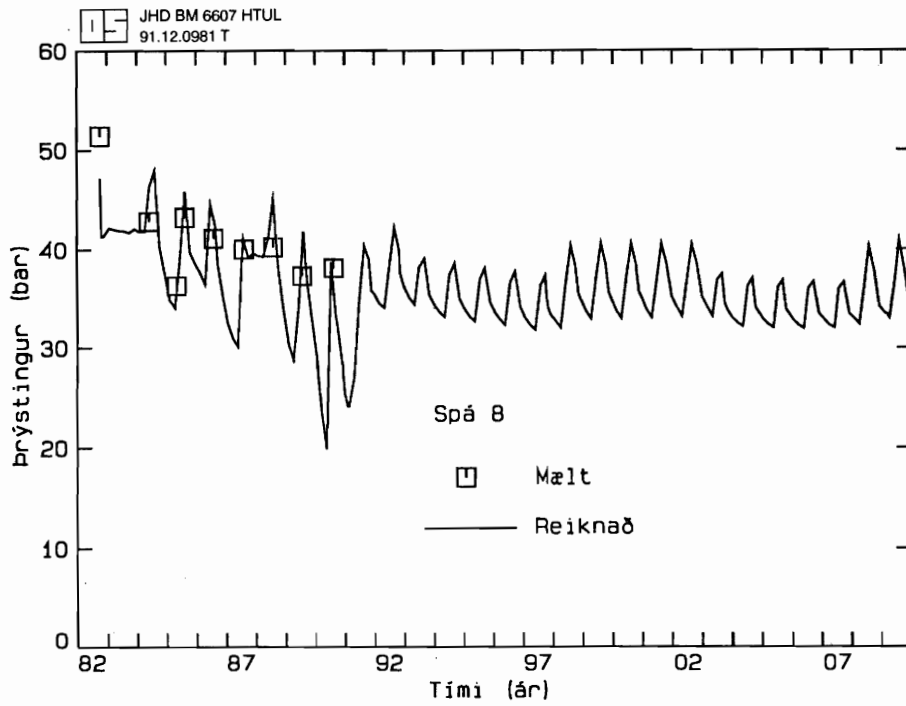
MYND 23. Vinnsluspá 4. Þrýstingur og vermi fram til 2000



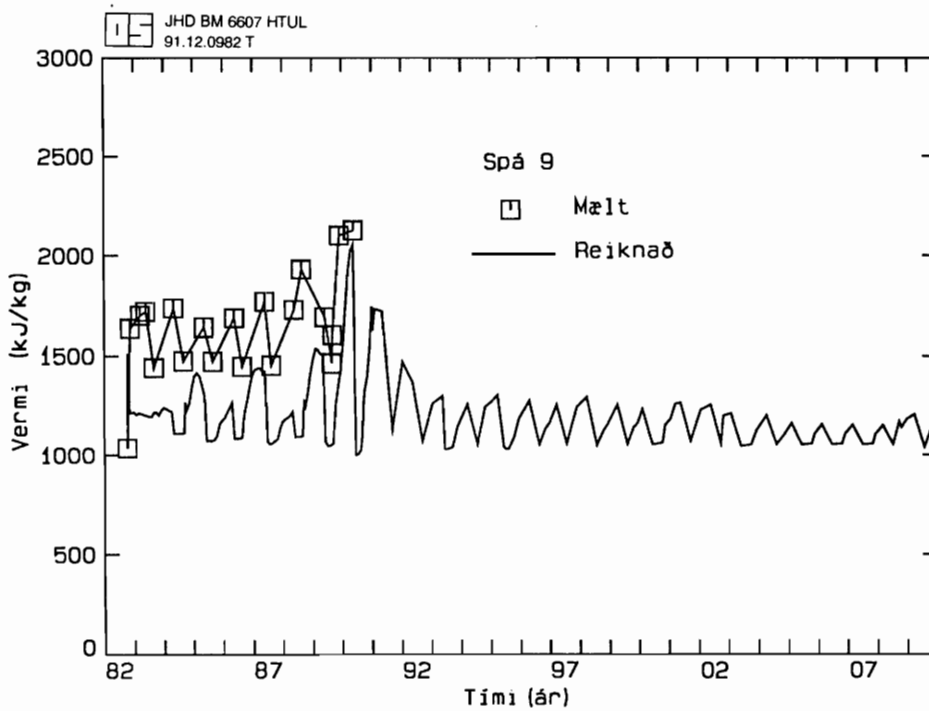
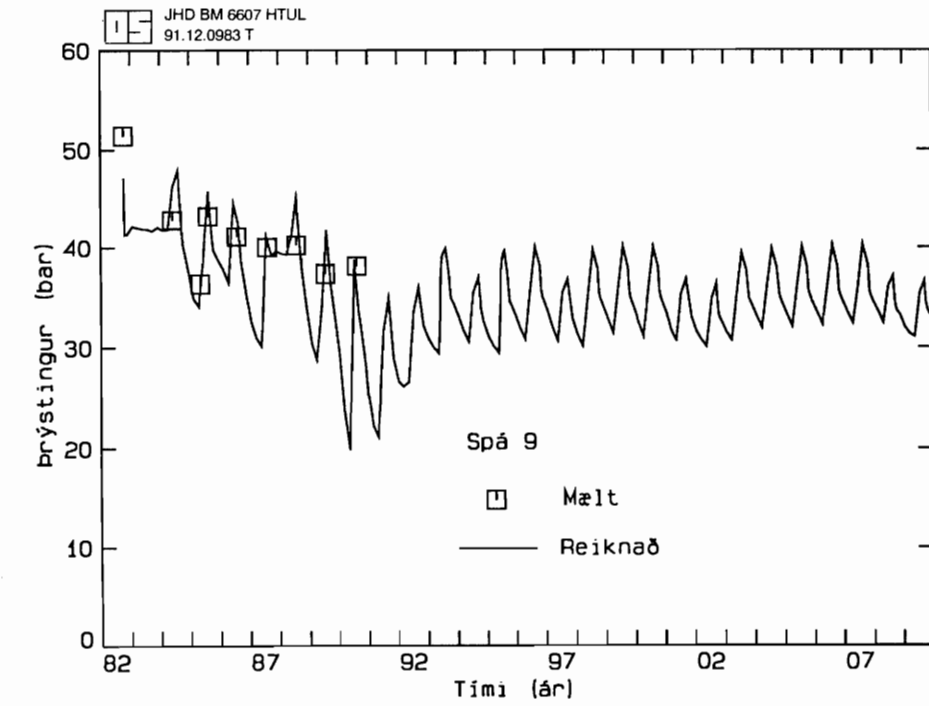
MYND 24. Vinnsluspá 5. Prýstingur og vermi fram til 2000



MYND 25. Vinnsluspá 6. Þrýstingur og vermi fram til 2000



MYND 26. Vinnsluspá 8. Þrýstingur og vermi fram til 2010



MYND 27. Vinnsluspá 9. Þrýstingur og vermi fram til 2010

6. UMRÆÐA

Eins og komið hefur fram er ennþá ýmislegt hægt að gera til að fá betra samræmi milli reiknaðra og mældra gilda og er hér nefnt það helsta.

- Lækka lekt í N - S til að beina heita vatninu meira til vesturs og fá þannig hærra vermi og hærri hita við borholurnar.
- Taka burt hitagjafa í neðsta lagi og hitasvelgi úr efsta lagi, nema yfir vinnslusvæðinu. Þetta myndi spara reiknitíma, en þessir hitagjafar og hitasvelgir hafa lítil áhrif á niðurstöður reikninga í líkaninu sem hér var notað.
- Hækka lekt við holurnar til að minnka þrýstifall við æðarnar, þegar þær eru í vinnslu.
- Breyta hlutlekt gufu og vatns. Nota svo kallaða X-ferla, þar sem hlutlekt gufu og vatns vex línulega frá 0 upp í 1 og við ákveðna metnun er summa þeirra ávallt 1. Þessir ferlar gefa samfelldari heildarhreyfanleika gufu og vatns.

Einnig þyrfti að endurbæta forritið lítilsháttar til að auðveldara sé að líkja eftir vinnslu úr holunum og stilla af tímaþrepin. Verið er að vinna í þessum endurbótum.

7. NIÐURSTÖÐUR

Gert hefur verið þrívítt líkan af Hvíthólasvæðinu, sem getur líkt eftir hita- og þrýstidreifingu í jarðhitakerfi Hvíthólasvæðisins við náttúrulegar aðstæður. Þetta líkan hefur verið notað til að herma eftir vinnslusögu svæðisins og gera vinnsluspár fram í tímann fyrir gefin vinnslutilfelli.

Náttúrulegt innstreymi í svæðið er um 9 kg/s af um 310°C heitu vatni. Prófun á staðsetningu uppsteymisins til jarðhitakerfis Hvíthóla bendir til að það verði að vera um 500-1000 m austan við Hvíthóla.

Samkvæmt líkaninu koma um 65% massaflæðis holu KJ-21 úr efri æðum (600 m) holunnar og um 35% úr neðri æðum (975 m) hennar.

Míðað við núverandi vinnslustýringu gæti svæðið enst í 10-20 ár í viðbót, þó er líklegt að þrýstingur við efri æðar fari öðru hverju niður fyrir 20 bar.

Öruggasta vinnslustýringin virðist vera að hafa holu KJ-21 lokaða í allt að 4 mánuði á ári.

Svo virðist sem að hægt sé að halda holu KJ-21 blásandi allt árið næstu 10 árin með því að taka að staðaldri aðeins 30 kg/s úr henni. Vinnslugeta Hvíthólasvæðisins næmi þá um 10 MWe.

Niurdæling hækkar þrýsting í kerfinu en lækkar vermi og þar með afl holanna.

HEIMLDIR

- Ásgrímur Guðmundsson og Hilmar Sigvaldason, 1982a: *Hola KJ-21. Borun frá 0-293 m.* Orkustofnun, OS-822118/JHD-34 B, 14 s.
- 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.* Orkustofnun, OS-82119/JHD-35 B, 19 s.
- 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.* Orkustofnun, 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.* Orkustofnun, 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.* Orkustofnun, 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.* Orkustofnun, 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.* Orkustofnun, OS-83082/JHD-27 B.
- Benedikt Steingrímsson og Halldór Ármannsson, 1984: *Krafla. Um niðurdælingu affallsvatns á Hvíthólasvæði.* Orkustofnun, OS-84026/JHD-08 B.
- Benedikt Steingrímsson, Halldór Ármannsson og Jón Benjamínsson, 1983: *Krafla. Hola KJ-21. Upphitun, upphleyping og blástur.* Orkustofnun, OS-83013/JHD-03 B, 35 s.
- Benedikt Steingrímsson, Ásgrímur Guðmundsson, Guðjón Guðmundsson, Guðmundur Ó. Friðleifsson, Helga Tulinius og Ómar Sigurðsson, 1984: *Krafla, hola KJ-23. Borun og rannsóknir. Lokaskýrsla.* OS-84032/JHD-03, unnið fyrir Rafmagnsveitur ríkisins - Kröfluvirkjun.
- Benedikt Steingrímsson og Grímur Björnsson, 1990: *Krafla - Eftirlit. Borholumælingar 1990.* Orkustofnun, OS-90048/JHD-28 B, 48 s.
- Grímur Björnsson, Guðlaugur Hermannsson og Benedikt Steingrímsson, 1989: *Krafla - Eftirlit. Borholumælingar í júlí 1989.* Orkustofnun, OS-89061/JHD-31 B, 51 s.
- 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: 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.* Orkustofnun, OS-84045/JHD-12 B.

- Halldór Ármannsson og Benedikt Steingrímsson, 1984: *Krafla. Hóla KJ-22. Upphitun, upphleyping og blástur*. Orkustofnun, OS-84008/JHD-02 B.
- Helga Tulinius og Ómar Sigurðsson, 1988a: *Jarðhitasvæðið við Hvíthóla. Hermireikningar og vinnsluspá*. Orkustofnun, OS-88007/JHD-03 B, 24 s.
- Helga Tulinius og Ómar Sigurðsson, 1988b: *Hvíthólar - Tillögur að framhaldsverkefni við hermun á Hvíthólasvæðinu*. Greinargerð Orkustofnunar, HTul/Ómar-88/02, 2 s.
- International Formulation Committee, 1967: *A Formulation of the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance*. IFC Secretariat, Dusseldorf, Germany.
- Knútur Árnason, Brynjólfur Eyjólfsson, Karl Gunnarsson, Kristján Sæmundsson og Axel Björnsson, 1984: *Krafla - Hvíthólar. Jarðfræði- og jarðeðlisfræðileg könnun 1983*. Orkustofnun, OS-84033/JHD-04. Unnið fyrir Rafmagnsveitur ríkisins - Kröfluvirkjun.
- Long, J.C.S, Remer, J.S., Wilson, C.R. and Witherspoon, P.A., 1982: Porous media equivalents for network of discontinuous fractures. *Water Resour. Res.*, 18: 645-658.
- Pinder, G.F., 1979: *State-of-the-Art Review of Geothermal Reservoir Modelling*. Geothermal Subsidence Research Management Program 5, Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California (LBL-9093), 144 s.
- Pruess, K., Schroeder, R. C., 1980: *SHAFT-79 User's Manual*. LBL-10861 Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, California, U.S.A.
- Pruess, 24. 1986: *TOUGH User's guide*. LBL-20700 Lawrence Berkeley Laboratory, U.S.A.

