



ORKUSTOFNUN  
Jarðhitadeild

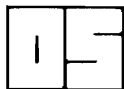
**Guðni Axelsson**

# **JARÐHITASVÆÐIÐ Á LAUGARENGI Í ÓLAFSFIRÐI**

**Prófun og vatnsborðsspár**

**OS-91012/JHD-03**  
Reykjavík, mars 1991

**Unnið fyrir  
Hitaveitu Ólafsfjarðar**



**ORKUSTOFNUN**

Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

**Guðni Axelsson**

# **JARÐHITASVÆÐIÐ Á LAUGARENGI Í ÓLAFSFIRÐI**

**Prófun og vatnsborðsspár**

**OS-91012/JHD-03**

Reykjavík, mars 1991

**Unnið fyrir  
Hitaveitu Ólafsfjarðar**

## ÁGRIP

Jarðhitasvæðið á Laugarengi er annað tveggja jarðhitasvæða sem Hitaveita Ólafsfjarðar nýtir. Árið 1990 var á ný hafist handa við rannsóknir á því svæði. Fyrsti hluti rannsókna var forðafræðileg athugun, sem framkvæmd var í þeim tilgangi að afla upplýsinga um gerð og eðli jarðhitakerfisins og meta afkastagetu þess. Í fyrsta lagi var gerð nákvæm prófun á viðbrögðum jarðhitakerfisins dagana 7. - 13. júlí 1990, í öðru lagi var unnið úr gögnum um vinnslu og vatnsborð sem safnað hafði verið síðan í september 1989 og í þriðja lagi voru reiknaðar vatnsborðsspár fyrir holu 4.

Með einföldum líkönum, m.a. þjöppuðum líkönum, hefur tekist að herma vatnsborðsbreytingar í jarðhitakerfinu undir Laugarengi nokkuð nákvæmlega. Innsti hluti kerfisins virðist bundinn þröngum sprungusveimi eða gangi. Jarðhitakerfið virðist síðan í góðum tengslum við mjög stórt vatnskerfi (grunnvatnskerfi, öflugra jarðhitakerfi), sem stjórnar því að við stöðuga dælingu nær niðurdráttur í kerfinu jafnvægi eftir 2 - 3 ár. Meðallekt vatnskerfisins í heild er þökkaleg.

Mun minni afköst holu 3 en holu 4 stafa aðallega af því að um sjöfalt meira iðustreymistap verður við sömu vinnslu í holu 3 en í holu 4. Er það vegna þess að hola 3 er grennri og sker þrengri æðar en hola 4.

Áætlað er að ársmeðalvinnslan á Laugarengi árið 1990 hafi verið um 25 l/s og að hún hafi aðeins vaxið lítillega frá því nýting holu 4 hófst. Ef ársmeðalvinnslan helst óbreytt er því spáð að vatnsborð á svæðinu lækki óverulega. Ef vinnslan á hinn bóginn eykst þarf strax að síkka dælu í holu 4. Með síkkun í 100 m má auka ársmeðalvinnslu í 33 l/s. Miðað við 2 % árlegan vöxt í vinnslu á Laugarengi er því spáð að árið 2010 fari vatnsborð í holu 4 lægst í 112 m.

Ljóst er að á Ólafsfirði er heita vatnið nýtt illa og má áætla að með **sülukerfisbreytingu** megi ná um 30 - 40 % sparnaði í vatnsnotkun. Miðað við slíkan sparnað er því spáð að vatnsborð í holu 4 muni ekki fara niður fyrir núverandi dæludýpi (60 m) fyrir árið 2010 þrátt fyrir 2% árlegan vöxt í vinnslu. Við slíkan samdrátt í notkun lengist líftími jarðhitakerfisins undir Laugarengi einnig verulega auk þess sem hægt verður að fresta borun nýrrar varaholu um all nokkur ár.

Lögð er áhersla á að Hitaveita Ólafsfjarðar haldi áfram vinnslueftirlitinu, sem nú hefur verið komið á. Þá verður mögulegt að endurskoða að nokkrum árum liðnum úrvinnsluna og vatnsborðsspárnar, sem aðeins eru byggðar á 17 mánaða vinnslusögu. Gott eftirlit með hitastigi vatns og efnainnihaldi verður mikilvægt vegna mögulegrar kólnunar vatnsins í framtíðinni. Einnig er mikilvægt að haldið verði áfram þeim jarðhitarannsóknum sem nú eru hafnar.

## EFNISYFIRLIT

ÁGRIP	2
1. INNGANGUR	5
2. MÆLINGAR Í JÚLÍ 1990	6
3. ÚRVINNSLA GAGNA FRÁ JÚLÍ 1990	13
3.1 Iðustreymistap í holu 4	13
3.2 Áhrif holu 4 á jarðhitakerfið	13
3.3 Hóla 3 og áhrif hennar	14
3.4 Mismunandi afköst vinnsluholanna	15
3.5 Eiginleikar jarðhitakerfisins	15
4. VINNSLUGÖGN OG ÚRVINNSLA ÞEIRRA	27
4.1 Gögnin	27
4.2 Líkanið	27
4.3 Einingarniðurdráttur	28
5. VATNSBORÐSSPÁR	32
6. HELSTU NIÐURSTÖÐUR	36
HEIMILDASKRÁ	37
ENGLISH SUMMARY	38

## TÖFLUR

1. Borholur á Laugarengi notaðar í prófun í júlí 1990.	7
2. Niðurstöður efnagreininga á sýnum úr holum 3 og 4 á Laugarengi	7
3. Eiginleikar þjappaðs líkans af jarðhitakerfinu undir Laugarengi.	17
4. Samanburður á eiginleikum innstu hluta nokkurra jarðhitakerfa skv. rennulíkani.	17
5. Áætluð rúmmál geyma í þjöppuðu líkani af jarðhitakerfinu undir Laugarengi.	18
6. Áætluð ársmeðalvinnsla úr jarðhitasvæðinu á Laugarengi frá upphafi vinnslu.	28
7. Áætluð ársmeðalvinnsla 1990 - 2010.	33

## MYNDASKRÁ

1. Staðsetning borhola á Laugarengi	8
2. Dæling úr jarðhitasvæðinu á Laugarengi í prófuninni 7.-13. júlí 1990	9
3. Vatnsborð holu 4 á Laugarengi í prófuninni	9
4. Vatnsborð holu 3 á Laugarengi í prófuninni	10
5. Vatnsborð holu 2 á Laugarengi í prófuninni	10
6. Hækkun vatnsborðs á Laugarengi 7.-9. júlí 1990	11

7. Vatnsborð og dæling á Laugarengi 9.-12. júlí 1990	11
8. Hækkun vatnsborðs á Laugarengi 12. júlí 1990	12
9. Vatnsborð og dæling á Laugarengi 12.-13. júlí 1990	12
10. Preparaþrófun holu 4 á Laugarengi	18
11. Þjappað líkan (vegna prófunar) af jarðhitakerfinu undir Laugarengi	19
12. Mælt og reiknað vatnsborð í holu 4 7.-12. júlí 1990	19
13. Mælt og reiknað vatnsborð í holu 3 7.-11. júlí 1990	20
14. Mælt og reiknað vatnsborð í holu 2 7.-12. júlí 1990	20
15. Einingarniðurdráttur í holum 2, 3 og 4 vegna dælingar úr holu 4	21
16. Einingarniðurdráttur í holum 2, 3 og 4 vegna dælingar úr holu 4, lógaritmískur tímaás	21
17. Mældur og reiknaður niðurdráttur í holu 3 12.-13. júlí 1990	22
18. Mældur og reiknaður niðurdráttur í holu 4 12.-13. júlí 1990	22
19. Mælt og reiknað vatnsborð í holu 2 12.-13. júlí 1990	23
20. Einingarniðurdráttur í holum 3 og 4 í vinnslu	23
21. Samanburður á einingarniðurdrætti holu 4 vegna dælingar úr holu 3 og holu 3 vegna dælingar úr holu 4	24
22. Samanburður á einingarniðurdrætti holu 4 vegna dælingar úr holu 3 og holu 3 vegna dælingar úr holu 4, lógaritmískur tímaás	24
23. Einingarniðurdráttur holu 2	25
24. Iðustreymistap í vinnsluholum	25
25. Einingarniðurdráttur í holum 3 og 4 og reiknuð viðbrögð rennulíkans	26
26. Einingarniðurdráttur holu 3 og reiknuð viðbrögð hálfvinnslulíkans	26
27. Vatnsborð í holu 4 og vikuleg meðalvinnsla frá því í september 1989	29
28. Þjappað líkan af jarðhitakerfinu undir Laugarengi	29
29. Mælt og reiknað vatnsborð í holu 4 frá því í september 1989	30
30. Einingarniðurdráttur holu 4 við langtíma vinnslu	30
31. Einingarniðurdráttur holu 4 við langtíma vinnslu, lógaritmískur tímaás	31
32. Einingarniðurdráttur jarðhitakerfis og reiknuð viðbrögð hálfvinnslulíkans	31
33. Vatnsborðsspár fyrir holu 4, stöðug ársmeðalvinnsla	34
34. Vatnsborðsspár fyrir holu 4, 1,5% árlegur vöxtur í vinnslu	34
35. Vatnsborðsspár fyrir holu 4, 2% árlegur vöxtur í vinnslu	35

## 1. INNGANGUR

Hitaveita Ólafsfjarðar tók til starfa árið 1944 og nýtir nú tvö vinnslusvæði, jarðhitasvæðin á Skeggjabrekkudal og Laugarengi. Fyrstu þrjá áratuginu nýtti hitaveitan eingöngu heitt vatn af Skeggjabrekkudal, en frá 1975 hefur hún einnig nýtt jarðhitasvæðið á Laugarengi. Vatnið á Skeggjabrekkudal er um 57°C en 66°C á Laugarengi. Alls hafa verið boraðar 17 holur á Skeggjabrekkudal og 4 á Laugarengi. Árið 1962 var fjórtánda hola (hola I) boruð á Skeggjabrekkudal og hefur hún verið vinnsluhola þar síðan. Hún gefur um 23 l/s í sjálfrennsli. Árið 1973 hófust rannsóknir á jarðhitasvæðinu á Laugarengi. Það ár voru holur 1 og 2 boraðar þar. Tveimur árum seinna var hola 3 boruð, en hún gaf í fyrstu um 13,5 l/s í sjálfrennsli og seinna um 24 l/s með dælingu. Árið 1982 var hola 4 á Laugarengi boruð. Reyndist hún töluvert afkastameiri en hola 3 og hefur verið vinnsluhola hitaveitunnar á því svæði síðan.

Jarðhitasvæðið á Laugarengi hefur lítið verið rannsakað ef undan eru skildar takmarkaðar yfirborðsrannsóknir árin 1973 og 1977 (Ragna Karlsdóttir og Jóhann Helgason, 1978). Engar forðafræðilegar rannsóknir hafa verið gerðar á jarðhitakerfinu, hvorki afkastaprófanir á einstökum borholum né úttekt á afkastagetu svæðisins. Vinnslueftirlit hefur einnig verið takmarkað, en reglulegt eftirlit með vinnslu, vatnsborði og hita vatns hófst þó í september 1989. Vatnssýni til efnagreininga hafa verið tekin árlega síðan 1986 (Auður Ingimarsdóttir, 1990).

Í byrjun árs 1990 var gerður samningur milli Orkustofnunar og Hitaveitu Ólafsfjarðar um jarðhitarannsóknir, sem einkum skyldu miða að því að auka þekkingu á gerð og eðli jarðhitakerfisins undir Laugarengi og meta afkastagetu þess. Skýrsla þessi fjallar um forðafræðilega athugun, sem gerð var samkvæmt samningnum. Tilgangur athugunarinnar var annars vegar að afla upplýsinga um gerð og eðli jarðhitakerfisins og hins vegar að meta afkastagetu kerfisins með því að áætla langtímaviðbrögð (vatnsborðs-

breytingar) þess við vinnslu í framtíðinni. Hitaveita Ólafsfjarðar getur vonandi haft niðurstöður þessarar athugunar til hliðsjónar við ákvarðanir vegna ýmissa framkvæmda, svo sem sölukerfisbreytinga eða borun nýrra hola á svæðinu.

Framkvæmd athugunarinnar var á þann veg að í fyrsta lagi var jarðhitakerfið prófað með breytilegri dælingu dagana 7.-13. júlí 1990 ásamt því að nákvæmlega var fylgst með breytingum á vatnsborði. Í öðru lagi var unnið úr þeim gögnum um vinnslu og vatnsborð, sem safnað hefur verið síðan í september 1989. Í kafla 2 er fjallað nánar um prófunina og birt þau gögn sem safnað var. Í kafla 3 er fjallað um einfalda úrvinnslu gagnanna og þær niðurstöður sem sú úrvinnsla gefur um gerð og eðli jarðhitakerfisins. Í kafla 4 er fjallað um úrvinnslu tiltækra vinnslugagna og sett fram einfalt líkan af kerfinu. Í kafla 5 eru að síðustu birtar vatnsborðsspár fyrir jarðhitasvæðið, byggðar á niðurstöðum kafla 3 og 4.

## 2. MÆLINGAR Í JÚLÍ 1990

Jarðhitasvæðið á Laugarengi var prófað dagana 7.-13. júlí 1990. Prófunin fór þannig fram að fylgst var með breytingum á vatnsborði í þremur af fjórum borholum á svæðinu vegna breytilegrar dælingar úr holum 3 og 4. Mynd 1 sýnir afstöðu borhola á svæðinu, en í töflu 1 eru upplýsingar um mæliholurnar. Til aðstoðar skýrsluhöfundu við prófunina voru Olgeir Gottliebsson veitustjóri og Einar Þórarinnsson formaður veitunefndar.

Dagana fyrir prófunina hafði verið dælt um 23 l/s að jafnaði úr holu 4, en prófunin var síðan gerð í sex hlutum:

1. Frá kl 16:05 þann 7. júlí til kl 8:09 að morgni þess 9. var engu vatni dælt úr jarðhitakerfinu (holur 3 og 4 stopp).
2. Frá kl 8:09 til kl 15:00 þann 9. júlí var hola 4 þrepaprófuð (23, 27 og 34 l/s þrep).
3. Frá kl 15:00 þann 9. júlí til kl 4:45 aðfaranótt þess 11. var dælt um 32 l/s að jafnaði úr holu 4.
4. Frá kl 4:45 þann 11. júlí til kl 21:18 þann 12. var hola 4 stopp á ný og engu vatni dælt úr jarðhitakerfinu.
5. Frá kl 21:18 þann 12. júlí til kl 19:42 þann 13. var dælt með fullum afköstum (u.þ.b. 20 l/s) úr holu 3.
6. Frá kl 19:42 til kl 22:45 þann 13. júlí var hola 3 síðan þrepaprófuð (20, 17 og 14 l/s þrep).

Meðan á prófuninni stóð var vatnsborð mælt reglulega í holum 2, 3 og 4. Í holum 2 og 4 var vatnsborð mælt með rúllumælum, en hægt var að renna slíkum mæli niður á milli dælurörs og fóðringar í holu 4. Fyrstu daga prófunarinnar var einnig hægt að mæla vatnsborð í holu 3 með rúllumæli, því engin dæla var í holunni. Þann 11. júlí var dæla síðan sett í holuna og eftir að hún var gangsett að kvöldi þess 12. var vatnsborð í holu 3 áætlað út frá þrýstingi á lofti sem blásið var eftir loftröri niður á um 100 m

dýpi. Dæling úr holum 3 og 4 var einnig mæld reglulega með rennslismæli sem er á lögninni frá holunum.

Gögnin úr prófuninni eru birt á myndum 2 til 9 hér á eftir. Mynd 2 sýnir dælinguna úr jarðhitakerfinu þetta tímabil, myndir 3 til 5 vatnsborð í holunum þremur og myndir 6 til 9 síðan gögnin úr fjórum aðalhlutum prófunarinnar (að undanskildum þrepaprófununum).

Við fyrstu sýn vekja eftirfarandi atriði mesta athygli: Annars vegar varð miklu meiri niðurdráttur í holu 3 í síðasta hluta prófunarinnar þegar dælt var úr henni, en í holum 2 og 4 (mynd 9). Jafnframt var mun minni niðurdráttur í holu 4 við sambærilega dælingu (mynd 7). Þessi munur er það sem veldur mismunandi afköstum þessara tveggja vinnsluhola. Hins vegar voru vatnsborðsbreytingar í holu 2 bæði miklu minni og miklu hægari en í holum 3 og 4 enda er hún mun grynri en þær.

Nokkur óvissa er í vatnsborðsmælingum úr holu 4 vegna þess að þegar slökkt er á dælu í henni tekur vatnssúlan í holunni að kólna, og dragast saman. Reynt var að leiðrétta þessa skekkju áður en unnið var úr gögnunum. Þegar dæling hefst úr holu 3 hitnar hins vegar vatnssúlan í holunni og hækkar miðað við það sem var í henni kaldri. Einnig var leiðrétt fyrir því áður en farið var að vinna úr gögnunum.

Meðan á prófuninni stóð voru tekin nýu vatnssýni úr holum 3 og 4. Tilgangurinn var að kanna hvort einhverjar breytingar yrðu á efnasamsetningu vatnsins annað hvort með tíma eða við breytilega dælingu. Örlítill munur er á styrk efna í vatni úr holum 3 og 4 en engar marktækar breytingar urðu á styrk efna úr hvorri holu fyrir sig (Magnús Ólafsson, persónulegar upplýsingar). Niðurstöður efnagreininga á sýnunum eru birtar í töflu 2.

*TAFLA 1. Borholur á Laugarengi notaðar í prófun í júl 1990*

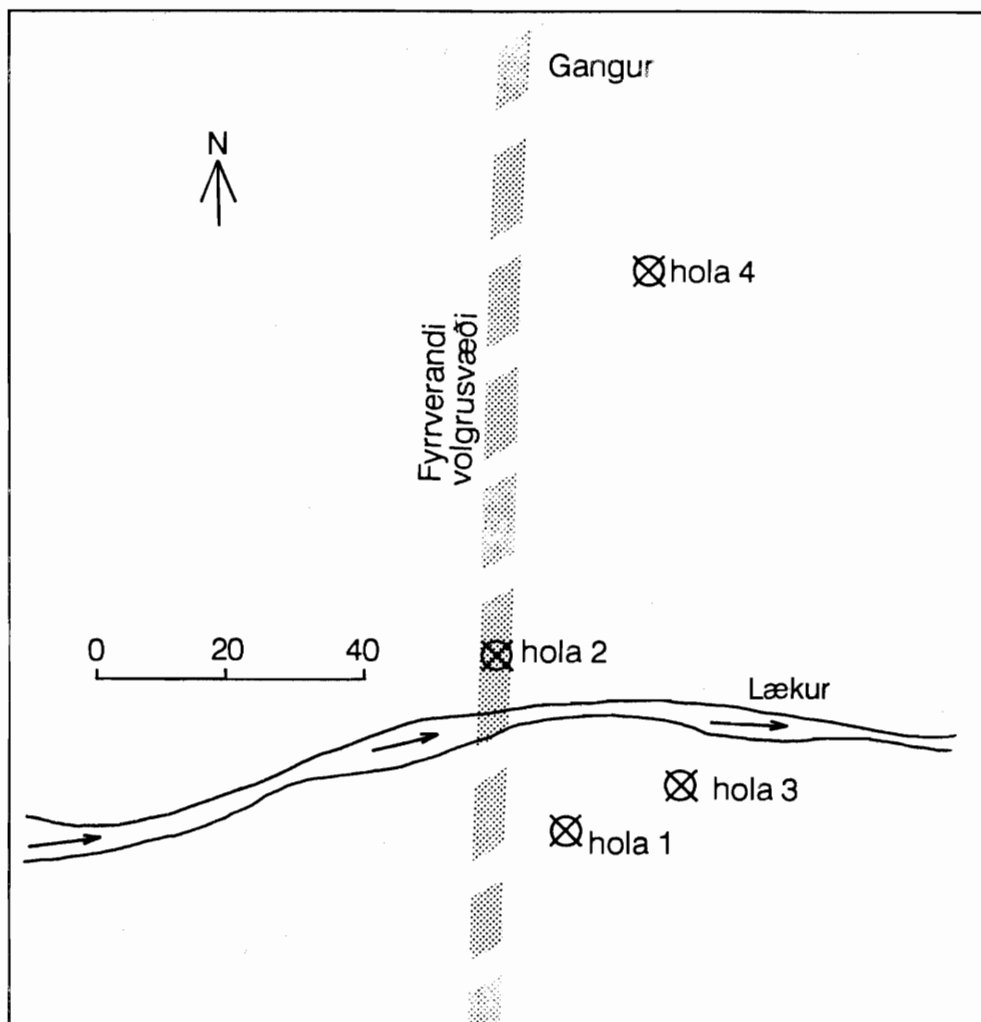
Hola	Borun lokið	Dýpi (m)	Fóðring dýpi (m)	vídd (m)	Vídd holu (m)	Aðalæðar (m)	Dæla (m)
2	nóv. 1973	299	6	0,27	0,14	(270)	nei
3	júl 1975	1169	110	0,27	0,17	1100	100
4	jan. 1983	1485	217	0,30	0,20-0,22	680,1470	60

*TAFLA 2. Niðurstöður efnagreininga á sýnum úr holum 3 og 4 á Laugarengi*

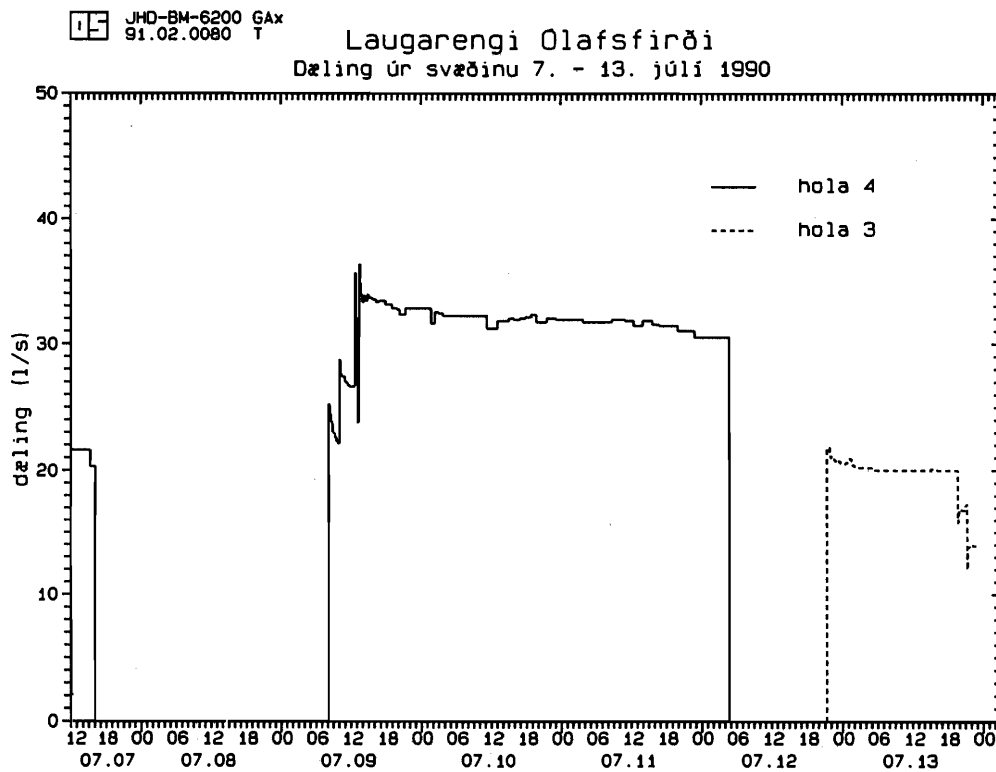
Hola	Dagsetning	Tími	Hiti (°C)	SiO <sub>2</sub> (mg/kg)	Cl (mg/kg)	Br (mg/kg)	F (mg/kg)	SO <sub>4</sub> (mg/kg)
4	90-07-07	15:45	66,2	78,1	8,59	0,02	0,160	6,06
4	90-07-09	10:50	65,7	79,1	8,56	0,02	0,158	6,03
4	90-07-09	22:20	66,5	79,2	8,56	0,02	0,159	6,06
4	90-07-10	13:25	67,0	80,4	8,55	0,02	0,167	6,01
4	90-07-11	9:45	67,0	78,3	8,54	0,02	0,159	6,04
4	90-07-12	16:45	67,0	79,8	8,56	0,02	0,162	6,05
3	90-07-12	23:45	61,5	77,1	8,80	0,02	0,160	6,23
3	90-07-13	9:40	63,0	80,9	8,83	0,02	0,161	6,35
3	90-07-13	18:05	64,0	80,5	8,69	0,02	0,163	6,31



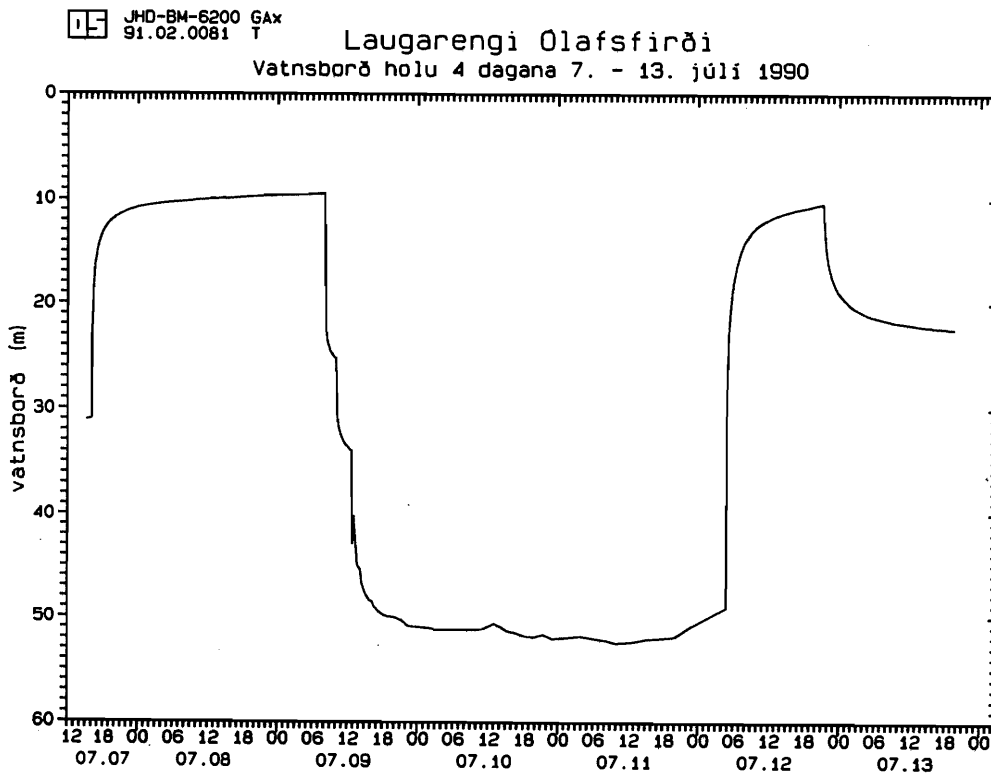
JHD BM 6200 GAx  
91.02.0112 ÓÐ



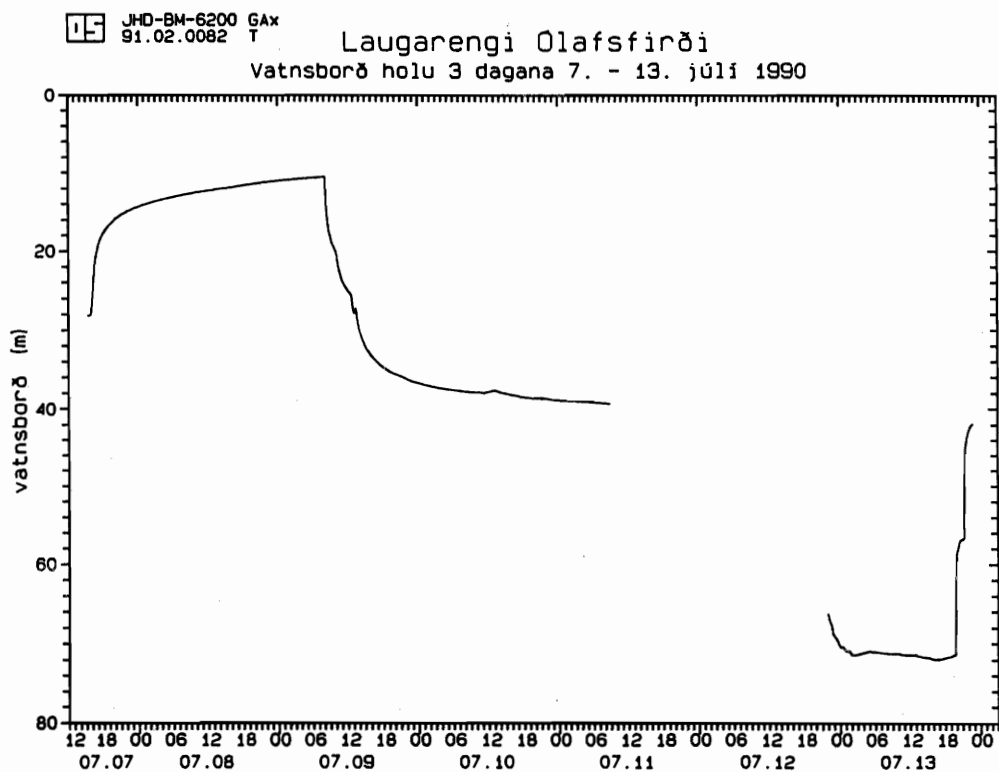
MYND 1. Staðsetning borhola á Laugarengi (Kristján Sæmundsson, 1981)



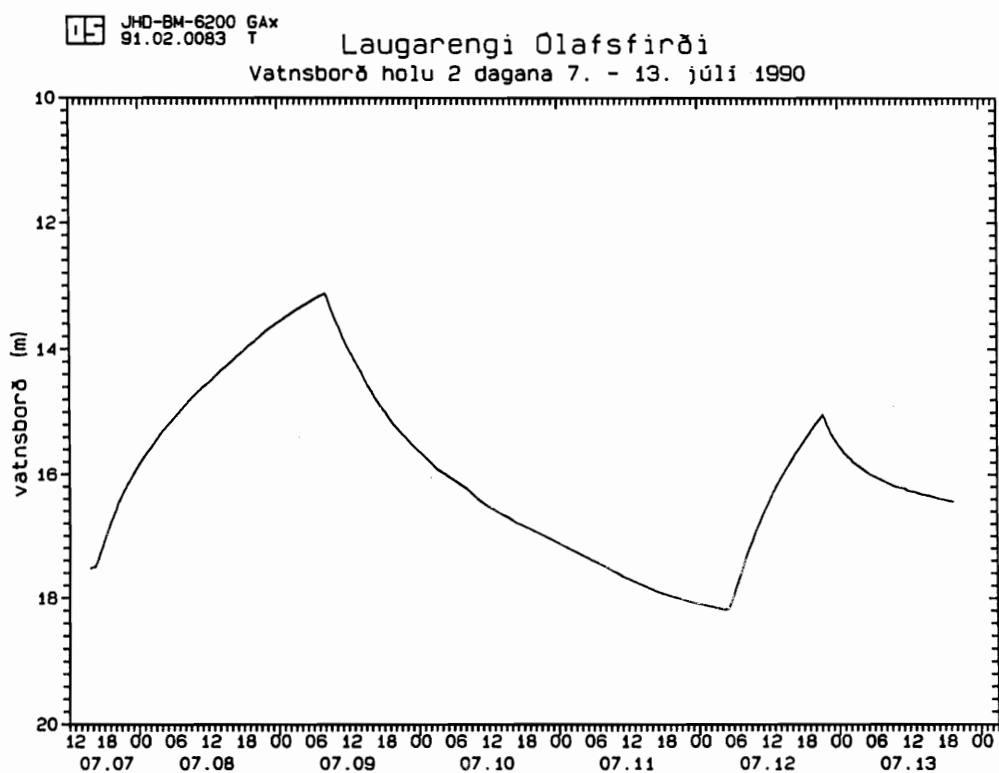
MYND 2. Dæling úr jarðhitasvæðinu á Laugarengi í prófuninni 7.-13. júlí 1990



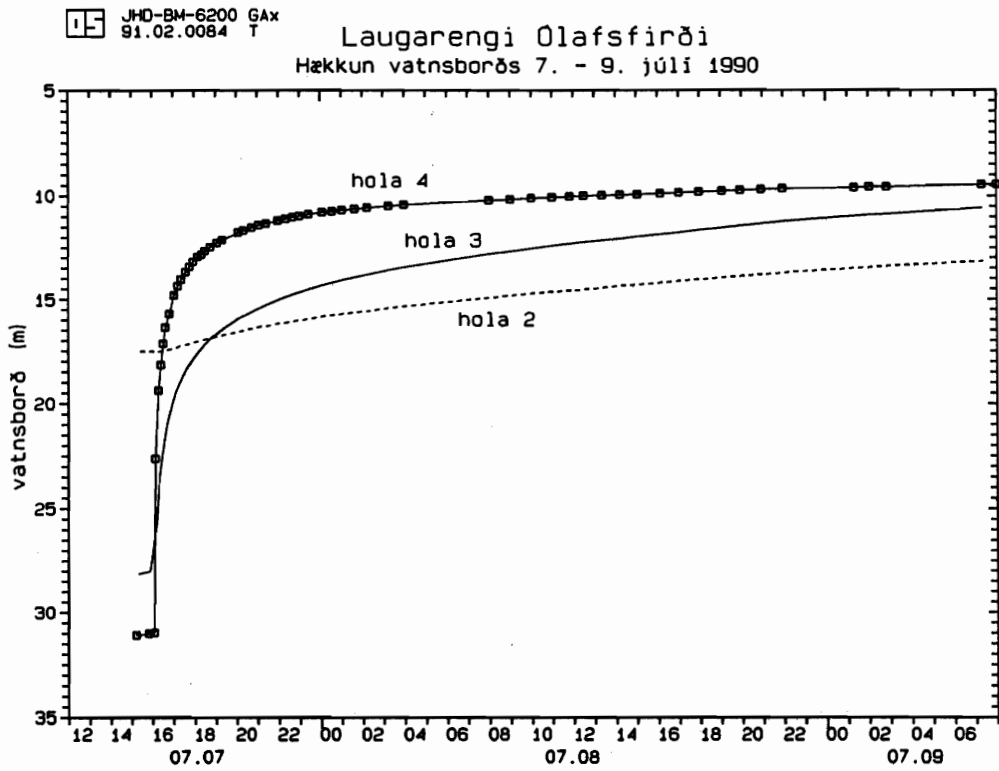
MYND 3. Vatnsborð holu 4 á Laugarengi í prófuninni



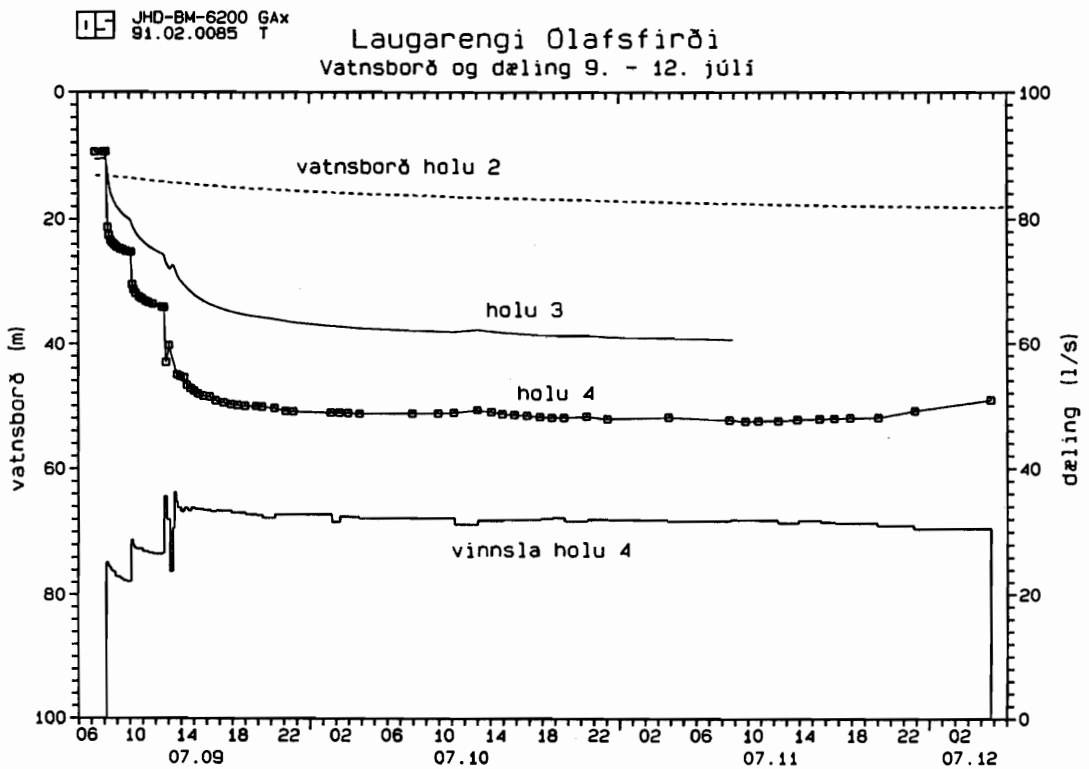
MYND 4. Vatnsborð holu 3 á Laugarengi í prófuninni



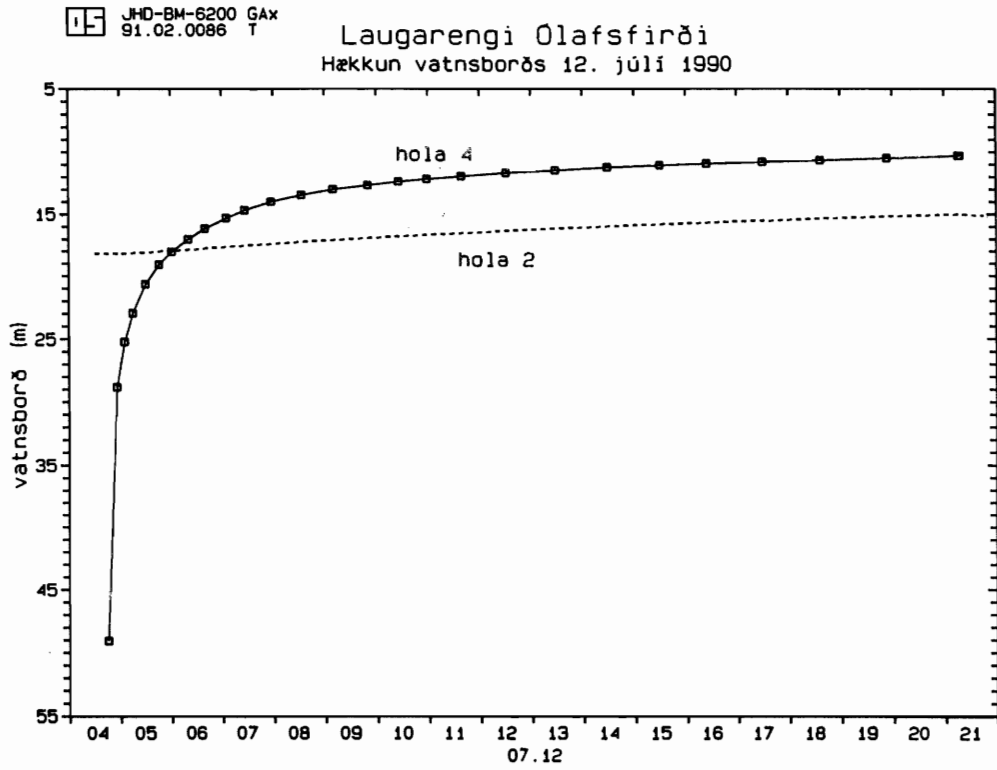
MYND 5. Vatnsborð holu 2 á Laugarengi í prófuninni



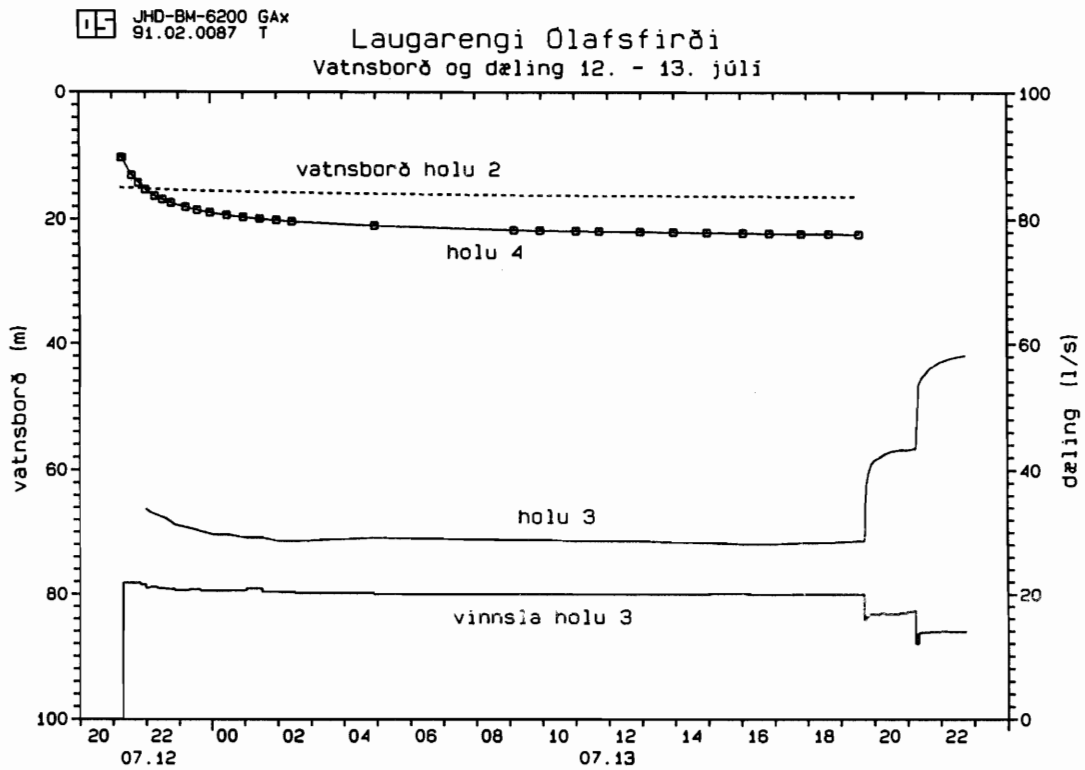
MYND 6. Hækkun vatnsborðs á Laugarengi 7.-9. júlí 1990



MYND 7. Vatnsborð og dæling á Laugarengi 9.-12. júlí 1990



MYND 8. Hækkun vatnsborðs á Laugarengi 12. júlí 1990



MYND 9. Vatnsborð og dæling á Laugarengi 12.-13. júlí 1990

### 3. ÚRVINNSLA GAGNA FRÁ JÚLÍ 1990

Við úrvinnslu gagnanna, sem safnað var í júlí 1990, voru eftirfarandi spurningar hafðar að leiðarljósi:

1. Hvað stjórnar streymi vatns í jarðhitakerfinu, hversu stórt er kerfið og hverjir eru vatnafræðilegir eiginleikar þess, þ.e. poruhluti og vatnsleiðni (lekt)? Þessi atriði stjórna niðurdrætti í jarðhitakerfinu og þar með afköstum þess.
2. Hver er niðurdráttur í vinnsluholum, þegar þær eru í vinnslu? Niðurdráttur er meiri í vinnsluholum en í öðrum holum, m.a. vegna iðustreymistaps.
3. Hvað veldur því að afköst holu 3 eru mun minni en afköst holu 4?

Úrvinnslunni var þannig háttað að í fyrstu var iðustreymistap áætlað fyrir dæluholurnar tvær, holur 3 og 4. Síðan voru gögnin túlkuð þannig að einföld vatnafræðileg líkön (m.a. þjöppuð líkön) voru látin herma vatnsborðsbreytingarnar sem mældar voru, en eiginleikar líkananna endurspegla þá eiginleika jarðhitakerfisins. Hér að neðan verður fjallað um niðurstöður úrvinnslunnar, en þær ásamt niðurstöðum kafla 4 verða síðan notaðar til þess að reikna vatnsborðsspár fyrir jarðhitakerfið á Laugarengi.

#### 3.1 Iðustreymistap í holu 4

Þegar vatni er dælt úr vinnsluholu þá er niðurdráttur í holunni meiri en niðurdráttur í jarðhitakerfinu utan hennar. Er þetta vegna þrýstifalls sem verður vegna iðustreymis (e. turbulence) í holunni og í sprungum næst henni, og oft er nefnt **iðustreymistap**. Þetta þrýstifall, eða niðurdráttur, er ekki línulega háð dælingu eins og þrýstifallið í jarðhitakerfinu, en má nálga með jöfnunni

$$(1) \quad \Delta p = CQ^2$$

þar sem  $\Delta p$  er iðustreymistapið,  $C$  fasti og  $Q$  dælingin. Iðustreymistap kemur yfirleitt fram strax og dæling hefst eða breytist, en

þrýstifallið í jarðhitakerfinu breytist smátt og smátt með tíma. Ef ætlunin er að spá fyrir um dýpi á vatnsborði í vinnsluholu (holu 4) þarf því að meta iðustreymistap í þeirri holu auk þess að áætla vatnsborðsbreytingar í jarðhitakerfinu.

Á mynd 7 hér að framan sést vel að niðurdráttur er nokkru meiri í holu 4, þegar hún er í vinnslu, en í öðrum holum á svæðinu. Er það að nokkru leyti vegna iðustreymistapsins. Til þess að áætla það fyrir holu 4 var holan þrepaprófuð í öðrum hluta prófunarinnar. Síðan var iðustreymistapið metið á eftirfarandi máta: Fyrst var stuðullinn  $C$  í jöfnu (1) áætlaður gróflega. Síðan var niðurdráttur í holunni, að frádregnu iðustreymistapinu, reiknaður með þjöppuðu líkani (sjá kafla 3.2) og iðustreymistapi samkvæmt jöfnu (1) bætt við. Stuðlinum  $C$  var síðan breytt og niðurdráttur og iðustreymistap endurreiknað fyrir nokkur mismunandi gildi. Minnst frávik fékkst ef  $C = 0,015\text{m}/(\text{l/s})^2$  var notað og eru mældar og reiknaðar niðurstöður sýndar á mynd 10.

#### 3.2 Áhrif holu 4 á jarðhitakerfið

Í fyrstu fjórum hlutum prófunarinnar var fylgst með viðbrögðum jarðhitakerfisins við breytilegri vinnslu úr holu 4. Fylgst var með vatnsborði í holum 2, 3 og 4 og eru gögnin sýnd á myndum 6, 7 og 8. Áður en gögnin úr holu 4 voru túlkuð var vatnsborð bæði leiðrétt fyrir iðustreymistapi skv. jöfnu (1) og fyrir kólnun vatnssúlunnar í holunni í dæluhléunum tveimur. Leiðrétt gögnin ættu að endurspegla vatnsborðsbreytingar í jarðhitakerfinu næst holu 4. Gögnin úr holu 3 sýna vatnsborðsbreytingar í jarðhitakerfinu ótruflaðar af nálægð vinnsluholu. Gögnin úr holu 2 gefa upplýsingar um áhrif holu 4 á vatnskerfið ofan hins eiginlega jarðhitakerfis.

Við túlkun á viðbrögðum holanna voru notuð svokölluð **þjöppuð líkön** (Guðni Axelson, 1989a). Fræðileg viðbrögð þeirra voru felld sjálfvirkt með tölvu að mældum breytingum á vatnsborði í mæliholunum. Þjöppuð líkön hafa verið notuð með góðum árangri við hermireikninga fyrir allmörg jarð-

hitakerfi á Íslandi (Guðni Axelsson, 1989b). Þau eru gagnleg ef einungis niðurdráttur í viðkomandi kerfi er til athugunar, en of einföld ef jafnframt þarf að túlka breytingar í efnainnihaldi eða hitastigi.

Í sem stystu máli þá er þjappað líkan byggt upp af nokkrum vatnsgeymum, sem eru innbyrðis tengdir með viðnámmum (mynd 11). Geymarnir líkja eftir vatnsrýmd viðkomandi vatnskerfis, en viðnámin eftir straumviðnámi eða vatnsleiðni (lekt) kerfis. **Rýmd** vatnskerfis stjórnar því hve mikið vatn fæst úr kerfinu við ákveðna þrýstibreytingu (sbr. hugtakið geymslustuðull). Ef rýmd er mikil þá er kerfið gjöfult og þrýstibreytingar í því hægar. **Vatnsleiðnin (lektin)** stjórnar því hve greiðlega vatn streymir um kerfið og þar af leiðandi hve miklar þrýstibreytingar verða í því við vinnslu. Ef lekt kerfis er mikil þá getur vatnsstreymi verið mikið og þrýstibreytingar litlar.

Ekki er hægt að segja að geymarnir á mynd 11 svari til tiltekinnar jarðfræðilega afmarkaðra svæða. Fremur ber að líta á geymana og viðnámin sem líkan sem svarar vinnslu eins og jarðhitakerfið á Laugarengi. Þó má líta svo á að fyrsti geymirinn sé hliðstæður þeim hluta jarðhitakerfisins, sem er næst borholunum. Vatni er dælt úr þeim geymi og hermir þrýstingur í honum þrýsting í mæliholu á viðkomandi jarðhitasvæði. Einnig má líta svo á að annar og þriðji geymirinn svari til þess hluta jarðhitakerfisins sem er utan við og dýpra en nánasta umhverfi holanna. Þjappaða líkanið á mynd 11 er síðan í tengslum við þá hluta jarðhitakerfisins, sem verða fyrir áhrifum við langtíma-vinnslu (sjá kafla 4).

Mæld og reiknuð viðbrögð holanna þriggja eru sýnd á myndum 12-14 þar sem reiknuðu ferlarnir sýna viðbrögð þjappaðs líkans af jarðhitakerfinu (mynd 11). Við úrvinnsluna voru notuð klukkustundar meðaltöl dælingar ásamt vatnsborði í lok hverrar klukkustundar. Í töflu 3 eru birtir eiginleikar líkansins eins og þeir voru samkvæmt viðbrögðum hola 3 og 4. Eiginleikar líkansins endurspeglar eiginleika jarðhitakerfisins eins og áður segir, en nánar verður fjallað um

gerð þess í kafla 3.5 hér á eftir.

Til þess að bera viðbrögð holanna saman og túlka frekar var svokallaður **einingarniðurdráttur** reiknaður með þjappaða líkaninu fyrir hverja holu fyrir sig. Einingarniðurdráttur er einfaldlega viðbrögð kerfis við stöðugri dælingu á einni massa- eða rúmmálseiningu á tímaeiningu, t.d. einum l/s. Þannig hverfa áhrif breytilegrar dælingar. Niðurstöðurnar eru birtar á myndum 15 og 16, og er mynd 16 með lógaritmískum tímaás. Iðustreymistapi er sleppt og endurspeglar einingarniðurdráttur holu 4 því viðbrögð kerfisins næst holunni, en ekki viðbrögð holunnar sjálfra í vinnslu.

Á myndunum sést að frekar lítill munur er á viðbrögðum hola 3 og 4 vegna dælingar úr holu 4. Þó er eðlilegt að einhver munur sé þar á og að niðurdrátturinn sé mestur næst vinnsluholunni. Það hve munurinn er lítill bendir til nokkuð greiðra tengsla milli hola 4 og 3. Einingarniðurdráttur holu 2 er mun minni, enda nær hún aðeins niður í efsta hluta jarðhitakerfisins (æð á 270 m). Eins og kemur fram í töflu 1 eru æðarnar í holu 4 hins vegar á 680 og 1470 m dýpi og æðin í holu 3 á 1100 m dýpi.

### 3.3 HOLA 3 OG ÁHRIF HENNA

Í fimmta og síðasta hluta prófunarinnar í júlí 1990, sem stóð í 25 1/2 klst., var dælt úr holu 3. Eru gögnin úr þeim hluta birt á mynd 9 hér að framan. Áður en gögnin voru túlkuð þurfti að leiðrétta þau fyrir áframhaldandi hækkun vatnsborðs í kerfinu vegna stöðvunar holu 4. Hækkunin var reiknuð með þjappaða líkaninu úr kafla 3.2. Einnig var vatnsborð í holu 3 leiðrétt fyrir hitnun vatnsúlunnar í holunni eftir að dæling úr henni hófst. HOLA 3 hafði verið hitamæld í lok júní 1990. Út frá þeirri hitamælingu var áætlað að vatnsborð hefði hækkað um 7,0 m við hitnunina.

Gögnin úr holum 2, 3 og 4 voru túlkuð með sama þjappaða líkaninu og gögn úr fyrri hlutum prófunarinnar og eru eiginleikar líkansins samkvæmt viðbrögðum hola 3 og 4 birtir í töflu 3. Jafnframt var iðustreymistap-

ið í holu 3 áætlað á sama hátt og í holu 4. Minnst frávik fékkst ef  $C = 0,108m/(l/s)^2$  var notað. Mældar og reiknaðar niðurstöður eru sýndar á myndum 17, 18 og 19.

Þjappaða líkanið var síðan notað til þess að reikna einingarniðurdrátt, vegna dælingar úr holu 3, fyrir allar holurnar. Niðurstöðurnar eru sýndar á myndum 20 til 23. Mynd 20 sýnir einingarniðurdrátt holu 3 í dælingu, án iðustreymistaps, ásamt einingarniðurdrætti holu 4 þegar dælt er úr henni. Þar sést að munurinn á viðbrögðum þessara tveggja vinnsluhola er aðeins um 1/3. Því virðist ljóst að hinn mikli munur sem er á niðurdrætti í holum 3 og 4 stafi að mestu leyti af mun meira iðustreymistapi í holu 3. Myndir 21 og 22 sýna einingarniðurdrátt holu 4 vegna dælingar úr holu 3 ásamt einingarniðurdrætti holu 3 vegna dælingar úr holu 4 til samanburðar. Mynd 22 er með lógaritmískum tímaás. Að síðustu sýnir svo mynd 23 einingarniðurdrátt holu 2 annars vegar vegna holu 3 og hins vegar vegna holu 4. Nánar verður fjallað um þessar niðurstöður í kafla 3.5 hér á eftir.

### 3.4 Mismunandi afköst vinnsluholanna

Eins og komið hefur fram þá er töluverður munur á afköstum hola 3 og 4. Er það vegna mun meiri niðurdráttar í holu 3 en í holu 4. Að einhverju leyti stafar það af meiri niðurdrætti í jarðhitakerfinu næst holu 3 þegar hún er í vinnslu (mynd 20), sem væntanlega stafar af minni lekt þeirra æða sem hola 3 sker en þeirra æða sem hola 4 sker. Meiri niðurdráttur næst holu 3 veldur því einnig að áhrif hennar á holu 4 eru nokkru minni en áhrif holu 4 á holu 3 (myndir 21 og 22).

Meiri niðurdráttur í holu 3 í vinnslu stafar þó aðallega af miklu iðustreymistapi í og við holuna. Iðustreymisstuðull holu 3 var áætlaður  $0,108m/(l/s)^2$ , en holu 4 aðeins  $0,015m/(l/s)^2$ . Mynd 24 sýnir reiknað iðustreymistap í holum 3 og 4 fyrir mismunandi dælingu. Þar sést t.d. að við 20 l/s dælingu er iðustreymistap í holu 3 um 43 m en aðeins 6 m í holu 4. Þetta mikla iðustreymistap

í og við holu 3 stafar væntanlega af því að mun meira iðustreymi verður er vatn streymir inn í holu 3 bæði vegna þrengri æða og vegna þess að hola 3 er grennri en hola 4 (tafla 1).

### 3.5 Eiginleikar jarðhitakerfisins

Þær niðurstöður sem fjallað var um hér að framan má túlka frekar til þess að afla upplýsinga um gerð og eiginleika jarðhitakerfisins undir Laugarengi.

Ef einingarniðurdráttur holu 3, vegna dælingar úr holu 4, og einingarniðurdráttur holu 4, vegna holu 3, er skoðaður nánar sést að ef notaður er lógaritmískur tímaás þá vex niðurdráttur línulega fyrstu 20-25 klst. (mynd 22). Þetta bendir til þess að í fyrstu stjórnist viðbrögð jarðhitakerfisins af tvívíðu rennsli, þ.e. rennsli í einhvers konar plani. Þar gæti verið um að ræða lóðréttar sprungur, sprungusveim eða jafnvel einn eða fleiri leka bergganga. Jarðfræðilegar aðstæður í jarðhitakerfinu undir Laugarengi eru lítt þekktar, en sprungur og/eða gangar stjórna viðbrögðum fjölmargra annarra lághitakerfa á Íslandi (Axel Björnsson o.fl., 1990).

Eins og áður segir stjórnar lekt bergs því hve greiðlega vatn streymir um það. Til þess að áætla lekt í jarðhitakerfinu voru viðbrögð einfalds vatnafræðilegs líkans felld að einingarniðurdrætti holu 3 vegna holu 4 annars vegar og hins vegar að einingarniðurdrætti holu 4 vegna holu 3. Hér var um að ræða líkan af einsleitri (e. homogeneous), einsátta (e. isotropic), lóðréttri rennu lokaðri fyrir vatnsstreymi um hliðar og yfirborð. Rennulíkanið hermíur tvívítt vatnsstreymi t.d. í sprungu- eða gangasveim.

Niðurstöður þessara reikninga eru sýndir á mynd 25. Þar sést að hægt var að fella viðbrögð rennulíkansins að fyrstu 23-25 klst. einingarniðurdráttarins. Líkanið gefur okkur hugmynd um eiginleika innsta hluta jarðhitakerfisins. Samkvæmt viðbrögðum holu 3 vegna dælingar úr holu 4 fékkst:

$$bk = 4,7 \times 10^{-11} \text{ m}^3$$



$$bc_t = 2,6 \times 10^{-10} \text{ mPa}^{-1},$$

þar sem  $b$  er breidd rennunnar,  $k$  lekt hennar og  $c_t$  þjappanleiki bergs og vatns í renninni. Samkvæmt viðbrögðum holu 4 vegna dælingar úr holu 3 fékkst:

$$bk = 4,7 \times 10^{-11} \text{ m}^3$$

$$bc_t = 2,2 \times 10^{-10} \text{ mPa}^{-1}.$$

Hér er um mjög gott innbyrðis samræmi að ræða. Ef gengið er út frá því að poruhluti bergsins í kerfinu ( $\phi$ ) sé um 5% fæst að breidd rennunnar sé aðeins um 5-6 m. Af þessu má draga þá ályktun að í fyrstu stjórnist viðbrögð jarðhitakerfisins af rennsli í þröngum sprungusveimi eða við gang.

Þessar niðurstöður má bera saman við áætlaða eiginleika innstu hluta nokkurra annarra jarðhitasvæða á Íslandi sem prófuð hafa verið á líkan hátt (Guðni Axelsson, 1987 og 1988; Ólafur G. Flóvenz o.fl., 1991). Þetta er gert í töflu 4 hér á eftir. Þar sést að margfeldi af lekt og breidd Laugarengiskerfisins er töluvert minna en samsvarandi margfeldi fyrir jarðhitakerfin undir Urriðavatni og á Hamri. Lektin virðist þó vera enn minni frammi í Eyjafirði (Botnskerfið). Margfeldi af rýmd og breidd er mun minna fyrir Laugarengi en hin svæðin.

Einingarniðurdrátt holu 2, vegna dælingar úr holu 4, var einnig hægt að herma með sama rennulíkaninu. Þannig fékkst margfeldi lektar og breiddar sem var mjög svipað og fyrir hinar holurnar. Einingarniðurdráttur holu 2 vegna dælingar úr holu 3 er nokkru meiri en einingarniðurdráttur holunnar vegna dælingar úr holu 4 (mynd 23). Stafar það einfaldlega af því að aðalæðin er dýpra í holu 4 en í holu 3, og þar af leiðandi í meiri fjarlægð frá æðinni í holu 2.

Að liðnum 20-25 klst. eru viðbrögð jarðhitakerfisins ekki lengur í samræmi við rennulíkanið, sem sést t.d. á því að þá beygir einingarniðurdráttur holu 3 vegna dælingar úr holu 4 frá beinni línu á lógaritmískum tímaás (mynd 16). Þá virðast þrýstiáhrif dælingarinnar vera farin að ná út fyrir rennuna og vatn tekið að streyma lárétt að henni. Vatnsstreymið virðist m.ö.o. vera orðið þrívítt.

Þetta ástand má herma með líkani af einseleitu, einsátta og óendanlegu hálfgrúmi (óendanleg jörð) lokuðu fyrir vatnsstreymi við yfirborð. Niðurstöður fyrir einingarniðurdrátt holu 3 vegna dælingar úr holu 4 eru sýndar á mynd 26, en eiginleikar líkansins eru:

$$k = 2,8 \times 10^{-14} \text{ m}^2$$

$$c_t = 3,3 \times 10^{-11} \text{ mPa}^{-1}.$$

Hér má líta á  $k$  sem meðallekt mun stærri hluta vatnskerfisins en rennunnar einnar. Þjappanleikinn  $c_t$  bendir til um 3% meðalporuhluta ( $\phi$ ).

Þjöppuðu líkönin, sem notuð voru í kafla 3.3 til að herma viðbrögð jarðhitakerfisins (tafla 3), fela einnig í sér upplýsingar um gerð og eiginleika jarðhitakerfisins. Í fyrsta lagi benda leiðnigildin til frekar lítillar lektar, en þó um stærðargráðu meiri en í afkastaminnstu jarðhitakerfum landsins. Í öðru lagi má nota rýmdargildin til þess að áætla stærðir þess hluta jarðhitakerfisins sem þrýstiáhrif náðu til í prófuninni. Í þessari stuttu prófun stjórnast viðbrögð jarðhitakerfisins væntanlega eingöngu af vatnsrýmd vegna þjappanleika bergs og vatns. Þá gildir um rýmd geymanna á mynd 11 að  $\kappa = V\rho c_t$ , þar sem  $V$  er rúmmál þess hluta kerfisins sem geymirinn hermir,  $\rho$  eðlismassi vatns og  $c_t$  þjappanleiki bergs og vatns eins og áður. Ef við göngum út frá því að poruhluti bergsins sé af stærðargráðunni 5% má áætla gróflega rúmmál þeirra hluta jarðhitakerfisins, sem geymarnir í þjappaða líkaninu herma. Niðurstöðurnar eru birtar í töflu 5.

Niðurstöðurnar í töflu 5 má túlka á eftirfarandi máta: Fyrsti geymirinn er mjög lítill að rúmmáli og svarar væntanlega til áður nefndra sprungna eða gangs (rennu) innan jarðhitasvæðisins, þ.e. innsta kjarna þess. Annar geymirinn svarar væntanlega til jarðhitakerfisins utan rennunnar. Ef reiknað er með 1500 m þykkt þess hluta má áætla að flatarmál hans sé um  $0,15 \text{ km}^2$  eða um  $400 \times 400 \text{ m}$ . Þriðji geymirinn gæti að einhverju leyti svarað til hluta vatnskerfisins, sem er utan hins eiginlega jarðhitakerfis. Ef reiknað er með 2000 m þykkt þess hluta

fæst að flatarmál hans sé um 5 km<sup>2</sup>. Einnig gæti geymir 3 að einhverju leyti svarað til hluta jarðhitakerfisins dýpra í jörðu.

Þjappaða líkanið nær aðeins yfir hluta þess vatnskerfis, sem svarar vinnslu úr holunum á Laugarengi. Í næsta kafla verður fjallað um þann hluta kerfisins sem svarar langtímvinnslu og ræður langtímaviðbrögðum þess.

TAFLA 3. Eiginleikar þjappaðs líkans af jarðhitakerfinu undir Laugarengi byggðu á prófun í júlí 1990.

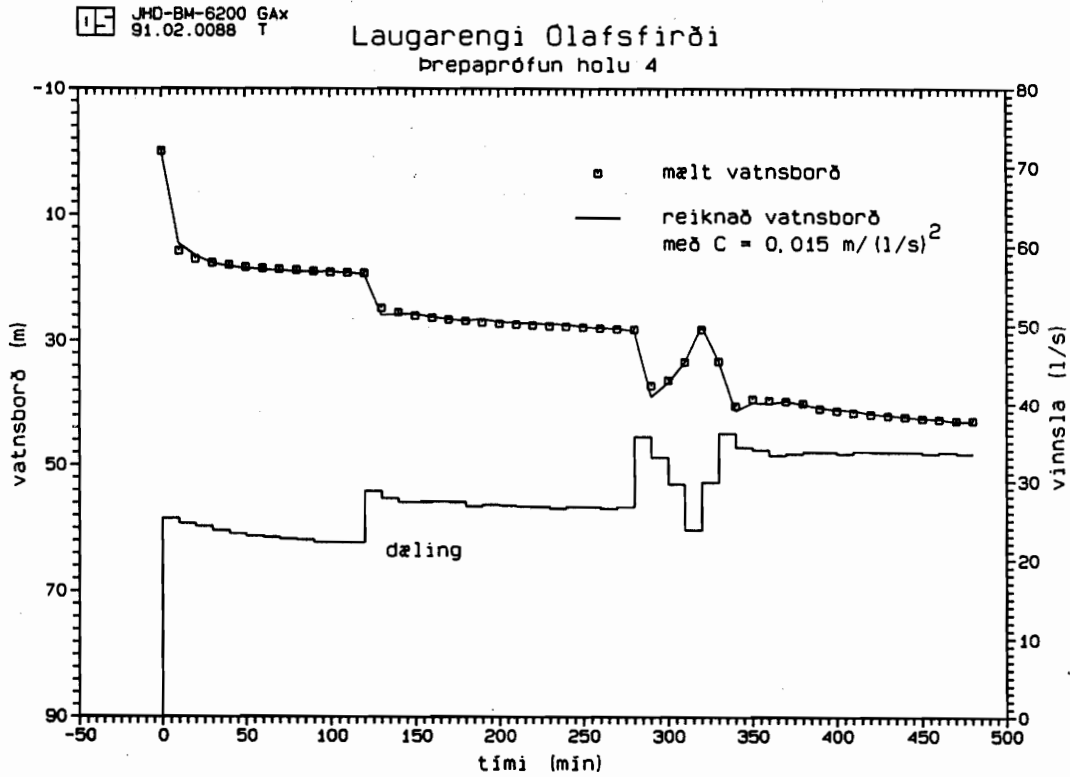
Vinnsluhola	4	4	3	3
Mælihol	3	4	3	4
Rýmd (m <sup>3</sup> )				
κ <sub>1</sub>	0,55	0,36	0,35	0,70
κ <sub>2</sub>	10	9,9	6,9	4,5
κ <sub>3</sub>	540	360	-	21
Leiðni (ms)				
σ <sub>1</sub>	0,00018	0,00014	0,00011	0,00029
σ <sub>2</sub>	0,00029	0,00029	0,00024	0,00044

TAFLA 4. Samanburður á eiginleikum innstu hluta nokkurra jarðhitakerfa skv. rennulíkani.

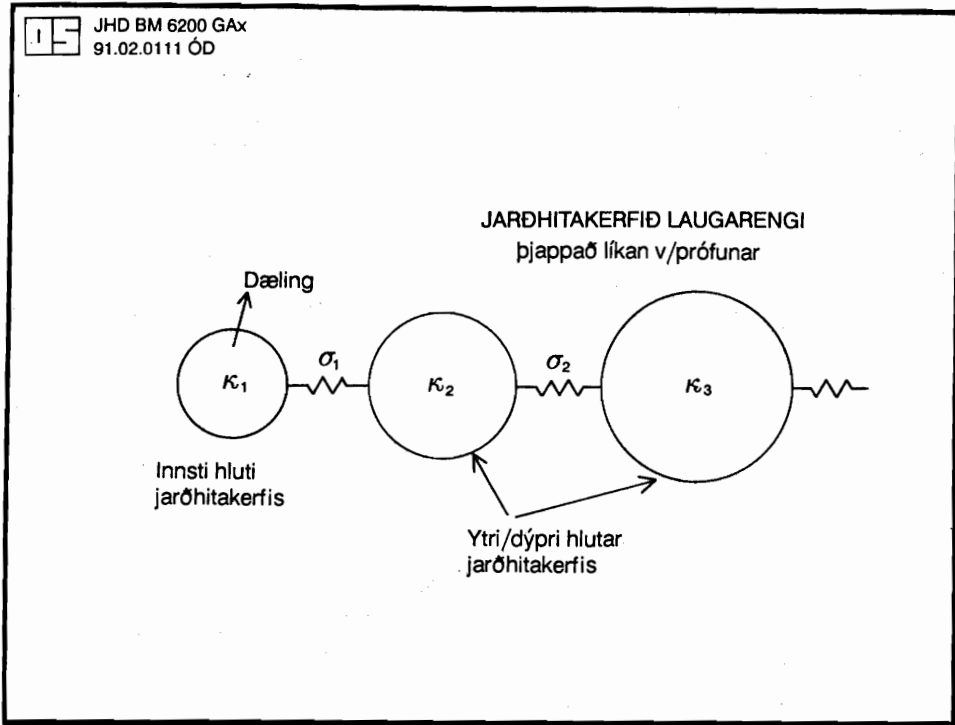
Svæði	b <sub>k</sub> (m <sup>3</sup> )	b <sub>c<sub>t</sub></sub> (mPa <sup>-1</sup> )
Laugarengi	47×10 <sup>-12</sup>	0,24×10 <sup>-9</sup>
Hamar (Dalvík)	530×10 <sup>-12</sup>	6,8×10 <sup>-9</sup>
Urriðavatn (Egilsst.)	110×10 <sup>-12</sup>	12×10 <sup>-9</sup>
Botn (Eyjafirði)	3,8×10 <sup>-12</sup>	3,1×10 <sup>-9</sup>

TAFLA 5. Áætluð rúmmál geyma í þjöppuðu líkani af jarðhitakerfinu undir Laugarengi (tafla 3), byggð á 5% poruhluta.

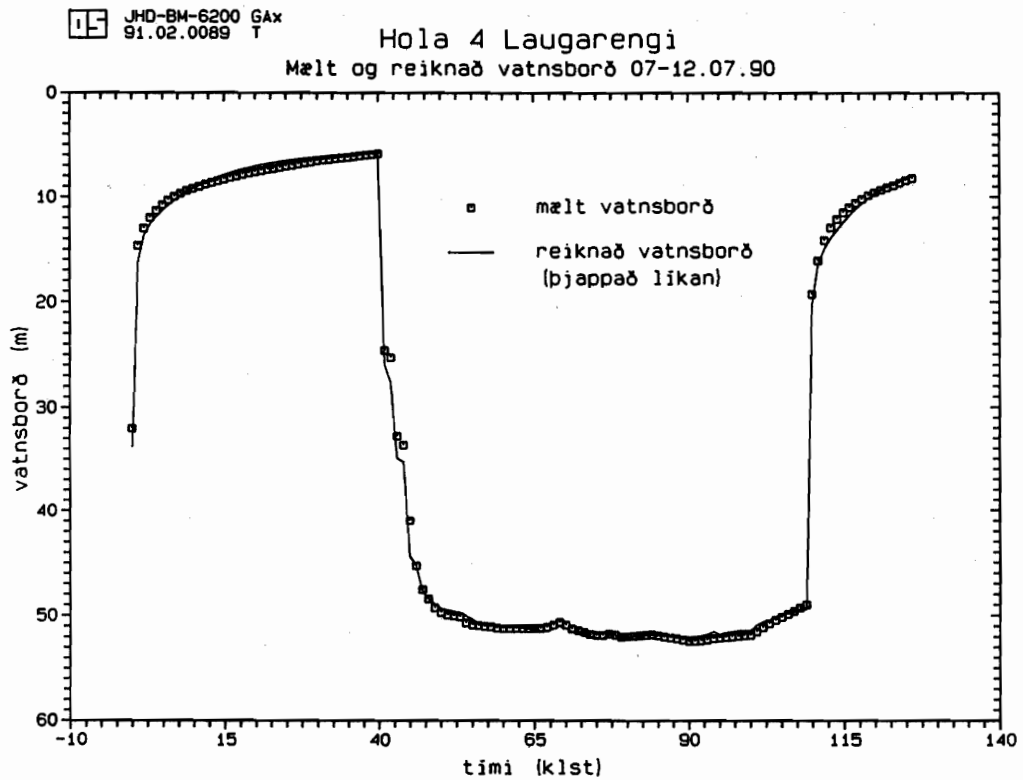
Vinnsluhola	4	4	3	3
Mælihol	3	4	3	4
geymir 1	0,012 km <sup>3</sup>	0,008 km <sup>3</sup>	0,008 km <sup>3</sup>	0,016 km <sup>3</sup>
geymir 2	0,23 km <sup>3</sup>	0,23 km <sup>3</sup>	0,16 km <sup>3</sup>	0,10 km <sup>3</sup>
geymir 3	12 km <sup>3</sup>	8,3 km <sup>3</sup>	-	0,48 km <sup>3</sup>



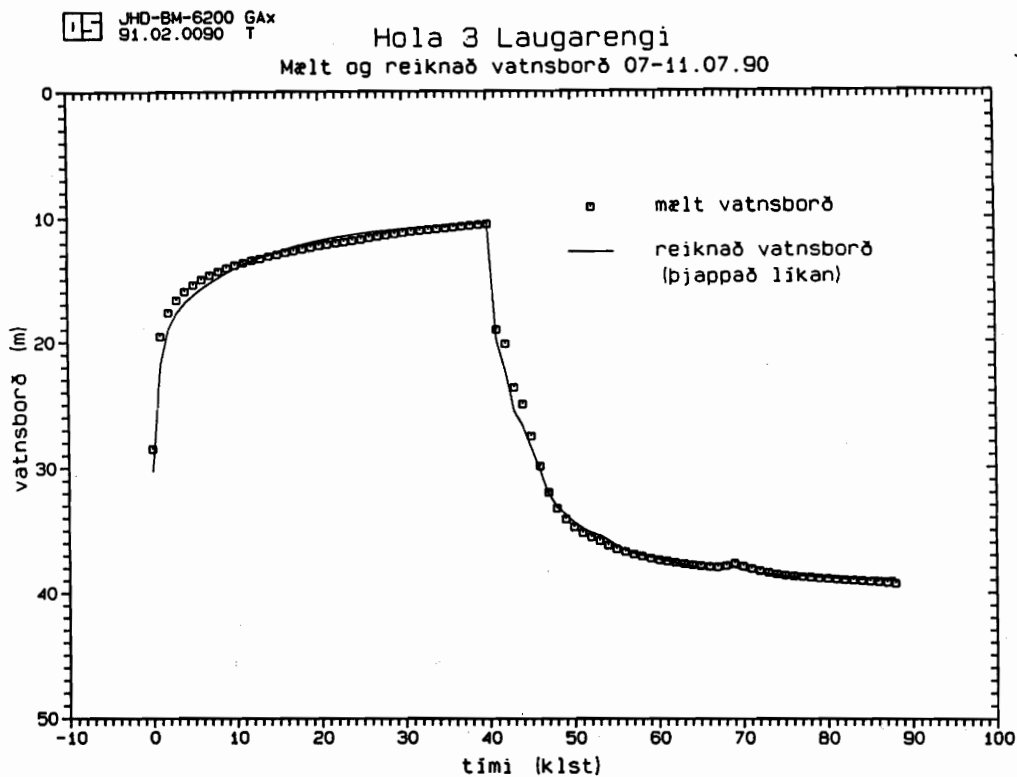
MYND 10. Þrepaprófun holu 4 á Laugarengi



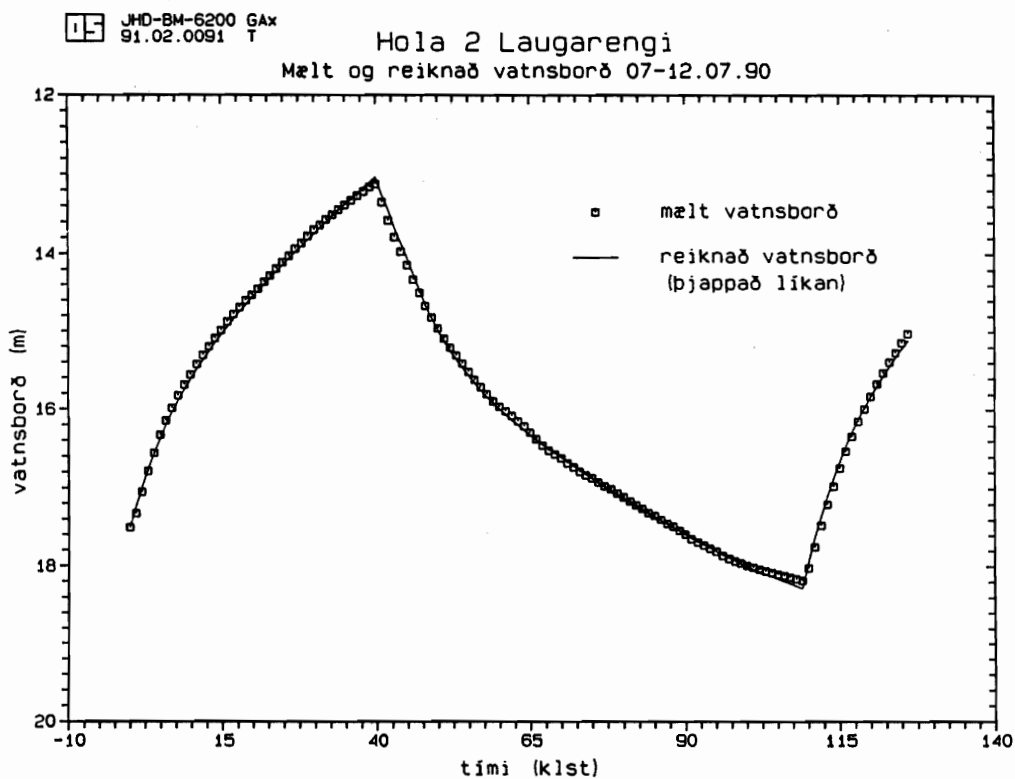
MYND 11. Þjappað líkan (vegna prófunar) af jarðhitakerfinu undir Laugarengi



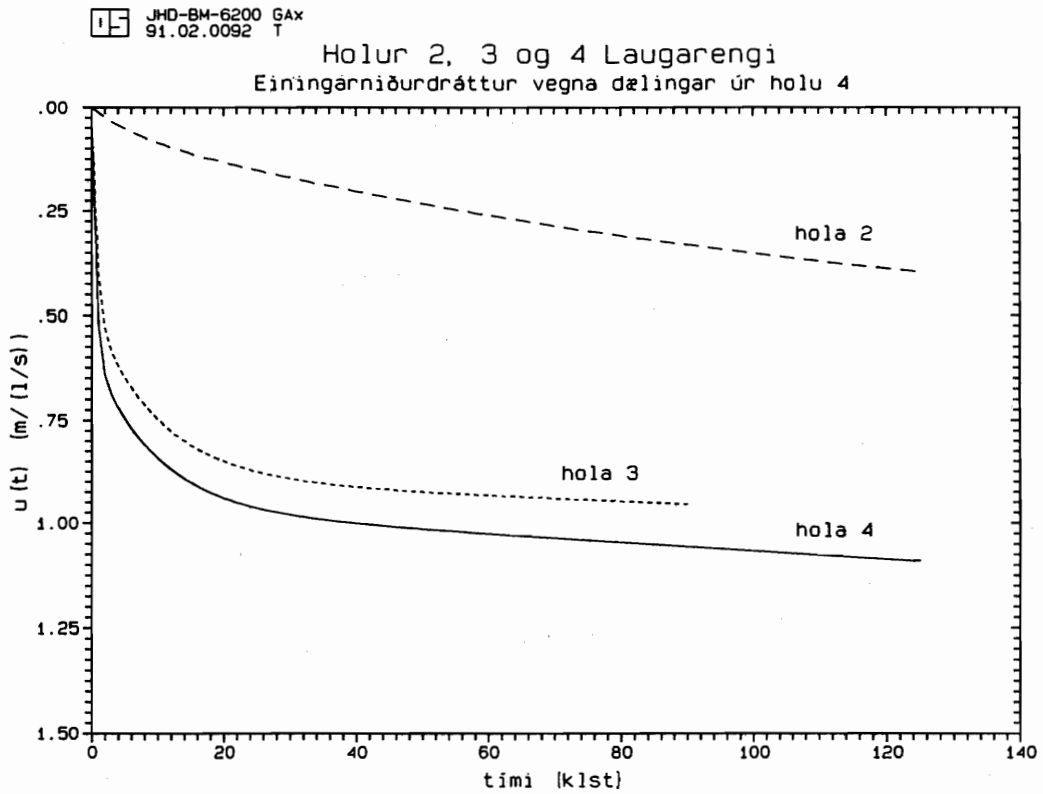
MYND 12. Mælt og reiknað vatnsborð í holu 4, 7.-12. júlí 1990



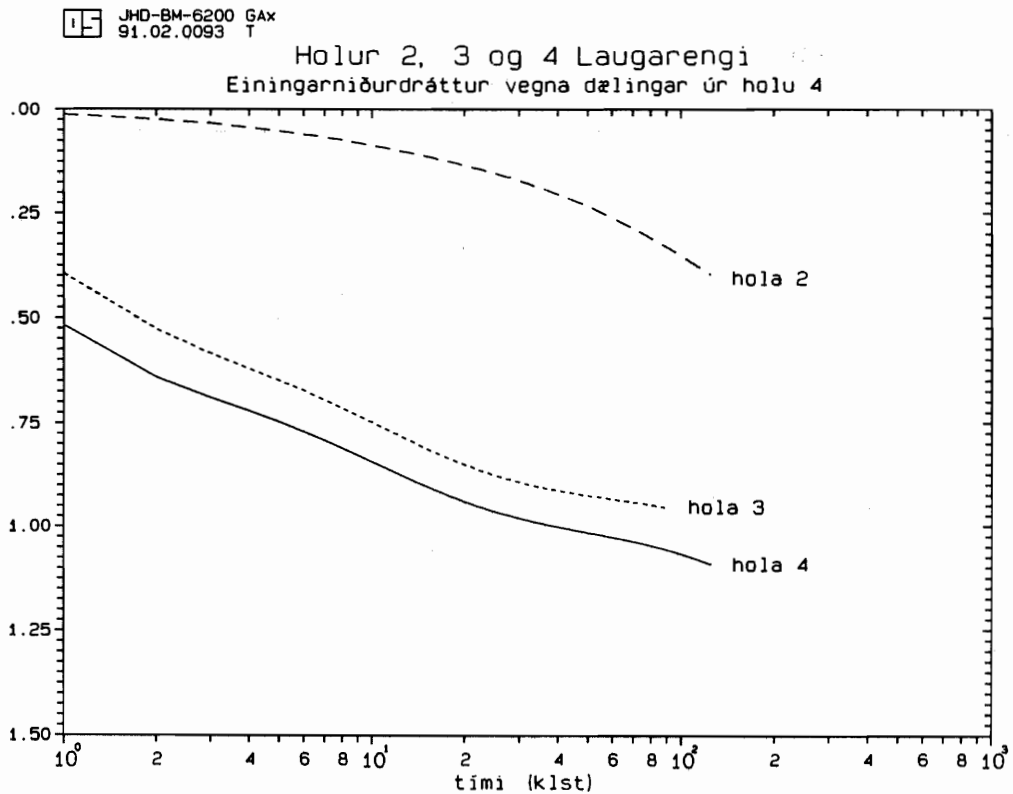
MYND 13. Mælt og reiknað vatnsborð í holu 3, 7.-11. júlí 1990



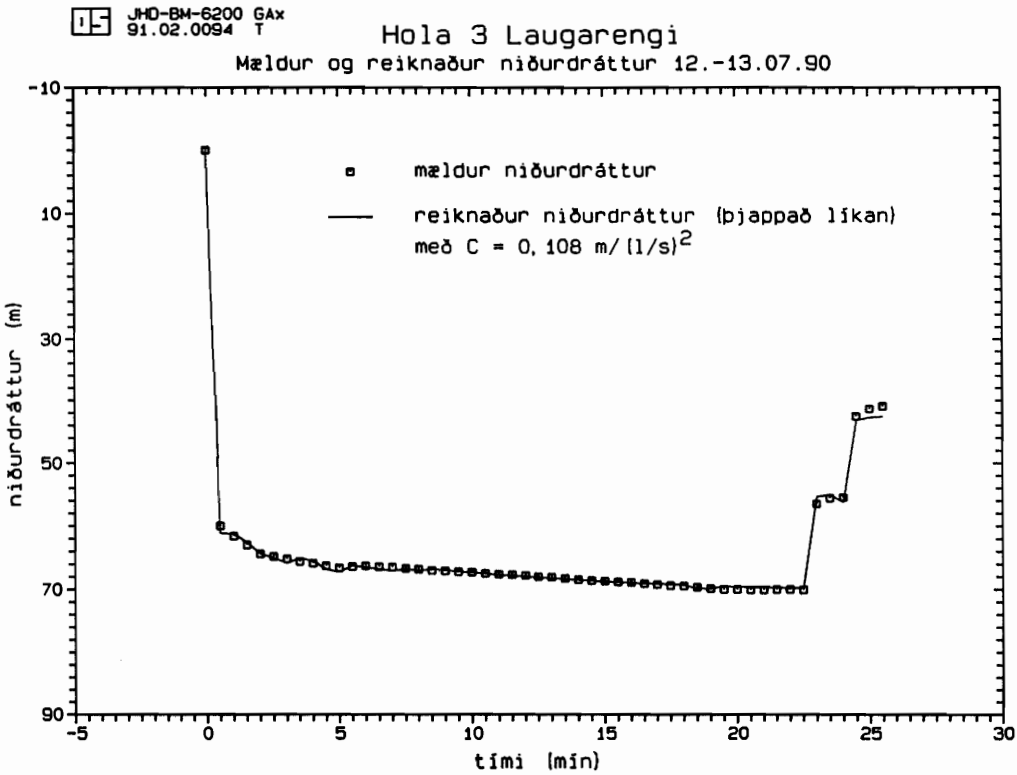
MYND 14. Mælt og reiknað vatnsborð í holu 2, 7.-12. júlí 1990



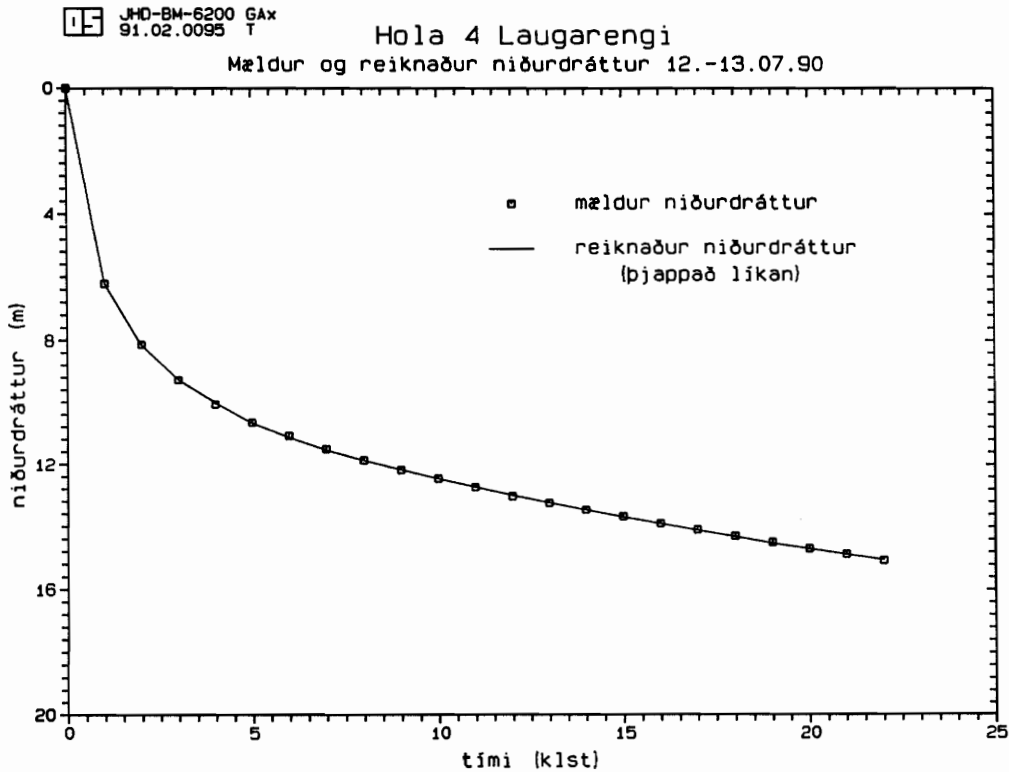
MYND 15. Einingarniðurdráttur í holum 2, 3 og 4 vegna dælingar úr holu 4



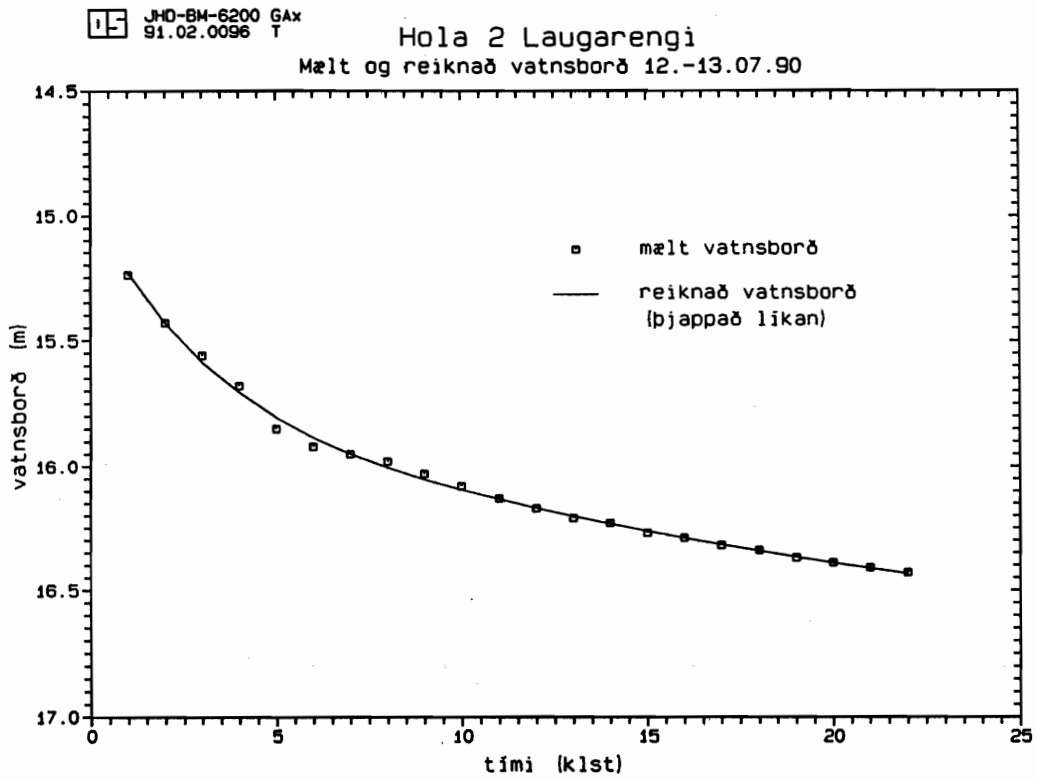
MYND 16. Einingarniðurdráttur í holum 2, 3 og 4 vegna dælingar úr holu 4, lógarítmískur tímaás



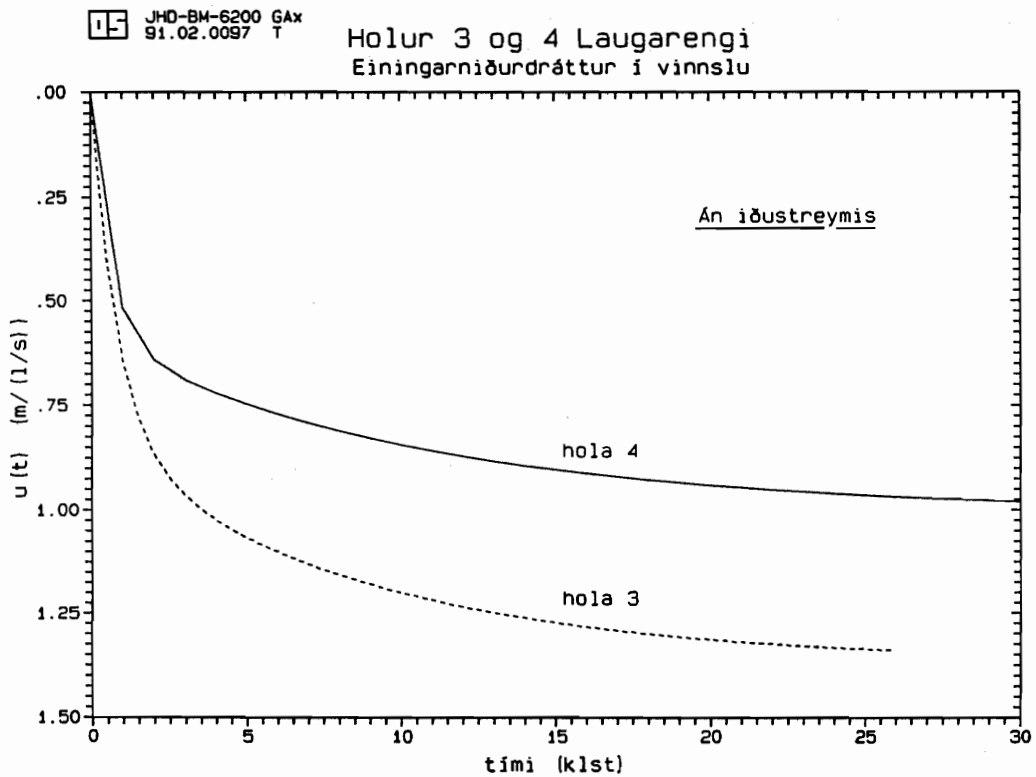
MYND 17. Mældur og reiknaður niðurdráttur í holu 3, 12.-13. júlí 1990



MYND 18. Mældur og reiknaður niðurdráttur í holu 4, 12.-13. júlí 1990

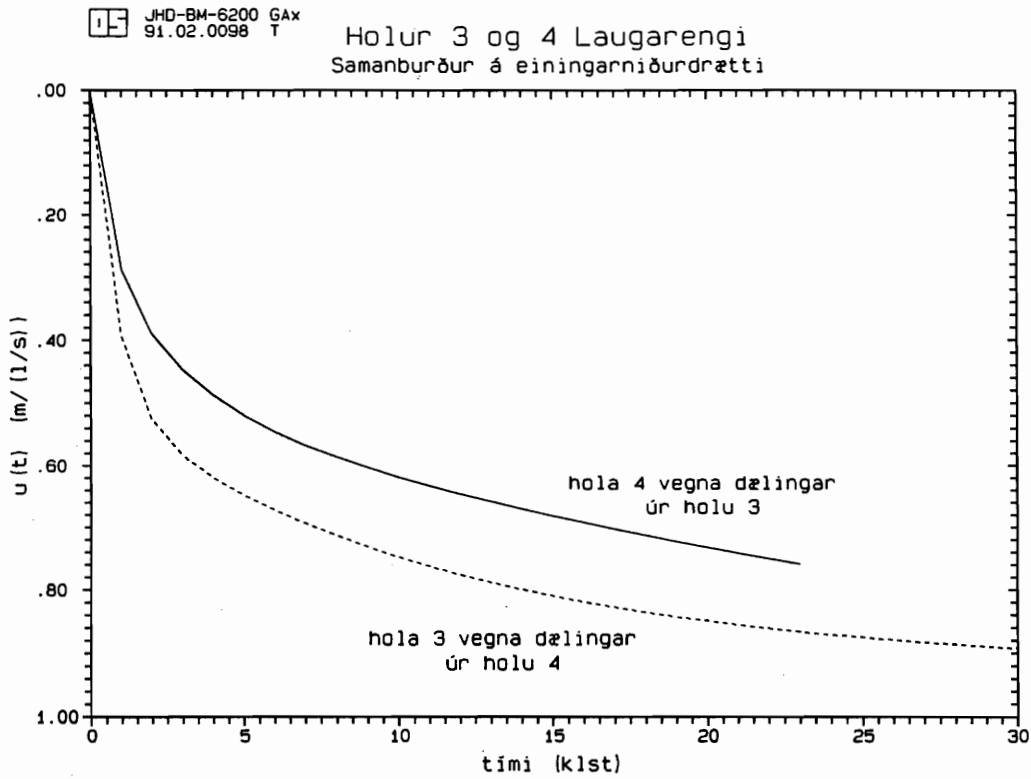


MYND 19. Mælt og reiknað vatnsborð í holu 2, 12.-13. júlí 1990

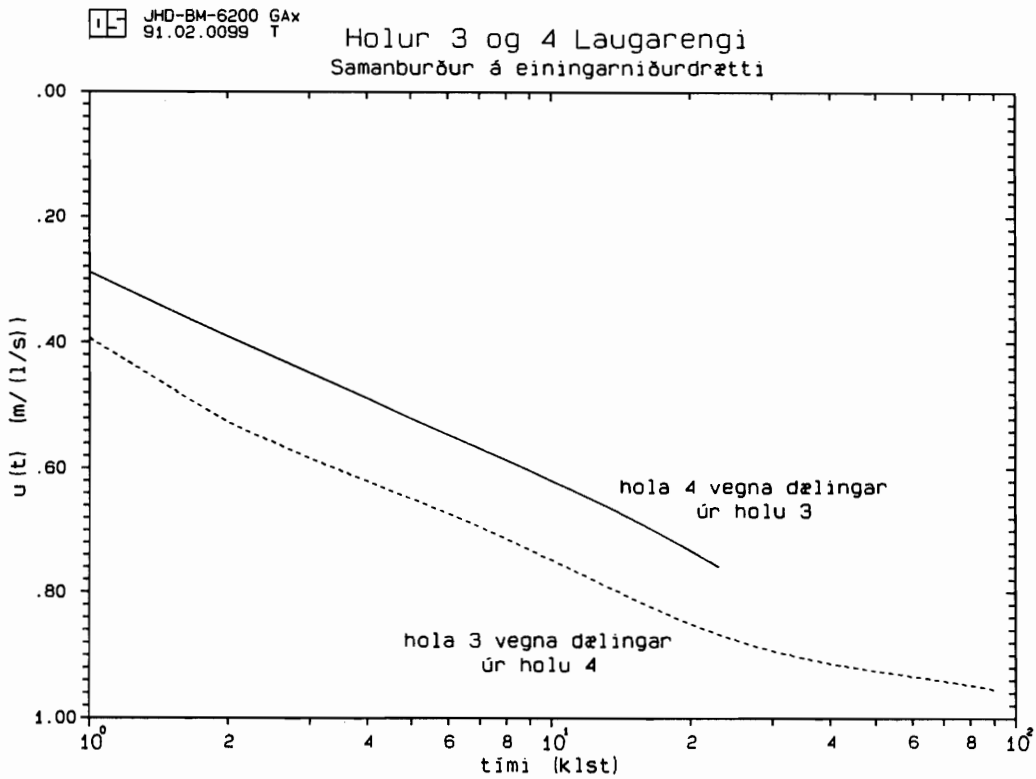


MYND 20. Einingarniðurdráttur í holum 3 og 4 í vinnslu

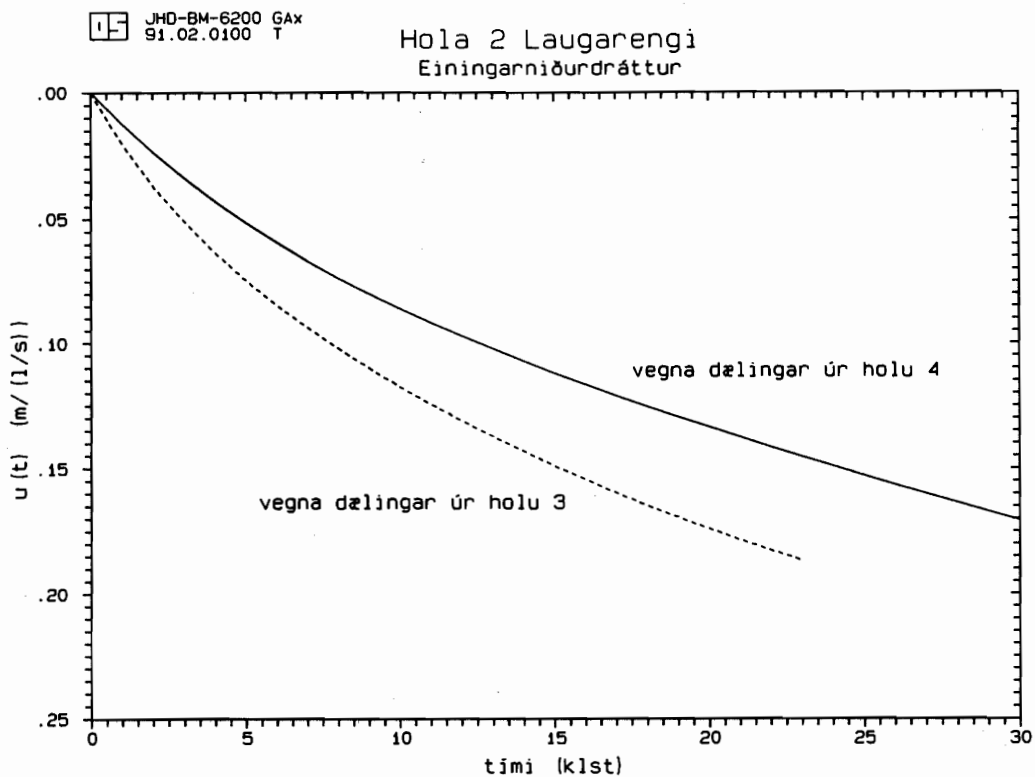




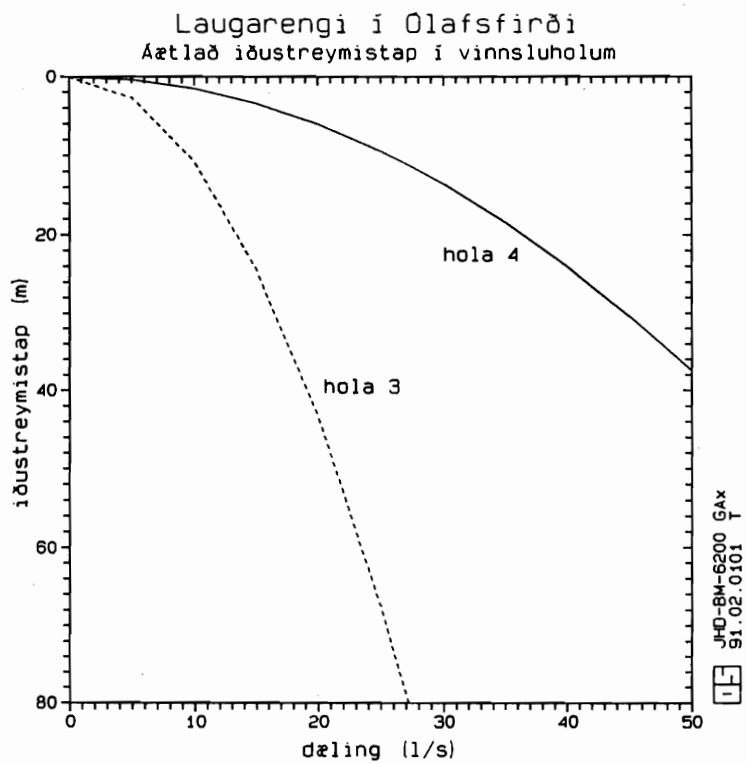
MYND 21. Samanburður á einingarniðurdrætti holu 4 vegna dælingar úr holu 3 og holu 3 vegna dælingar úr holu 4



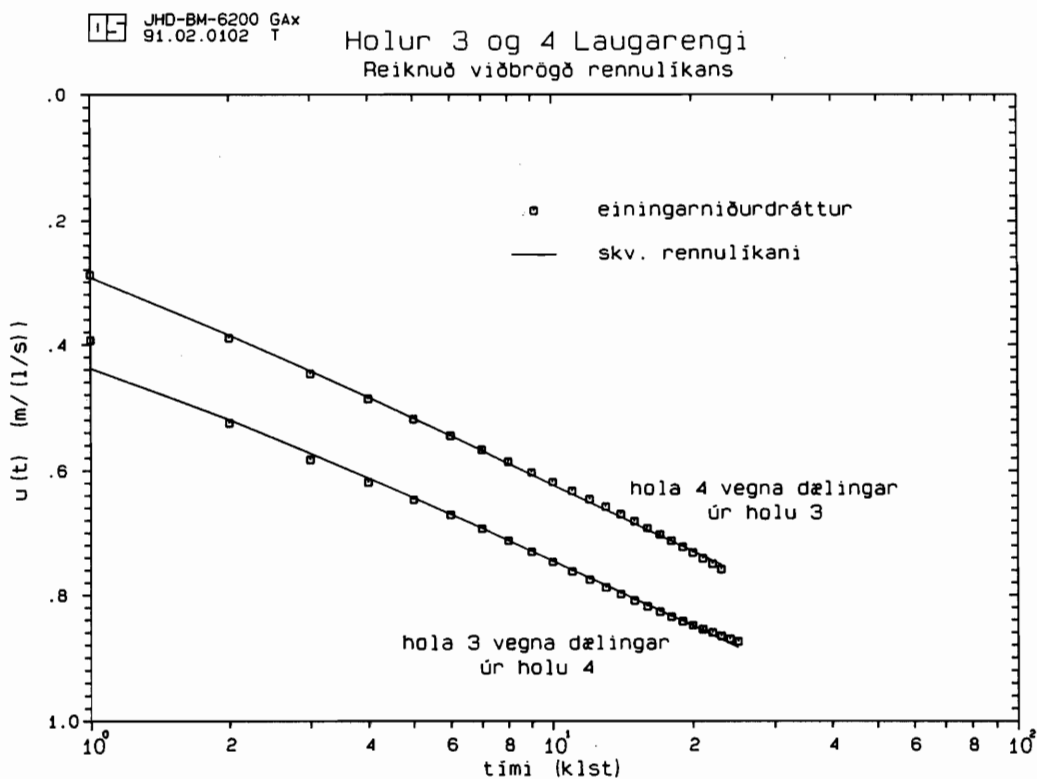
MYND 22. Samanburður á einingarniðurdrætti holu 4 vegna dælingar úr holu 3 og holu 3 vegna dælingar úr holu 4, lógaritmískur tímaás



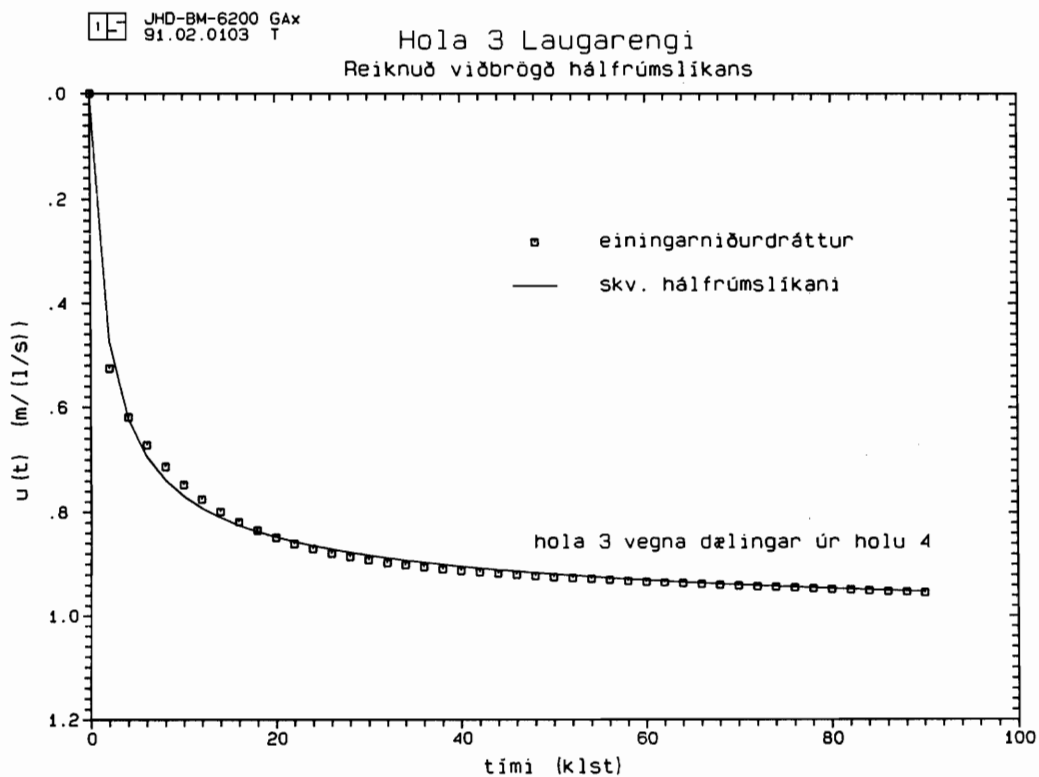
MYND 23. Einingarniðurdráttur holu 2



MYND 24. Iðustreymistap í vinnsluholum



MYND 25. Einingarniðurdráttur í holum 3 og 4 og reiknuð viðbrögð rennulíkans



MYND 26. Einingarniðurdráttur holu 3 og reiknuð viðbrögð hálfvæmslíkans

## 4. VINNSLUGÖGN OG ÚRVINNSLA ÞEIRRA

Mikilvægustu gögn um gerð og eðli jarðhitakerfis, sem nota má við mat á afkastagetu þess, fást ef fylgst er nákvæmlega með viðbrögðum kerfisins við langtímaþvinnslu árum eða áratugum saman. Því er gott eftirlit með vinnslu á jarðhitasvæðum og viðbrögðum þeirra, svo kallað vinnslueftirlit, afar mikilvægt. Reglulegt vinnslueftirlit með jarðhitakerfinu undir Laugarengi hófst í september 1989. Í þessum kafla verður fjallað um það hvernig vatnafræðilegt líkan af jarðhitakerfinu var þróað á grundvelli vinnslugagnanna, sem safnast hafa síðan.

### 4.1 Gögnin

Gögn um vinnslu og vatnsborð, sem safnað hefur verið síðan í september 1989, eru birt á mynd 27. Myndin sýnir vikumeðalvinnslu, áætlaða útfra mælingum á augnabliksdælingu sem gerðar voru annan hvern dag að jafnaði, auk vatnsborðsmælinga úr holu 4. Þessar mælingar hefur Hitaveita Ólafsfjarðar séð um. Frá því um miðjan júlí fram til loka október 1990 var hraðastýring holu 4 biluð og hola 3 því aðallega notuð. Ekki eru til mælingar á dælingu eða vatnsborði frá þessum tíma. Við líkangerðina (hermireikningana) var einnig stuðst við grófa áætlun á ársmeðalvinnslu úr jarðhitakerfinu frá upphafi nýtingar, sem birt er í töflu 6. Auk þess var áætlað að yfirþrýstingur í kerfinu hafi verið um 3,8 bör áður en vinnsla hófst úr holu 3.

### 4.2 Líkanið

Til þess að herma viðbrögð jarðhitakerfisins undir Laugarengi við vinnslu (mynd 27) var notað þjappað líkan. Þjöppuðum líkönum var lýst í kafla 3 hér að framan, en þjappað líkan var notað til þess að herma viðbrögð jarðhitakerfisins í prófuninni í júlí 1990. Það líkan náði þó aðeins yfir lítið brot af því vatnskerfi sem svarar langtímaþvinnslu úr jarðhitakerfinu. Þjöppuð líkón hafa verið notuð til þess að herma vinnslugögn (þ.e. vatnsborð og vinnslu) frá nokkuð mörgum

jarðhitakerfum á Íslandi (Guðni Axelsson, 1989b).

Þjappaða líkanið af jarðhitakerfinu undir Laugarengi er sýnt á mynd 28 og reiknuð viðbrögð þess, ásamt mældum viðbrögðum jarðhitakerfisins, á mynd 29. Ef tekið er tillit til ýmissa óvissuþátta þá falla reiknuðu viðbrögðin nokkuð vel að þeim mældu. Eins og áður segir fara hermireikningarnir þannig fram að fræðileg viðbrögð þjappaða líkansins, við vinnslusögu jarðhitakerfisins, eru felld sjálfvirkt með tölvu að mældum breytingum á vatnsborði. Reiknað var með iðustreymisstuðli  $C = 0,015 \text{ m}/(1/\text{s})^2$ . Eiginleikar þess líkans sem best féll að gögnunum eru:

$$\begin{aligned}\kappa_1 &= 16,0 \text{ ms}^2 \\ \kappa_2 &= 1640 \text{ ms}^2 \\ \sigma_1 &= 0,000057 \text{ ms} \\ \sigma_2 &= 0,000108 \text{ ms}\end{aligned}$$

Fyrsti geymirinn samsvarar væntanlega að miklu leyti geymum 1 og 2 í líkaninu sem notað var í kafla 3 (mynd 11, tafla 3), eða innri hluta jarðhitakerfisins. Ef gengið er útfra poruhuta 5% fæst að rúmmál hans sé um  $0,37 \text{ km}^3$ . Leiðnin milli geyma 1 og 2 ( $\sigma_1$ ) er lítil, sem endurspeglar frekar litla lekt innan jarðhitakerfisins. Annar geymirinn samsvarar væntanlega bæði ytri og dýpri hluta jarðhitakerfisins og vatnskerfinu þar fyrir utan. Rýmd hans ( $\kappa_2$ ) er þó mjög mikil og gæti hann því að einhverju leyti samsvarað grunnvatnskerfinu ofan jarðhitakerfisins. Rýmd grunnvatnskerfisins stjórnast af frjálsu vatnsborði þess en ekki þjappanleika og er rýmd af völdum frjáls vatnsborðs að öllu jöfnu a.m.k. þremur stærðargráðum meiri en rýmd af völdum þjappanleika. Sá hluti jarðhitakerfisins sem geymar 1 og 2 herma virðist síðan í tengslum við vatnskerfi með föstum þrýstingi, t.d. grunnvatnskerfið á svæðinu. Leiðnin milli geymis 2 og þessa kerfis ( $\sigma_2$ ) er þokkaleg, sem bendir til þess að lekt minnki lítið er fjær jarðhitakerfinu dregur.

Rétt er að benda á það hér að jarðhitakerfið undir Laugarengi gæti verið hluti af mun stærra jarðhitakerfi og vatnskerfið með

fasta þrýstingnum gæti samsvarað því að einhverju leyti. Jarðhitasvæðið á Skeggjabrekkudal er í aðeins 2 km fjarlægð frá Laugarengi og ekki er ólíklegt að tengsl séu þar á milli, e.t.v. á miklu dýpi.

### 4.3 Einingarniðurdráttur

Erfitt er að greina nákvæmlega viðbrögð jarðhitakerfisins í vinnslugögnunum (mynd 29) vegna þess hve vinnslan er breytileg. Til þess að skoða langtíma viðbrögð jarðhitakerfisins nánar var því gripið til þess ráðs að nota þjappaða líkanið til þess að reikna einingarniðurdrátt kerfisins, sem er eins og áður hefur verið lýst viðbrögð kerfis við stöðugri dælingu á einum l/s. Í kafla 3 var birtur einingarniðurdráttur fyrir 5 daga dælingu, en hér er um að ræða einingarniðurdrátt vegna langtíma vinnslu. Niðurstöðurnar eru birtar á myndum 30 og 31, og er mynd 31 með lógaritmískum tímaás.

Samkvæmt myndum 30 og 31 nær einingarniðurdrátturinn jafnvægi á 2-3 árum. Það þýðir að ef dæling er stöðug þá næst á þeim tíma jafnvægi milli þess sem dælt er og vatns sem streymir að utan inn í kerfið. Líklegasta skýringin á því er eins og áður hefur komið fram (mynd 28) að jarðhitakerfið sé í tengslum við vatnskerfi sem er svo gjöfult að þrýstingur breytist þar ekki.

Í kafla 3 var lekt innri hluta jarðhitakerfisins áætluð. Til þess að leggja mat á meðallekt vatnskerfisins í heild sinni, þ.e. jafnt jarðhitakerfisins sem vatnskerfisins utan og ofan þess, voru viðbrögð einfalds hálfórúmslíkans felld að einingarniðurdrætti jarðhitakerfisins. Hér var um að ræða líkan af einsleitu, einsátta, óendanlegu hálfórúmi (jörð) með föstum þrýstingi við yfirborð. Niðurstöður þessara reikninga eru sýndar á mynd 32. Þar sést að viðbrögð líkansins falla vel að einingarniðurdrættinum. Hálfórúmslíkanið endurspeglar meðaleiginleika alls vatnskerfisins. Lekt líkansins var áætluð  $k = 1,0 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ . Í kafla 3 var meðallekt innri hluta jarðhitakerfisins áætluð  $k = 2,8 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ , eða aðeins lítið eitt meiri.

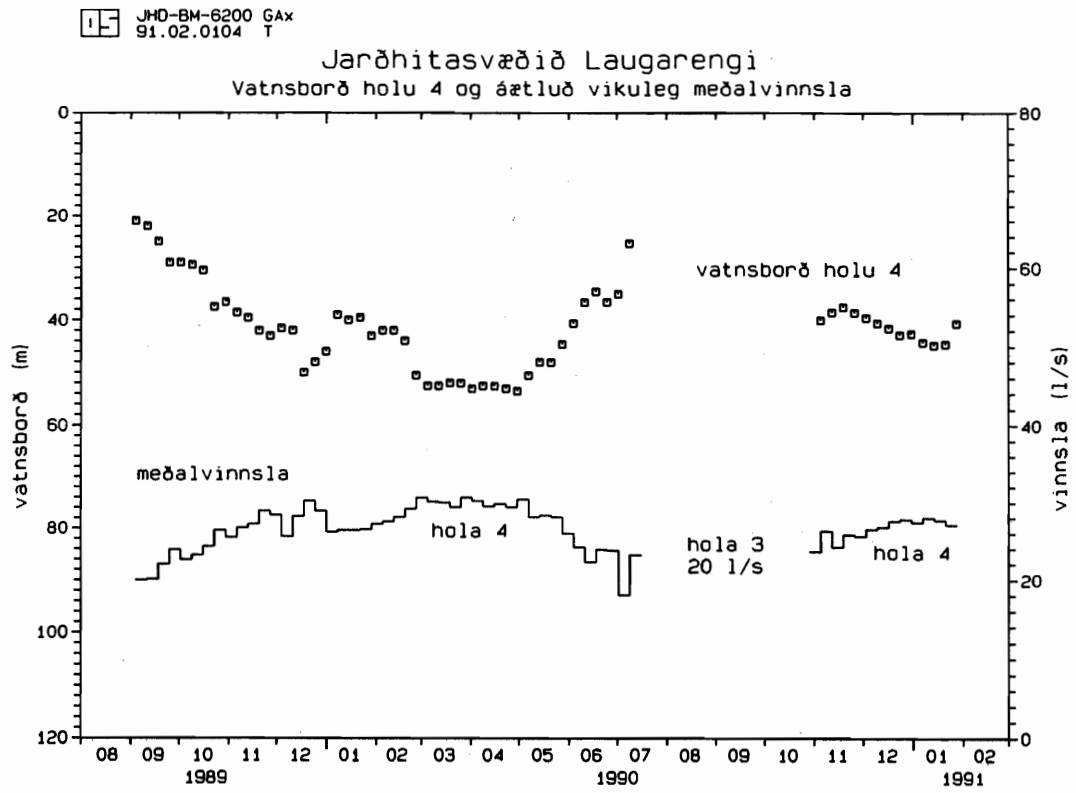
Borið saman við önnur jarðhitakerfi þá er meðallekt vatnskerfisins í heild t.d. mjög svipuð og meðallekt jarðhitakerfisins við Hamar í Svarfaðardal (Guðni Axelsson, 1988) og sambærileg við meðallekt annarra sæmilega afkastamikilla jarðhitkerfa á Íslandi. Lekt innsta hluta jarðhitakerfisins við Hamar er þó mun meiri eins og áður hefur komið fram. Á hinn bóginn virðist vatnskerfið undir Laugarengi mun opnara en kerfið við Hamar sem virðist takmarkað fyrir aðstreymi. Lekt kerfisins undir Laugarengi virðist einnig um stærðargráðu meiri en lekt í jarðhitakerfum frammi í Eyjafirði.

Samkvæmt hálfórúmslíkaninu er vatnsrýmd Laugarengiskerfisins mjög mikil. Bendir það til þess að rýmdin stjórnist ekki eingöngu af þjappanleika eins og líkanið gerir ráð fyrir, heldur einnig af frjálsum vatnsborði grunnvatnskerfisins á svæðinu.

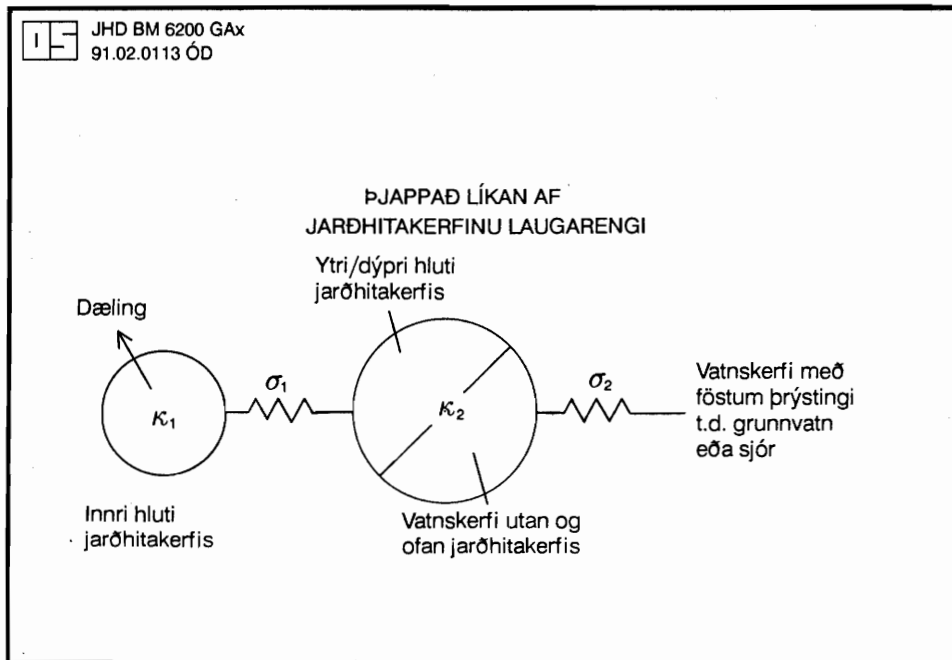
Rétt er að leggja áherslu á það að niðurstöður þessa kafla eru byggðar á aðeins 17 mánaða vinnslusögu. Þar af leiðandi eru atriði eins og eiginleikar þjappaða líkansins og nákvæm lögun einingarniðurdráttarins frekar óviss. Rétt væri því að nokkrum árum liðnum að endurskoða þessa úrvinnslu. Því er mikilvægt að nákvæmu vinnsluefirliti verði haldið áfram.

TAFLA 6. Áætluð ársmeðalvinnsla úr jarðhitasvæðinu á Laugarengi frá upphafi vinnslu

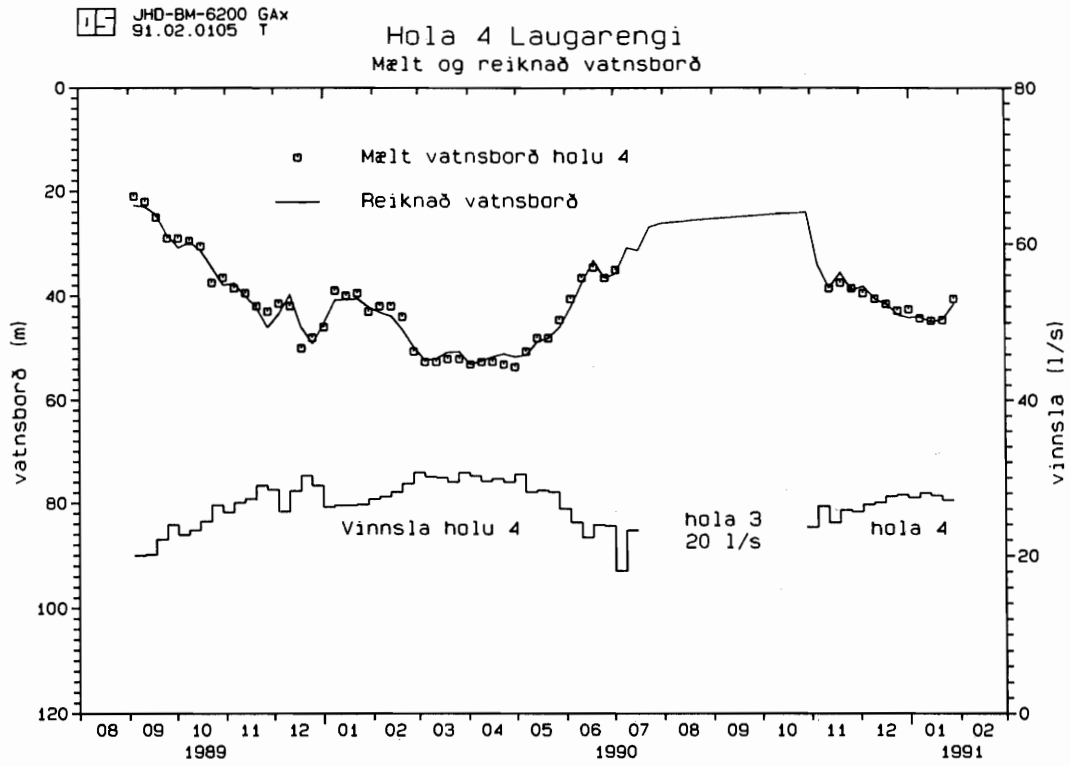
Ár	Meðalvinnsla (l/s)	Athugasemdir
1975	13,5	hola 3, frá júlí
1976	13,5	hola 3
1977	15,5	hola 3
1978	17,5	hola 3
1979-1980	19,5	hola 3
1981-1982	22,0	hola 3
1983-1986	24,0	hola 4
1987	24,2	hola 4
1988	24,4	hola 4
1989	24,7	hola 4
1990	25,0	hola 4, mælt/áætlað



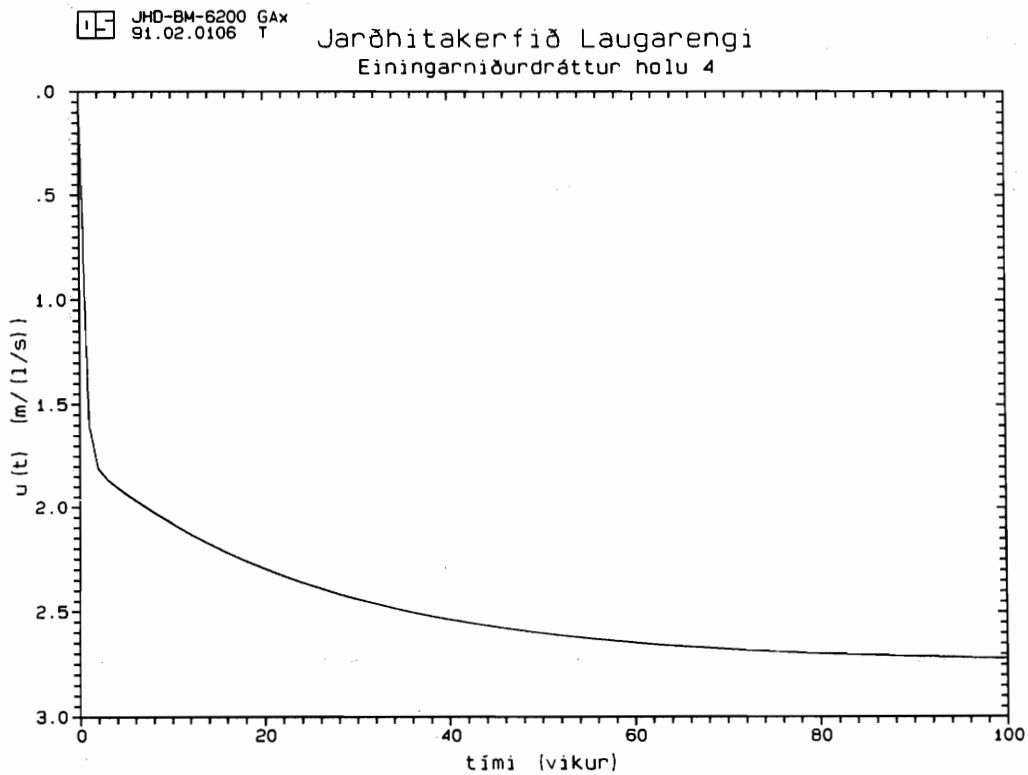
MYND 27. Vatnsborð í holu 4 og vikuleg meðalvinnsla frá því í september 1989



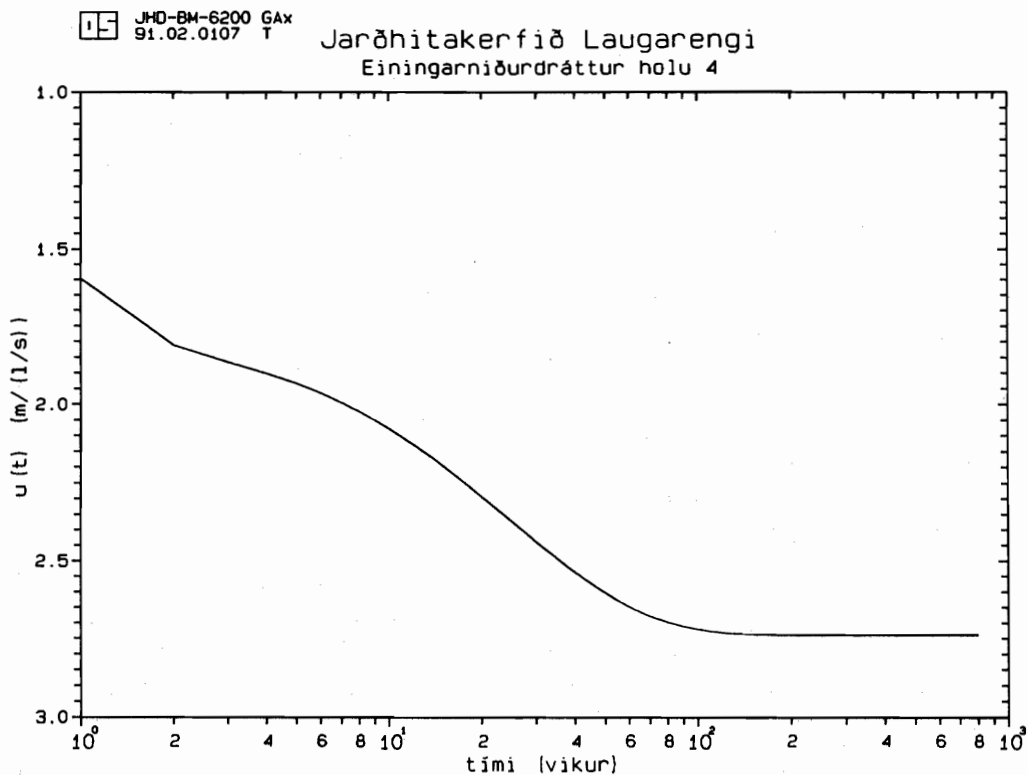
MYND 28. Þjappað líkan af jarðhitakerfinu undir Laugarengi



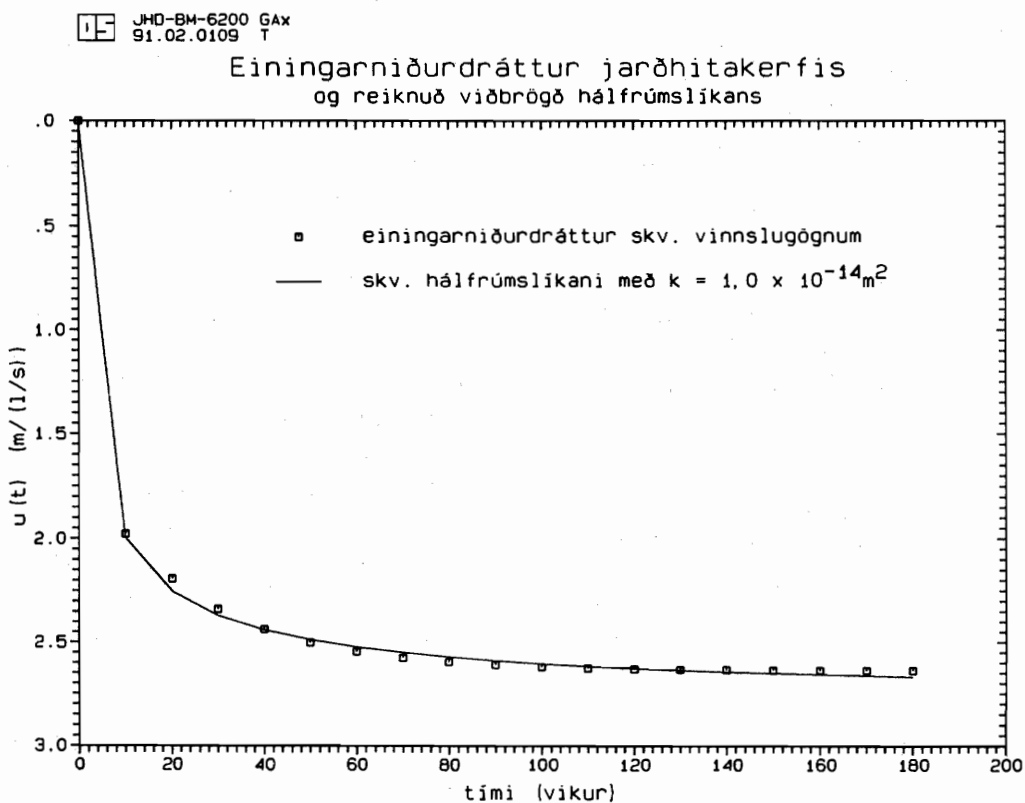
MYND 29. Mælt og reiknað vatnsborð í holu 4 frá því í september 1989



MYND 30. Einingarniðurdráttur holu 4 við langtímvinnslu



MYND 31. Einingarniðurdráttur holu 4 við langtímaþvinnslu, lógaritmískur tímaás



MYND 32. Einingarniðurdráttur jarðhitakerfis og reiknuð viðbrögð hálfvæðslíkans



## 5. VATNSBORÐSSPÁR

Þjappaða líkanið, sem notað var í kafla 4 til þess að herma vinnslugögnin, var að síðustu notað, ásamt niðurstöðum úr kafla 3, til þess að spá fyrir um vatnsborðsbreytingar í holu 4. Niðurstöðurnar eru birtar á þremur myndum. Mynd 33 sýnir vatnsborðsspár fyrir fimm mismunandi tilfelli stöðugrar ársmeðalvinnslu. Myndir 34 og 35 sýna vatnsborðsspár þar sem gert hefur verið ráð fyrir 1,5-2,0% árlegum vexti í vatnsnotkun (sjá töflu 7). Orkuspárnefnd (1987) gerir ráð fyrir 1,1% árlegum vexti í orkunotkun til húshitunar á Norðurlandi fram til ársins 2010. Ef gert er ráð fyrir slíkum vexti á Ólafsfirði og að eingöngu Laugarengi mæti honum jafngildir það 1,8% árlegri vinnsluaukningu.

Ljóst er að Ólafsfirðingar nýta heita vatnið illa. Þetta sést m.a. á því að munur á vatnsnotkun að sumri og vetri er óeðlilega lítill. Einnig sést þetta vel ef orkunotkun á Ólafsfirði er borin saman við orkunotkun annarra hitaveitna á landinu sem þjóna sambærilegum íbúafjölda.

Ef sölukerfi Hitaveitu Ólafsfjarðar verður breytt þannig að allt vatn verði selt samkvæmt magnmælum í stað hemla, má væntanlega ná verulegum sparnaði í vatnsnotkun, m.a. vegna betri stillingar ofnakerfa í kjölfarið. Ef mið er t.d. tekið af Hitaveitu Dalvíkur og Hitaveitu Egilsstaða og Fella, sem nýlega hafa breytt um sölufrirkomulag, má áætla að við núverandi aðstæður mætti minnka ársmeðalnotkunina niður í 25-30 l/s, eða um 38-48%. Til samanburðar má geta þess að á Dalvík minnkaði orkunotkun um 34% við sölukerfisbreytingu árið 1986.

Myndir 34 og 35 sýna tvær vatnsborðsspár hvor mynd. Annars vegar spá þar sem gert er ráð fyrir óbreyttu sölufrirkomulagi og hins vegar spá þar sem gert er ráð fyrir því að á árinu 1992 verði farið að selja allt vatn samkvæmt magnmælum. Gert hefur verið ráð fyrir því að við það minnki meðalvinnsla á Laugarengi um 1/3 (tafla 6).

Myndir 33 til 35 sýna spár um lægstu vatnsborðsstöðu hvers árs. Spárnar eru reiknaðar þannig að í fyrsta lagi er vatnsborð í innsta hluta jarðhitakerfisins reiknað með þjappaða líkaninu (mynd 28) útfrá ársmeðalvinnslu. Í öðru lagi er bætt við það áætlaðri viðbótarlækkun vatnsborðs vegna aukinnar vinnslu að vetri (hér áætluð um 25%). Og í þriðja lagi þá er iðustreymistapi í holu 4, við hámarksvinnslu, bætt við vatnsborðsspárnar.

Um vatnsborðsspárnar má segja eftirfarandi:

- Ef ármeðalvinnsla helst óbreytt, þ.e. um 25 l/s, er því spáð að vatnsborð lækki óverulega.
- Ef ársmeðalvinnsla eykst þarf að síkka dælu í holu 4, sem nú er á 60 m dýpi. Með síkkun í 100 m má sennilega auka ársmeðalvinnsluna í 33 l/s.
- Miðað við óbreytt sölukerfi og 1,5-2,0% árlegan vöxt í vinnslu á Laugarengi þarf að síkka dælu í holu 4 strax á þessu ári (1991). Við 2,0% vöxt er því spáð að vatnsborð fari lægst í 80 m árið 2000 og 112 m árið 2010.
- Ef samdráttur í vinnslu á Laugarengi verður um 1/3 við sölukerfisbreytingu er því spáð að vatnsborð í holu 4 fari ekki niður fyrir núverandi dæluþýpi (60 m) fyrir árið 2010, þrátt fyrir 2,0% árlegan vöxt í vinnslu eftir breytinguna.

Hér er gert ráð fyrir því að við sölukerfisbreytingu minnki vinnsla á Laugarengi um 1/3 og að vinnsla á Skeggjabrekkudal minnki sambærilega. En vatnið á Skeggjabrekkudal er mjög súrefnisríkt og tærandi og því æskilegt að minnka hlut þess. Ef jafn mikill samdráttur verður í vatnsnotkun og hér er áætlað, verður því mögulegt að minnka vinnsluna á Skeggjabrekkudal hlutfallslega meira en vinnsluna á Laugarengi.

Mikilvægt er að hafa í huga að hér er einungis spáð vatnsborðsbreytingum. Þar sem jarðhitakerfið undir Laugarengi virðist í góðum tengslum við kaldari vatnskerfi utan þess er líklegt að kaldara vatn streymi inn í

*TAFLA 7. Áætluð ársmeðalvinnsla 1990 - 2010 fyrir mismunandi árlegan vöxt í vatnsnotkun og mismunandi sölufyrirkomulag*

Ár	tilfelli A (l/s)	tilfelli B (l/s)	tilfelli C (l/s)	tilfelli D (l/s)
1990	25,0	25,0	25,0	25,0
1991	25,4	25,4	25,5	25,5
1992	25,8	16,9	26,0	17,3
1993	26,1	17,2	26,5	17,6
1994	26,5	17,4	27,1	18,0
1995	26,9	17,7	27,6	18,4
1996	27,3	18,0	28,2	18,7
1997	27,7	18,2	28,7	19,1
1998	28,2	18,5	29,3	19,5
1999	28,6	18,8	29,9	19,9
2000	29,0	19,1	30,5	20,3
2001	29,4	19,3	31,1	20,7
2002	29,9	19,6	31,7	21,1
2003	30,3	19,9	32,3	21,5
2004	30,8	20,2	33,0	21,9
2005	31,3	20,5	33,6	22,4
2006	31,7	20,8	34,3	22,8
2007	32,2	21,1	35,0	23,3
2008	32,7	21,5	35,7	23,7
2009	33,2	21,8	36,4	24,2
2010	33,7	22,1	37,1	24,7

Tilfelli A: 1,5% vöxtur og óbreytt sölufyrirkomulag.

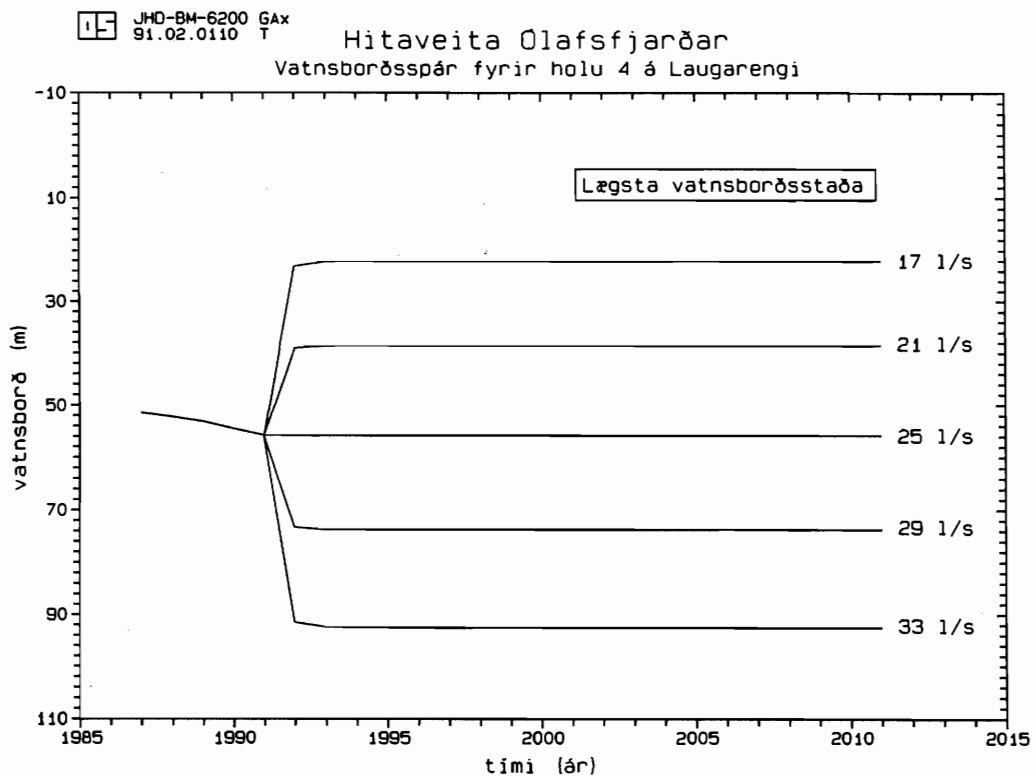
Tilfelli B: 1,5% vöxtur og sölufyrirkomulagi breytt 1992.

Tilfelli C: 2,0% vöxtur og óbreytt sölufyrirkomulag.

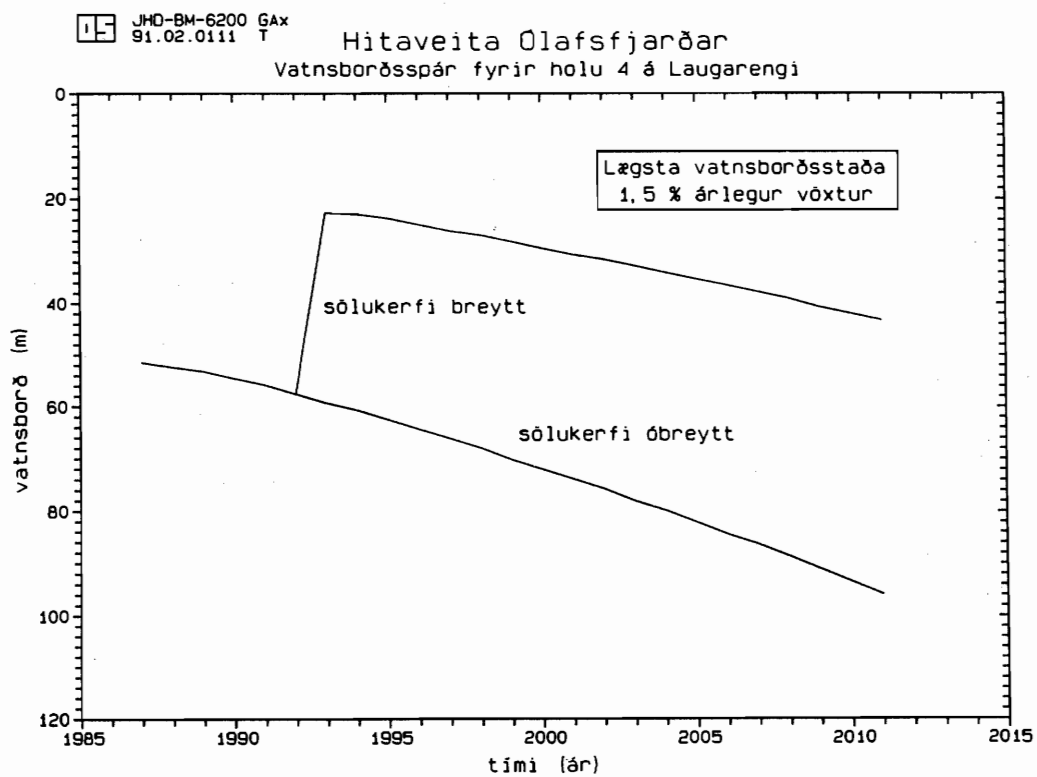
Tilfelli D: 2,0% vöxtur og sölufyrirkomulagi breytt 1992.

jarðhitakerfið, eins og reyndar flest jarðhitakerfi sem nýtt eru á Íslandi. Þetta þýðir að vatn úr jarðhitasvæðinu á Laugarengi mun fara kólnandi einhvern tímann í framtíðinni. Hvenær það verður er ómögulegt að segja að svo stöddu. Þó er ekki von á miklum breytingum næstu tvo áratuginum því hiti vatnsins úr hola 4 hefur ekki lækkað þann áratug sem hún hefur verið nýtt. Breytingar í efnainnihaldi þann tíma (Auður Ingimarsdóttir, 1990) benda heldur ekki til yfirvofandi kólnunar.

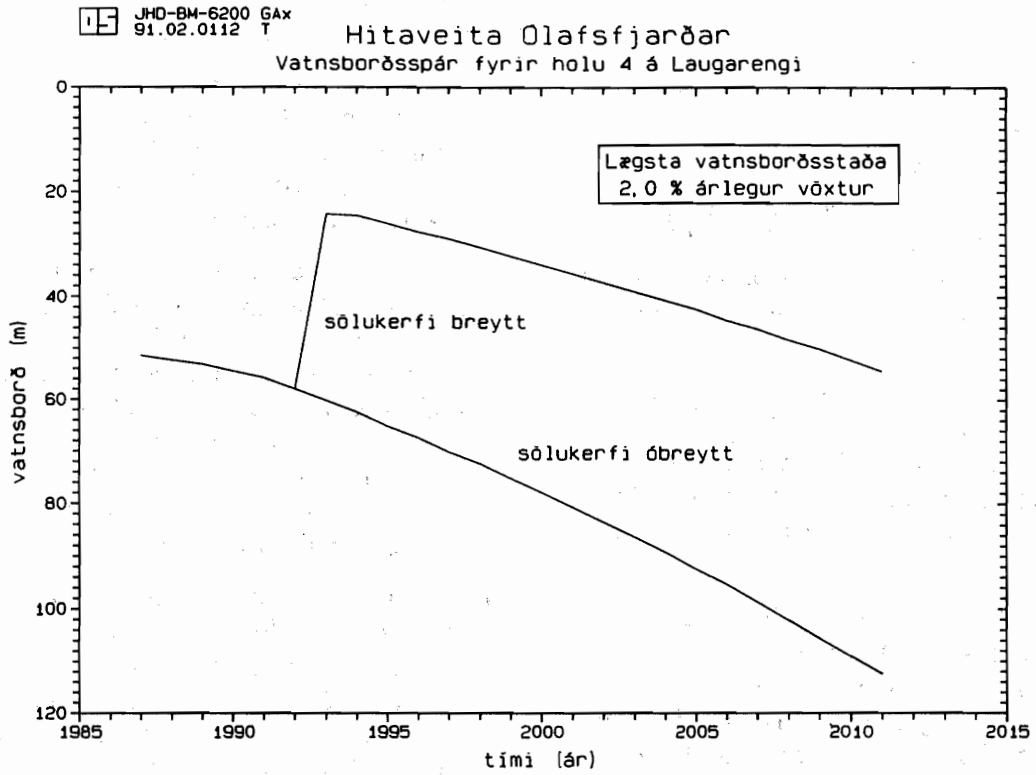
Minni vinnsla og niðurdráttur í kjölfar sölukerfisbreytingar mun lengja endingartíma jarðhitakerfisins undir Laugarengi verulega, sennilega um nokkra áratugi. Auk þess munu hola 3 á Laugarengi og hola I á Skegjabrekkudal nægja sem varaafli fyrir Hitaveitu Ólafsfjarðar í kjölfar sölukerfisbreytingar. Þá verður ekki nauðsynlegt að bora nýja varaholu næstu árin, en eins og nú er nægir hola 3 ekki sem varahola á mestu álagstímum.



MYND 33. Vatnsborðsspár fyrir holu 4, stöðug ársmeðalvinnsla



MYND 34. Vatnsborðsspár fyrir holu 4, 1,5% árlegur vöxtur í vinnslu



MYND 35. Vatnsborðsspár fyrir holu 4, 2,0% árlegur vöxtur í vinnslu

## 6. HELSTU NIÐURSTÖÐUR

Helstu niðurstöður þessara úttektar eru eftirfarandi:

- Innsti hluti jarðhitakerfisins undir Laugarengi virðist bundinn þröngum sprungusveimi eða gangi.
- Mun minni afköst holu 3 en holu 4 stafa aðallega af meira iðustreymistapi í og við holu 3. Er það að hluta til vegna þrengri æða við holu 3 og að hluta til vegna þess að hún er mun grennri en hola 4.
- Með einföldu tveggja geyma þjöppuðu líkani tókst að herma langtíma vatnsborðsbreytingar í jarðhitakerfinu undir Laugarengi nokkuð nákvæmlega. Byggt var á vinnslugögnum frá september 1989 til janúar 1991.
- Samkvæmt þjappaða líkaninu virðist jarðhitakerfið í góðum tengslum við vatnskerfi utan þess sem síðan tengist öðru mjög gjöfulu vatnskerfi, t.d. grunnvatnskerfi eða öflugra jarðhitakerfi. Meðallekt vatnskerfisins í heild er þokkaleg ( $k = 1,0 \times 10^{-14} \text{m}^2$ ).
- Ef ársmeðalvinnsla helst óbreytt (25 l/s) er því spáð að vatnsborð lækki óverulega, en ef vinnslan eykst þarf fljótlega að síkka dælu í holu 4. Með síkkun í 100 m má auka ársmeðalvinnsluna í 33 l/s.
- Með **sölukerfisbreytingu** er væntanlega hægt að ná **verulegum sparnaði í vatnsnotkun** (1/3) og er því spáð að þá muni vatnsborð í holu 4 ekki fara niður fyrir 60 m fyrr en eftir árið 2010, þrátt fyrir 2% árlegan vöxt í vinnslu. Aftur á móti er því spáð að við 2% vöxt án sölukerfisbreytingar fari vatnsborð lægst í 112 m í holu 4 árið 2010.
- Vegna minni vinnslu í kjölfar sölukerfisbreytingar mun líftími jarðhitakerfisins undir Laugarengi lengjast verulega auk þess sem hægt verður að fresta borun nýrrar varaholu um allmörg ár.
- Hermireikningarnir og vatnsborðsspárnar eru byggð á aðeins 17 mánaða vinnslusögu. Rétt væri því að endurskoða þá þætti úrvinnslunnar að nokkrum árum liðnum.
- Mikilvægt er að nákvæmu vinnslueftirliti verði haldið áfram með jarðhitakerfinu undir Laugarengi. Fylgjast þarf með vinnslu úr kerfinu, vatnsborði í því, hitastigi vatnsins og efnainnihaldi þess. Líkur eru á því að vatn úr kerfinu muni fara kólnandi einhverntíma í framtíðinni, en oft má sjá fyrirboða kólnunar í breytingum á efnainnihaldi vatnsins.
- Einnig er mikilvægt að haldið verði áfram þeim jarðhitarannsóknum á Laugarengissvæðinu, sem nú eru hafnar, og gert er ráð fyrir í samningi Hitaveitu Ólafsfjarðar og Orkustofnunar. Á næstunni ætti að leggja áherslu á borholumælingar í holu 4, greiningu jarðлага í borholum á svæðinu og kortlagningu sprungna og misgengja í nágrenninu.

## HEIMILDASKRÁ

- Axel Björnsson, Guðni Axelsson og Ólafur G. Flóvenz, 1990: *Uppruni hvera og lauga á Íslandi*. Náttúrufræðingurinn, 60 (1): 15-38.
- Auður Ingimardóttir, 1990: Hitaveita Ólafsfjarðar. Eftirlit með hitaveituvatni 1989. Orkustofnun, greinargerð AuI-90/01, 7 s.
- Guðni Axelsson, 1987: *Jarðhitasvæðið Urriðavatni. Vatnafræðileg athugun í ágúst 1987*. Orkustofnun, OS-87048/JHD-28 B, 42s. Unnið fyrir Hitaveitu Egilsstaða og Fella.
- Guðni Axelsson, 1988: *Jarðhitasvæðið að Hamri í Svarfaðardal. Um afköst vinnsluhola Hitaveitu Dalvíkur*. Orkustofnun, OS-88053/JHD-11, 38s. Unnið fyrir Hitaveitu Dalvíkur.
- Guðni Axelsson, 1989a: *Simulation of pressure response data from geothermal reservoirs by lumped parameter models*. Proceedings, 14th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, California, janúar 1989: 257-263.
- Guðni Axelsson, 1989b: *Forðafræði jarðhitans. Vinnslueftirlit, hermireikningar og vinnsluspár*. Erindi flutt á aðalfundi Sambands íslenskra hitaveitna, Egilsstöðum, júní 1989, 9 s.
- Kristján Sæmundsson, 1981: Varðar borun fyrir Hitaveitu Ólafsfjarðar. Orkustofnun, greinargerð KS-81/06, 2 s.
- Orkuspárnefnd, 1986: *Jarðvarmaspá 1987-2015. Spá um vinnslu og notkun jarðvarma*. Orkustofnun, OS-87045/OBD-01, 178 s.
- Ólafur G. Flóvenz, Guðni Axelsson og Ásgrímur Guðmundsson, 1991: *Rannsóknarboranir við Botn og Hrafnagil í Eyjafirði*. Orkustofnun, skýrsla í handriti. Unnin fyrir Hitaveitu Akureyrar.
- Ragna Karlsdóttir og Jóhann Helgason, 1978: *Jarðhitakönnun í Ólafsfirði*. Orkustofnun, OS-JHD-7803, 48 s.

## ENGLISH SUMMARY

The low-temperature geothermal field at Laugarengi is one of two geothermal fields utilized for space heating by the town of Ólafsfjörður (pop. 1200) in Central Northern Iceland. This report presents the results of a reservoir engineering study of the Laugarengi field. The study included a week long interference and buildup test performed during July 1990, analysis of long-term production and water-level data collected since September 1989 and water-level predictions up to the year 2010 for well 4, the main production well in the field.

It was possible to simulate accurately the water level changes observed in the geothermal wells at Laugarengi by simple models, for example lumped models. The innermost part of the geothermal system appears to be a narrow fracture zone or a dike. The Laugarengi geothermal reservoir appears to be connected to a much larger hydrological system (ground water system or a larger geothermal system) which controls the long-term drawdown in the reservoir. The drawdown reaches an equilibrium after 2-3 years of constant production. The average permeability of the hydrological system is estimated to be about  $10^{-14} m^2$ .

Well 3 at Laugarengi is not nearly as productive as well 4. This is mostly the result of much greater drawdown due to turbulence in well 3.

A lumped model of the Laugarengi reservoir predicts that the long-term average water-level in the reservoir will not change significantly (currently above 60 m depth) in the future if the yearly average production stays constant at the present rate of 25 l/s. By assuming, however, a 2 % yearly increase in production the model predicts that by the year 2010 the water-level will drop to 112 m depth.

It is evident that at Ólafsfjörður the energy of the geothermal water is not used very efficiently. It is suggested that by charging the customers of the District Heating Service based on the total volume of water used, instead of the rate of flow, a 30 - 40 % reduction in the demand for hot water can be expected. If a reduction of this magnitude in the production at Laugarengi is achieved then the lumped model predicts that the water-level in well 4 will stay well above 60 m until the year 2010 even though a 2 % yearly increase in production is assumed.

It is very important that careful monitoring of the Laugarengi geothermal field should continue in the future, including monitoring of the chemical content of the water produced. More data will enable better analysis and water-level predictions in the future as well as accurate predictions of the cooling of the reservoir, which is impending sometime in the distant future.

