



ORKUSTOFNUN  
Jarðhitadeild

Ragna Karlsdóttir  
Guðni Axelsson

**VATNSÖFLUN HITAVEITU DALVÍKUR**  
Úttekt á jarðhitasvæðinu við Hamar

**OS-86044/JHD-12**  
Reykjavík, júní 1986

**Unnið fyrir**  
**Hitaveitu Dalvíkur**



**ORKUSTOFNUN**

Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verknúmer : 665-031

**Ragna Karlsdóttir**  
**Guðni Axelsson**

# **VATNSÖFLUN HITAVEITU DALVÍKUR**

**Úttekt á jarðhitasvæðinu við Hamar**

**OS-86044/JHD-12**

Reykjavík, júní 1986

**Unnið fyrir**  
**Hitaveitu Dalvíkur**

## ÁGRIP

Á árunum 1966-1977 voru boraðar 10 holur á jarðhitasvæðinu við Hamar. Aðeins þrjár þeirra hafa nýst sem vinnsluholur fyrir Hitaveitu Dalvíkur; hola 2 var nýtt frá 1970-1975 og hola 9 frá 1975-1977. Hola 10 var boruð 1977 og hefur síðan verið eina vinnsluholan á svæðinu. Úr henni er dælt að jafnaði um 40 l/s af 65°C heitu vatni.

Sumarið 1985 voru gerðar viðnámssniðsmælingar við Hamar. Niðurstöður þeirra benda til að uppstreymi heits vatns sé eftir NA-SV sprungu sem liggur yfir núverandi vinnslusvæði en vatnið leiti svo út frá henni eftir þremur N-S göngum/sprungum.

Segulmælingar voru einnig gerðar á vinnslusvæðinu og næsta nágrenni þess. Þær sýna tvo N-S ganga og samkvæmt viðnámssniðsmælingunum er heitt vatn með þeim vestari.

Í skýrslunni er einnig vatnafræðileg athugun á vinnslusögu svæðisins og var stuðst við gögn um vatnsstöðu og dælingu síðustu fjögurra ára. Niðurstöður benda til góðrar vatnsleiðni í vatnskerfinu. Einnig er því spáð að vinna megi allt að 60 l/s að jafnaði næstu 20 árin, með innan við 100 m niðurdrætti. Þó gæti einhverrar kólnunar farið að gæta.

Staðsetning nýrrar borholu er háð tilganginum með slíkri holu. Ef bora á varaholu fyrir holu 10 er lagt til að borað verði nálægt henni, í sama vatnsleiðara. Ef ætlunin er að reyna að auka vatnsvinnsluna er lagt til að næsta skref verði rannsóknarborun vestar á svæðinu og e.t.v. vinnsluborun ef árangur reynist jákvæður.

## EFNISYFIRLIT

	bls.
ÁGRIP	2
1 INNGANGUR	5
2 BORSAGA JARÐHITASVÆÐISINS VIÐ HAMAR, STUTT YFIRLIT	6
3 SEGULMÆLINGAR 1985	8
4 VIÐNÁMSSNIÐSMÆLINGAR VIÐ HAMAR 1985	9
4.1 Framkvæmd og úrvinnsla	9
4.2 Niðurstöður	12
5 ÚTTEKT Á VINNSLUSÖGU JARÐHITAKERFISINS VIÐ HAMAR	13
5.1 Vinnslusagan	13
5.2 Einingarniðurdráttur	14
5.3 Túlkun einingarniðurdráttarins	17
5.4 Vinnsluspár	21
6 LÍKAN AF JARÐHITAKERFINU	24
7 STAÐSETNING NÝRRAR HOLU	27
HEIMILDIR	28
Viðauki A: Um viðnámsmælingar	29
Viðauki B: Viðnámslíkön, mældir og reiknaðir ferlar	31
Viðauki C: Vatnafræðileg gögn	39
Viðauki D: Tvö einföld vatnafræðileg líkön	43
Viðauki E: Þjappað vatnafræðilegt líkan	47

## MYNDASKRÁ

bls.

1	Afstöðumynd af borholusvæðinu við Hamar	7
2	Segulmælingar	8
3	Staðsetning mælilína, yfirlitskort	10
4	Túlkun jarðeðlisfræðimælinga	11
5	Vinnslusaga jarðhitakerfisins	15
6	Einingarniðurdráttur jarðhitakerfisins	15
7	Einingarniðurdráttur jarðhitakerfisins	16
8	Mælt og reiknað vatnsborð í holu 2	16
9	Viðbrögð jarðhitakerfisins og aðfelld viðbrögð rennulíkans	19
10	Þjappað líkan af jarðhitakerfinu	20
11	Vinnsluspár fyrir jarðhitakerfið við Hamar	22
12	Hugsanlegt líkan	24
13	Afstaða holu 3, 5 og 10 til hugsanlegrar uppstreymisrásar	25

## TÖFLUR

1	Borholur við Hamar	7
2	Vinnsluholur Hitaveitu Dalvíkur við Hamar	14
3	Áætluð ársmeðalvinnsla úr jarðhitakerfinu við Hamar	14

## 1 INNGANGUR

Í bréfi dags. 01.03.85 óskaði bæjarstjórn Dalvíkur eftir rannsókn á jarðhitasvæðinu við Hamar.

Rannsókn þessi er tvíþætt:

- i) Viðnámsniðsmælingar til að kanna stærð svæðisins og freista þess að finna þar uppstreymi heits vatns.
- ii) Vatnafræðileg úttekt á vinnslusögu svæðisins til þess að meta vinnslugetu þess.

Tilgangur rannsókna er að staðsetja nýja borholu fyrir Hitaveitu Dalvíkur.

## 2 BORSAGA JARÐHITASVÆÐISINS VIÐ HAMAR, STUTT YFIRLIT

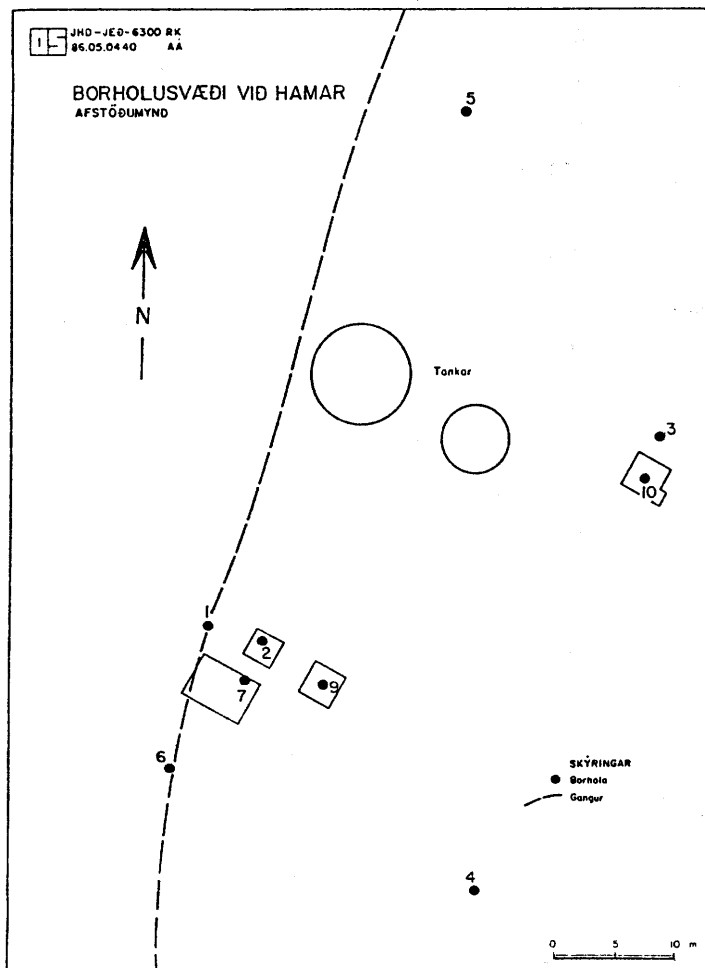
Á jarðhitasvæðinu við Hamar í Svarfaðardalshreppi hafa verið boraðar 10 holur fyrir Hitaveitu Dalvíkur. Af þeim hafa aðeins þrjár verið nýttar af hitaveitunni, eða hola 2, hola 9 og hola 10. Mynd 1 sýnir afstöðu á vinnslusvæðinu og borholur nema hola 8, sem er utan vinnslusvæðis.

Áður en boranir hófust við Hamar var ein laug á yfirborði. Hitastig í henni var  $39,5^{\circ}\text{C}$  og rennsli 0,2 l/s. Fyrsta hola (hola 1) var boruð sem rannsóknarhola ofan í eða rétt við laugina, sem hvarf við borunina. Hola 1 var boruð í nóvember og desember 1966 og gaf í upphafi 1 l/s af  $49,5^{\circ}\text{C}$  heitu vatni.

Snemma í sögu jarðhitarannsókna við Hamar kom í ljós að jarðhitinn er tengdur N-S gangi sem liggur í gegnum núverandi vinnslusvæði (Kristján Sæmundsson, 1970). Flestum holunum var ætlað að skera þennan gang og var árangur æði-misjafn. Hola 2 var boruð í desember 1968 og janúar 1969 og var hún nýtt frá 1970 allt til ársins 1975. Hola 3 var boruð í febrúar-apríl 1969 og gaf í upphafi 4 l/s (Jarðboranir ríkisins). Hola 4 var boruð í apríl-júní 1969 og gaf í upphafi 3-4 l/s (Jarðboranir ríkisins). Hola 5 var boruð í nóvember 1970 - febrúar 1971, og reyndist þurr. Hola 6 var boruð í febrúar - mars 1971 og gaf takmarkaðan árangur. Hola 7, sem var boruð í júní - júlí 1971, gaf ekki vatn, en samgangur virtist milli hennar og hola 2 (Jarðboranir ríkisins). Hola 8 var boruð sem rannsóknarhola í maí - júlí 1974. Hún er staðsett við ganginn um 200 m norðan við vinnslusvæðið, og benti til þess að volgt vatn væri þar við ganginn. Hola 9 var boruð í júlí - september 1975, rétt við hola 2, og tók við af henni sem vinnsluhola. Hola 9 var nýtt til ársins 1977. Hola 10 var síðan boruð í ágúst - september 1975 og hefur verið aðalvinnsluhola hitaveitunnar síðan. Helstu upplýsingar um holurnar eru færðar í töflu 1. Nánari upplýsingar um vinnsluholurnar þrjár eru gefnar í töflu 2.

TAFLA 1 Borholur við Hamar

Hola	Boruð	Bortæki	Dýpi (m)	Vídd neðan fóðringar	Fóðring
1	Nóv.-des. `66	Sullivan III	101	4"	4" í 3,4 m
2	Des. `68-jan. `69	Ýmir	300	4 3/4"	8" í 38 m
3	Feb.-apr. `69	-	504	4 3/4"	10" í 5,3 m; 8" í 39,4 m
4	Apr.-júní `69	-	303	4 3/4"	8" í 28 m
5	Nóv. `70-feb. `71	-	587	4 3/4"	7" í 60 m
6	Feb.-mar. `71	-	373	4 3/4"	12" í 3 m
7	Júní-júlí `71	-	302	5 1/8"	8" í 78 m
8	Mai-júlí `74	Dugandi (C-2)	108	3 1/8"	4" í 8,8 m
9	Júlí-sept. `75	Glaumur	253	7 7/8"	10" í 119,5 m; 8" í 228,7 m
10	Ágúst-sept. `77	-	838	7 7/8"	10 3/3" í 122 m; 9 5/8" í 174,6 m



MYND 1 Afstöðumynd af borholusvæðinu við Hamar

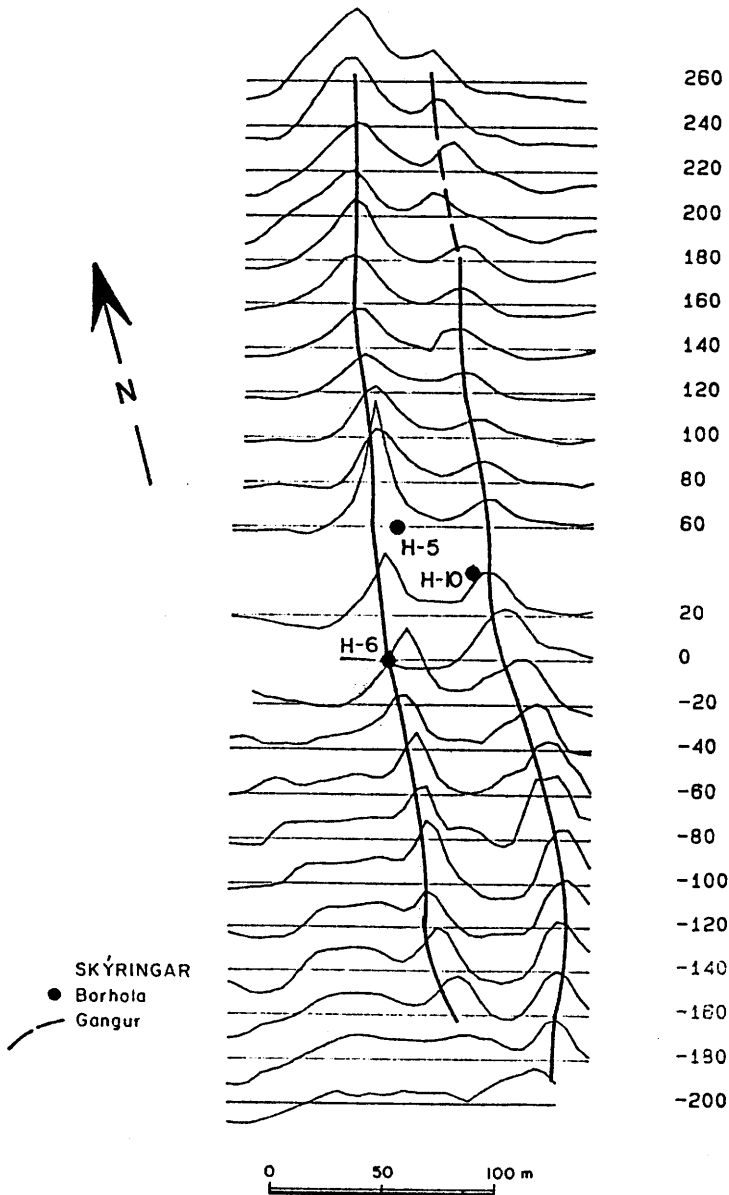


### 3 SEGULMÆLINGAR 1985

Vitað var að gangur með N-S stefnu lægi í gegnum vinnslusvæðið. Gerðar voru nákvæmar segulmælingar af vinnslusvæðinu og næsta nágrenni þess í júlí 1985. Mælt var í neti þannig, að 20 metrar voru milli lína og 5 metrar milli mælipunkta eftir línu. Svæðið er 170 m x 460 m að stærð. Segulkortið er sýnt á mynd 2.

Kortið sýnir tvo greinilega ganga sem liggja samsíða. Stefna þeirra á borholusvæðinu er nálægt N10°A. Vestari gangurinn (sem hér eftir verður nefndur gangur A) er sá sem yfirborðshitinn var við og flestar borholur eru staðsettar við. Hinn gangurinn (gangur B) liggur austan við borholurnar. Göngunum hallar sennilega lítillega til austurs um eða innan við eina gráðu (Kristján Sæmundsson 1970).

JHD-JED-6300 RK  
86.05.0442 T



MYND 2 Segulmælingar

## 4 VIÐNÁMSSNIÐSMÆLINGAR VIÐ HAMAR 1985

### 4.1 Framkvæmd og úrvinnsla

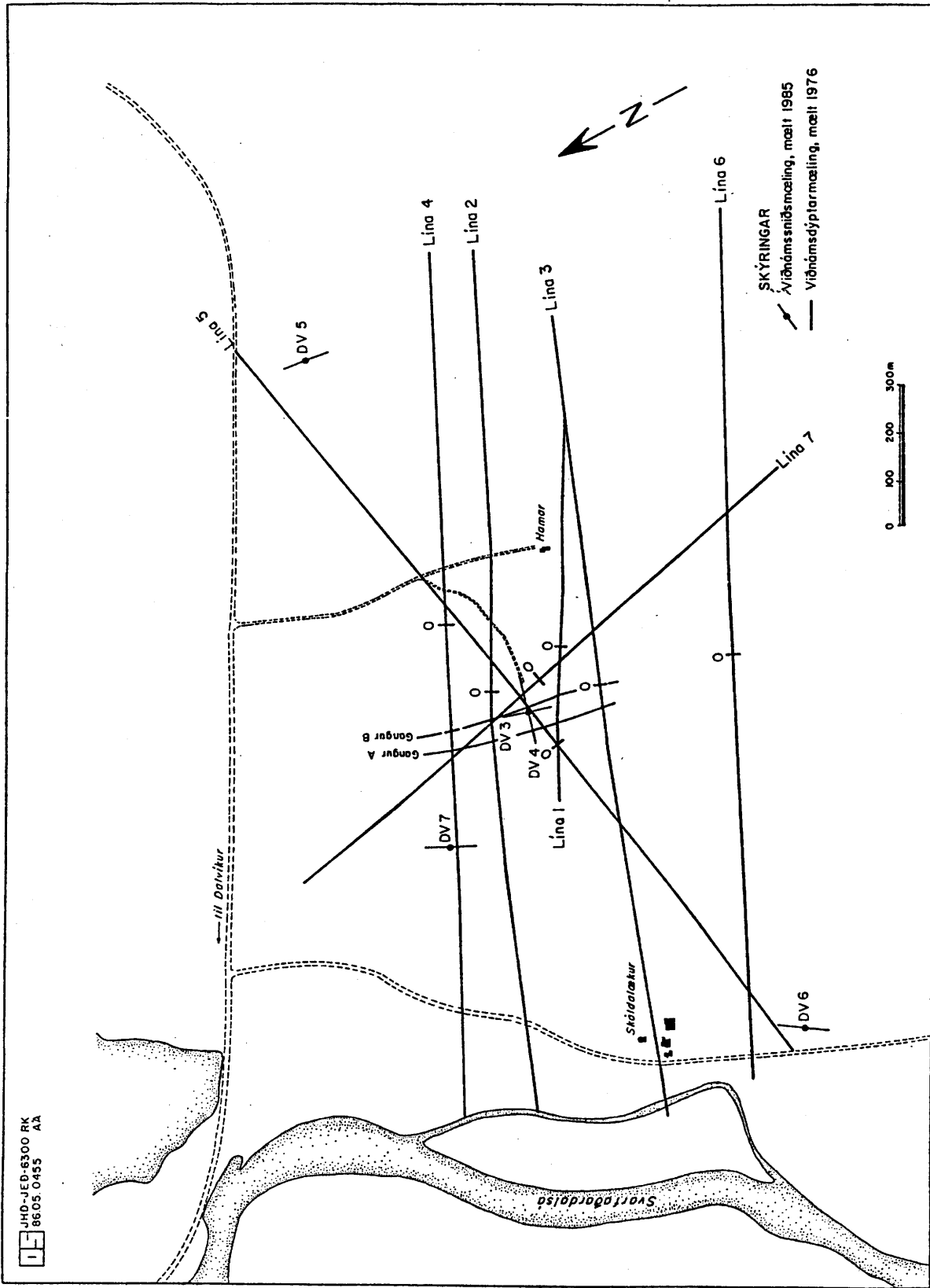
Viðnámsniðsmælingar voru gerðar á jarðhitasvæðinu við Hamar dagana 17. - 23. júlí 1985. Mældar voru 7 línur alls eins og sýnt er á yfirlitskortí (mynd 3). Notaðar voru tvær straumarmslengdir, 300 og 500 m, fyrir allar línurnar. Fjarlægð milli mælistöðva í línu var 25 m.

Mælingarnar hafa verið túlkaðar tvívítt, sem þýðir að í túlkun getur viðnám breyst eftir línunni og með dýpi, en ekki þvert á línuna. Hver lína er túlkuð sér og óháð öðrum línunum en í lokin er túlkun allra línanna borin saman og reynt að gera líkan eða mynd af svæðinu í heild.

Túlkunin fer þannig fram að giskað er á líkan fyrir hverja línu. Síðan eru reiknaðir út viðnámsferlar fyrir það líkan og bornir saman við raunverulega melda ferla. Ef þeir falla ekki saman er líkaninu breytt, nýir viðnámsferlar reiknaðir og bornir saman við mældu ferlana. Þannig eru niðurstöður líkansins smám saman felldar að mældum niðurstöðum.

Unnt var að túlka allar línurnar nema línu 6, og fékkst þokkalegt samræmi milli mældra og reiknaðra ferla. Reynt var að halda líkaninu einföldu. Lína 6 reyndist allflókin en þó var gerð heiðarleg tilraun til að fella hana að líkani. Þess má geta að túlkanirnar eru ekki einhlítar, þ.e. fleiri en ein lausn getur gilt fyrir hvern mæliferil.

Um eðli viðnámsmælinga má lesa í viðauka A.



MYND 3 Staðsetning mællína, yfirlitskort

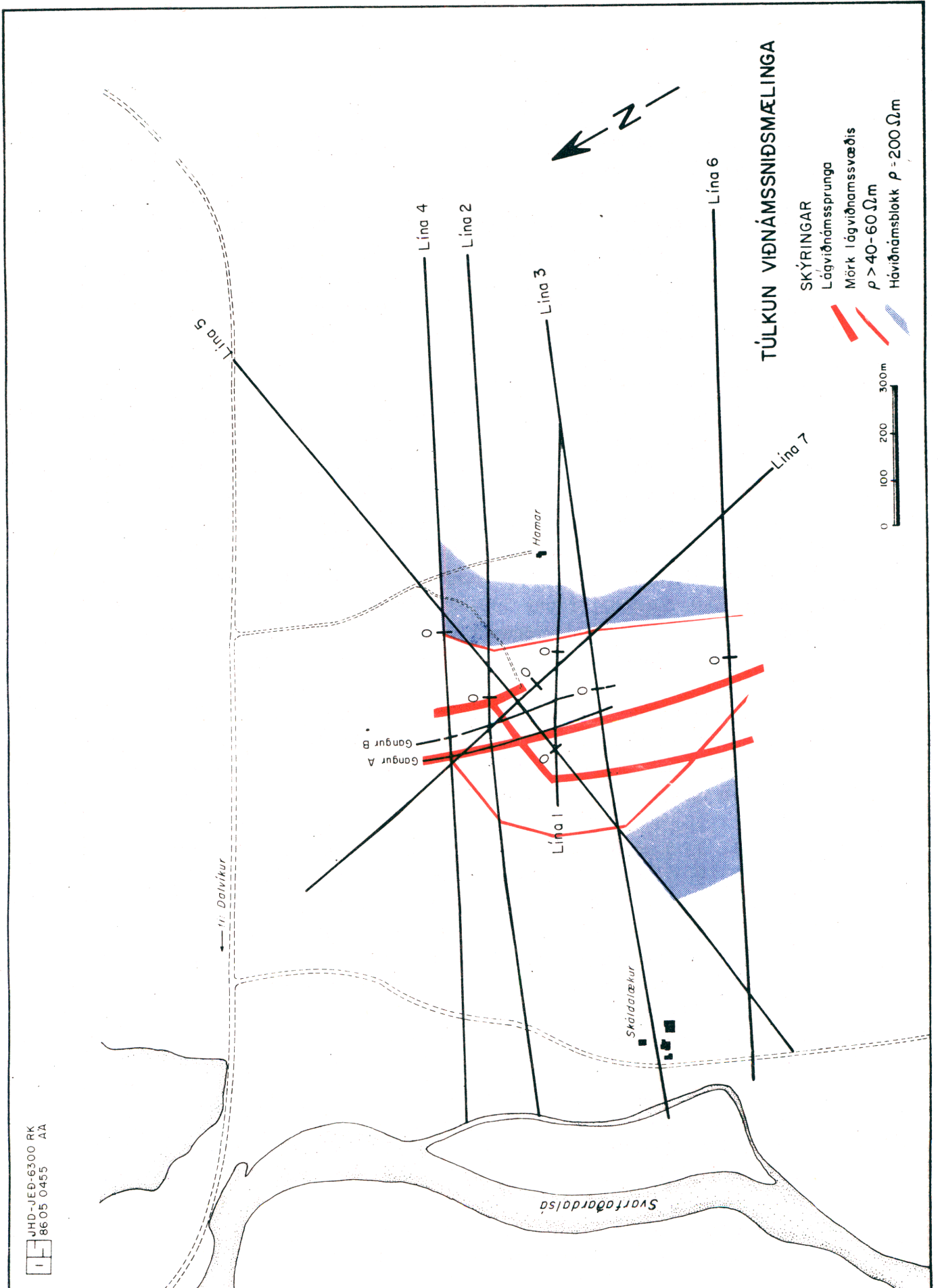
## 5 ÚTTEKT Á VINNSLUSÖGU JARÐHITAKERFISINS VIÐ HAMAR

Tilgangur eftirfarandi úttektar er tvíþættur. Annars vegar er hann sá að ráða nokkuð í gerð jarðhitakerfisins, vatnsleiðni þess og stærð. En hins vegar er hann sá að reyna að spá fyrir um viðbrögð kerfisins við vinnslu framtíðarinnar. Með jarðhitakerfi er hér átt við vatnskerfið í heild, ekki einungis hinn heita hluti þess, heldur einnig kalt írennsli úr efri jarðlögum og aðstreymi, sem upprunalega er kalt.

### 5.1 Vinntlusagan

Lítið er til af gögnum um vinnslusögu svæðisins, þ.e. gögnum um vatnsvinnsluna úr svæðinu og um þrýstiviðbrögð þess. Þó hefur verið fylgst reglulega (a.m.k. tvisvar í mánuði) með vatnsborði í holu 2 síðan í lok febrúar 1982. Þær vatnsborðsmælingar endurspeglar þrýstiástandið í jarðhitakerfinu frá þeim tíma. Einnig eru til mælingar á augnabliksdælingu úr holu 10 síðan í nóvember 1981. Hefur dæling þá verið mæld á eins til tveggja daga fresti að jafnaði. Mat á meðalvinnslu út frá augnabliksmælingu er ónákvæmt þar sem mælt er að degi til þegar vinnslan er væntanlega meiri en að nóttu til. Árið 1985 var vinnslan einnig mæld með rúmmetramæli. Slik mæling gefur mun nákvæmari upplýsingar um meðalvinnsluna. Ekki reyndist vera nema um 2% munur á þessari mælingu og augnabliksmælingunni og því verður hér stuðst við gögn um augnabliksdælingu frá 1982, 1983 og 1984 (þó leiðrétt um 2%). Vegna bilunar í mælibúnaði eru aðeins til vinnslugögn til loka október 1985. Því eru til gögn um tæplega fjögurra ára tímabil af rúmlega fimmtán ára vinnslusögu svæðisins. Gögnin eru birt á mynd 5 (og á tölulegu formi í viðauka C). Þessi takmörkuðu gögn voru lögð til grundvallar þeirri úttekt á vinnslusögu jarðhitakerfisins sem greint verður frá hér á eftir.

Jafnframt verður stuðst við grófa áætlun (byggð á vatnssölu Hitaveitu Dalvíkur) um vinnslu úr kerfinu frá upphafi, og er hún birt í töflu 3. Nánari upplýsingar um vinnsluholurnar þrjár (2,9 og 10) og núverandi vatnsborðsholu (2) eru gefnar í töflu 2. Í júlí 1971 voru gerðar dæluprófanir í nokkrum borholanna og er niðurstöðunum lýst í skýrslu Orkustofnunar (Þorsteinn Thorsteinsson o.fl., 1972).



MYND 4 Túlkun jarðeðlisfræðimælinga

## 4.2 Niðurstöður

Í viðauka B eru sýndir allir mældir ferlar og túlkanir, þ.e. líkön og ferlar sem eru reiknaðir eftir þeim.

Viðnámsdýptarmælingar í Svarfaðardal frá 1976 gefa til kynna að viðnám í berggrunni utan jarðhitasvæðis sé 150-200 ohm-m. Viðnám í berggrunni í næsta nágrenni jarðhitasvæðisins við Hamar er um 90 ohm-m. Staðsetningar þessara mælinga eru merktar DV3, DV4, DV5, DV6 og DV7 á yfirlitskortu (mynd 3).

Viðnámsniðsmælingarnar gefa nákvæmari upplýsingar um jarðhitasvæðið sjálft (mynd 4). Í samræmi við viðnámsdýptarmælingarnar er 90 ohm-m viðnám neðan 150 metra dýpis utan svæðisins. Innan svæðisins er viðnám lægra eða 40-60 ohm-m. Að austan afmarkast það af háviðnámsblokk 200-300 ohm-m, en að vestan afmarkast það af 90-150 ohm-m viðnámi. Yfirborðslag er um 50 metra þykkt yfir lágviðnámsvæðinu en 150 metrar utan þess. Austan til er háviðnámsblokk á 50-150 metra dýpi. Viðnámið í henni er hæst syðst eða 500-700 ohm-m en lækkar heldur til norðurs og er þar 300-500 ohm-m. Vestast í öllum línunum (nema línu 7) er lágt viðnám í yfirborði. Það eru áhrif frá árseti (sjá líkön í viðauka B).

Í línunum koma fram tveir til þrjú lágviðnámsveggir. Einn slíkur lágviðnámsveggur liggur í gegnum allt svæðið, sést í öllum línunum og fellur saman við gang A á segulkortu. Hins vegar kemur ekki fram lágt viðnám við gang B.

Í línunum 1, 3, 5 og 6 kemur fram lágviðnámsveggur um 150 metrum vestan við gang A. Hann kemur ekki fram í línunum 2, 4 og 7 og virðist því ekki ná svo langt norður. Um 100 metrum austan við gang A kemur fram lágviðnámsveggur á norðurhluta svæðisins, eða í línunum 2, 4 og 5. Í línu 7 kemur fram lágviðnám sem fellur ekki inn í fyrrnefnda þrjú lágviðnámsveggi. Samkvæmt túlkun viðnámsniðsmælinganna er því uppstreymi á svæðinu þannig háttað:

Þversprunga með NA-SV stefnu er aðal-uppstreymisrás jarðhitavatnsins.

Út frá þversprungunni seytlar svo vatnið meðfram gangi A bæði til norðurs og suðurs og eftir sprungum eða göngum til suðurs þar sem vestasti lágviðnámsveggurinn er og til norðurs þar sem austasti lágviðnámsveggurinn er.

Þversprungan liggur trúlega yfir vinnslusvæðið á milli holu 5 og holu 10, og sker línu 7 þar sem lágviðnámið kemur fram í henni.

TAFLA 2. Vinnsluholur Hitaveitu Dalvíkur við Hamar

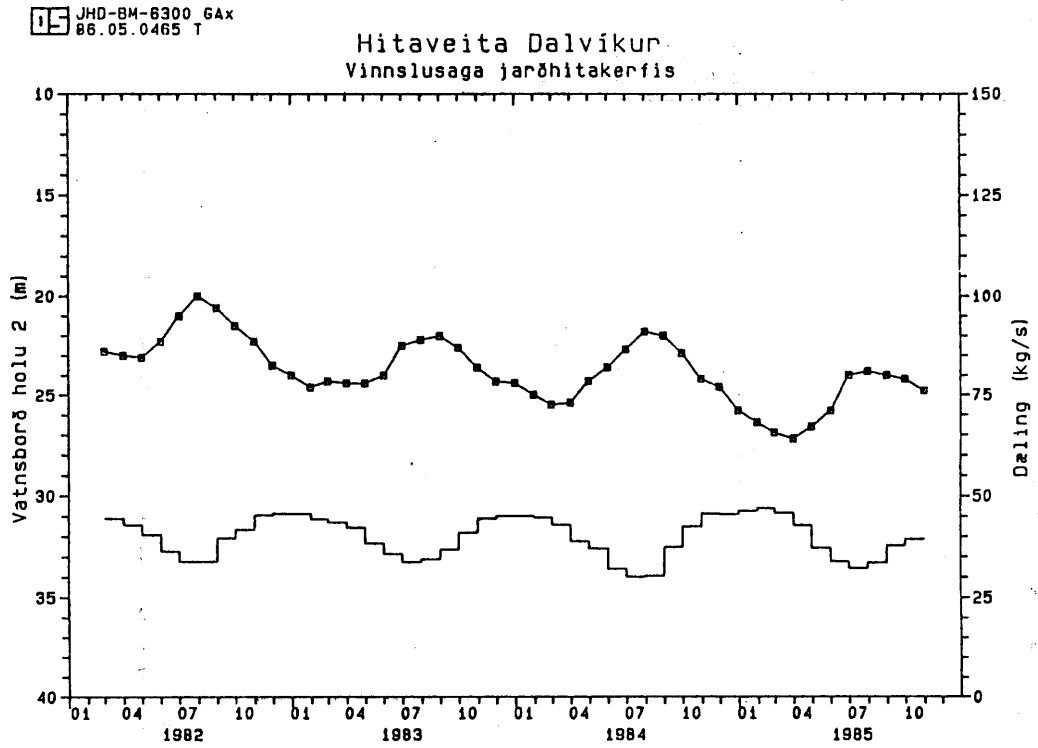
Hola	Borað dýpi	Hæð yfir sjávarmáli	Fjarlægð frá holu 2	Aðalæð
2	300 m	64 m	0 m	220 m
9	250 m	63 m	6 m	220 m
10	840 m	62 m	35 m	820 m

TAFLA 3. Aætluð ársmeðalvinnsla úr  
jarðhitakerfi við Hamar

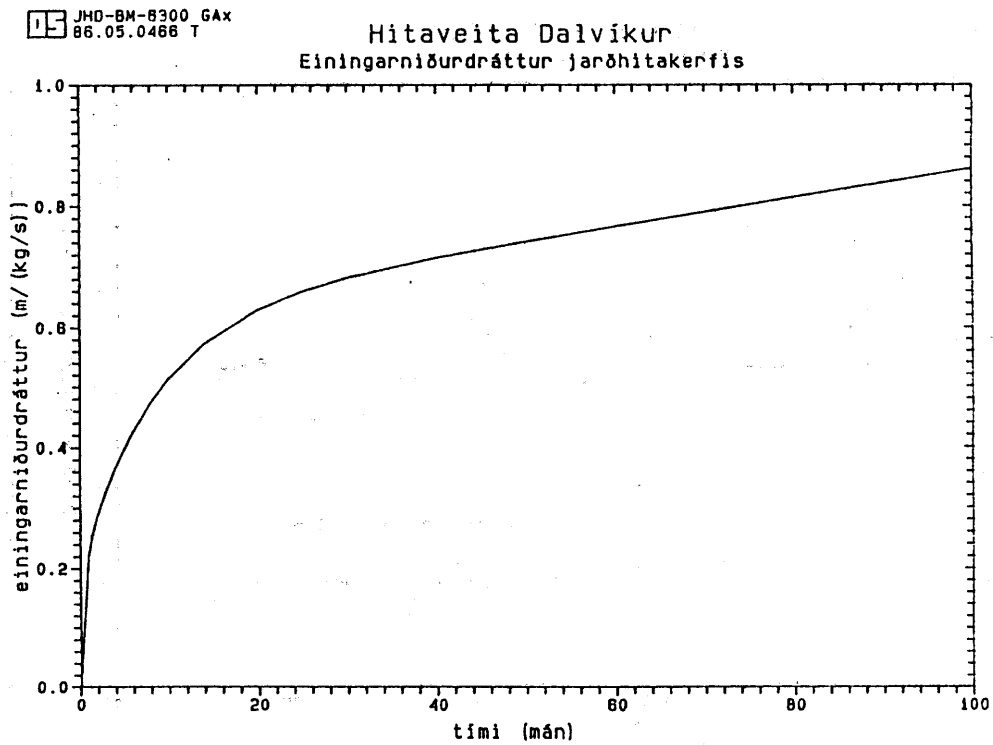
Ár	Vinnsla, l/s
1971	22,5
1972	22,5
1973	22,5
1974	23,5
1975	29,1
1976	29,9
1977	31,2
1978	33,0
1979	38,0
1980	39,0
1981	41,5

## 5.2 Einingarniðurdráttur

Erfitt er að greina nákvæmlega viðbrögð kerfisins í hráum vinnslugögnunum. Er það vegna hinnar árlegu sveiflu í vinnslu og vatnsborði (mynd 5). Hér er því brugðið á það ráð að reikna svokallaðan einingarniðurdrátt, eða viðbrögð kerfisins við stöðugri dælingu á einni massa- eða rúmmálseiningu á tímæiningu (Guðni Axelsson, 1985). Þetta hefur verið gert fyrir vinnslugögnin á mynd 5, og jafnframt stuðst við áætlaða meðalvinnslu áranna 1971 - 1981. Einnig er reiknað með nokkrum yfirþrýstingi í kerfinu við upphaf vinnslu, eða um 1.2 bar. Niðurstöður eru birtar á myndum 6 og 7 og samanburður reiknaðs og mælds vatnsborðs á mynd 8. Þar er kvaðratfrávikid aðeins um 29 cm sem er lítið ef tekið er tillit til óvissu í dælingartölum og þess að einhverjar skekkjur eru væntanlega í vatnsborðstölum, t.d. vegna áhrifa sjávarfalla.

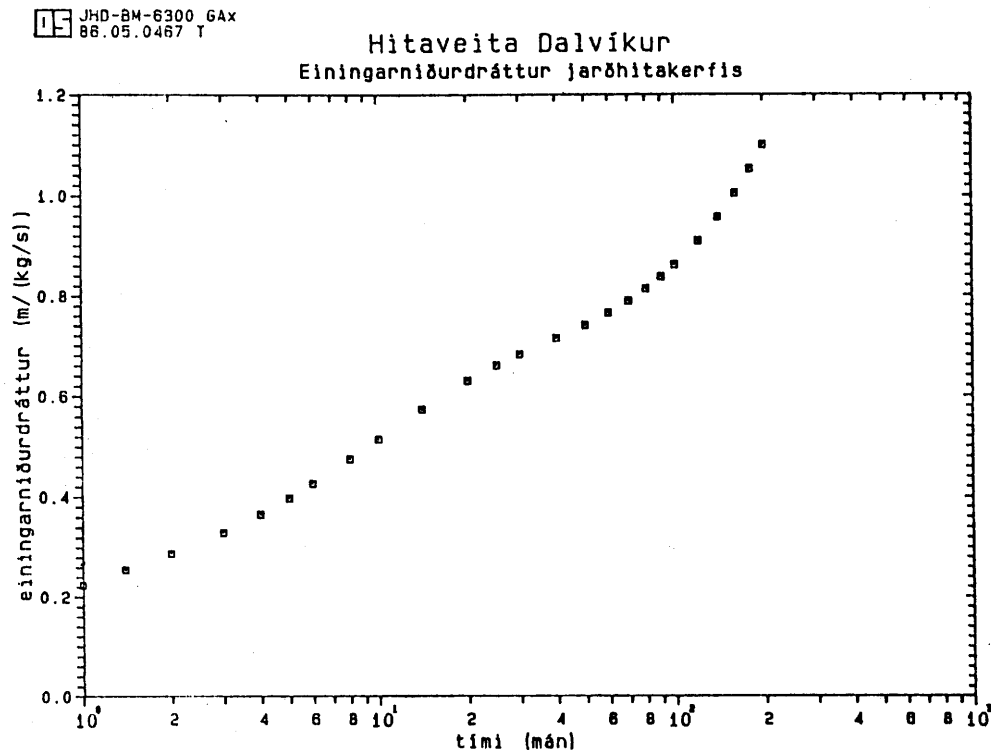


MYND 5 Vinnslusaga jarðhitakerfisins

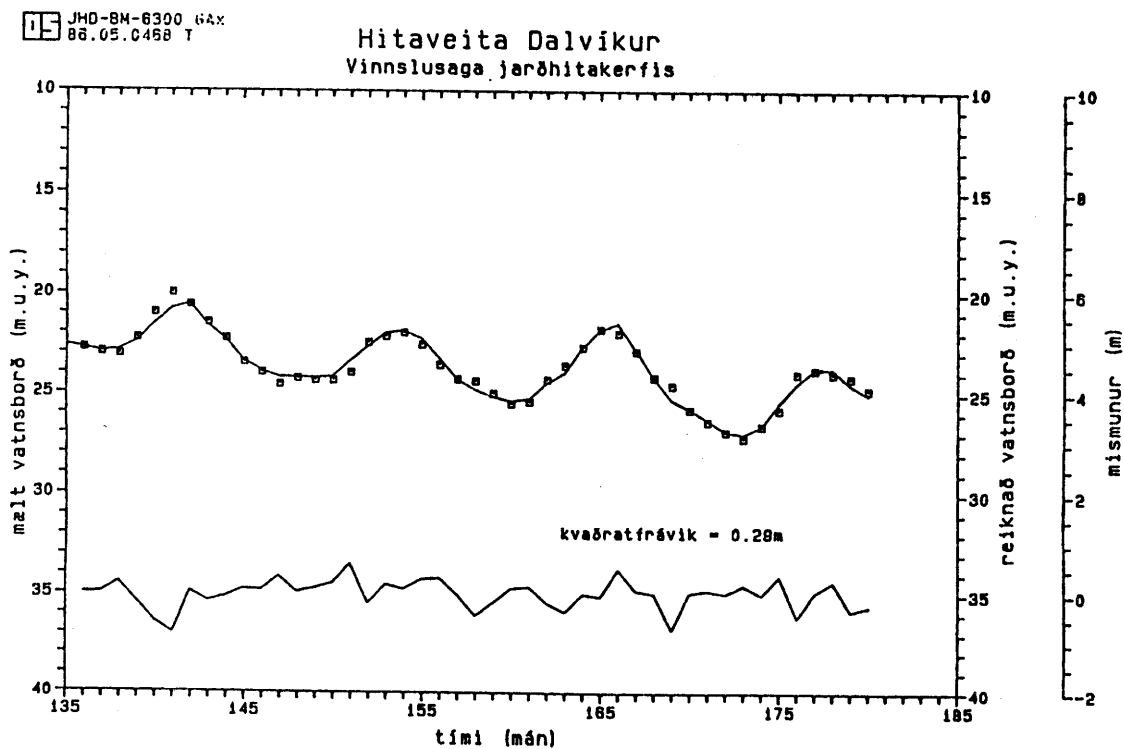


MYND 6 Einingarniðurdráttur jarðhitakerfisins





MYND 7 Einingarniðurdráttur jarðhitakerfisins



MYND 8 Mælt og reiknað vatnsborð í holu 2

Til er mæling á vatnsborði í holu 10 frá því í lok september 1977, þ.e. stuttu áður en vinnsla hófst úr holunni. Var vatnsborð þá á 7 m dýpi. Er þetta í góðu samræmi (innan við 1 m) við áætlað vatnsborð á þessum tíma samkvæmt einingarniðurdrættinum.

Ef einingarniðurdrátturinn (mynd 6) er skoðaður sést eftirfarandi:

- Mestur er niðurdrátturinn fyrstu 10 - 20 mánuðina og er það vegna þrýstifalls í hinum staðbundna hluta vatnskerfisins. Þetta þrýstifall verður að nokkru leyti vegna þjappanleika bergs og vatns í kerfinu. Einnig verður það vegna niðurdráttar á frjálsum vatnsborði þess.
- Nokkur langtímaniðurdráttur er einnig og stafar hann væntanlega að mestu leyti af ytri takmörkum jarðhitakerfisins í heild. Þessi langtímaniðurdráttur er um 0,026 m/(kg/s) á ári eða um 1 m/ári við 40 l/s vinnslu

### 5.3 Túlkun einingarniðurdráttarins

Túlkun einingarniðurdráttarins er ekki einhlít þar sem hann er aðeins byggður á vatnsborðsgögnum úr einni holu. Ekki er því hægt að draga nákvæmar ályktanir um innri gerð kerfisins eingöngu á grundvelli hans. Þó er hægt að meta bæði meðallekt bergsins í vatnskerfinu og heildarvatnsrymd þess. Einnig er hægt með hliðsjón af öðrum gögnum, jarðeðlisfræðilegum og jarðfræðilegum, að túlka einingarniðurdráttinn nánar. En rétt er að taka fram að enda þótt túlkun einingarniðurdráttarins sé margræð þá rýrir það ekki gildi hans við gerð vinnsluspáa.

Fyrsta skrefið í túlkun einingarniðurdráttarins er að fella viðbrögð einfaldra vatnafræðilegra líkana að honum. Hér verða notuð tvenns konar líkön: af óendanlegu hálfjúmi og af lóðréttri rennu, en þessum tveim líkönum er lýst nánar í viðauka D. Hálfjúmslíkan er auðvitað mikil einföldun á raunveruleikanum, en gefur meðaltal yfir lekt jarðhitakerfisins og næsta nágrennis þess. Þetta meðaltal má síðan bera saman við sambærileg meðaltöl (byggð á langtímagögnum) frá öðrum jarðhitasvæðum.

Viðbrögð hálfjúmslíkans má fella mjög vel að fyrstu 5 - 6 árum einingarniðurdráttarins. Það gefur eftirfarandi mat á meðallekt bergsins:

$$k = 1,1 \times 10^{11} \text{ m}^2 = 0,011 \text{ Darcy}$$

Til samanburðar má nefna eftirfarandi meðallektartölur frá öðrum lágheitsvæðum (Guðni Axelsson, 1985):

Svæði	k (10 <sup>-14</sup> m <sup>2</sup> )
Laugaland, Eyjafirði	0,06
Ytri-Tjarnir, Eyjafirði	0,07
Laugarnes, Reykjavík	1,4
Svartsengi, Reykjanesi	0,55

Ofangreint meðaltal fyrir Hamarssvæðið er töluvert hærra en það meðalgildi sem reiknast fyrir hin tvö svæðin á Eyjafjarðarsvæðinu, og endurspeglar það betri vinnslueiginleika jarðhitakerfisins við Hamar. Hugsanlegt er að hreyfing á jarðskjálftasprungum í nágrenni Hamars (t.d. í Dalvíkurskjálftanum 1934) viðhaldi meiri lekt þar en víða annars staðar á Eyjafjarðarsvæðinu.

Rennulíkanið sem lýst er í viðauka D er í betra samræmi við jarðfræði svæðisins. Slíkt líkan getur líkt eftir vatnsstreymi í og við gang eða í gangasveim. Þetta líkan á því væntanlega vel við á jarðhitasvæðinu við Hamar.

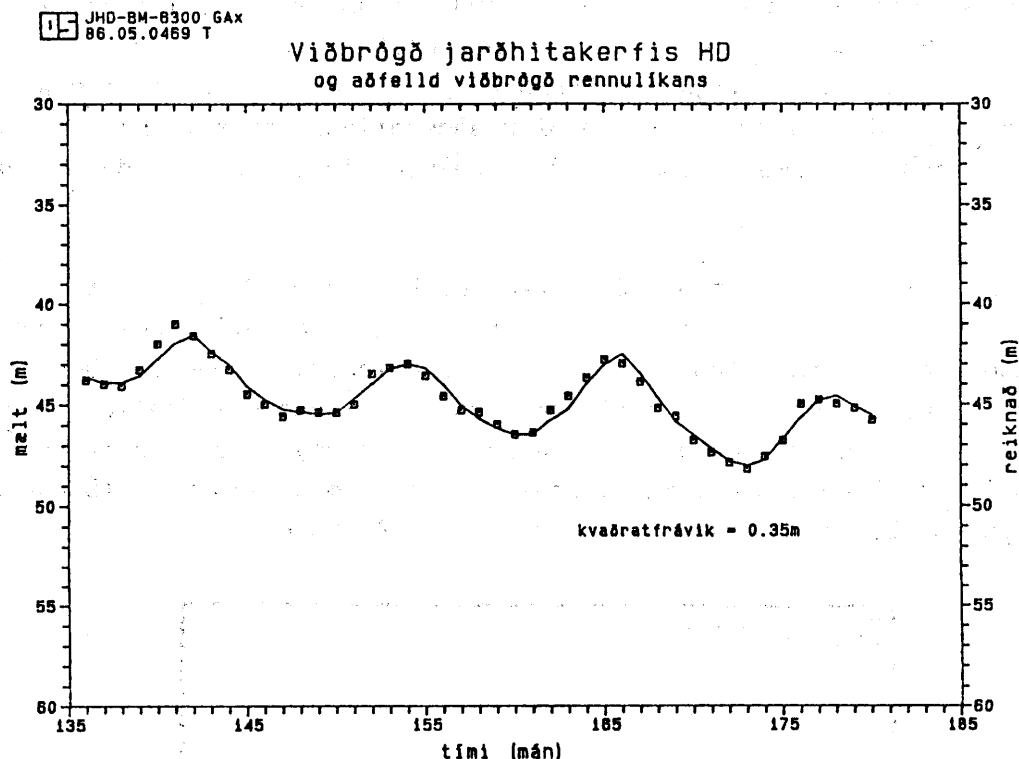
Viðbrögð rennulíkans má fella vel að fyrstu 8 - 9 árum einingarniðurdráttarins. Það gefur eftirfarandi mat á margfeldi þykktar (b) og lektar (k) rennunnar

$$bk = 1,0 \times 10^{-10} \text{ m}^3 = 100 \text{ Darcym}$$

Margfeldið af þykkt og lekt má einnig túlka sem lekt af völdum nokkurra samsíða sprungna eins og lýst er í viðauka D. Sem dæmi má taka þrjár sprungur, en samkvæmt viðnámsmælingum eru þrjár lágviðnámsrennur á svæðinu, og þá fæst að meðalvið sprungnanna sé um 0,7 mm.

Viðbrögð rennulíkans má einnig fella beint að vinnslugögnunum. A mynd 9 er sýndur samanburður á reiknuðum viðbrögðum rennulíkans og mældum viðbrögðum jarðhitakerfisins við Hamar. Eins og sést, er samanburðurinn góður.

Sú staðreynd að viðbrögð rennulíkans má fella að fyrirbyggjandi gögnum er í samræmi við þá túlkun viðnámsmælinga að jarðhitakerfið sé að mestu tengt nokkrum, nærri lóðréttum, göngum og/eða misgengjum, þ.e. ganga/sprungu-sveim.



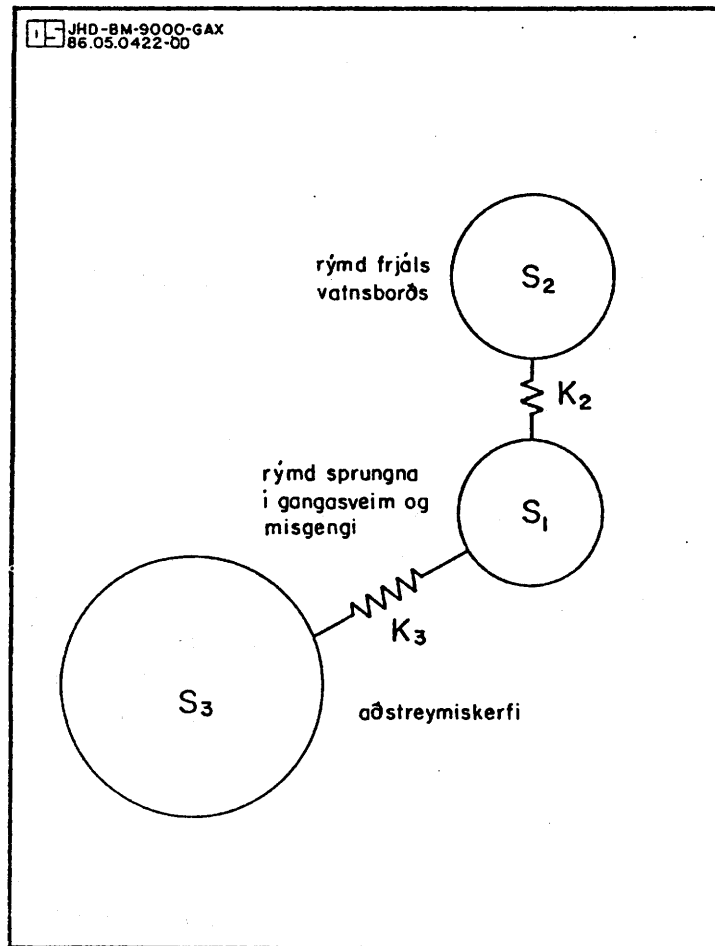
MYND 9 Viðbrögð jarðhitakerfisins og aðfæld viðbrögð rennulíkans

Ofangreind líkön eru þó fulleinföld til þess að herma nákvæmlega langtíma viðbrögð jarðhitakerfisins, eða til þess að spá um framtíðarviðbrögð. Því er gripið til þess ráðs að nota svokallað þjappað líkan, en þjöppuðum líkönum og notkun þeirra er lýst í viðauka E. Með einföldum þjöppuðum líkönum má herma mjög nákvæmlega þrýstiviðbrögð flókinna jarðhitakerfa og síðan nota líkönin til þess að spá fyrir um framtíðarviðbrögð kerfanna. Þjappað vatnafræðilegt líkan samanstendur af nokkrum vatnsgeymum sem líkja eftir vatnsrýmd kerfis, og eru þeir innbyrðis tengdir með viðnámmum sem líkja eftir straumviðnámi í kerfinu. Vatnsrýmd vatnsfasa jarðhitakerfis getur verið af tvennum toga eins og lýst er í viðauka E, þ.e. bæði vegna samþjappanleika vatns og bergs og vegna frjáls vatnsborðs kerfis. Sjaldan er í túlkun þrýstiviðbragða vatnsfasa jarðhitakerfa tekið tillit til rýmdar vegna frjáls vatnsborðs, en sú rýmd er sennilega ráðandi í langtíma viðbrögðum margra slíkra kerfa (Guðni Axelsson, 1985).

Hægt er að fella viðbrögð lokaðs þriggja kassa líkans mjög nákvæmlega að einingarniðurdrættinum fyrir jarðhitakerfið við Hamar og er niðurstöðunum lýst í viðauka E. Án nánari túlkunar fæst mat á heildarrýmd vatnskerfis jarðhitakerfisins, eða  $S = 118000 \text{ ms}^2$ . Þetta er mjög mikil rýmd og er varla hægt að skýra hana eingöngu með samþjappanleika

bergs og vatns. Þá væri vatnskerfið 500 - 1000 km<sup>2</sup> að yfirborðsflatarmáli (reiknað með 3000 m þykkt og poruhluta 0,04 - 0,10). En ef rýmdin er af völdum frjáls vatnsborðs þarf flatarmál kerfisins aðeins að vera um 10 - 30 km<sup>2</sup>. Er það öllu aðgengilegri stærð. Ljóst er því að vatnsrýmd vatnskerfisins er að verulegu leyti af völdum frjáls vatnsborðs.

Nánari túlkun hins þjappaða líkans er birt á mynd 10. Aðeins er um eina túlkun af fleiri mögulegum að ræða og hún því ekki einhlít. Túlkunin er í fyrsta lagi byggð á jarðfræðilegum aðstæðum, í öðru lagi á þeim niðurstöðum jarðeðlisfræðilegra mælinga sem fjallað er um í þessari skýrslu og í þriðja lagi á þeirri staðreynd að frjáslt vatnsborð virðist vera mikilvægt í þrýstiviðbrögðum kerfisins. Túlkuninni er lýst stuttlega hér á eftir og nánar í viðauka E.



MYND 10 Þjappað líkan af jarðhitakerfinu

Kassar 1 og 2 svara til hins staðbundna jarðhitakerfis. Vatni er dælt úr kassa 1 (holu 10) og jafnframt fylgst með vatnsborði í sama kassa (holu 2). Kassi 1 hermir að mestu vatnsrýmd hins staðbundna kerfis neðan 100 - 200 m dýpis. Sú vatnsrýmd er bundin einstökum sprungum í gangasveimnum og misgengissprungunni, en ekki rúmmáli poróttts bergs. Léleg hittni borhóla, sem þó hafa verið boraðar á mjög litlu svæði, styður þá túlkun að vatnsrýmd og leiðni þessa hluta kerfisins sé bundin einstökum sprungum. Kassi 2 hermir vatnsrýmd vegna frjáls vatnsborðs kerfisins og er poruhluti yfirborðsjarðlaga metinn  $\emptyset = 0,05 - 0,08$ . Þriðji kassinn samsvarar aðstreymiskerfinu.

Hin mikla rýmd hins staðbundna jarðhitakerfis (rýmd kassa 1 og kassa 2 =  $2600 \text{ ms}^2$ ) er í samræmi við þær niðurstöður viðnámsmælinga að jarðhitakerfið við Hamar sé töluvert víðáttumeira en núverandi vinnslusvæði. Þó ber að hafa það í huga að hér er einnig um rýmd hins kalda yfirborðshluta kerfisins að ræða.

#### 5.4 Vinnsluspár

Hið þjappaða líkan, sem lýst hefur verið hér að ofan, má nú nota til þess að spá fyrir um framtíðarviðbrögð svæðisins. Þetta hefur verið gert og eru niðurstöðurnar birtar á mynd 11. Á það ber þó að leggja áherslu að hér er um að ræða spá um svæðisviðbrögð, eins og þau mælast í holu 2, en ekki vatnsborð í holu 10. Í holu 10 er vatnsborð nokkuð lægra en á svæðinu almennt og er það vegna iðustreymistaps í og við holuna.

Ekki eru til gögn um vatnsborð í holu 10 í vinnslu. Einungis eru til gögn um hækkun vatnsborðs í holu 10 eftir stöðvun dælu. Slík gögn eru til frá 1982, 1983 og 1985 (birt í viðauka C). Út frá gögnum um hækkun vatnsborðs má áætla vatnsborð í vinnslu. Þetta hefur verið gert að því er varðar gögnin frá október 1983, maí 1985 og október 1985. Þetta er þó mjög gróf áætlun þar sem gögnin eru takmörkuð að gæðum. Iðustreymistapið er síðan áætlað út frá muninum á vatnsborði í holu 2 og áætluðu vatnsborði í holu 10. Iðustreymistap í vinnsluholu má áætla með jöfnunni

$$dh = Cq^2$$

og út frá ofangreindum áætlunum fæst að

$$C = 0.0050 \text{ m}/(1/\text{s})^2$$

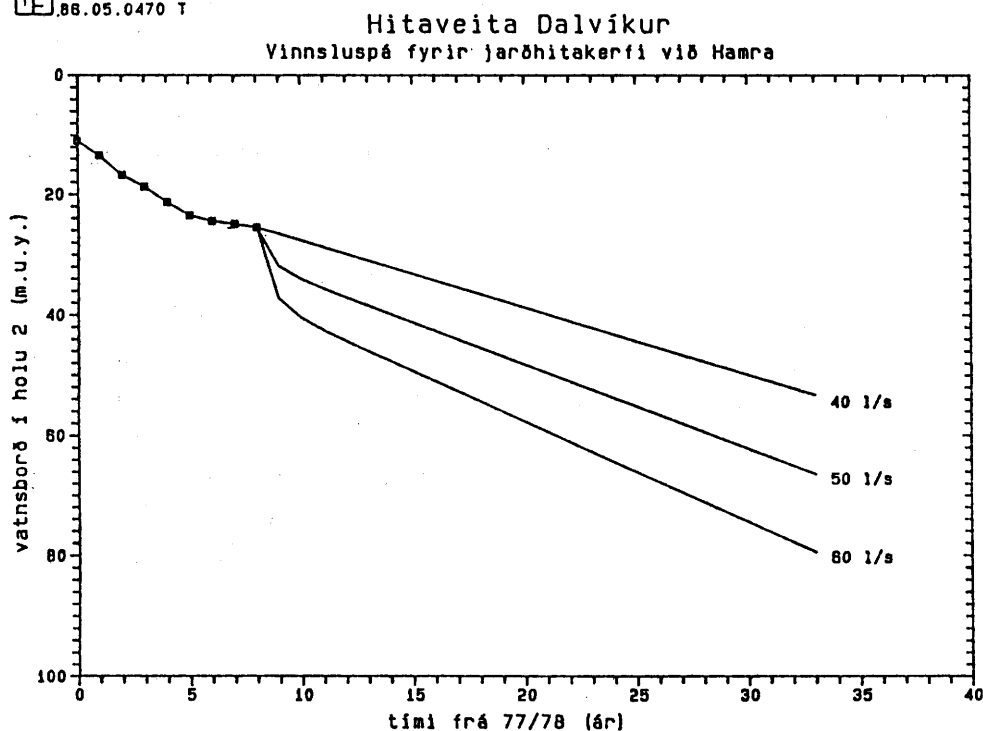
Iðustreymistap við mismunandi vinnslu má þá áætla sem hér segir:

vinnsla (l/s)	$dh = Cq^2$ (m)
40	8
50	13
60	18
70	25

Þessu mati er því rétt að bæta við niðurdráttarspána á mynd 11 ef áætla á vatnsborð í holu 10. Þetta mat er þó mjög gróft. Ef átlunin er að auka vinnslu úr holu 10 verulega (um 10 - 20 l/s) væri rétt að þrepaðæla úr holunni til þess að meta iðustreymistapið nákvæmlega.

Spáin á mynd 11 er fyrir 40, 50 og 60 l/s ársmeðalvinnslu og gefur ársmeðalniðurdrátt. Niðurdráttur að vetri yrði nokkuð meiri. Ef vetrarvinnsla er t.d. 10 l/s meiri en ársmeðalvinnsla verður svæðisvatnsborðið um 3 m lægra en spáin. Einnig verður meira iðustreymistap að vetri til.

JHD-BM-6300 GAX  
86.05.0470 T



MYND 11 Vinnsluspár fyrir jarðhitakerfið við Hamar

Leggja ber áherslu á það að spáin verður þeim mun óvissari sem lengra liður frá árslokum 1985. Þar sem spáin byggir svo til eingöngu á

fjögurra ára vinnslusögu má búast við að hún sé þokkaleg fyrstu 5 - 10 árin. Eftir það er hún óvissari en einnig er hún óvissari fyrir 50 og 60 l/s vinnslu. Þó er hægt að draga eftirfarandi ályktanir (dælan í holu 10 er nú á 47 m dýpi):

- Ef iðustreymistapið í holu 10 hefur ekki verið vanmetið hér að framan þá virðist varla þurfa að síkka dæluna, við óbreytta vinnslu, næstu 5 árin. Þó ber að hafa það í huga að iðustreymis-tapið er aðeins gróflega áætlað.
- Ef vinnsla er hins vegar aukin þarf væntanlega að síkka dælu á næstu árum. Rétt er að ítreka að áður væri rétt að þrepaðæla úr holu 10.
- Ef unnt er að síkka dælu í holu 10 um nokkra tugi metra má búast við að halda megi núverandi vinnslu í nokkra áratugi.
- Erfiðara er að segja með vissu til um hámark þess sem hægt er að vinna úr holu 10, eða svæðinu öllu. Spáin bendir þó til þess að ef unnt er að síkka dælu í 100 m sé hámarksmeðalvinnsla til 20 ára um 60 l/s.

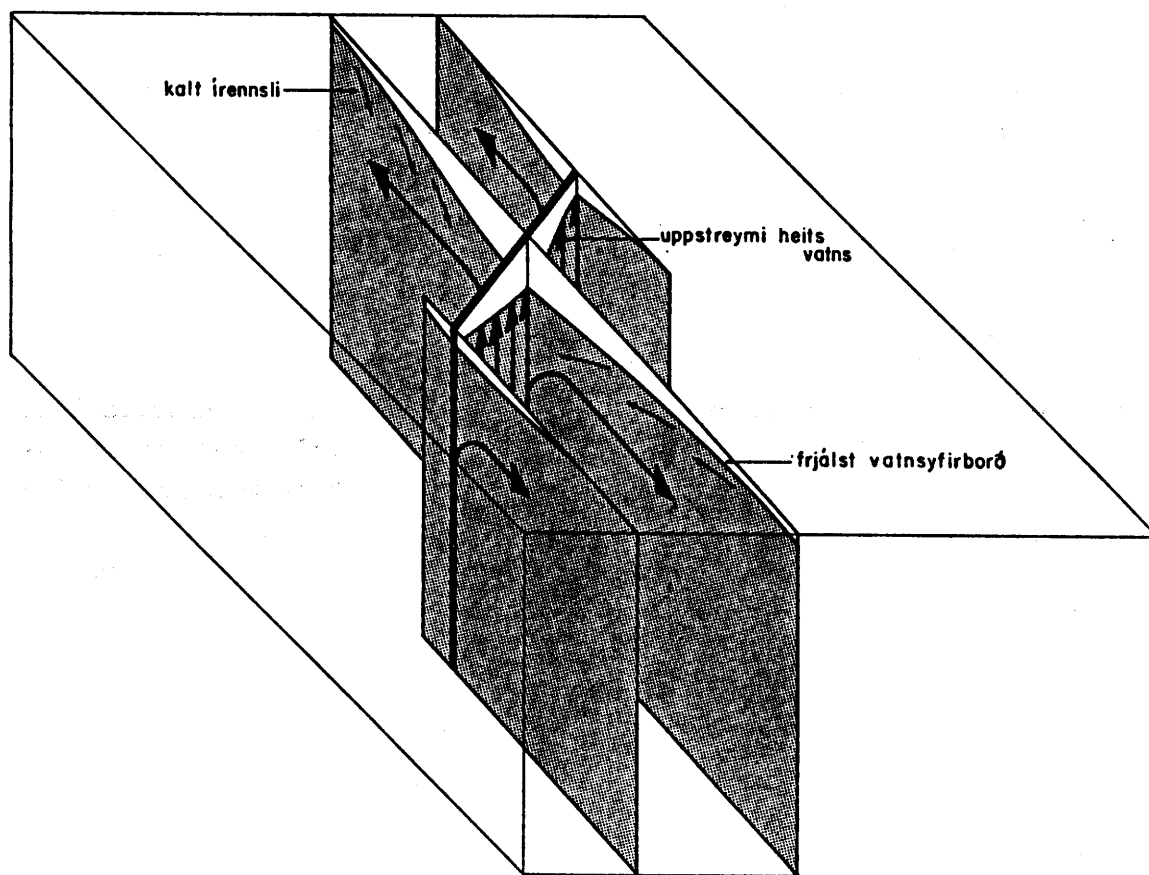
Rétt er að taka fram að hér er einungis verið að spá um þrýstiástand (þ.e. vatnsborð) í jarðhitakerfinu. Engu hefur verið spáð um hita-ástand kerfisins. Engrar kólnunar, eða fyrirboða kólnunar, hefur orðið vart. Það er þó engin trygging fyrir því að jarðhitavatnið muni ekki kólna í framtíðinni, en eins og bent hefur verið á þá er eitthvert innstreymi kalds vatns að ofan.



## 6 LÍKAN AF JARÐHITAKERFINU

Mynd 12 sýnir mögulegt, einfaldað líkan af jarðhitakerfinu. Þetta líkan er fyrst og fremst byggt á túlkun viðnámsmælinganna (sjá 4.2) en jafnframt er stuðst við túlkun einingarniðurdráttar kerfisins (sjá 5.3). Leggja ber áherslu á að hér er aðeins um mögulegt líkan að ræða sem er byggt á túlkun takmarkaðra gagna.

JHD-JED-6300 RK  
86.05.0441 RK



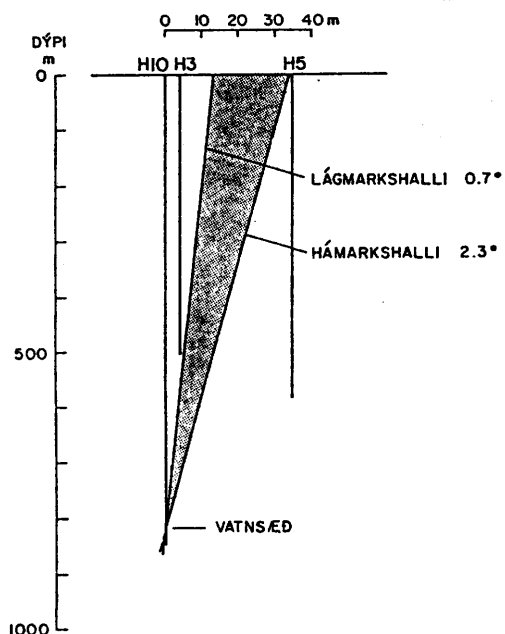
MYND 12 Hugsanlegt líkan

Samkvæmt líkaninu er uppstreymi heits vatns í kerfinu um NA-SV sprungu, sem kemur fram sem lágviðnámsveggur í túlkun viðnámsmælinganna. Út frá uppstreymissprungunni leitar vatnið síðan út í N-S gang (gang A), sem kemur fram sem lágviðnámsveggur og einnig sést í segulmælingum, og einnig út í tvo ganga/sprungur, sem sjást sem lágviðnámsrennur sín hvoru megin við gang A. Vatnið virðist aðeins streyma í suður eftir vestasta ganginum/sprungunni, í báðar áttir eftir gangi A

og aðeins í norður eftir austasta ganginum/sprungunni.

Um legu og halla uppstreymissprungunnar er stuðst við þá staðreynd að hola 10 fær vatn en hvorki hola 3 né hola 5 (sjá mynd 13). Einnig er gert ráð fyrir að uppstreymisrásin skeri lágviðnámið í línu 7, sem er norðan við holu 10.

JHD-JED-6300 RK  
86.05.0456 RK



Ath. láréttur mælikvarði ekki í samræmi við lóðréttan mælikvarða.

MYND 13 Afstaða holu 3, 5 og 10 til hugsanlegrar uppstreymisrásar

Hola 10 sker uppstreymi á 820 m dýpi, en hola 3, sem er aðeins í 4 m fjarlægð, 504 m djúp, fær ekki vatn. Þannig hallar sprungunni a.m.k. 0,7° til suðurs. Hola 5 er þurr og sker því ekki uppstreymið. Þannig fæst hámarksgildi á hallanum, 2,3°. Trúlegt er að halli sprungunnar sé þó nálægt eða innan við 1 gráðu (Kristján Sæmundsson, 1970).

Holur 2 og 9 skera gang A í nokkurri fjarlægð frá uppstreymissprungunni, sem skýrir mun lélegri vinnslueiginleika þeirra.

Niðurstöður vatnsborðsmælinga er gerðar hafa verið í holu 10 eftir stöðvun dælu (sjá viðauka C) sýna að fljótlega (þ.e. innan klst.) eftir stöðvun er þrýstingur orðinn hærri í holu 10 en í holu 2. Þetta styður þá tilgátu að uppstreymi heits vatns sé nær holu 10 en holu 2 og að hola 10 skeri jafnvel uppstreymissprunguna.

Sú staðreynd að viðbrögð vatnsborðs virðast mikilvæg í þrýsti- viðbrögðum kerfisins bendir til þess að kalt yfirborðsvatn streymi inn í kerfið. Er þetta sýnt á mynd 12. Ekki er hægt að segja til um hvenær áhrif þess muni segja til sín sem merkjanleg kólnun, eða hve mikil sú kólnun gæti orðið. Engrar kólnunar hefur enn orðið vart. En rétt er að fylgjast vel með hitastigi vatnsins sem dælt er ásamt efna-

innihaldi þess, en breytingar á efnainnihaldi eru oft fyrirboðar kólnunar. Þetta er einnig rétt að hafa í huga við staðsetningu vinnsluhola í framtíðinni með því að stefna að því að skera vatnsæðar á meira dýpi en í holu 10, t.d. á 1000 - 1500 m dýpi.

Samkvæmt tvívetnismælingum (Bragi Árnasonar, 1976) getur jarðhita- vatnið hafa fallið sem úrkoma á Tröllaskaga. Því gæti aðstreymið að kerfinu verið eftir N-S ganga/sprungusveimnum.

## 7 STAÐSETNING NÝRRAR HOLU

Eftirfarandi tillögur að staðsetningu nýrrar holu eru byggðar á því líkani af jarðhitakerfinu sem lýst er í kafla 6. Staðsetning nýrrar holu fer eftir tilganginum með borun slíkrar holu, en um tvo möguleika er að ræða:

1. Ef ný hola er einungis hugsuð sem varahola fyrir holu 10 er rétt að staðsetja hana rétt við holu 10, þannig að hún skeri sama vatnsleiðara, en á meira dýpi (1200-1500 m). Slík hola myndi varla gefa viðbót við núverandi heitavatnsvinnslu. Þó má reikna með minna iðustreymistapi ef sama magni er dælt úr tveimur holum í stað einnar. Ef ákveðnu vatnsmagni er dælt úr tveimur holum með sama iðustreymisviðnámi og í holu 10, verður iðustreymistapið aðeins um 1/4 af því sem það er ef sama magni er öllu dælt úr einni slíkri holu. Nokkuð væri því unnið með borun slíkrar vinnsluholu auk aukins rekstraröryggis Hitaveitu Dalvíkur.
2. Ef ætlunin er að freista þess að fá aukið vatn, er lagt til að lega uppstreymissprungunnar sé könnuð betur með nokkrum allt að 200 metra djúpum, rannsóknarholum. Niðurstöður viðnámsmælinganna benda til þess að jarðhitakerfið sé töluvert útbreiddara en núverandi vinnslusvæði. Niðurstöður hinnar vatnafræðilegu úttektar styðja þessa ályktun, þ.e. góð lekt og mikil rýmd hins staðbundna hluta vatnskerfisins. Mögulegt væri því að kanna skurðlínu hins mögulega SA-NV misgengis/sprungu, sem í líkaninu er talið vera uppstreymisrás jarðhitakerfisins, og þess N-S lágviðnámsveggjar af þremur, sem vestast liggur (sjá mynd 4). Ef niðurstöður slíkra könnunarborana yrðu jákvæðar, og þar tækist að bora vel heppnaða vinnsluholu, má búast við því að nokkra viðbót megi fá við núverandi vatnsvinnslu.

Rétt er að leggja áherslu á það að mun meiri áhætta fylgir seinni kostinum. Á hinn bóginn hefur aðeins lítið brot af mögulegu vinnslusvæði verið kannað með borunum.

## HEIMILDIR

Bragi Árnason, 1976: Groundwater Systems in Iceland traced by Deuterium. Soc. Sci. Islandica, Rit 42, 1976.

Guðni Axelsson, 1985: Hydrology and Thermomechanics of Liquid-Dominated Hydrothermal Systems in Iceland. PhD-Ritgerð, Oregon State University, USA, 1985.

Jarðboranir ríkisins: Úr borskýrslum.

Kristján Sæmundsson, 1970: Skýrsla um jarðhitarannsóknir á Dalvík í ágúst 1970. Orkustofnun, september 1970.

Valgarður Stefánsson og Kristján Sæmundsson, 1975: Borholumælingar við Dalvík 1974. Orkustofnun, janúar 1975.

Þorsteinn Thorsteinsson, Kristján Sæmundsson og Sigurður Benediktsson, 1972: Heitavatnskerfið við Hamar í Svarfaðardal. Orkustofnun, júlí 1972.

**VIÐAUKI A**

**Um viðnámsmælingar**

## VIÐAUKI A: Um viðnámsmælingar

Viðnámsmælingar eru samheiti yfir flokk mælinga sem beinast að því að mæla eðlisviðnám jarðar. Þær byggja allar á þeirri reglu að sendur er út gegnum jörðu, rafstraumur milli tveggja straumskauta og mæld sú spenna sem straumurinn skapar milli tveggja spennuskauta. Reiknað er út svonefnt sýndarviðnám sem ræðst af hlutfalli mælðrar spennu og straums, og innbyrðis afstöðu straum- og spennuskauta. Sýndarviðnámið þarf síðan að túlka yfir í raunverulegt eðlisviðnám jarðar, en það getur verið mismunandi, bæði með dýpi og milli mælistaða.

Reynslan hefur sýnt að oft fer saman lágt eðlisviðnám í jörðu og vatnsleiðandi sprungur eða gangar. Tilgangur viðnámsmælinga er að finna og afmarka slík lágviðnámssvæði í berggrunninum.

Sumarið 1981 var fyrst reynd héraendis ný mæliaðferð sem kölluð er viðnámsniðsmæling. Hún hefur reynst sérlega hentug til leitar að vatnsleiðandi sprungum þar sem þær koma fram sem lóðréttir lágviðnámsveggir. Í mælingunum eru notuð 3 straumskaut (A, B og C) og tvö spennuskaut (M og N). Straumskautunum A og B, og spennuskautunum er raðað á línu og straumskauti C er komið fyrir mjög langt í burtu. Mæld eru þrjú sýndarviðnámsgildi  $\rho_{AB}$ ,  $\rho_{AC}$  og  $\rho_{BC}$ . Síðan er straumskautunum A og B, og spennuskautunum hliðrað eftir mælilínunni og ný sýndarviðnám mæld. Ef jörðin er einungis gerð úr láréttum viðnámslögum verða öll viðnámsgildin eins, en í grennd við lóðrétt viðnámskil raskast þetta. Ef teiknaðir eru tveir viðnámsferlar,  $\rho_{AC} - \rho_{AB}$  og  $\rho_{BC} - \rho_{AB}$  eftir mælilínu, þá skerast þeir, í einföldum tilvikum, beint yfir lóðréttu viðnámskilunum. Þannig má í einföldum tilvikum finna stefnu lágviðnámsprungu með nokkrum mælilínum, en slík lágviðnámsprungu er síðan túlkuð sem lóðrétt vatnsfyllt sprungu í berggrunninum.



VIÐAUKI B

Viðnámslíkön, mældir og reiknaðir ferlar

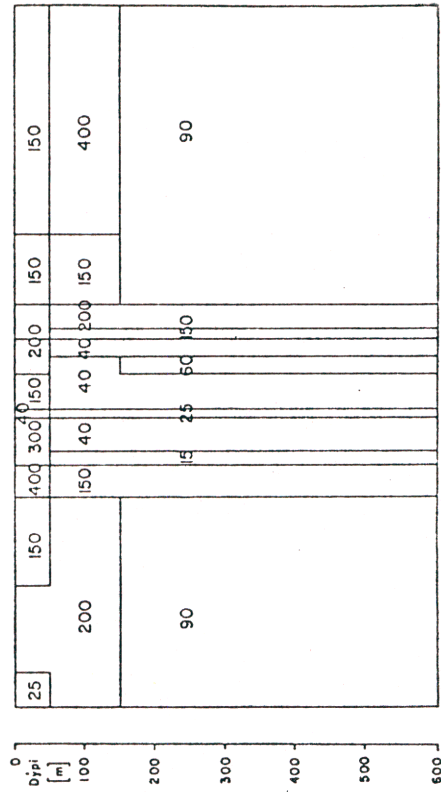
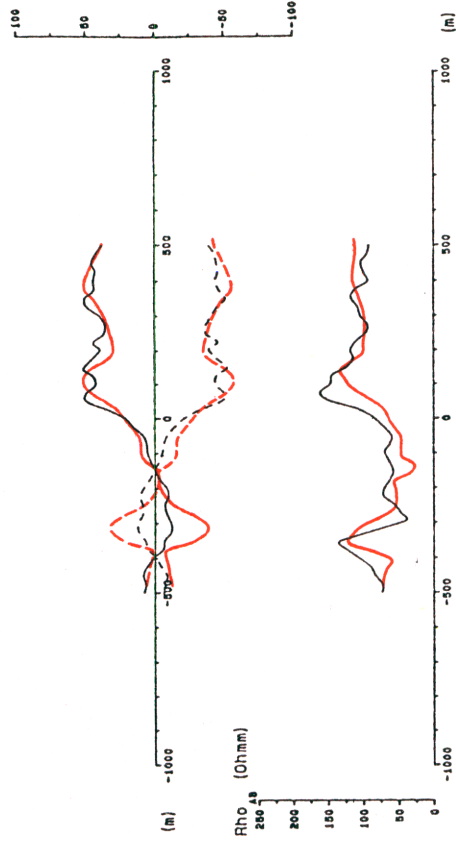




11 JHO-JEO-6300 RK  
86.03.0427/02 T

DALVIK LINA 1  
AB/2 = 500M MN/2 = 25M  
A ER AUSTAR  
FJARLFGDIR VAXA TIL AUSTURS

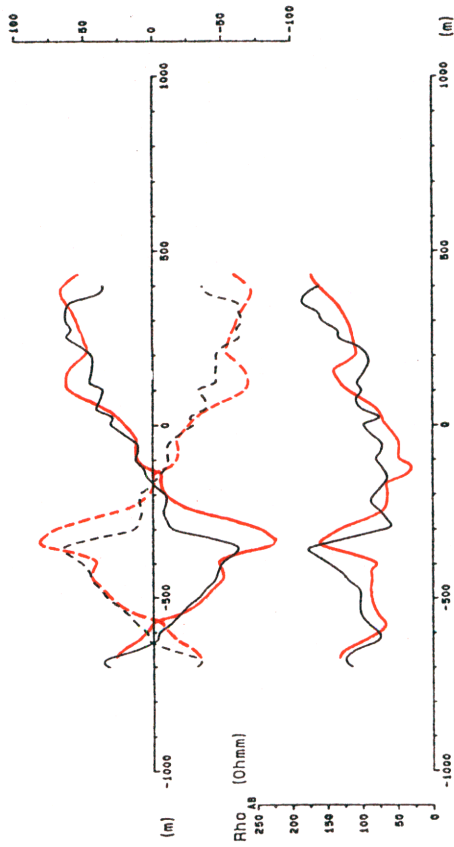
--- Rho<sub>AC-AS</sub>  
--- Rho<sub>BC-AS</sub>  
(Ohmm)



11 JHO-JEO-6300 RK  
86.03.0427/02 T

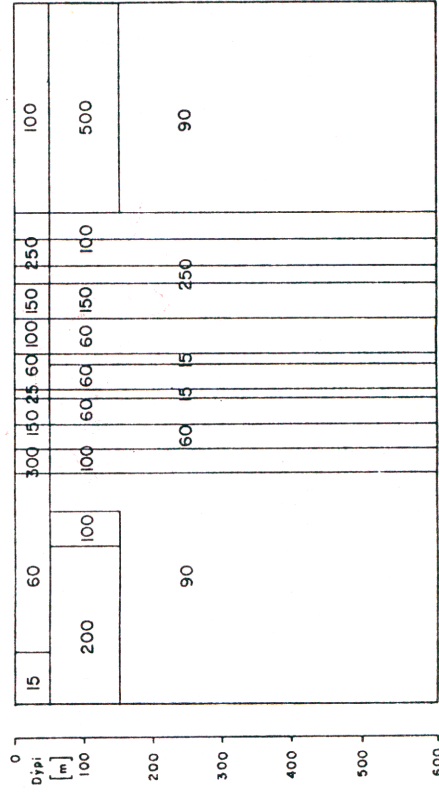
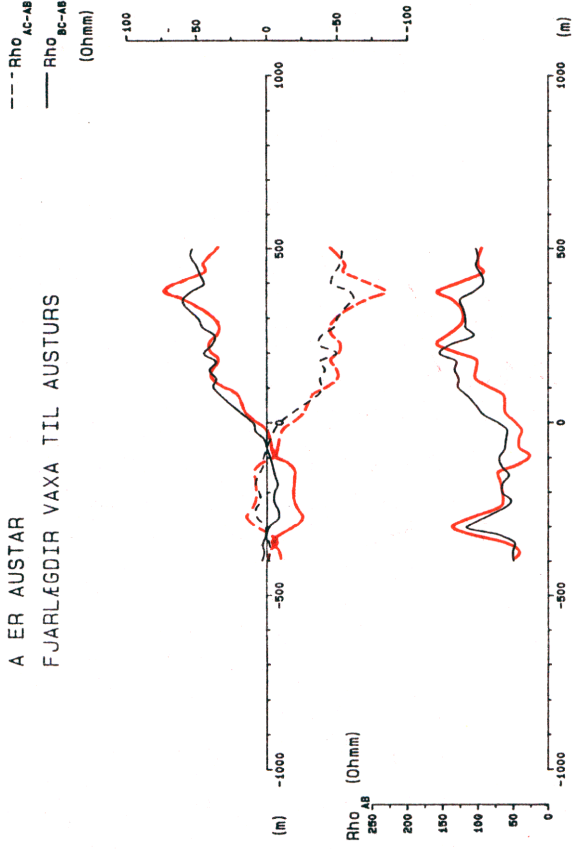
DALVIK LINA 1  
AB/2 = 300M MN/2 = 25M  
A ER AUSTAR  
FJARLFGDIR VAXA TIL AUSTURS

--- Rho<sub>AC-AS</sub>  
--- Rho<sub>BC-AS</sub>  
(Ohmm)



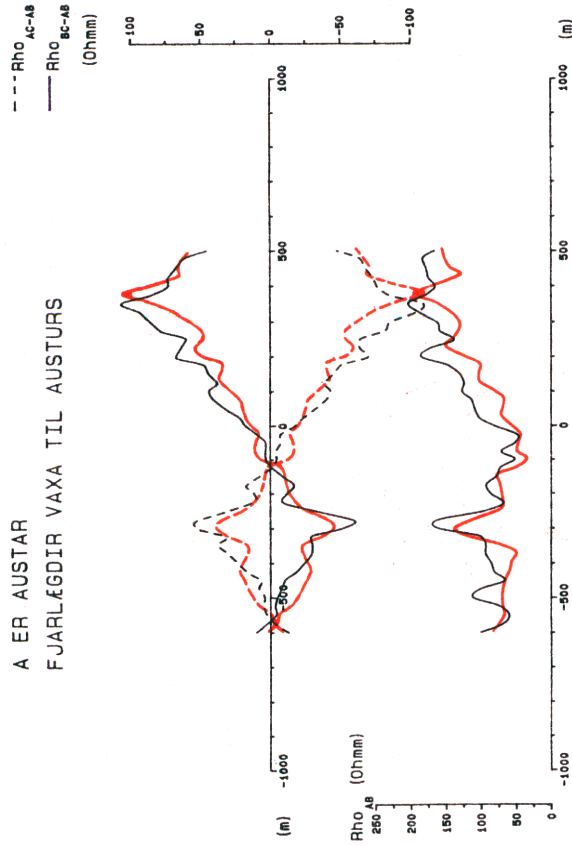
JHD-JED-6300 RK  
86.05.0428 T

DALVIK LINA 2  
AB/2 = 500M MN/2 = 25M  
A ER AUSTAR  
FJARLÆGDIR VAXA TIL AUSTURS



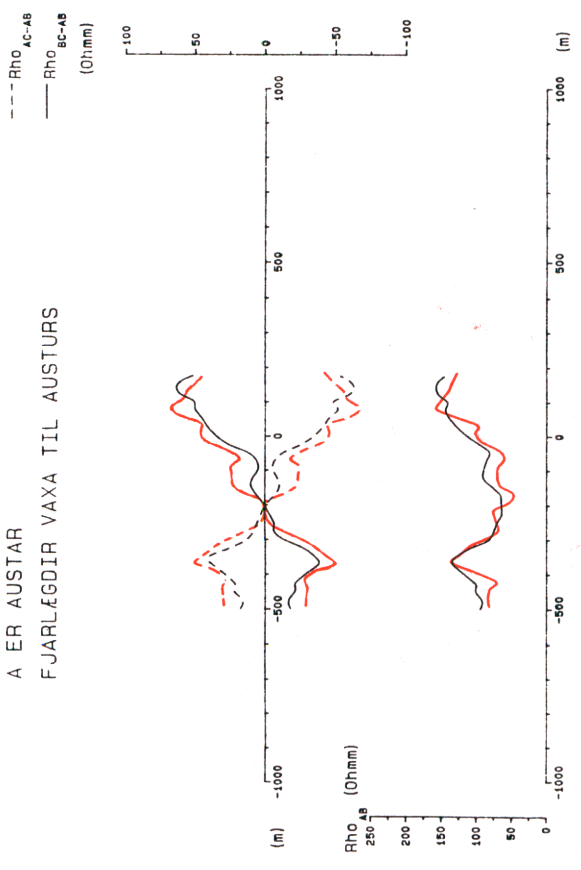
JHD-JED-6300 RK  
86.05.0429 T

DALVIK LINA 2  
AB/2 = 300M MN/2 = 25M  
A ER AUSTAR  
FJARLÆGDIR VAXA TIL AUSTURS



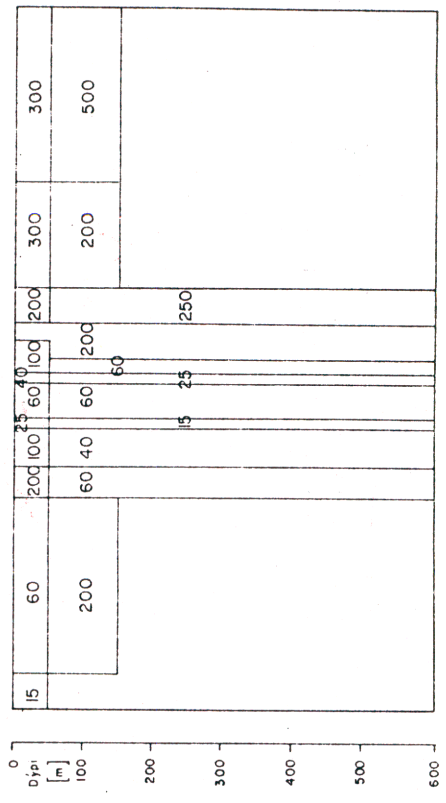
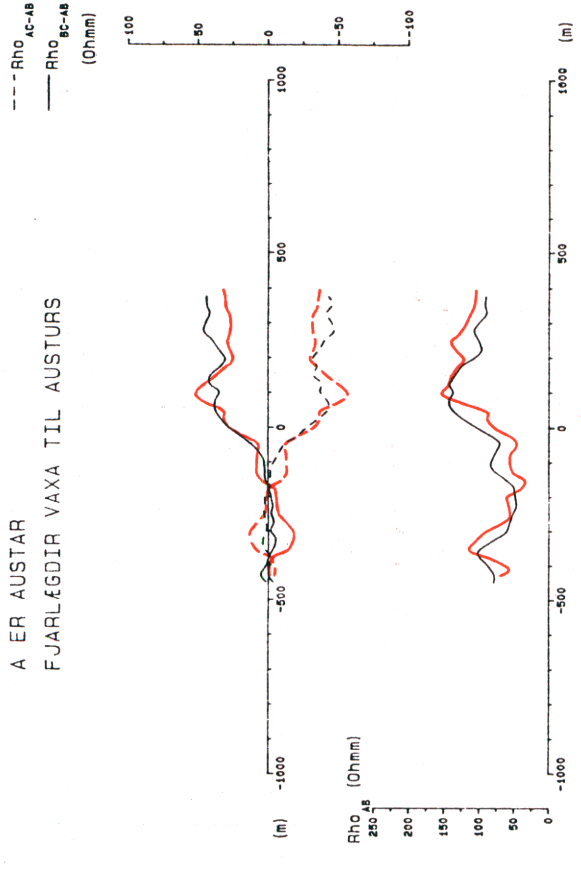
JHD-JED-6300 RK  
86.05 0.431 T

DALVIK LINA 3  
AB/2 = 300M MN/2 = 25M  
A ER AUSTAR  
FJARLEGGDIR VAXA TIL AUSTURS



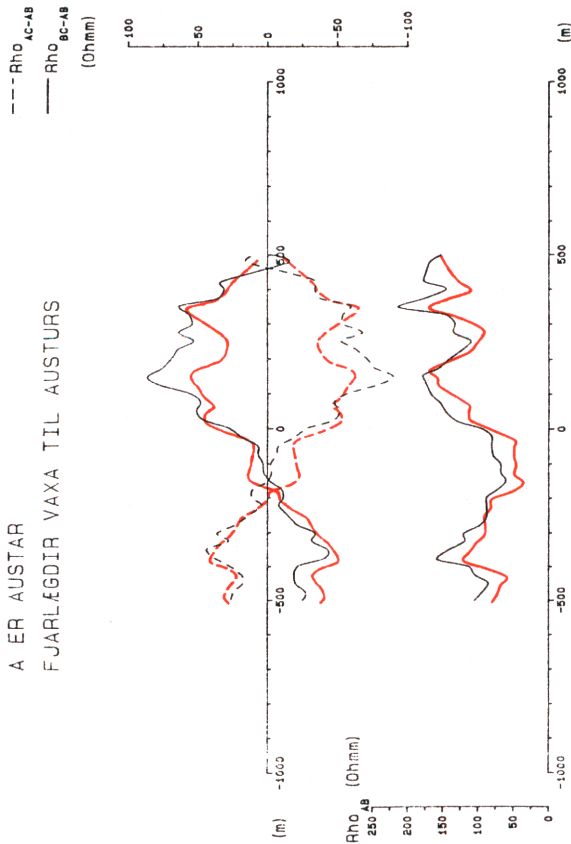
JHD-JED-6300 RK  
86.05 0.427 T

DALVIK LINA 3  
AB/2 = 500M MN/2 = 25M  
A ER AUSTAR  
FJARLEGGDIR VAXA TIL AUSTURS



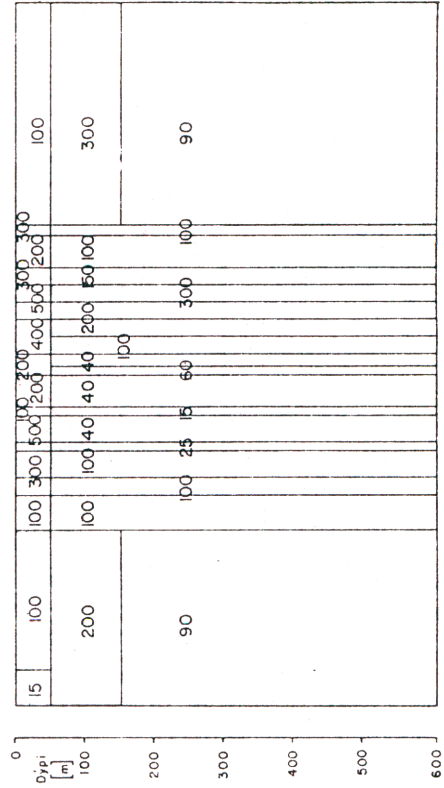
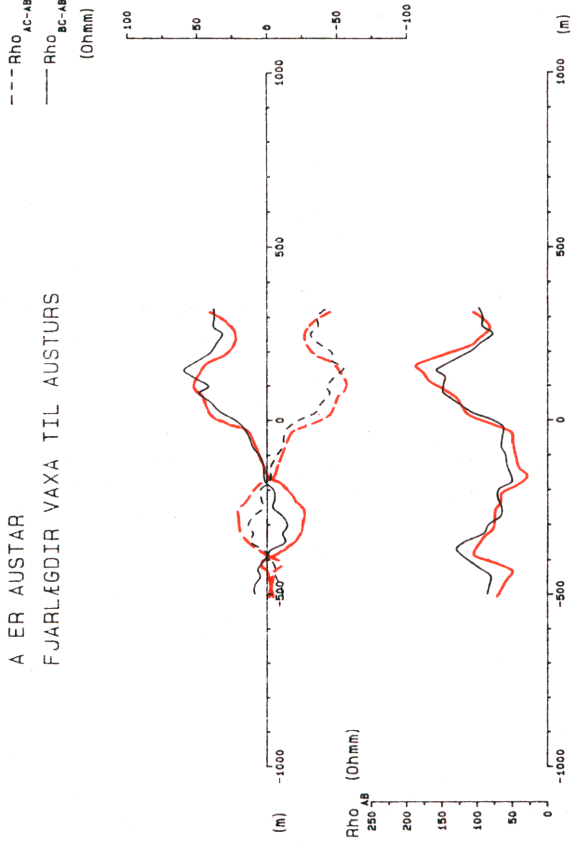
JHD-JED-6300 RK  
8605 0433 T

DALVIK LINA 4  
AB/2 = 300M MN/2 = 25M  
A ER AUSTAR  
FJARLEGDIR VAXA TIL AUSTURS



JHD-JED-6300 RK  
8605 0432 T

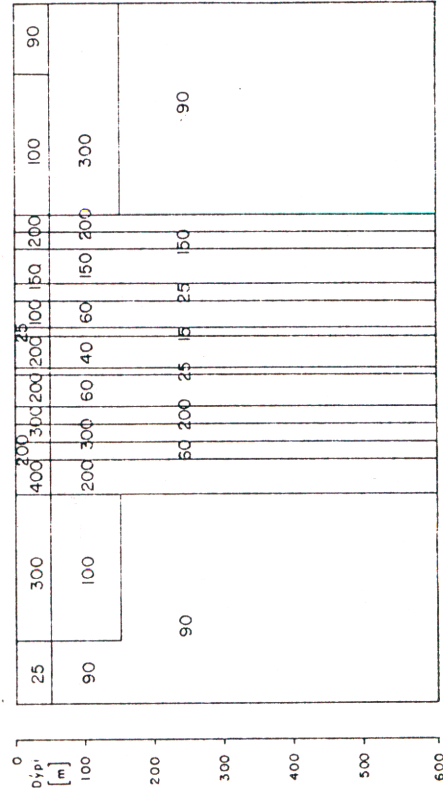
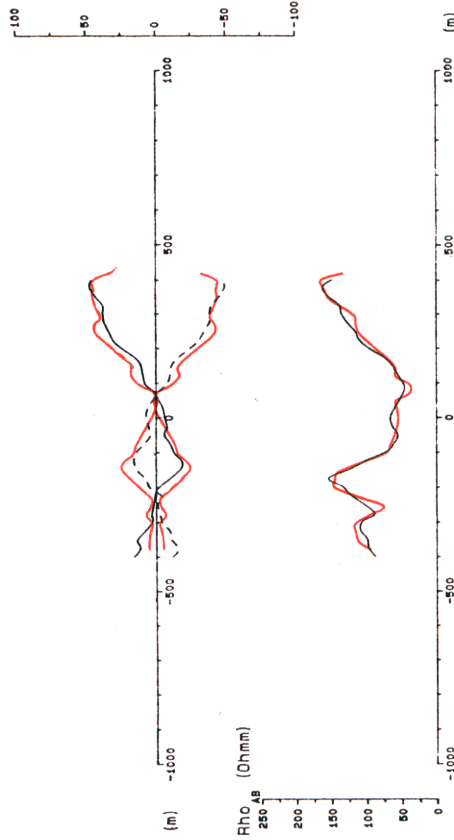
DALVIK LINA 4  
AB/2 = 500M MN/2 = 25M  
A ER AUSTAR  
FJARLEGDIR VAXA TIL AUSTURS



JHD-JED-6300 RK  
86050434 T

DALVIK LINA 5  
AB/2 = 500M MN/2 = 25M  
A ER NORDAR  
FJARLEGGIR VAXA TIL NORDURS

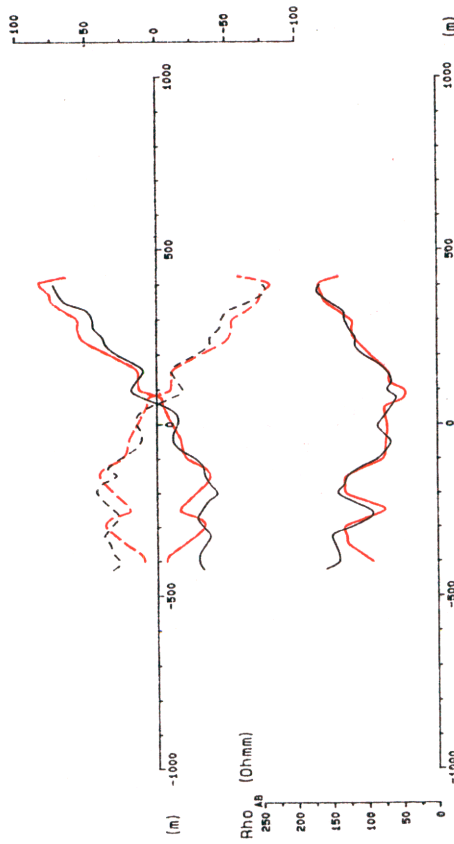
--- Rho<sub>AC-AB</sub>  
— Rho<sub>BC-AB</sub>  
(Ohmm)



JHD-JED-6300 RK  
86050435 T

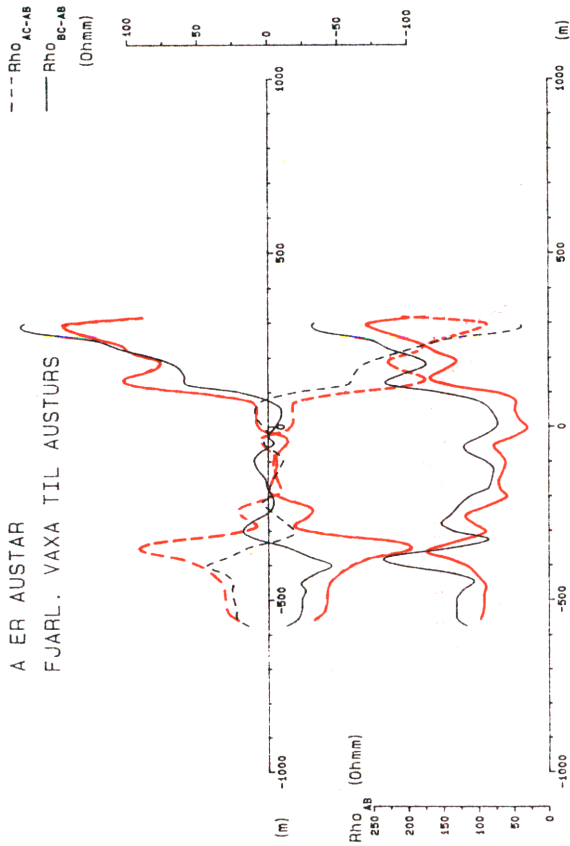
DALVIK LINA 5  
AB/2 = 300M MN/2 = 25M  
A ER NORDAR  
FJARLEGGIR VAXA TIL NORDURS

--- Rho<sub>AC-AB</sub>  
— Rho<sub>BC-AB</sub>  
(Ohmm)



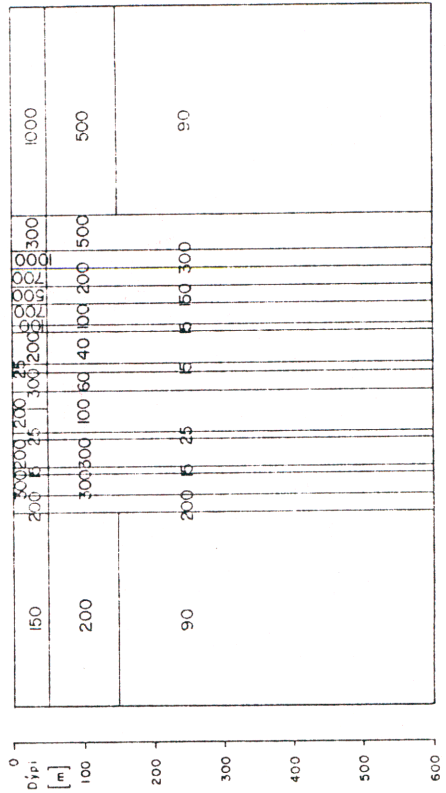
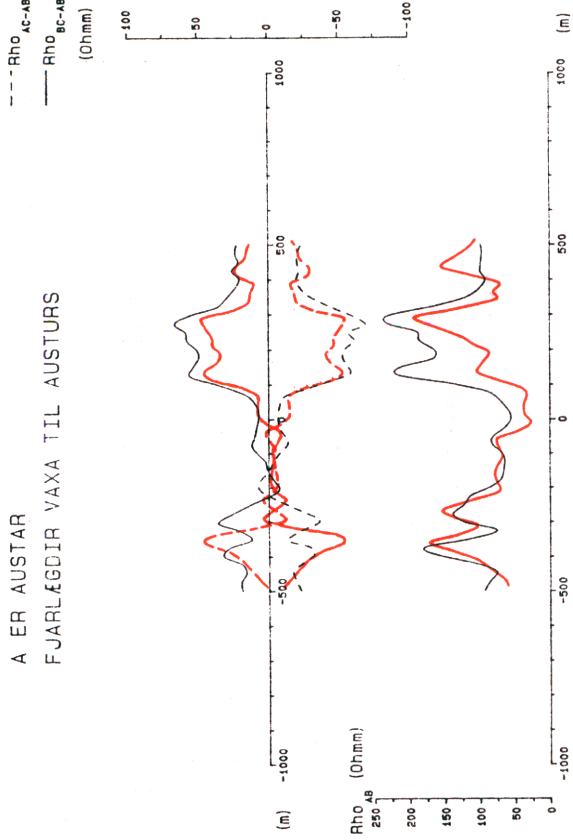
JHD-JED-6300 RK  
86 05 0437

DALVIK LINA 6  
AB/2 = 300M MN/2 = 25M  
A ER AUSTAR  
FJARLÆGGIR VAXA TIL AUSTURS



JHD-JED-6300 RK  
86 05 0436

DALVIK LINA 6  
AB/2 = 500M MN/2 = 25M  
A ER AUSTAR  
FJARLÆGGIR VAXA TIL AUSTURS



JHD-JED-6300 RK  
86.05.0438 T

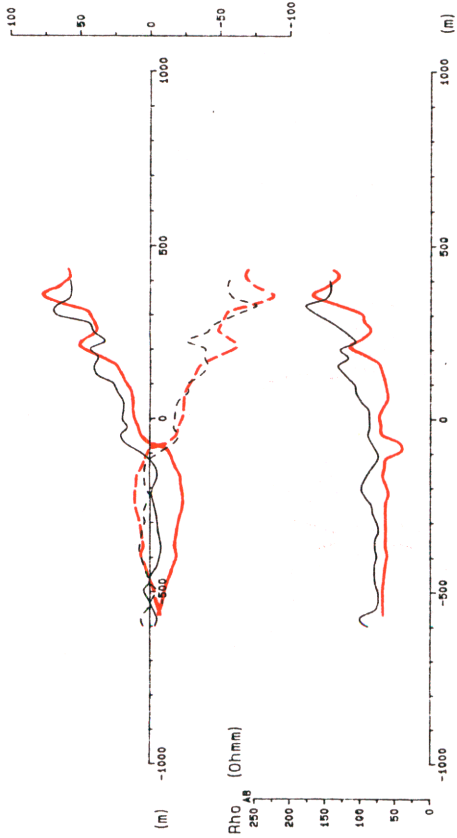
DALVIK LINA 7

AB/2 = 300M MN/2 = 25M

A ER SUNNAR

FJARLÆGDIR VAXA TIL SUDURS

--- Rho<sub>AC-AB</sub>  
— Rho<sub>BC-AB</sub>  
(Ohmm)



JHD-JED-6300 RK  
86.05.0439 T

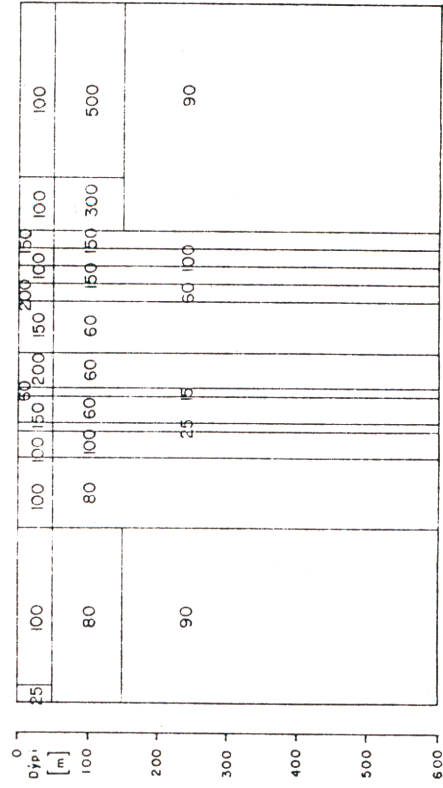
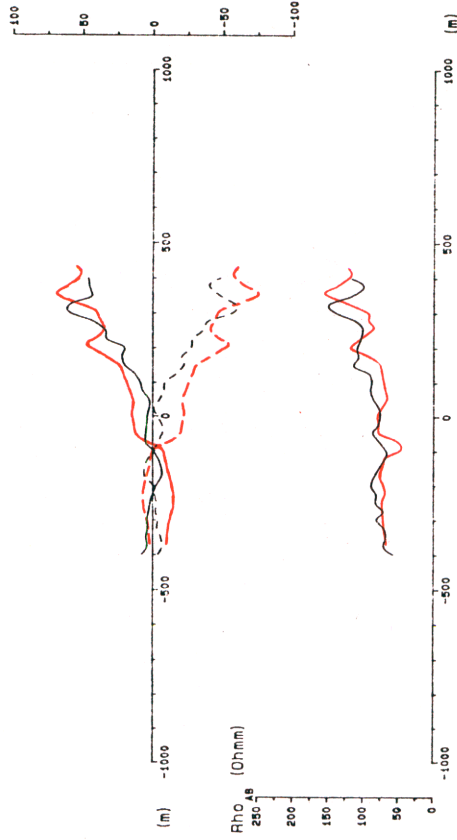
DALVIK LINA 7

AB/2 = 500M MN/2 = 25M

A ER SUNNAR

FJARLÆGDIR VAXA TIL SUDURS

--- Rho<sub>AC-AB</sub>  
— Rho<sub>BC-AB</sub>  
(Ohmm)



**VIÐAUKI C**

**Vatnafræðileg gögn**



VIÐAUKI C: VATNAFRÆÐILEG GÖGN.

Tafla C.1 Vinnslusaga jarðhitakerfis við Hamar frá 1982

Ár	Mán.	Meðalvinnsla úr holu 10 (kg/s)	Vatnsborð í holu 2 í lok mánaðar (m)
82	02	44,8	22,8
82	03	44,4	23,0
82	04	42,8	23,1
82	05	40,4	22,3
82	06	36,3	21,0
82	07	33,8	20,0
82	08	33,8	20,6
82	09	39,6	21,5
82	10	41,7	22,3
82	11	45,3	23,5
82	12	45,7	24,0
83	01	45,6	24,6
83	02	44,3	24,3
83	03	43,5	24,4
83	04	42,2	24,4
83	05	38,3	24,0
83	06	35,7	22,5
83	07	33,7	22,2
83	08	34,4	22,0
83	09	36,8	22,6
83	10	41,0	23,6
83	11	44,5	24,3
83	12	45,1	24,4
84	01	45,1	25,0
84	02	44,7	25,5
84	03	42,9	25,4
84	04	38,8	24,3
84	05	37,0	23,6
84	06	32,0	22,7
84	07	30,0	21,8
84	08	30,2	22,0
84	09	37,4	22,9
84	10	42,5	24,2
84	11	45,7	24,6
84	12	45,5	25,8

85	01	46,3	26,4
85	02	47,0	26,9
85	03	45,8	27,2
85	04	42,7	26,6
85	05	37,1	25,8
85	06	33,8	24,0
85	07	32,1	23,8
85	08	33,5	24,0
85	09	37,7	24,2
85	10	39,3	24,8

Tafla C.2 Vatnsborðsmælingar eftir stöðvun dælu í holu 10

Dags	Tími frá stöðvun (mín)	Vatnsb. holu 10 (m)	Vatnsb. holu 2 (m)
82.03.16	0		24,2
	6	21,4	
	12	21,2	
	24	21,1	
	39	20,9	
	54	20,6	
	74		23,5
	82	20,6	
8310.05	0		22,7
	25	19,0	22,4
	55	19,0	22,3
	95	18,8	22,1
	105	18,5	22,1
	115	18,2	22,1
85.05.02	0		26,5
	10	23,2	
	30	22,8	
	53	21,9	26,0
	75	21,8	
	90	21,8	25,7

85.10.31	0		24,8
	10	20,9	
	25	19,7	24,3
	40	18,8	24,1
	55	18,6	24,1
	70	18,6	24,1

VIÐAUKI D

Tvö einföld vatnafræðileg líkön

VIÐAUKI D: TVÖ EINFÖLD VATNAFRÆÐILEG LÍKÖN.

Hér verður lýst stuttlega tveimur einföldum vatnafræðilegum líkönum sem nota má við túlkun langtíma vinnslugagna. Þessi tvö líkön eiga það sameiginlegt að þau hafa frjálst vatnsborð og bæði eru byggð á þeirri nálgun að samþjappanleiki vatns og bergs sé hverfandi. Þessi nálgun er aðeins gild fyrir langtímagögn, þ.e. fyrir lengri tíma en nokkra mánuði.

Fyrst skal nefna líkan af einleitu, óendanlegu hálfrúmi með einsátta vatnsleiðni eða lekt og frjálssu vatnsborði (sjá mynd D.1). Vatni er dælt úr punktinum  $Q = (0,0,d)$  og fylgst með þrýstingi í punktinum  $P = (x,y,z)$ . Byrjað er að dæla  $q$  kg/s við tímann  $t = 0$ . Þá gildir um þrýstiviðbrögðin í punkti P

$$p(P,t) = (-q/12.566c) \left( \frac{1}{r_{PQ}} + \frac{1}{r_{PQ'}} - \frac{2}{r_{PQ't}} \right)$$

þar sem

$$c = k/v$$

$$k = \text{lekt bergsins}$$

$$v = \text{eðlissegja vatnsins}$$

$$r_{PQ} = \sqrt{x^2 + y^2 + (z-d)^2}$$

$$r_{PQ'} = \sqrt{x^2 + y^2 + (z+d)^2}$$

$$r_{PQ't} = \sqrt{x^2 + y^2 + (z+d+wt)^2}$$

og

$$w = cg/o$$

$$g = \text{þyngdarhröðunin}$$

$$o = \text{poruhluti bergsins}$$

Seinna líkanið er líkan af einsleitri lóðréttri rennu með frjálssu vatnsborði og tvíviðu vatnsstreymi (sjá mynd D.2). Þar sem um tvívítt flæði er að ræða er þrýstingurinn ekki háður x-hniti. Slíkt líkan getur líkt eftir vatnsstreymi í og við gang eða í gangasveim. Ef dælt er úr  $Q = (0,d)$  þá gildir um þrýstiviðbrögðin í punkti  $P = (y,z)$

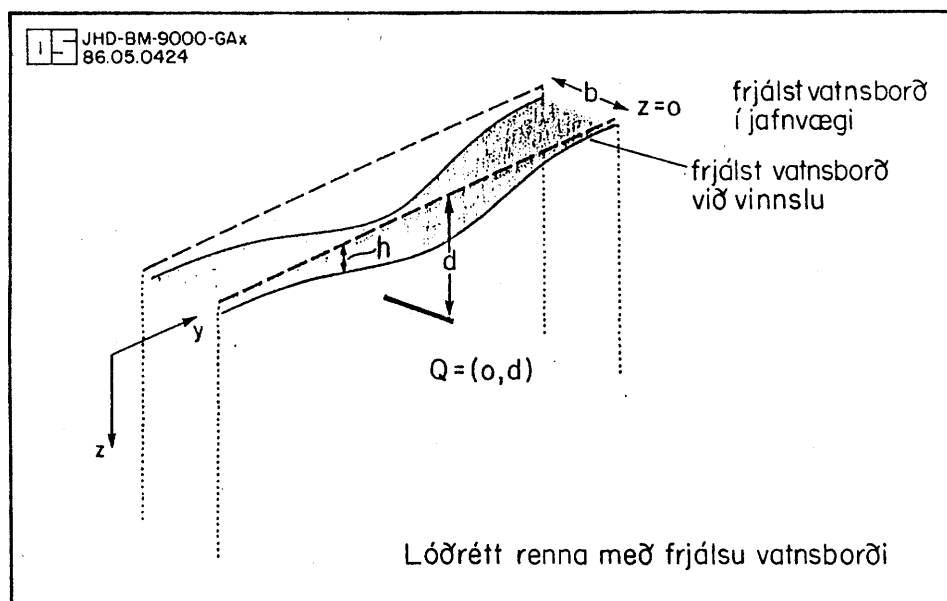
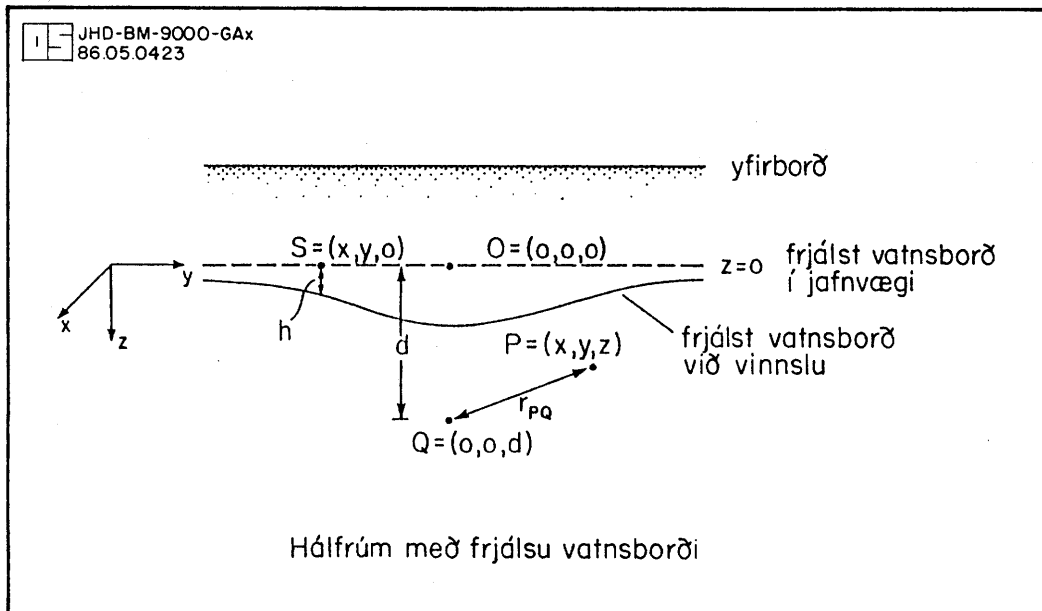
$$p(P,t) = (q/6.283bc) \left( \ln(r_{PQ}) + \ln(r_{PQ'}) - \ln(r_{PQ't}) \right)$$

PQ      PQ`      PQ`t

þar sem allar skilgreiningar eru eins og áður, en auk þess er  $b$  þykkt rennunnar og  $x = 0$ .

Margfeldið af þykkt og lekt má einnig túlka sem lekt af völdum einnar eða fleiri samsíða sprungna. Ef  $n$  er fjöldi þeirra og  $h$  meðalviðd, þá gildir

$$3 \\ bk = nh / 12$$





VIÐAUKI E

Þjappað vatnafræðilegt líkan



## VIÐAUKI E: ÞJAPPAÐ VATNAFRÆÐILEGT LÍKAN.

Þjappað vatnafræðilegt líkan samanstendur af nokkrum vatnsgeymum sem eru tengdir með leiðurum (þ.e. viðnámmum) eins og sýnt er á mynd E.1. Einföld þjöppuð líkön geta hermt mjög nákvæmlega þrýstiviðbrögð flókinna jarðhitakerfa. Til þess að setja upp þjappað líkan þarf einungis að byggja á gögnum um þrýstiviðbrögð viðkomandi kerfis. Þjöppuð líkön eru því mjög hentug til þess að gera vinnsluspár, jafnvel þó lítið eða ekkert sé vitað um innviði viðeigandi jarðhitakerfis.

Vatnsgeymarnir líkja eftir vatnsrýmd vatnskerfisins og er rýmd geymis (S) skilgreind þannig að geymir svarar viðbótarvatnsmassa m með þrýstibreytingu  $p = m/S$ . Leiðararnir líkja eftir vatnsleiðni, eða straumviðnámi, kerfisins og er leiðni leiðara (K) skilgreind þannig að ef massastraumur um leiðarann er q þá verður þrýstifallið  $p = q/K$  yfir leiðarann (þ.e. á milli þeirra geyma sem leiðarinn tengir). Almenn stærðfræðileg lausn fyrir þrýstiviðbrögð þjappaðra kerfa er gefin í heimild (7).

Vatnsrýmd í vatnsfasa jarðhitakerfi getur verið af tvennum toga:

- i) Vegna samþjappanleika bergs og vatns í kerfinu. Ef um porótt berg er að ræða gildir

$$S = \frac{V_0(o_c + (1-o_c)c)}{v \quad b}$$

þar sem

$V$  = rúmmál bergsins

$o$  = eðlisþyngd vatnsins

$o_c$  = poruhluti bergsins

$c$  = samþjappanleiki vatns =  $5 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$

$c_b$  = samþjappanleiki basalts =  $2 \times 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$

En ef um sprungið berg er að ræða þá er samþjappanleiki bergsins ráðandi, ekki samþjappanleiki vatns í sprungunum. Rýmd af völdum einnar sprungu með hliðarlengd L má meta gróflega

$$S = \frac{onL}{3(4u)}$$

með  $u$  = stífni bergsins =  $1.5 \times 10^{10} \text{ Pa}$

ii) Einnig getur vatnsrýmdin verið að hluta til vegna óbundins vatnsborðs vatnskerfisins. Þá gildir

$$S = a_0/g$$

þar sem a er yfirborðsflatarmál kerfisins og g er þyngdarhröðunin.

Rýmd vegna óbundins vatnsborðs er alla jafna um tveimur stærðargráðum meiri en rýmd vegna samjappanleika vatns og poróttts bergs. Ef sprungur eru víðáttumiklar er sprungurýmd einnig meiri en rýmd samsvarandi rúmmáls poróttts bergs.

Herma má einigarniðurdrátt jarðhitakerfisins við Hamar mjög nákvæmlega með lokuðu þriggja geyma líkani. Einingarniðurdráttur slíks kerfis er gefinn með eftirfarandi líkingu:

$$u(t) = T_1 t + \sum_{j=2}^3 (T_j / L_j) (1 - e^{-L_j t}), \text{ m/(kg/s)}$$

þar sem

$$T_1 = 0.68 \times 10^{-6} \text{ m s}$$

$$T_2 = 1.82 \times 10^{-4} \text{ m s}$$

$$T_3 = 1.56 \times 10^{-3} \text{ m s}$$

$$L_1 = 4.44 \times 10^{-8} \text{ s}$$

$$L_2 = 8.29 \times 10^{-7} \text{ s}$$

$$L_3 = 8.29 \times 10^{-1} \text{ s}$$

fyrir einigarniðurdrátt jarðhitakerfisins við Hamar.

Ofangreindar niðurstöður eru fengnar á þeirri forsendu einni að um lokað þriggja kassa líkan sé að ræða. Þær eru óháðar því hvernig geymarnir tengjast innbyrðis. Ef gengið er útfrá ákveðinni tengingu má meta rýmdir kassana og leiðni leiðaranna og fela þær stærðir þá í sér einhverjar upplýsingar um innviði kerfisins. Þannig er þó aðeins um eina túlkun af fleiri mögulegum að ræða, og alls ekki einhlíta. Einnig þarf að ganga útfrá því við nánari túlkun hvers konar rýmd hver kassi líkir eftir.

Snúum okkur nú að ákveðinni túlkun einigarniðurdráttar jarðhitakerfisins við Hamar (sjá mynd 6) sem er byggð á samsíðatengdu þjöppuðu

líkani (sjá mynd 10). Í þessu líkani er vatni dælt úr kassa 1 (hola 10) og jafnframt fylgst með vatnsborði í sama kassa (hola 2). Forsendum túlkunarinnar er lýst í kafla 5.3 að ofan. Þá fæst eftirfarandi mat á rýmd geymanna (S) og leiðni leiðaranna (K) þeirra á milli:

$$\begin{array}{l} 2 \\ S = 570 \text{ ms} \\ 1 \qquad \qquad 2 \\ S = 2050 \text{ ms} \\ 2 \qquad \qquad \qquad 2 \\ S = 115000 \text{ ms} \\ 3 \\ K = 0.000264 \text{ ms} \\ 1 \\ K = 0.000159 \text{ ms} \\ 2 \end{array}$$

og túlkunin er þá eins og að neðan greinir:

- Kassar 1 og 2 svara til hins staðbundna jarðhitakerfis.
- Kassi 1 hermir að mestu vatnsrýmd hins staðbundna kerfis neðan 100 - 200 m dýpis. Sú vatnsrýmd er bundin einstökum sprungum í og við ganga og misgengi, en ekki rúmmáli poróttts bergs. Túlkunin er byggð á því að rýmd kassans er svo mikil að hún getur ekki nema að takmörkuðu leyti verið vegna samþjappanleika vatns og poróttts bergs. Hins vegar geta nokkrar (2-5) sprungur skýrt þessa rýmd ef þær eru opnar niður á nokkurra (2-3) kílómetra dýpi. Er þetta í samræmi við jarðfræði svæðisins og einnig koma gangarnir greinilega fram í túlkun viðnámsmælinga. Þó getur verið að rýmd kassa 1 sé einnig að nokkru leyti vegna hins frjálssa vatnsborðs kerfisins (sjá túlkun á rýmd kassa 2 hér að neðan).
- Kassi 2 samsvarar vatnsrýmd vegna fjáls vatnsborðs kerfisins. Samkvæmt viðnámsmælingum er yfirborðsflatarmál svæðisins gróflega áætlað um 0.25 - 0.35 km<sup>2</sup>. Út frá yfirborðsflatarmáli svæðisins og rýmd annars kassans má nú meta poruhluta yfirborðsjarðlaga. Þá fæst  $\alpha = 0.05 - 0.08$ , sem ekki virðist mjög ósennilegt.
- Lekt jarðlaganna milli frjálssa vatnsborðs og jarðhitakerfisins má meta út frá leiðninni milli kassa 1 og kassa 2. Þá gildir

$$K = \frac{akv}{h}$$

þar sem  $a$  er yfirborðsflatarmálið,  $k$  er lektin,  $v$  er eðlissegja vatnsins og  $h$  er dýptin niður á jarðhitakerfið, sem hér er metin sem 200 m. Þá fæst

$$-14 \text{ }^2$$

$$k = 5 \times 10 \text{ m}$$

- Ákveðin túlkun á rýmd þriðja kassans, sem er túlkuð sem rýmd aðstreymiskerfisins, er varla réttlátanleg, því lítið er vitað um aðstreymiskerfið. Samkvæmt tvívætnismælingum Braga Arnasonar (heimild (2)) gæti jarðhitavatnið hafa fallið sem úrkoma á Tröllaskaga. Hin mikla rýmd þriðja kassans ( $115000 \text{ ms}^2$ ) er í samræmi við nokkuð fjarlægt og víðáttumikið aðstreymissvæði.

