



ORKUSTOFNUN  
Jarðhitadeild

## **LAUGALAND Í EYJAFJARÐARSVEIT**

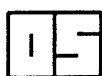
**Tilraun með niðurdælingu vatns**

Guðni Axelsson, Ólafur G. Flóvenz  
Hrefna Kristmannsdóttir, Guðrún Sverrisdóttir

Samstarfsverkefni Hitaveitu Akureyrar og Orkustofnunar

OS-93052/JHD-13

Október 1993



**ORKUSTOFNUN**  
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verknr. 760 601

## **LAUGALAND Í EYJAFJARÐARSVEIT**

**Tilraun með niðurdælingu vatns**

Guðni Axelsson, Ólafur G. Flóvenz  
Hrefna Kristmannsdóttir, Guðrún Sverrisdóttir

Samstarfsverkefni Hitaveitu Akureyrar og Orkustofnunar

OS-93052/JHD-13

Október 1993

ISBN 9979-827-29-7

## ÁGRIP

Hitaveita Akureyrar og Orkustofnun stóðu vorið 1991 sameiginlega að tilraun með niðurdælingu í jarðhitasvæðið við Laugaland í Eyjafjarðarsveit. Hitaveitan sá um framkvæmd hennar en Orkustofnun skipulagði verkið og annaðist úrvinnslu. Markmið tilraunarinnar var að kanna hvort auka megi hámarksafl og vinnslugetu svæðisins með því að dæla volgu eða köldu vatni niður um holur sem ekki eru nýttar. Niðurstöður tilraunarinnar munu einnig hafa fordæmisgildi fyrir margar aðrar hitaveitur.

Tilraunin fór þannig fram að 80°C heitu vatni frá jarðhitasvæðinu á Ytri-Tjörnum var dælt niður um holu LJ-8 á Laugalandi, sem er ein dýpsta hola á landinu, rúmir 2800 m. Þessi hola hentar vel til niðurdælingar því ætla má að vatn sem dælt er niður fari út um margar smáar æðar og náí að komast í sneringu við stórt rúmmál heits bergs áður en því er dælt aftur upp um vinnsluholur. Í fyrstu var dælt niður um 8 l/s, sem er það magn sem holan tekur við án yfirþrýstings á holutoppi. Meðan á niðurdælingunni stóð var dælt tæplega 40 l/s af um 95°C heitu vatni úr holu LJ-5, sem er um 250 m frá holu LJ-8. Jafnframt var fylgst vel með hækkun vatnsborðs á jarðhitasvæðinu og í nágrenni þess.

Tvenns konar ferilefnum var blandað í vatnið sem dælt var niður í holu LJ-8. Í upphafi var sett 1 kg af sterku flúrljómandi litarefni (natríum-flúoresceín) en einnig var efninu natríum-brómíð stöðugt blandað í vatnið. Tilgangurinn var að kanna hversu greið tengsl væru milli holanna. Ferilefnin skiluðu sér mjög hægt og í mjög lágum styrk yfir í holu LJ-5. Þetta sýnir að vatnið sem dælt var niður dreifði sér um mjög stórt rúmmál. Hins vegar kom í ljós að vatnsborð í jarðhitakerfinu við vinnsluholurnar hækkaði nær samstundis þegar niðurdælingin hófst. Hvorki varð vart breytinga á vatnshita né kísilstyrk í holu LJ-5 meðan á niðurdælingunni stóð.

Með mjög einföldu þjöppuðu líkani tókst að herma endurheimtu ferilefnanna í holu LJ-5 nokkuð vel. Líkanið var síðan notað til þess að spá kólnun vatns úr holu LJ-5 við langtímaniðurdælingu. Spáð var fyrir tilfelli þar sem 10 l/s af 15°C heitu vatni er dælt niður í LJ-8 og vinnslan úr LJ-5 er 40 l/s. Samkvæmt spánni mun vatn úr LJ-5 kólna mjög hægt, eða úr 95°C niður í tæplega 91°C á tíu árum. Spáin er þó mjög ónákvæm því aðeins lítið brot ferilefnanna skilaði sér í tilrauninni. Vætanlega mun vatn úr holum LJ-7 og LN-12 kólna enn hægar við langtímaniðurdælingu.

Niðurstöður tilraunarinnar benda til þess að niðurdæling sé mjög vænleg til þess að auka hámarksafl og vinnslugetu Laugalandssvæðisins. Heppilegast væri að nota bakrásarvatn til niðurdælingar því þá er ekki talin hætta á að útfellingar stífla æðar við niðurdælingarholuna. Niðurdæling kalds grunnvatns virðist þó hagkvæmari en niðurdæling bakrásarvatns frá Akureyri. Gera þarf tilraun með niðurdælingu kalds vatns í holu LJ-8 í nokkurn tíma til þess að kanna áhrif meiri seigju og kólnunar bergs við holuna. Tilraunin myndi einnig nýtast til þess að meta áhrif hugsanlegra kalk- og magnesíum-sílikat-útfellinga.

## EFNISYFIRLIT

ÁGRIP	2
1. INNGANGUR	5
2. FRAMKVÆMD TILRAUNARINNAR	7
2.1 Niðurdælingin	8
2.2 Vinnsla á svæðinu og mælingar á vatnsborðsbreytingum	9
2.3 Ferilprófunin	15
3. ÚRVINNSLA OG TÚLKUN	23
3.1 Vatnsborðshækkun og áhrif niðurdælingar á vinnslu	23
3.2 Ferilprófunin	24
3.2.1 Endurheimt ferilefna	24
3.2.2 Túlkun ferilprófunar með einföldu líkani	25
3.2.3 Breytingar í styrk ferilefna veturinn 1991/1992	27
3.3 Spár um áhrif langtímaniðurdælingar	30
3.4 Framhald rannsókna	31
4. SAMANDREGNAR NIÐURSTÖÐUR	33
5. HEIMILDIR	34
ENGLISH SUMMARY	35
VIÐAUKI A: Niðurdæling í holu LJ-8	37
VIÐAUKI B: Dæling og hiti í holu LJ-5	41
VIÐAUKI C: Vatnsborðsmælingar í borholum	45
VIÐAUKI D: Mælingar á styrk flúoresceins og brómíðs	51
VIÐAUKI E: Þjappað líkan af niðurdælingu í lokaðan geymi með föstu innstreymi	61

## MYNDASKRÁ

1. Kort af Eyjafjarðarsveit sem sýnir djúpar borholur, laugar og hita á 500 m dýpi	6
2. Borholur á Laugalandi í Eyjafjarðarsveit og nágrenni	7
3. Gögn um niðurdælingu í holu LJ-8	8
4. Tvær hitamælingar úr holu LJ-8	9
5. Hitamælingar úr holu LJ-5 frá því borun hennar lauk	10
6. Vinnsla og vatnshiti holu LJ-5 ásamt niðurdælingunni	11
7. Vatnsborð í holu LN-10 ásamt niðurdælingunni	12
8. Vatnsborð í holum KW-2, LJ-6 og LG-9 ásamt niðurdælingunni	13
9. Vatnsborð í holum GG-1 og HW-9 ásamt niðurdælingunni	14
10. Styrkur flúoresceins í vatni úr holu LJ-5 í maí og júní 1992	17
11. Styrkur flúoresceins í vatni úr holu LJ-5 til mars 1992	17
12. Styrkur flúoresceins í vatni úr holu LJ-7 til mars 1992	18
13. Styrkur flúoresceins í vatni úr holu LN-12 til mars 1992	18
14. Styrkur flúoresceins í vatni úr holu HN-10 til mars 1992	19
15. Styrkur flúoresceins í vatni úr holu BN-1 til mars 1992	19
16. Styrkur brómíðs í vatni úr holu LJ-5	20
17. Styrkur klóríðs í vatni úr holu LJ-5	20
18. Hlutfallið $\text{Br}^-/\text{Cl}^-$ í vatni úr holu LJ-5	21
19. Styrkur brómíðs í vatni úr holu LN-12	21
20. Styrkur klóríðs í vatni úr holu LN-12	22
21. Hlutfallið $\text{Br}^-/\text{Cl}^-$ í vatni úr holu LN-12	22
22. Hækkun vatnsborðs í holu LN-10 fyrstu 13 daga prófunarinnar	24
23. Einfalt líkan til þess að herma þrýsting ( $p_i$ ), breytingar í styrk ferilefna ( $C_i$ ) og hita ( $T_i$ ) í niðurdælingartilrauninni	25
24. Mældur og reiknaður styrkur flúoresceins í holu LJ-5	26
25. Mældar og reiknaðar breytingar í Br-styrk í holu LJ-5	26
26. Styrkur flúoresceins, vatnsborð LJ-8, mánaðar meðalvatnshiti LJ-5 og heildarvinnsla á Laugalandi maí 1991 til febrúar 1992	28
27. Samband flúoresceinstyrks og klóríðstyrks annars vegar (a) og flúoresceinstyrks og vatnshita hins vegar (b) í holu LJ-5 veturinn 1991/92	29
28. Reiknuð kólnun vatns úr holu LJ-5 við 10 kg/s niðurdælingu 15°C vatns og 40 kg/s vinnslu	31

## 1. INNGANGUR

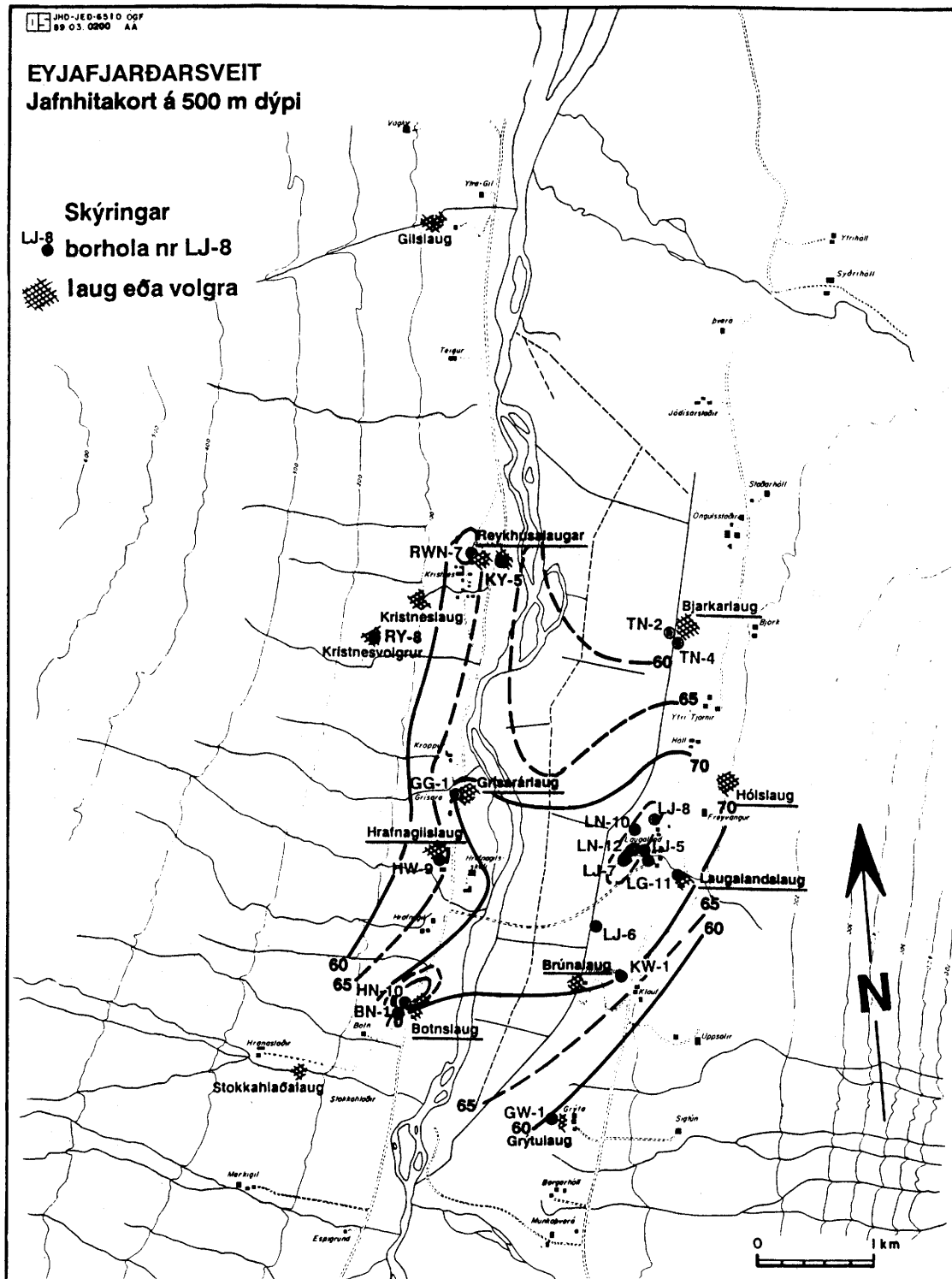
Reynsla af áratuga vinnslu vatns af lághitasvæðum hefur sýnt að þegar í langan tíma er dælt mun meira vatni úr jörðu en svarar til náttúrulegs aðstreymis að svæðunum lækkar þrýstingur í jarðhitakerfunum. Þetta veldur því að ýmist lækkar vatnsborð stöðugt með tímanum eða að kaldara vatn streymir inn í kerfin svo vatnið kólnar (Guðni Axelsson, 1993).

Í þeim tilvikum þar sem jarðhitakerfi eru í góðum tengslum við kaldara grunnvatn umhverfis kólnar vatnið sem dælt er upp. Hversu hratt það gerist fer eftir rennslisleiðum kaldara vatnsins inn í jarðhitakerfið, þ.e. hversu lengi það er í snertingu við heitt berg áður en það nær borholunum sem dælt er úr. Þar sem rennslisleiðin er löng er þetta innstreymi kaldara grunnvatns af hinu góða, því þá nær kalda vatnið hluta af þeim varma úr berginu, sem árpúsunda hringrás jarðhitakerfisins hefur skapað.

Ef jarðlög eru á hinn bóginn mjög þétt og tengsl við grunnvatnið eru léleg, fellur þrýstingur með tíma og afköst svæðanna minnka af þeim sökum. Í þessum tilfellum vantar vatn til að ná varmanum úr heitu berginu. Ein möguleg lausn á þessum vanda er að skapa innstreymi kaldara vatns niður í jarðhitakerfið á stöðum þar sem ætla má að rennslisleiðir að dæluholunum séu nógu langar til að kalda vatnið hitni nægjanlega af snertingu við heitt bergið.

Hitaveita Akureyrar er ein þeirra hitaveitna, sem hefur mátt búa við mikinn niðurdrátt á vinnslusvæðum sínum, en nær enga kælingu vatns (Guðni Axelsson o.fl., 1988). Jarðlög á vinnslusvæðunum eru því mjög þétt og kaldara vatn kemst treglega inn í jarðhitakerfin. Mælingar á rafleiðni jarðlaga og hitamælingar í borholum sýna hins vegar að jörð er heit á stóru svæði umhverfis vinnslusvæðin (mynd 1). Því má ætla að auka megi orkuvinnslu og afl jarðhitasvæðanna, sem hitaveitan nýtir, með því að dæla köldu vatni niður í jarðhitakerfin á heppilegum stöðum. Þannig mætti fresta um nokkur ár fjárfrekum framkvæmdum til orkuöflunar, sem annars eru fyrirsjáanlegar innan fárra ára.

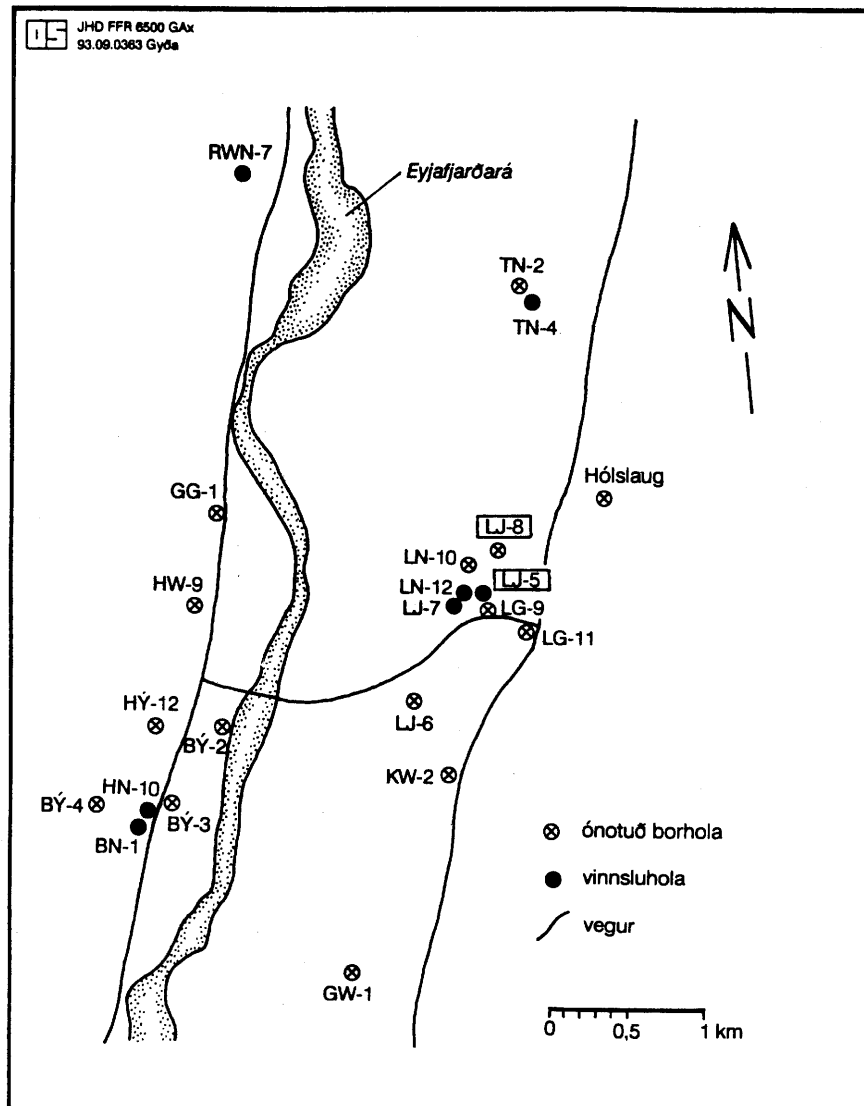
Þannig háttar til að á vinnslusvæðum hitaveitunnar eru fjölmargar borholur sem ekki eru nýttar af því að þær hafa ekki skorið neinar öflugar vatnsæðar. Í sumum þeirra eru samt smáæðar sem tækju við vatni sem dælt væri niður auk þess að það dreifðist vel um jarðhitakerfin. Þarna eru því góðar aðstæður til að gera niðurdælingartilraun. Hitaveita Akureyrar og Orkustofnun réðust því í það í sameiningu að gera tilraun með niðurdælingu í jarðhitasvæðið að Laugalandi í Eyjafjarðarsveit vorið 1991 og fjallar þessi skýrsla um niðurstöður hennar. Áður hefur verið fjallað stuttlega um þær í erindi á Orkuþingi 1991 (Ólafur G. Flóvenz o.fl., 1991).



Mynd 1. Kort af Eyjafjarðarsveit sem sýnir djúpar borholur, laugar og hita á 500 m dýpi.

## 2. FRAMKVÆMD TILRAUNARINNAR

Alls hafa verið boraðar 12 holur í jarðhitasvæðið á Laugalandi, þar af eru 8 holur dýpri en 1000 m, sú dýpsta 2820 m (hola LJ-8). Að auki eru holur á Klauf, Brúnalaug, Hrafna-gili og Grísará í greinilegu þrýstisambandi við jarðhitakerfið á Laugalandi. Staðsetning helstu holanna á þessu svæði er sýnd á mynd 2. Af þessum holum eru þrjár nýttar, holur LJ-5, LJ-7 og LN-12, og eru aðalvatnsæðar þeirra milli 1000 og 1500 m dýpis. Að auki er stór vatnsæð á um 600 m dýpi í holu LJ-5. Undanfarin ár hefur að meðaltali verið dælt 40-50 l/s af um 95°C heitu vatni úr þessum holum. Þrýstingslækkun á svæðinu nemur frá upphafi sem svarar 300-400 m vatnsborðslækkun (Ólafur G. Flóvenz o.fl., 1992). Vinnslan á Laugalandi svarar til um 40% af orkuvinnslu Hitaveitu Akureyrar. Svæðið hefur allgóða miðlunareiginleika. Ef það er hvílt yfir sumarið hækkar vatnsborð jafnt og þétt og má þá dæla vel yfir 100 l/s úr þessum þremur holum í skamman tíma þegar aflþörf er mest. Með niðurdælingu mætti hugsanlega auka talsvert vinnslugetu svæðisins og einnig afl þess tímabundið á álagstímum.



Mynd 2. Borholur á Laugalandi í Eyjafjarðarsveit og nágrenni.

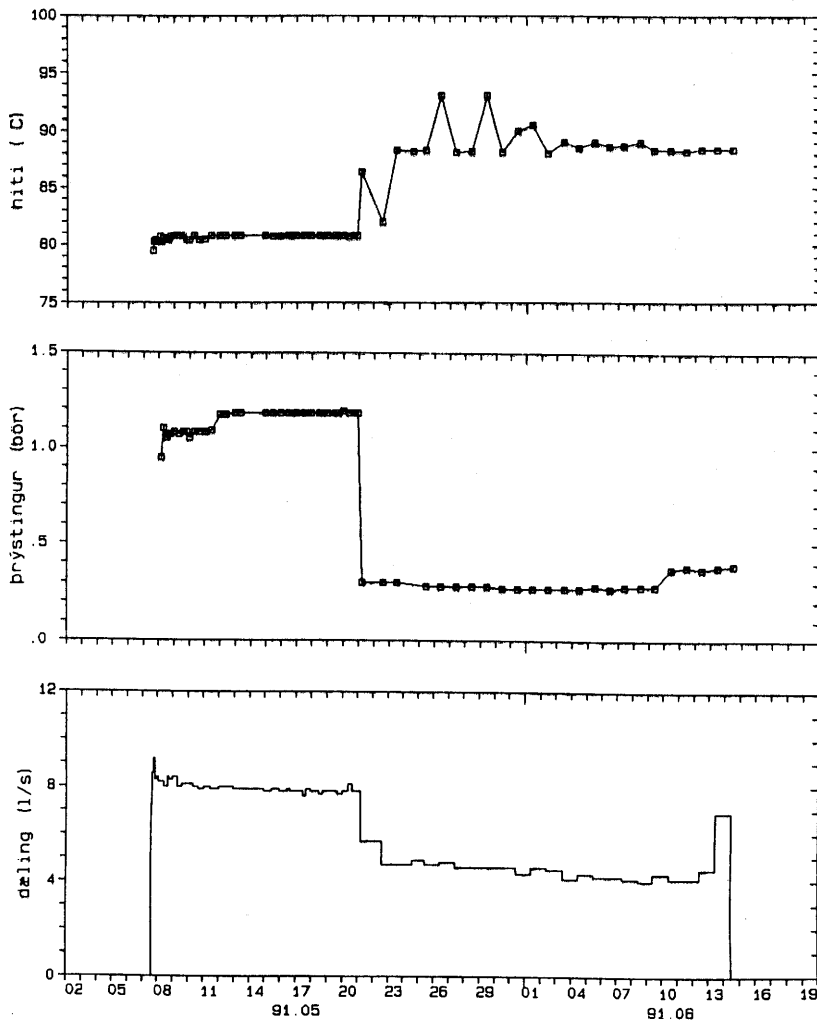


## 2.1 Niðurdælingin

Hola LJ-8 þótti heppileg sem niðurdælingarhola. Bæði er hún djúp og einnig sker hún margar smáar æðar neðan 1000 m dýpis. Ekki þótti ráðlegt að dæla niður köldu vatni í fyrstu tilraun vegna hættu á útfellingum sem stíflað gætu æðar LJ-8 auk hættunnar á að kalda vatnið skilaði sér mjög fljótt í vinnsluholurnar og ylli kælingu og súrefnismengun. Var því um 80°C heitt vatn leitt frá vinnslusvæðinu á Ytri-Tjörnum og því dælt niður.

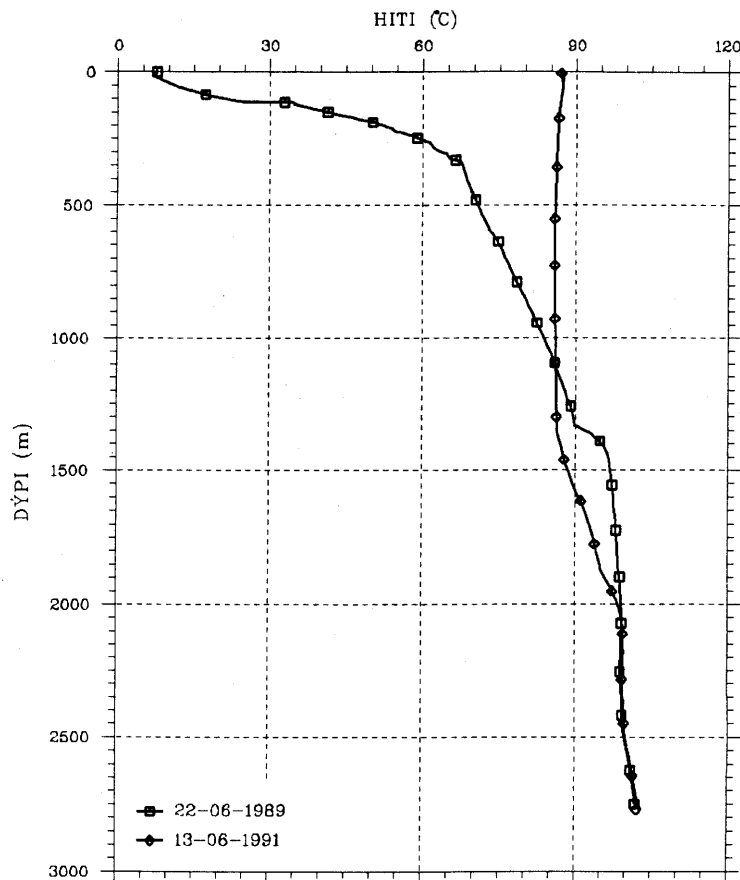
Niðurdælingin hófst 7. maí 1991 kl. 14:30 og var eins mikið vatn látið renna niður í holuna og hún tók við án þess að þrýstingur skapaðist á holutoppi. Reyndist hola taka við um 8 l/s. Upphaflega stóð til að dæla þessu magni niður í 1-2 mánuði en vegna bilunar á dælu í vinnsluholunni á Ytri-Tjörnum varð að minnka niðurdælinguna verulega eftir 2 vikur og hætta henni alveg þann 14. júní, eftir 5½ viku. Eftir bilunina var dælt niður blöndu af vatni úr holu LJ-5 og vatni frá jarðhitasvæðinu að Botni og var blandan 88-93°C heit.

Í viðauka A eru gögn um niðurdælinguna í holu LJ-8 birt. Jafnframt sýnir mynd 3 hvernig magnið sem dælt var niður, hiti þess og toppþrýstingur á holunni breyttust með tíma meðan á niðurdælingunni stóð.



Mynd 3. Gögn um niðurdælingu í holu LJ-8.

Til þess að sjá hvar vatnið, sem dælt var niður í holu LJ-8, fór út í jarðhitakerfið var hiti mældur í holunni rétt áður en niðurdælingunni var hætt. Þessi hitamæling er sýnd á mynd 4. Til samanburðar er sýnd hitamæling frá 22. júní 1989. Með því að bera saman niðurstöður þessara tveggja mælinga sést að vatnið fer að mestu út úr holunni á tveimur stöðum, nálægt 1350 m dýpi og nálægt 1870 m dýpi. Rennsli úr holunni eftir borun kom aðallega úr þessum tveimur æðum, sem báðar eru í gangbergi (Hrefna Kristmannsdóttir o.fl., 1977).



Mynd 4. Tvær hitamælingar úr holu LJ-8.

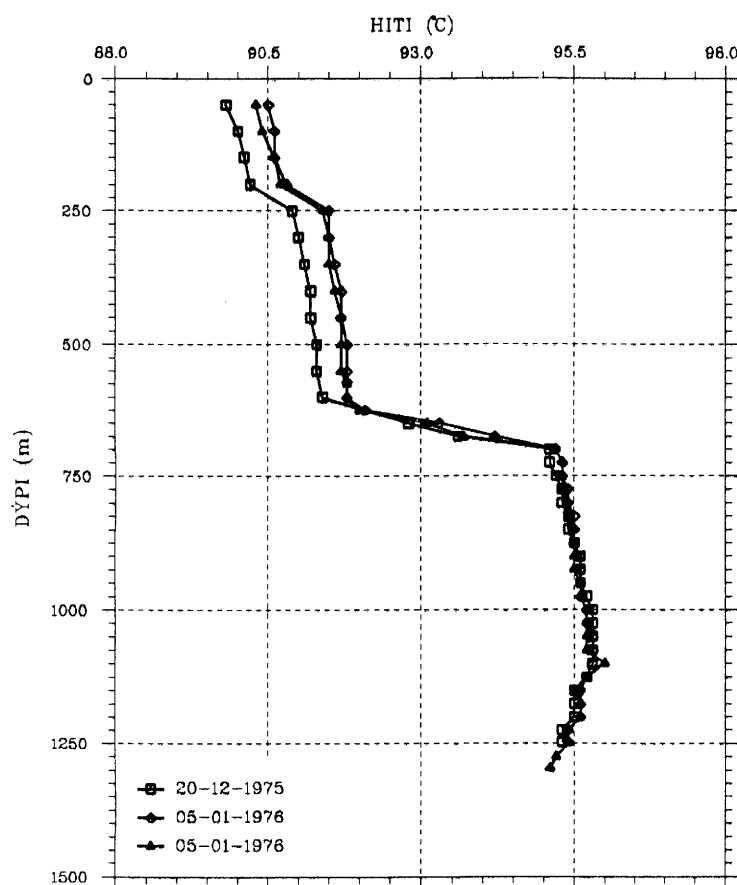
## 2.2 Vinnsla á svæðinu og mælingar á vatnsborðsbreytingum

Vikurnar fyrir niðurdælinguna var dælt sem næst föstu magni, 38 l/s, úr holu LJ-5 á Laugalandi, en dælur í öðrum holum stöðvaðar. Meðan á niðurdælingunni stóð var þessu fyrirkomulagi haldið óbreyttu. Vinnslan úr holunni jókst þó um 1,4 l/s að meðaltali. Eftir að niðurdælingunni lauk og fram í miðjan september var áfram svo til eingöngu dælt úr holu LJ-5.

Hola LJ-5 var boruð síðla árs 1975 og lauk borun hennar í janúar 1976. Boruninni og þeim upplýsingum sem þá fengust er lýst í skýrslu Orkustofnunar (Axel Björnsson o.fl. 1976). Þar kemur fram að í holunni eru aðallega þrjár æðakaflar; nálægt 200 m dýpi, á 570-618 m dýpi og á 1296 m dýpi. Efri tveir æðakafarnir sjást vel í hitamælingunum á mynd 5. Auk þessara þriggja æðakafla er getið um æðar á 660 m og 712-3 m dýpi. Í töflu 1 er gefið yfirlit um æðarnar, hve mikið þær gáfu í borun og hiti þeirra er áætlaður út frá fyrirliggjandi gögnum.

Tafla 1. Helstu æðar í holu LJ-5

Dýpi æðar (m)	Skolaukning í borun (l/s)	Áætlaður hiti (°C)
u.þ.b. 200	0,5	75
570-618	23	86-92
660	3-4	Óviss
712-713	1	Óviss
1296	(66)	96



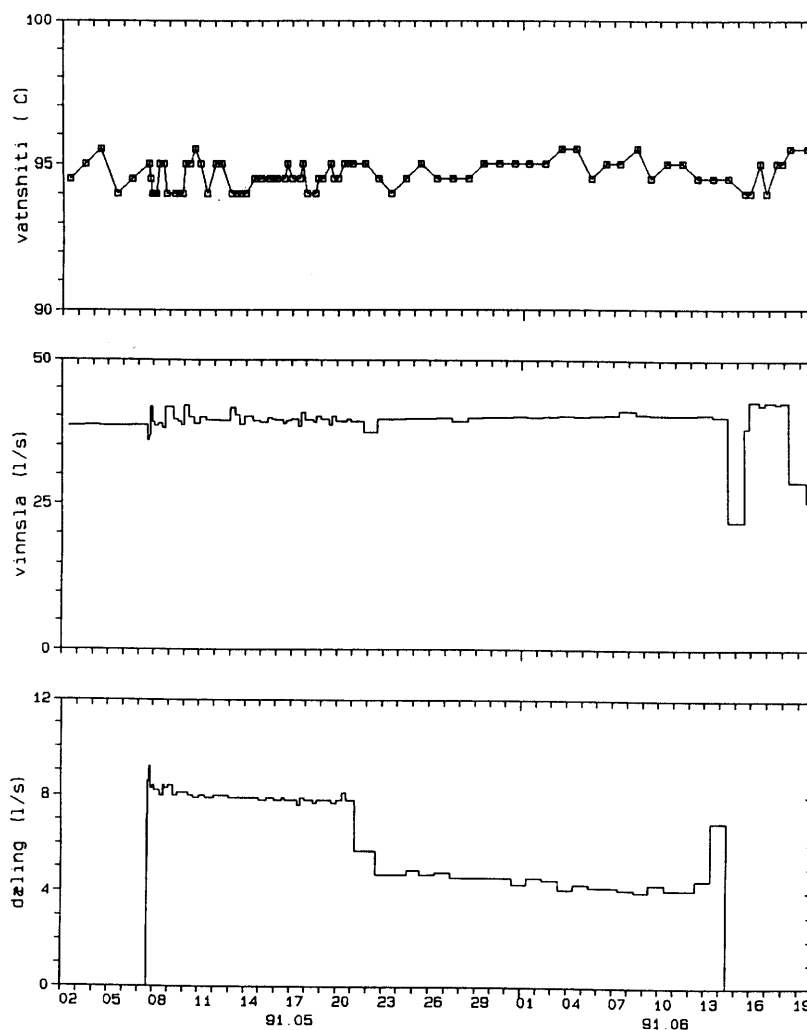
Mynd 5. Hitamælingar úr holu LJ-5 frá því borun hennar lauk.

Frá því nokkru fyrir niðurdælinguna og til mánaðarmóta júní/júlí var fylgst gjörlla með breytingum á vatnsborði í allmörgum borholum í nágrenni Laugalands og hita á vatni úr holu LJ-5 auk áðurnefndra mælinga á niðurdælingunni. Jafnframt voru tekin vatnssýni til efnagreininga úr holu LJ-5 og nokkrum öðrum holum fram á árið 1992, sem nánar verður fjallað um hér á eftir. Gögnin um vinnsluna úr holu LJ-5 eru birt á mynd 6 og í viðauka B.

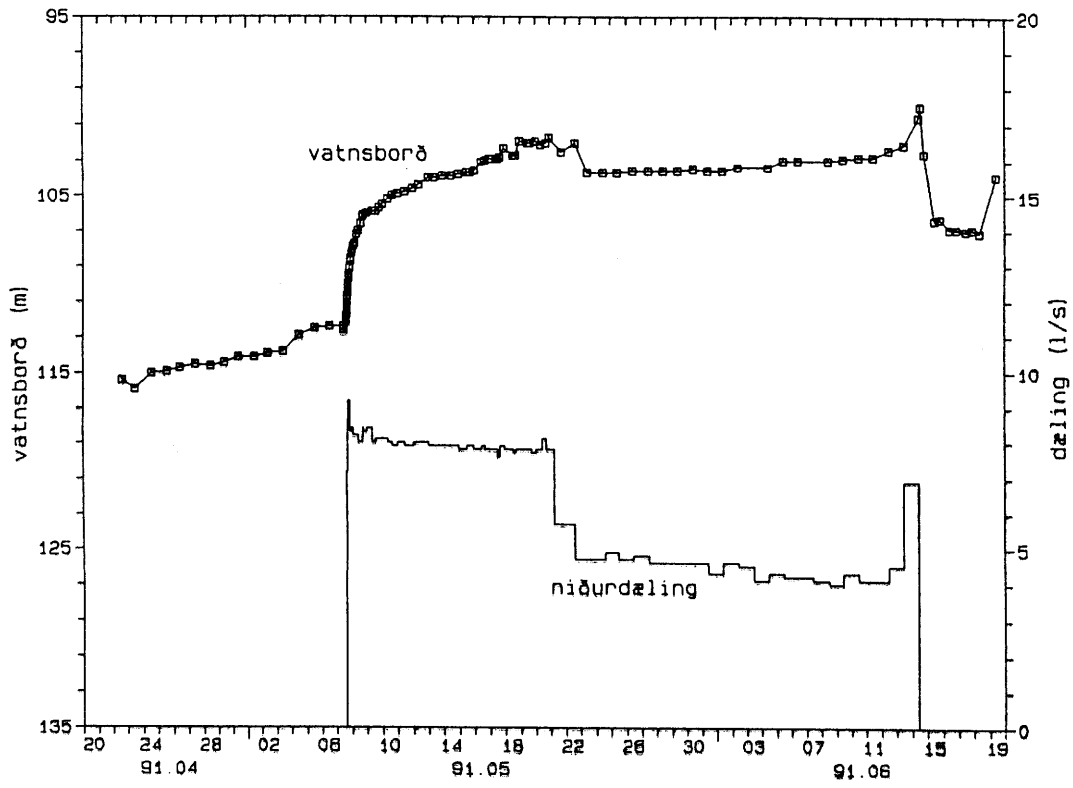
Í tengslum við niðurdælinguna var fylgst með vatnsborði í eftirtöldum holum:

- Holum LJ-6, LG-9 og LN-10 við Laugaland
- Holu KW-2 við Klauf
- Holu 1 við Hólslaug
- Holu BÝ-2 við Botn
- Holu HW-9 við Hrafnagil
- Holu GG-1 við Grísará.

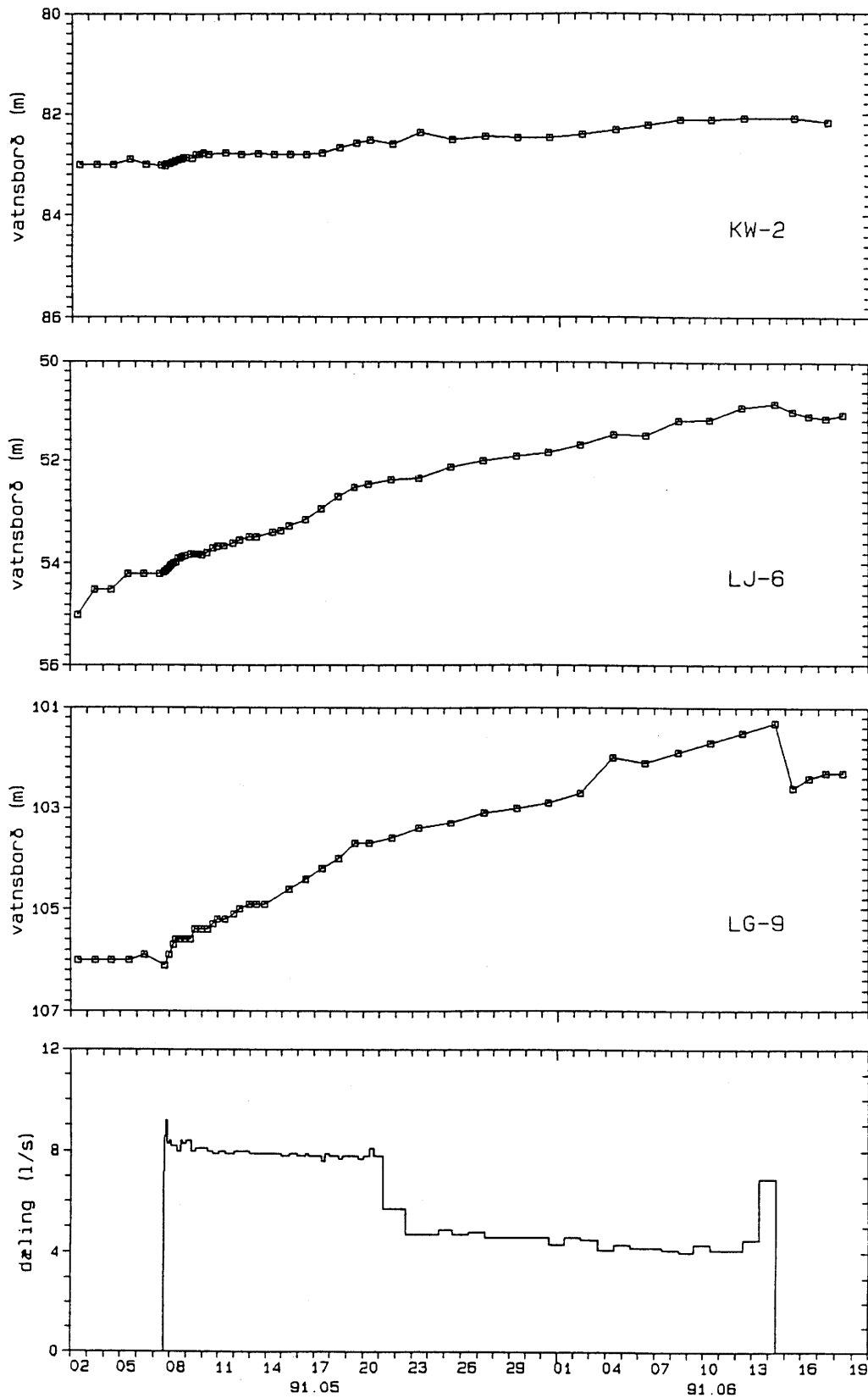
Vatnsborðsmælingarnar úr flestum holanna eru birtar í viðauka C og á myndum 7-9 ásamt niðurdælingunni. Mælingunum úr holunni við Hólslaug og úr holu BÝ-2 er þó sleppt, enda sáust engin áhrif niðurdælingarinnar í þeim holum. Áhrif niðurdælingarinnar eru mest áberandi í holu LN-10 enda er hún næst holu LJ-8. Áhrifin eru einnig greinileg í holu LG-9 og lítilsháttar áhrif sjást í holum LJ-6 og KW-2. Óvíst er hvort merkja má áhrif í holum GG-1 og HW-9.



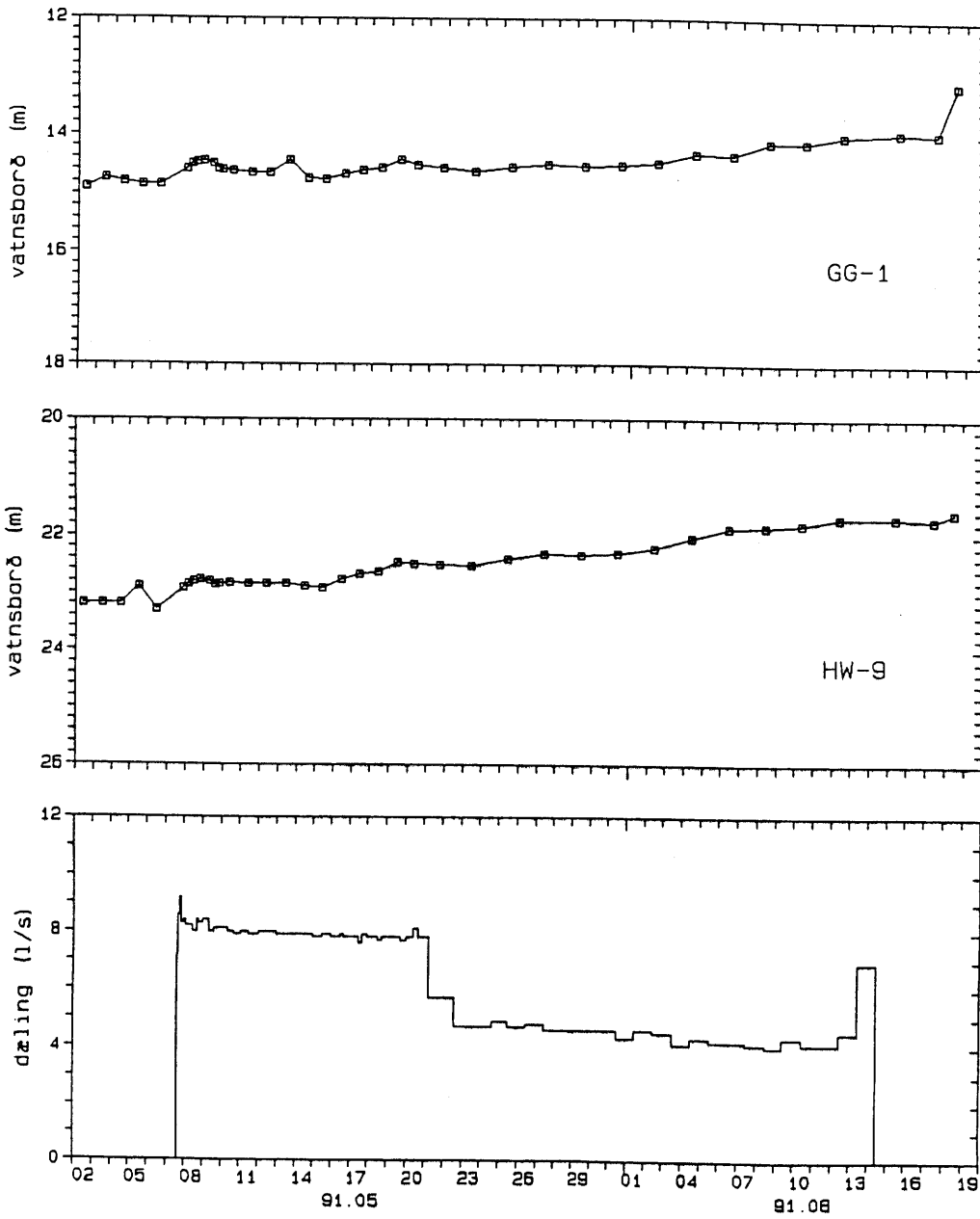
Mynd 6. Vinnsla og vatnshiti holu LJ-5 ásamt niðurdælingunni.



Mynd 7. Vatnsborð í holu LN-10 ásamt niðurdælingunni.



Mynd 8. Vatnsborð í holum KW-2, LJ-6 og LG-9 ásamt niðurdælingunni.



Mynd 9. Vatnsborð í holum GG-1 og HW-9 ásamt niðurdælingunni.

## 2.3 Ferilprófunin

Til þess að kanna hversu greið tengsl eru milli hola LJ-8 og LJ-5 voru sett tvenns konar ferilefni í holu LJ-8 í tilrauninni og síðan fylgst með því hvernig og hve hratt efnin skil-uðu sér yfir í holu LJ-5. Niðurstöðurnar má síðan nota til þess að áætla kólnun vatns úr vinnsluholunum við langtíma niðurdælingu. Ferilefnin natríum-flúorescein og natríum-brómíð voru notuð í tilrauninni. Natríum-flúorescein er sterkt flúrljómandi litarefni, sem hefur þann eiginleika að vera mælanlegt í mjög lágum styrk og er greining þess jafnframt fljótleg og ódýr. Flúrljómun er mæld í vatninu og er hún mælikvarði á styrk efnisins. Eins og í öðrum ferilprófunum á Íslandi þar sem natríum-flúorescein hefur verið notað var ákveðið magn (1 kg) sett niður í einu lagi í niðurdælingarholuna í upphafi tilraunarinnar. Styrkur þess í holu LJ-5 ætti þá að sýna greinilega hversu fljótt vatn berst á milli holanna.

Natríum-flúorescein hefur fremur lítið hitaþol og er ekki heppilegt að nota það á háhita-svæðum. Ekki er vitað nákvæmlega við hvaða hita mörkin liggja né heldur hver stöðug-leiki þess er við gefinn hita. Miðað við reynslu í ferilprófun við Árbæ í Ölfusi var talið að unnt væri að nota efnið á Laugalandi þar sem hitinn er svipaður á þessum stöðum (Ó-lafur G. Flóvenz o.fl., 1990). Talið er hættulaust að natríum-flúorescein sé tímabundið í litlu magni í vatninu, því það hefur mjög litlar eiturverkanir.

Natríumbrómíðinu var aftur á móti blandað stöðugt í niðurdælingarvatnið og var ætlunin að á þann hátt mætti reikna beint út blöndunarhlutfallið í holu LJ-5. Jafnframt var talið meira öryggi í því að nota tvö ferilefni. Til þess að blanda efninu stöðugt varð að skammta því í jöfnum styrk í vatnið með skammtadælu. Náttúrulegur brómíðstyrkur í jarðhitavatninu er 20-30 µg/l. Með íblöndun 10 mg/l getur niðurdælingarvatnið blandast í hlutfallinu 1:400 og styrkur efnisins samt tvöfaldast. Talið er að brómíð hagi sér nánast eins og jodíð í berggrunninum, bæði hvað varðar efnahvörf og aðsog, og því ólíklegt að það bindist svo einhverju nemi í jarðhitakerfinu. Lítil reynsla er þó af notkun brómíðs sem ferilefnis. Til greina kom að nota annað hvort natríum- eða kalíum-brómíð og eru bæði þessi efni ódýr. Natríum-brómíð var valið þar sem það er ódýrara. Natríum-brómíð er ekki skaðlegt heilsu manna í þeim styrk er hér um ræðir.

Frá upphafi tilraunarinnar og allt næsta ár voru tekin vatnssýni úr holu LJ-5 og nokkrum öðrum holum. Tekin voru sýni til mælinga á báðum ferilefnunum, flúoresceini og brómíði. Auk þess voru tekin sýni til mælinga á kísli, þar sem breytingar á styrk hans geta gefið vísbendingar um kólnun jarðhitakerfisins. Mælingum á kísilstyrk var hætt þegar dælan bilaði í vinnsluholunni á Ytri-Tjörnum og farið var að dæla niður vatni úr sjálfu Laugalandskerfinu. Ekki urðu breytingar á kísilstyrk í vatni úr holu LJ-5 þennan tíma. Þar sem talsverðar sveiflur hafa verið í klóríðstyrk jarðhitavats á Laugalandssvæðinu, en brómíð/klóríð ( $\text{Br}^-/\text{Cl}^-$ ) hlutfall aftur á móti verið stöðugt, var klóríð einnig mælt í vatns-sýnunum til stöðlunar á mæligildum.

Fyrstu tvær vikurnar voru tekin 2-3 sýni á dag til greininga á ferilefnunum ef undan eru skildir fyrstu tveir dagarnir er mun meira var tekið af sýnum. Síðan var tekið a.m.k. eitt sýni á dag fram yfir miðjan júní. Eftir það og fram í nóvember voru sýni tekin nokkurn veginn vikulega og loks u.þ.b. tvisvar í mánuði allt til vors 1992. Stundum voru þó tekin nokkur sýni sama daginn. Sýni til kísilgreininga voru tekin einu sinni á dag fyrsta hálfu mánuðinn. Sýni til mælinga á flúorescein og brómíði voru ekki meðhöndluð á neinn sér-stakan hátt. Þar sem flúorescein þolir ekki að geymast í dagsbirtu voru sýnin þó tekin í dökkar glerflöskur og þau geymd í sérsníðuðum, ljósheldum kassa og greind innan viku



frá sýnatöku. Sýni til kísilgreininga voru þynnt til helminga með eimuðu vatni og ávallt tekið tvítak.

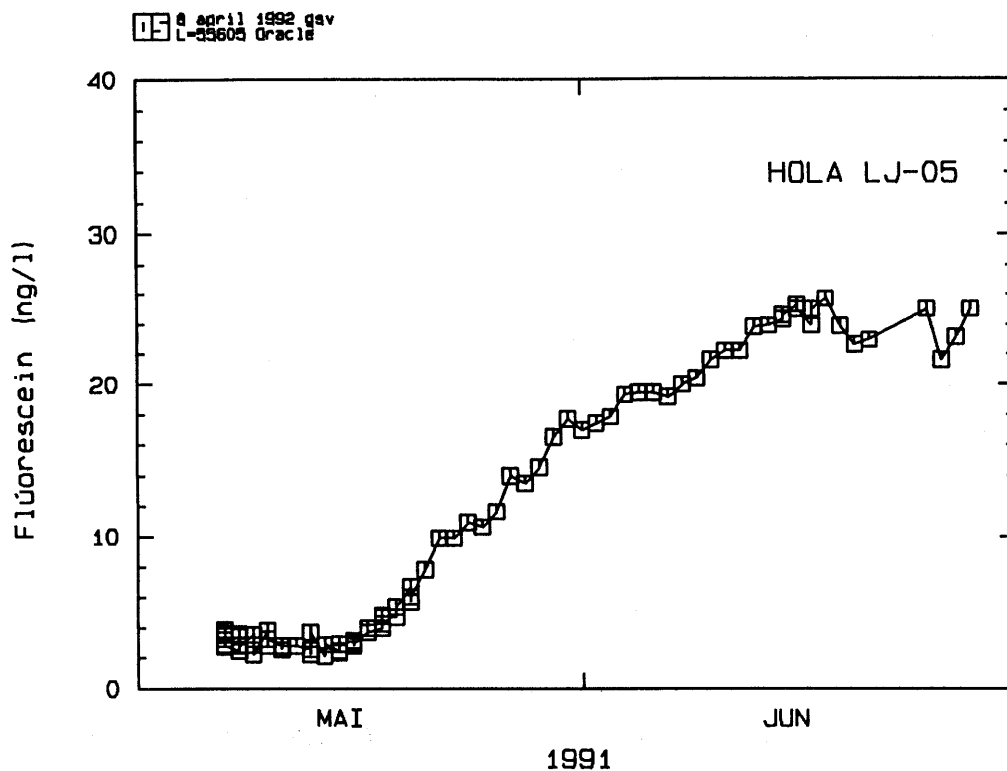
Myndir 10-15 sýna styrk flúoresceins í fimm vinnsluholum Hitaveitu Akureyrar á tímabilinu maí 1991 til mars 1992. Flestar eru mælingarnar í holu LJ-5 og það er líka einungis í henni sem efnið skilaði sér í marktækum mæli (myndir 10 og 11). Reyndar mælist mjög lágur styrkur allan tímann, milli 15 og 40 ng/l, en þó mælast einstaka toppar með um 100 ng/l. Mynd 10 sýnir þá hægu aukningu ferilefnisins, sem varð í holu LJ-5 meðan á niðurdælingunni stóð. Eins og áður hefur komið fram þá var dælingu úr LJ-5 haldið stöðugri þann tíma. Fram í september lækkar síðan styrkurinn hægt og sígandi, en á því tímabili var svo til eingöngu dælt úr holu LJ-5, þó dælingin væri breytileg.

Um miðjan september verður mikil breyting í endurheimtu flúoresceinsins í LJ-5 eins og sést á mynd 11. Jafnframt því að nokkrir áberandi toppar koma fram þá eykst meðalstyrkurinn verulega, eða úr um 20 ng/l í um 40 ng/l. Topparnir koma fram eftir að hlé urðu á dælingu úr LJ-5, þannig að styrkur ferilefnisins varð mjög hár í fyrstu eftir að dælan í holunni var ræst. Styrkur efnisins lækkaði síðan og fór jafnvel niður í grunnildi eftir nokkurn tíma. Við áframhaldandi dælingu hækkaði styrkurinn síðan aftur upp í svipað gildi og áður. Frá því í desember hefur styrkurinn haldist nokkuð stöðugur, enda sýnin væntanlega ekki tekin strax eftir dæluhlé. Þess ber að geta að þennan vetur var dælt úr öllum vinnsluholum á Laugalandi og einna mestu úr holu LN-12.

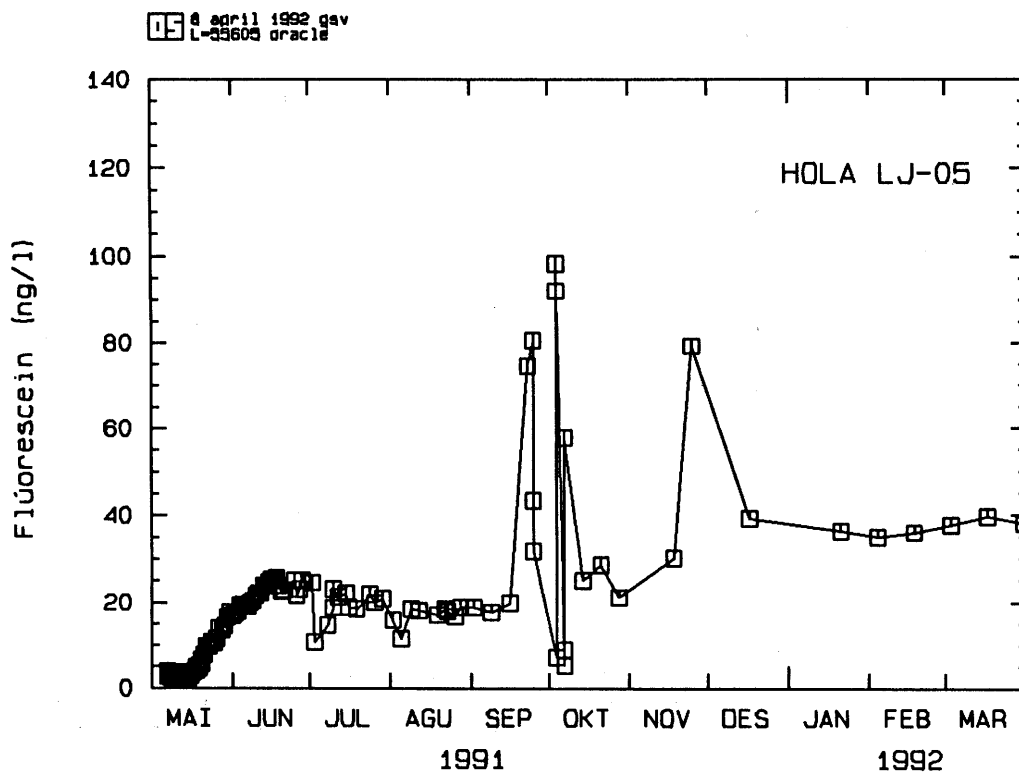
Á myndum 14 og 15 sést að í holum BN-1 og HN-10 kemur flúorescein ekki fram í mælanlegum styrk. Ekki greinist það heldur í holu LJ-7 (mynd 12), enda var hún lítið notuð. Í júní og júlí koma hins vegar toppar í holu LN-12 (mynd 13), báðir skömmu eftir að dæla í holunni er ræst. Eftir það er styrkurinn í holu LN-12 nálægt greiningarmörkum, en virðist þó hærri en í Botnsholunum og í holu LJ-7.

Á myndum 16-21 eru sýndar niðurstöður mælinga á brómíði, klóríði og breytingar á hlutfallinu Br/Cl með tíma. Styrkur brómíðs mælist mjög lítil allan tímann. Meðan á niðurdælingartilrauninni stóð og næstu mánuði þar á eftir er varla hægt að greina marktækar breytingar því þær eru það nálægt greiningarmörkum brómíðs og frávikin það lítil frá náttúrulegum styrk þess. Ef litið er á Br/Cl-hlutfallið sést þó greinileg hækkun meðan á niðurdælingunni stóð (mynd 18). Um haustið koma fram toppar í brómíðstyrknum á sama tíma og topparnir í styrk flúoresceins. Þessir toppar koma einnig fram í Br/Cl-hlutfallinu og tengjast þeir dæluhléum á sama hátt og flúoresceintopparnir. Veruleg aukning verður síðan í brómíðinu veturinn 1991/1992 eins og í flúoresceininu. Segja má að styrkur ferilefnanna tveggja fylgist því nokkurn veginn að. Það vekur athygli að frá því um haustið 1991 verða samskonar breytingar í klóríðstyrk í holu LJ-5 og í styrk ferilefnanna (mynd 17). Um þessar breytingar og túlkun þeirra verður fjallað nánar í næsta kafla.

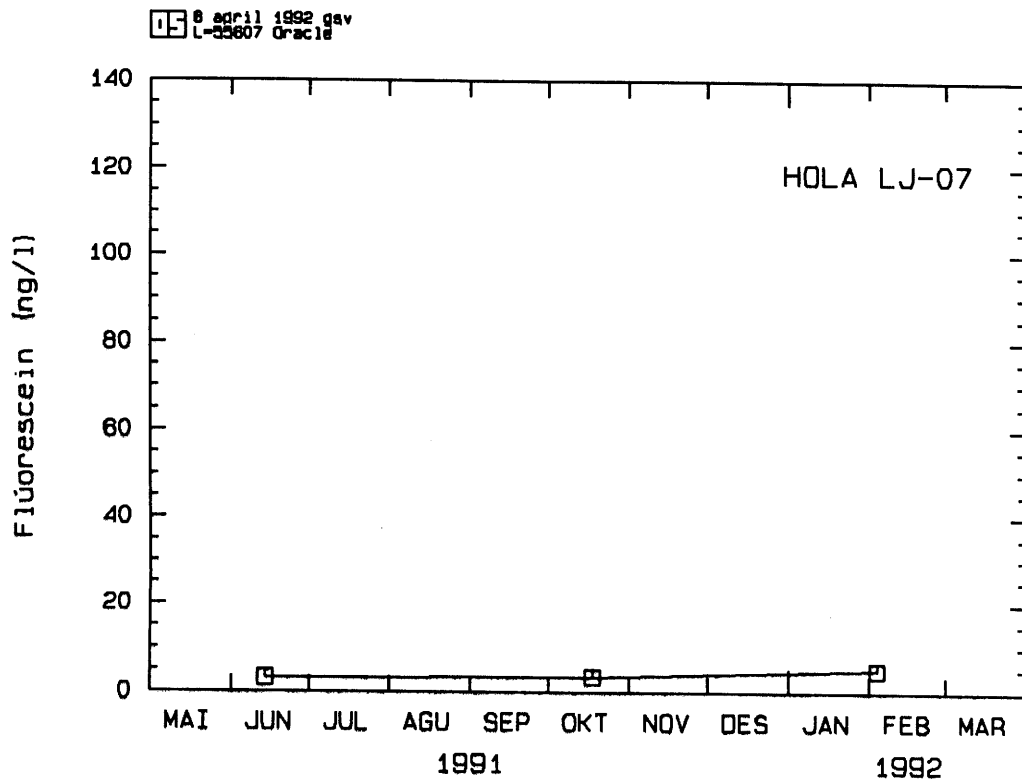
Á mynd 19 og 21 sést að það koma toppar í brómíðstyrknum og Br/Cl-hlutfallinu í holu LN-12 samtímis flúoresceintoppunum líkt og í holu LJ-5. Að öðru leyti er varla hægt að tala um marktæka aukningu í brómíði í LN-12, nema ef vera skyldi í febrúar og mars 1992. Litlar breytingar urðu á klóríðstyrk í holu LN-12 (mynd 20). Hvorki varð aukning á brómíði í holu LJ-7 á Laugalandi né í holum BN-1 og HN-10 á Botnssvæðinu.



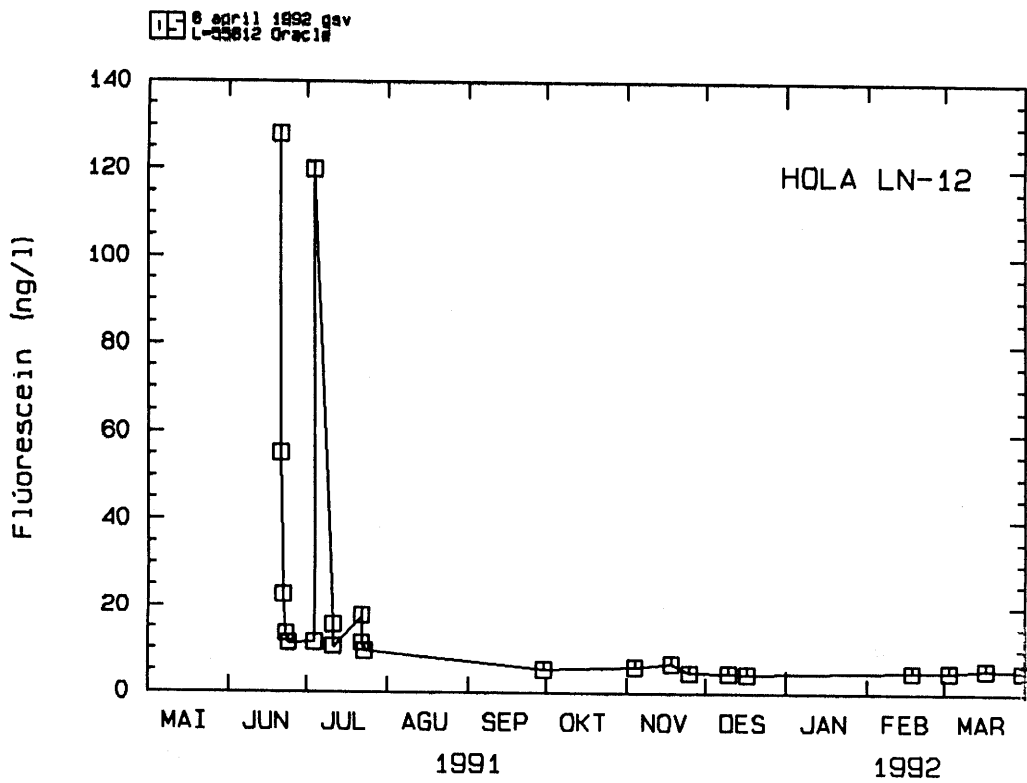
Mynd 10. Styrkur flúoresceins í vatni úr holu LJ-5 í maí og júní 1992.



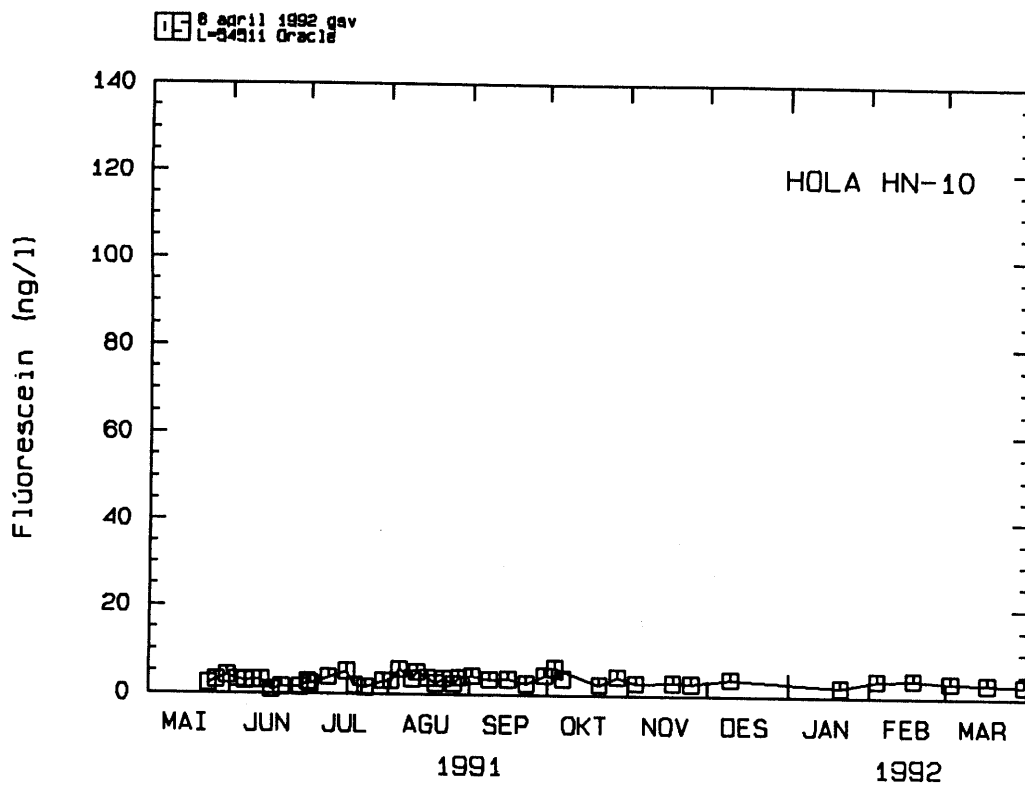
Mynd 11. Styrkur flúoresceins í vatni úr holu LJ-5 til mars 1992.



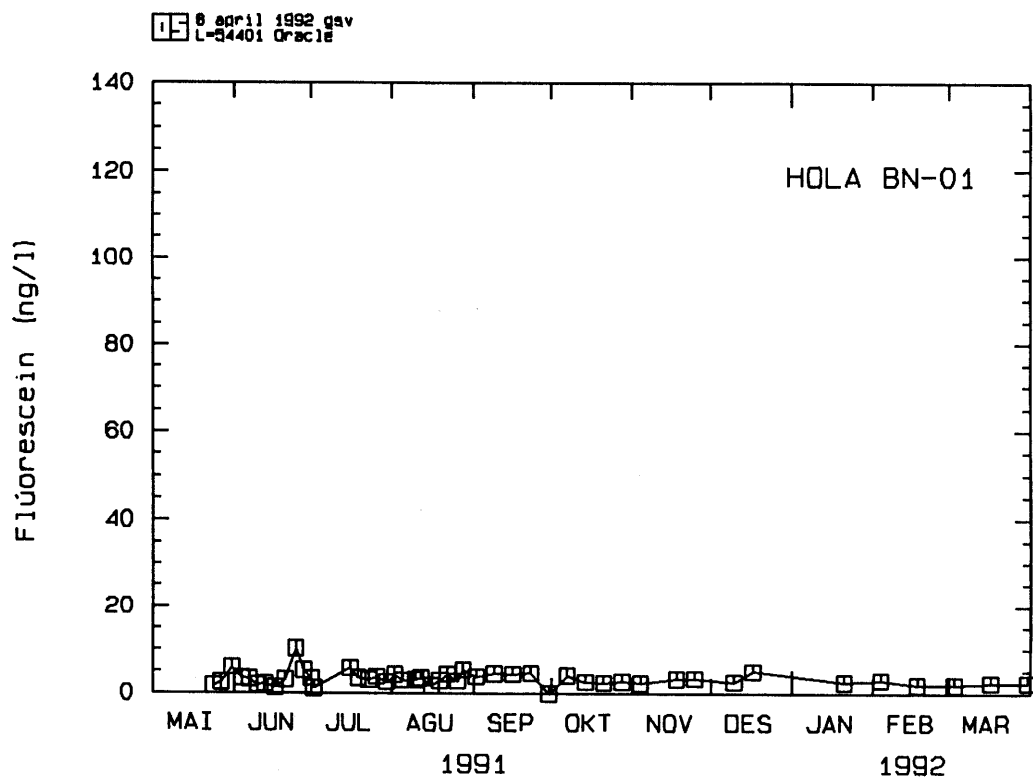
Mynd 12. Styrkur flúoresceins í vatni úr holu LJ-7 til mars 1992.



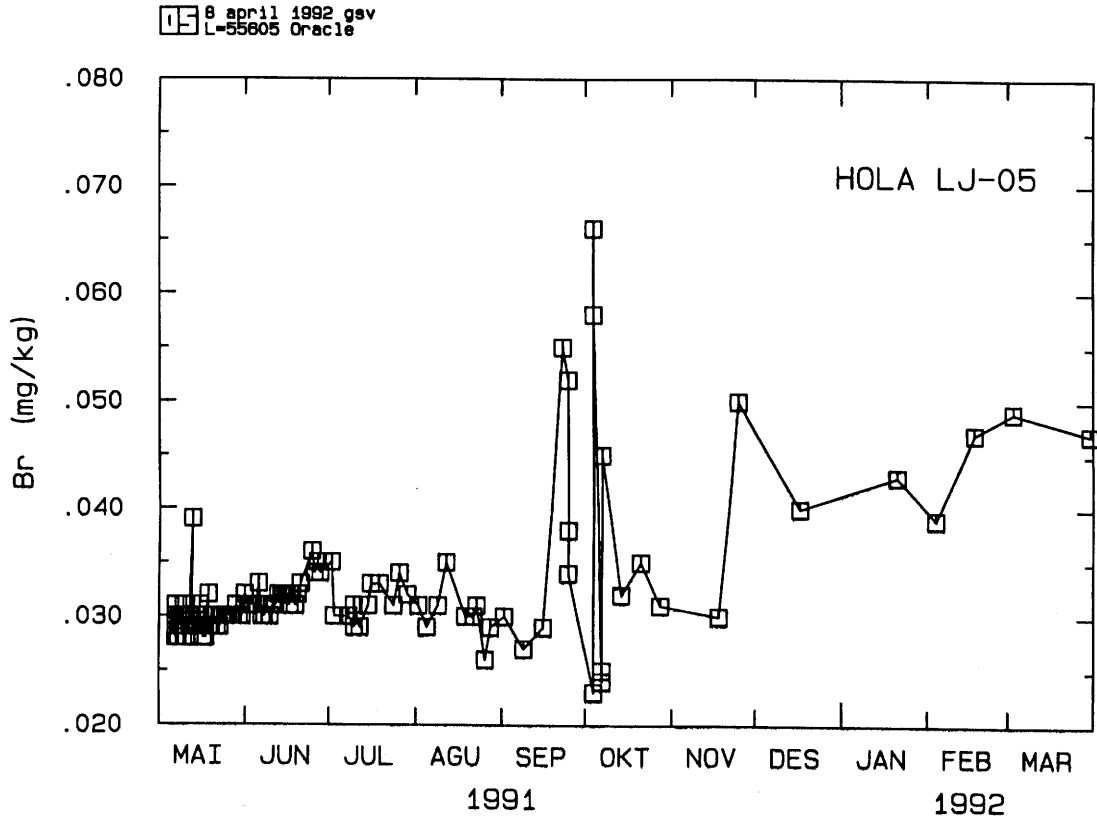
Mynd 13. Styrkur flúoresceins í vatni úr holu LN-12 til mars 1992.



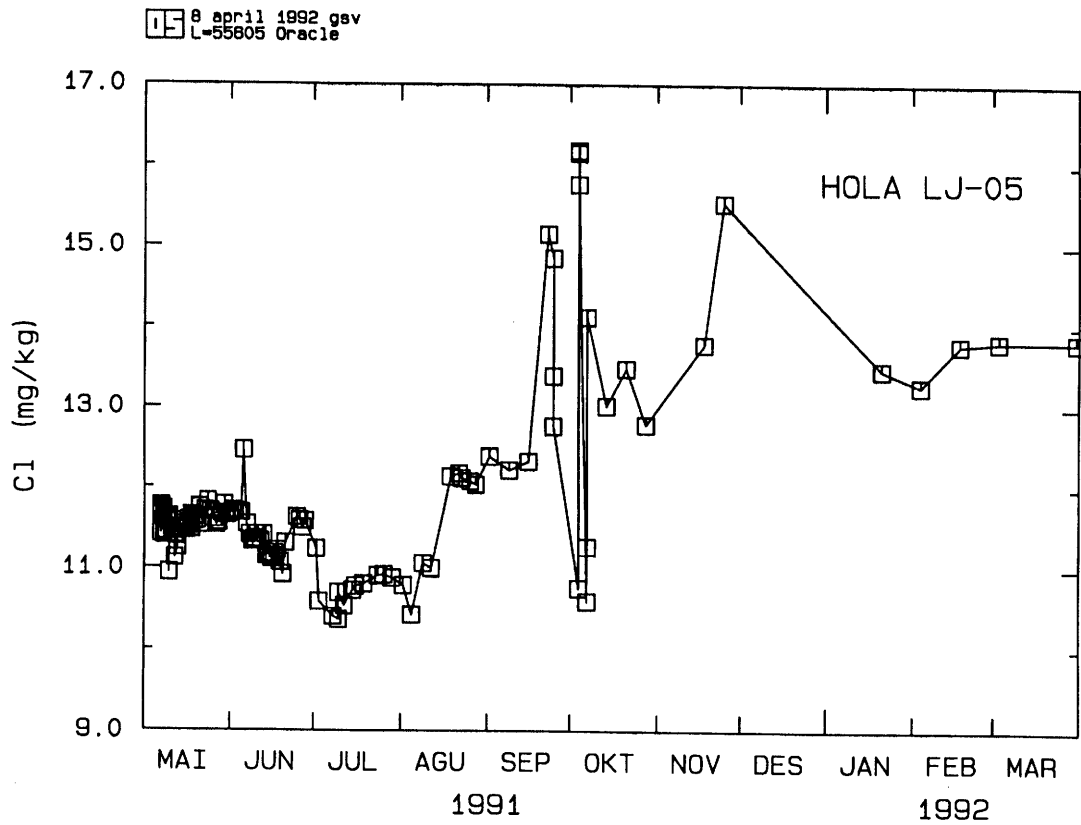
Mynd 14. Styrkur flúoresceins í vatni úr holu HN-10 til mars 1992.



Mynd 15. Styrkur flúoresceins í vatni úr holu BN-1 til mars 1992.

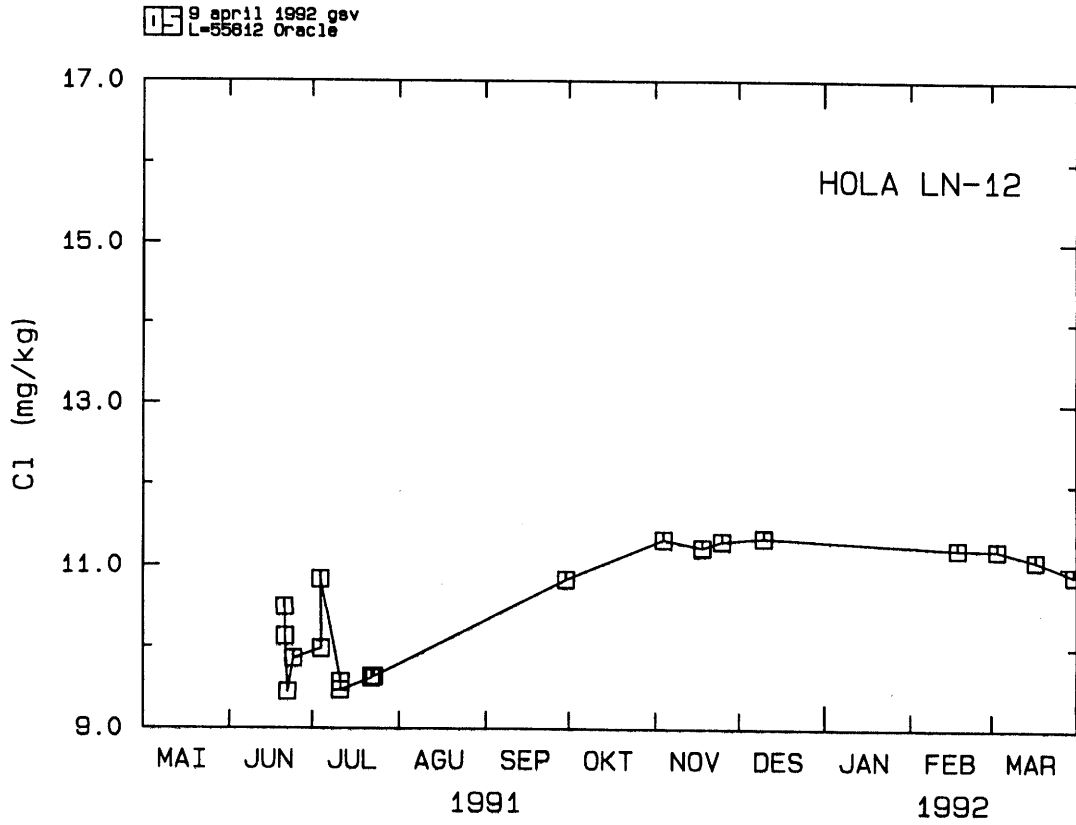


Mynd 16. Styrkur brómíðs í vatni úr holu LJ-5.

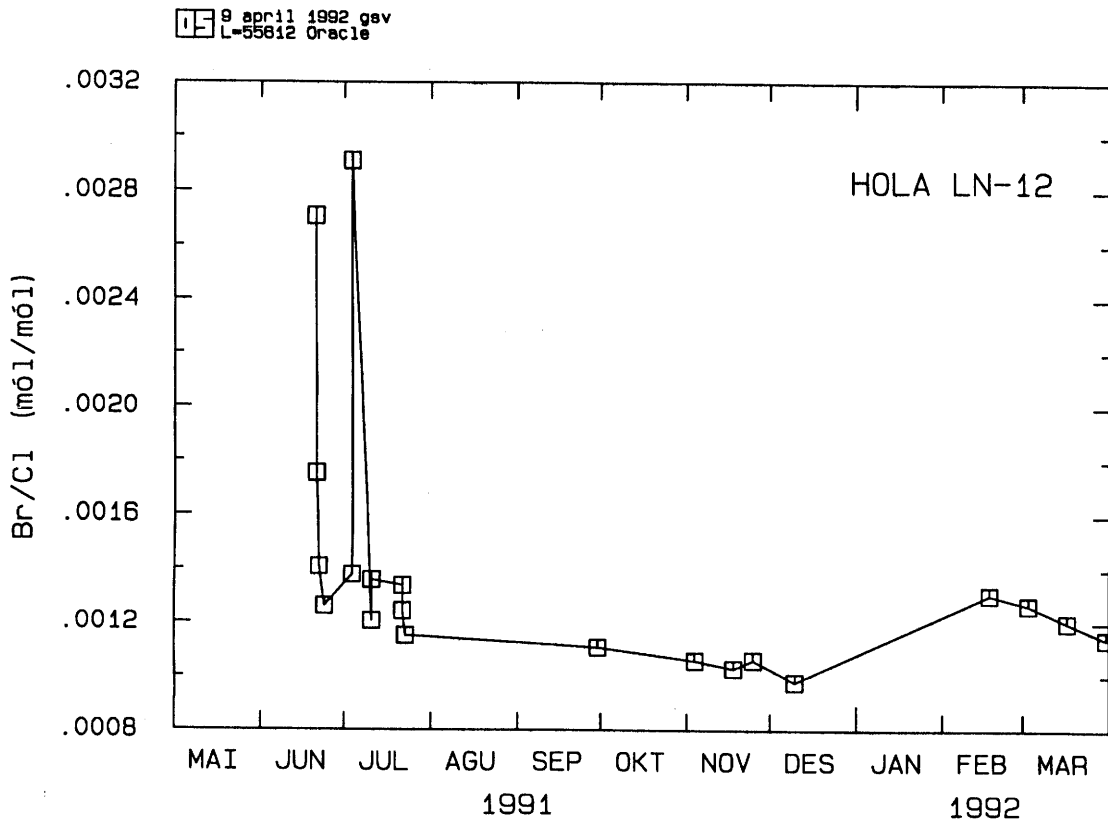


Mynd 17. Styrkur klóríðs í vatni úr holu LJ-5.





Mynd 20. Styrkur klóríðs í vatni úr holu LN-12.



Mynd 21. Hlutfallið  $Br^-/Cl^-$  í vatni úr holu LN-12.

### 3. ÚRVINNSLA OG TÚLKUN

Eins og kemur fram hér að framan þá eru til mjög ítarleg gögn um áhrif niðurdælingarinnar meðan hún stóð yfir og næstu vikur þar á eftir, bæði hvað varðar vatnsborðs- og vinnslubreytingar og endurheimtu ferilefna. Unnið var úr þeim gögnum og eru þau undirstaða túlkunar niðurdælingartilraunarinnar, sem fjallað verður um hér á eftir. Eftir þann tíma kom í ljós að ferilefnin héldu áfram að skila sér fram til þess tíma að sýnatöku var hætt. Þau sýni eru þó mun færri og virðist efnastyrkurinn mjög háður breytingum í vinnslu, sem oftast eru miklar á Laugalandi, og því hvaða vinnsluholur voru notaðar. Vegna þess að gögnin frá þeim tíma voru ekki nógu ítarleg voru þau ekki túlkuð eins og gögnin úr tilrauninni sjálfri. Þó er talið að skýringar á breytingum á styrk ferilefnanna séu þekktar og er fjallað um þær hér á eftir.

#### 3.1 Vatnsborðshækkun og áhrif niðurdælingar á vinnslu

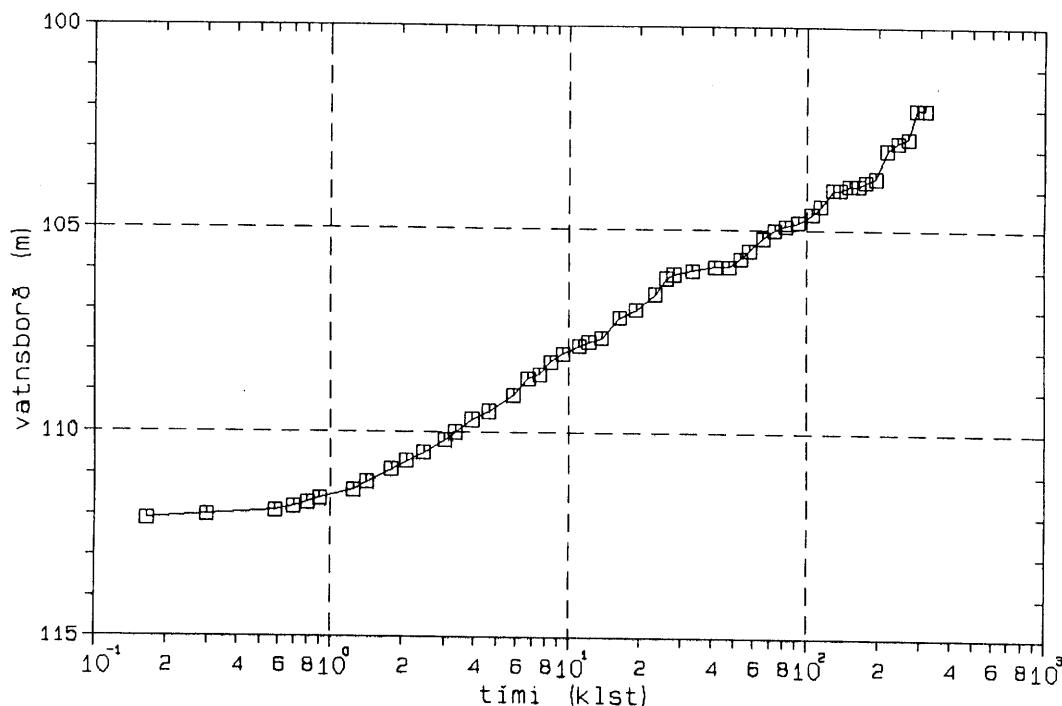
Þó að niðurdælingarvatnið hafi skilað sér mjög hægt yfir í vinnsluholumnar hafði niðurdælingin mikil áhrif á vatnsborð í jarðhitakerfinu á Laugalandi (mynd 7). Jafnframt jókst vinnslan úr LJ-5 um 1,4 l/s að meðaltali í tilrauninni (mynd 6). Fyrstu fjórtán dagana var niðurdælingin að meðaltali um 7,9 l/s og vatnsborð í LN-10 hækkaði um rétta 10 m. Ef tekið er tillit til þess að vikurnar fyrir tilraunina hafði vatnsborð á svæðinu farið hægt hækkandi eftir veturinn (um 1 m/viku) og að vinnslan úr LJ-5 jókst við niðurdælinguna, þá má áætla að vatnsborðshækkunin í LN-10 hafi numið 1,2 m/(l/s) fyrstu fjórtán dagana. Vatnsborðshækkunin hefur væntanlega verið nokkru minni í jarðhitakerfinu við vinnsluholumnar, en því miður var ekki hægt að mæla vatnsborð í þeim vegna bilaðra mæliröra. Hækkunina í LN-10 má bera saman við breytingar sem urðu á vatnsborði holunnar við breytingar í vinnslu úr holu LJ-5 árið 1978 (Axel Björnsson o.fl., 1978) og virðast þær sambærilegar. Það bendir til þess að auka megi vinnslu úr holu LJ-5 um nokkurn veginn sama magn og dælt er niður í holu LJ-8 án þess að vatnsborð í jarðhitakerfinu breytist verulega. Aftur á móti lækkar vatnsborð í holu LJ-5 væntanlega hraðar í fyrstu vegna aukinnar vinnslu en það hækkar vegna niðurdælingarinnar. Því líður sennilega einhver tími þar til holan nær jafnvægi.

Hækkun vatnsborðs fyrsta hálfu mánuð tilraunarinnar, leiðrétt fyrir hækkun þess eftir veturinn, er birt á mynd 22. Sú mynd er með lógaritmískum tímaskala og má á grundvelli hennar áætla leiðnistuðul jarðhitakerfisins milli hola LJ-8 og LN-10, ef gert er ráð fyrir tvívíðu rennsli í kerfinu (líkan Theis). Þá fæst:

$$\frac{k h g}{v} = 3,9 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

þar sem  $k$  er lekt bergsins ( $\text{m}^2$ ),  $h$  þykkt kerfisins ( $\text{m}$ ),  $g$  þyngdarhröðun jarðar ( $\text{m}/\text{s}^2$ ) og  $v$  er eðlisseigja vatns ( $\text{m}^2/\text{s}$ ). Prófun af svipaðri tímallengd sem gerð var á Botni sumarið 1990 leiddi til þess að leiðnistuðull þess kerfis var áætlaður um  $5,0 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ . Hærrí leiðnistuðull fyrir Laugaland endurspeglar bæði meiri lekt og stærra jarðhitakerfi (meiri þykkt).





Mynd 22. Hækkun vatnsborðs í holu LN-10 fyrstu 13 daga prófunarinnar.

## 3.2 Ferilprófunin

### 3.2.1 Endurheimt ferilefna

Eins og komið hefur fram þá skiluðu ferilefnin sér mjög hægt yfir í holu LJ-5. Fyrstu merki þess að niðurdælingarvatnið væri farið að skila sér sáust reyndar eftir um 10 daga og hefur það vatn borist með um 1 m/klst hraða milli holanna. Annars hefur rennslis hraði niðurdælingarvatnsins verið mjög lífill.

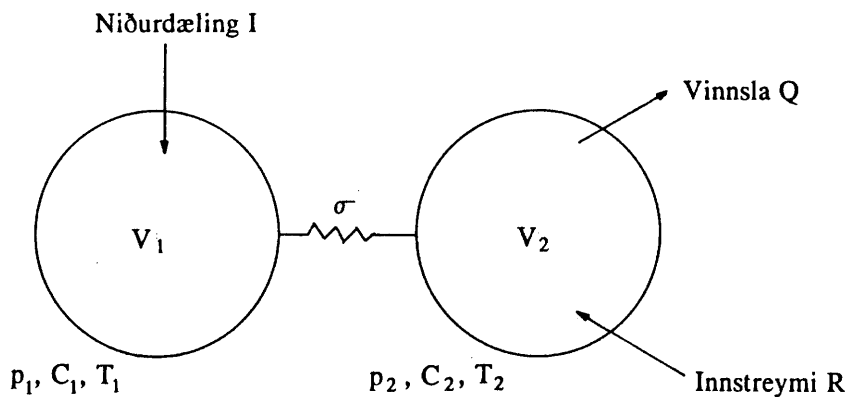
Þar sem styrkur ferilefnanna í vatni úr holu LJ-5 er þekktur, ásamt vinnslu úr henni, er auðvelt að áætla hve mikið af ferilefnunum hafði skilað sér upp aftur á hverjum tíma. Það má gera á grundvelli eftirfarandi jöfnu

$$m = \int_0^t C(\tau)Q(\tau) d\tau \quad (1)$$

þar sem  $m$  er endurheimtur massinn,  $t$  tíminn frá því að tilraunin hófst,  $C$  styrkur ferilefnisins í vatni úr holu LJ-5 og  $Q$  vinnslan úr holunni. Þannig má áætla að meðan á niðurdælingunni stóð, þ.e. á um 40 dögum, endurheimtust aðeins 1,7 g af þeim 1000 g flúoresceins sem sett voru niður. Þá má áætla að á heilu ári hafi einungis um 25 g af flúorescein skilað sér upp um vinnsluholumar á Laugalandi. Þetta sýnir greinilega að vatnið sem dælt var niður hefur dreift sér um mjög stórt rúmmál og að hættan á snöggri kólnun vegna niðurdælingar sé hverfandi. Með svipuðu áframhaldi má ætla að það taki um 40 ár fyrir allt efnið að skila sér upp aftur. Reyndar er líklegt að aðeins lítill hluti efnisins muni í raun skila sér (sjá jöfnu E-42 í viðauka E hér á eftir). Auk þess er hugsanlegt að flúoresceinið hafi verið farið að brotna niður í jarðhitakerfinu er kom fram á veturinn 1991/1992.

### 3.2.2 Túlkun ferilprófunar með einföldu líkani

Til þess að hægt væri að vinna úr niðurstöðum tilraunarinnar á magnbundinn hátt var sett upp einfalt þjappað líkan af jarðhitakerfinu. Það er gert úr tveimur geymum sem tengdir eru með viðnámi eins og sýnt er á mynd 23. Fyrri geymirinn (1) hermí hluta jarðhitakerfisins umhverfis holu LJ-8. Seinni geymirinn (2) hermí þann hluta jarðhitakerfisins sem er umhverfis vinnsluholurnar. Geymarnir eru síðan tengdir með viðnámi sem hermí rennslisviðnám (lekt) í þeim hluta jarðhitakerfisins sem líkanið nær yfir. Í viðauka E eru leiddar út þær jöfnur sem lýsa viðbrögðum líkansins við niðurdælingu.

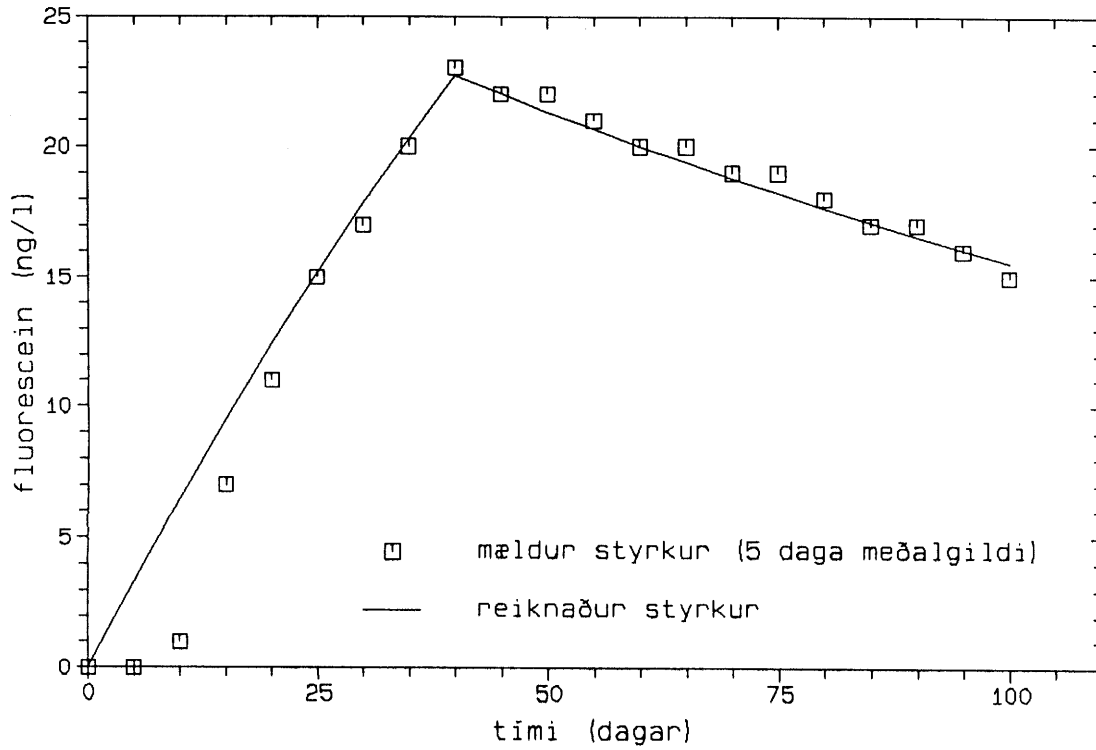


Mynd 23. Einfalt líkan til þess að herma þrýsting ( $p_i$ ), breytingar í styrk ferilefna ( $C_i$ ) og hita ( $T_i$ ) í niðurdælingartilrauninni.

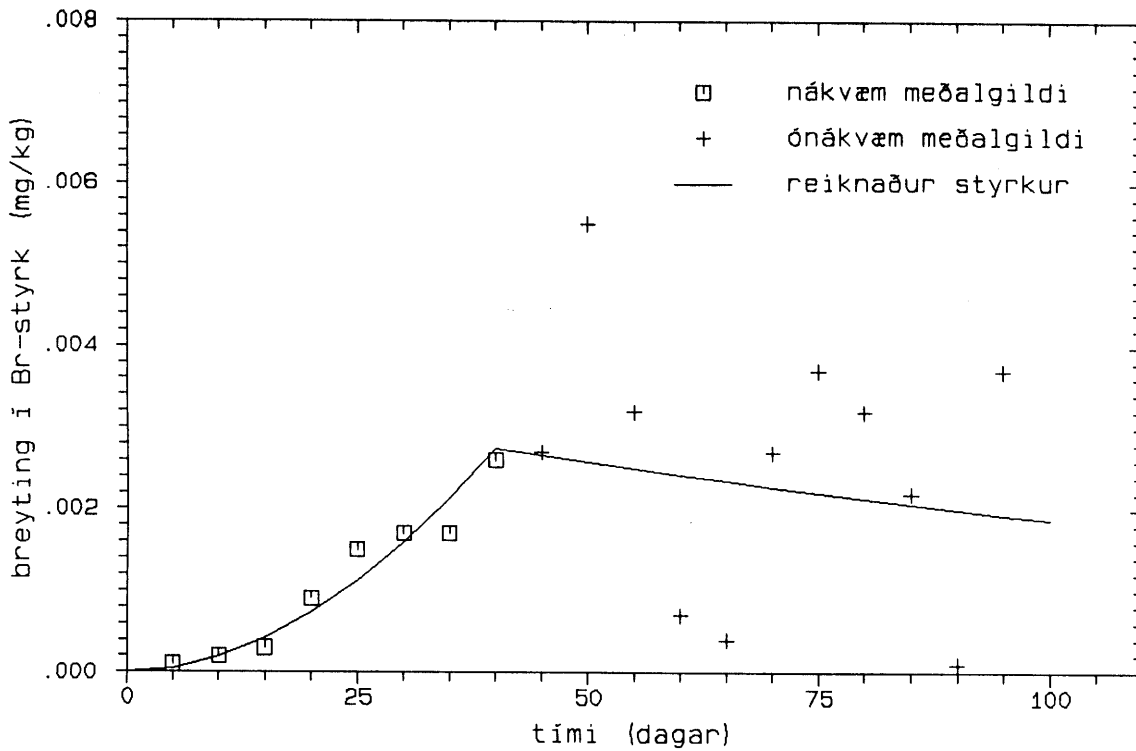
Við túlkunina er byggt á jöfnum E-34 til E-37 í viðaukanum, þar sem efni A er flúorescein og efni B brómíð. Unnið er með fimm daga meðalgildi á styrk ferilefnanna og er það vegna þess að einstakar mælingar eru ónákvæmar, sérstaklega mælingar á brómíði. Einnig er unnið með breytingar í brómíðstyrk og miðað við að fyrir tilraunina hafi styrkur þess verið 29,3  $\mu\text{g}/\text{kg}$ . Gengið er út frá eftirfarandi:

$$\begin{aligned} I &= 5,5 \text{ kg/s (niðurdælingin)} \\ Q_1 &= 40 \text{ kg/s (vinnsla í niðurdælingu)} \\ Q_2 &= 28 \text{ kg/s (vinnsla eftir niðurdælingu)} \\ I \cdot M &= 1 \text{ kg (massi flúoresceins)} \\ C_1 &= 12 \text{ mg/kg (styrkur brómíðs í niðurdælingu)} \\ t_0 &= 40 \text{ dagar (lengd niðurdælingartilraunar)} \end{aligned}$$

Stuðlunum  $\alpha_1$  og  $\alpha_2$  var síðan breytt nokkrum sinnum þar til viðbrögð líkansins, reiknuð með jöfnum E-34 til E-37, féllu vel að mældum gildum. Þetta var gert fyrir gögnin allt til ágústloka, eða í 100 daga. Niðurstöðurnar fyrir flúorescein eru birtar á mynd 24. Þar sést að skv. líkaninu verða strax breytingar í flúoresceinstyrk, en ekki fyrr en eftir um 10 daga í raunveruleikanum. Ástæðan er sú að í líkaninu er gert ráð fyrir því að niðurdælingarvatnið blandist strax saman við allt vatnið í fyrri tanknum. Niðurstöðurnar fyrir brómíð, reiknaðar með þeim stuðlum sem fengust fyrir flúoresceinið, eru birtar á mynd 25. Ekki þurfti að hagræða stuðlunum sérstaklega fyrir brómíðið, sem styrkir mjög túlkunina. Reiknaður brómíðstyrkur fellur vel að meðalgildunum fyrstu 40 daga (meðan á niðurdælingunni stóð), en eftir það er hann mjög breytilegur. Er það annars vegar vegna þess að þá eru mun færri mælingar á bak við hvert meðalgildi og hins vegar vegna þess að þá er dælingin úr holu LJ-5 breytileg, sem veldur einhverjum sveiflum í brómíðstyrknum.



Mynd 24. Mældur og reiknaður styrkur flúoresceins í holu LJ-5.



Mynd 25. Mældar og reiknaðar breytingar í Br-styrk í holu LJ-5.

Eftirfarandi gildi á stuðlunum  $\alpha_1$  og  $\alpha_2$  gáfu best samræmi:

$$\alpha_1 = \frac{1}{V_1 \rho_v \phi_1} = 5,4 \times 10^{-10} \text{ kg}^{-1}$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{V_2 \rho_v \phi_2} = 2,6 \times 10^{-9} \text{ kg}^{-1}$$

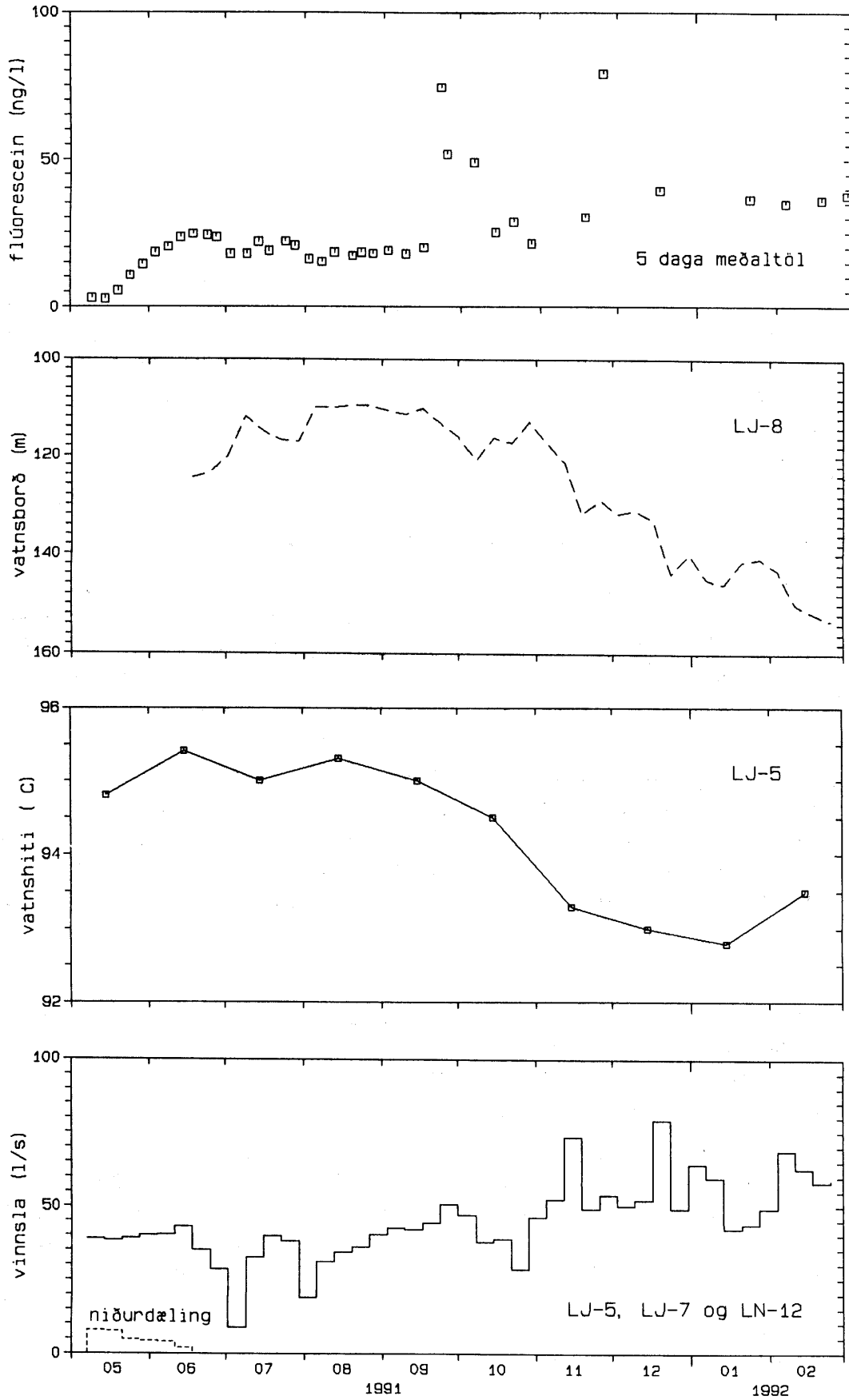
þar sem  $V_1$  og  $V_2$  eru rúmmál geymanna,  $\phi_1$  og  $\phi_2$  poruhlutar bergs í þeim og  $\rho_v$  er eðlismassi vatns í kerfinu. Þessi gildi má nú nota til þess að áætla rúmmál þeirra hluta jarðhitakerfisins sem líkanið hermír og nota þau gildi til þess að spá fyrir um kólnun vatns úr holu LJ-5 við langtímaniðurdælingu. Ekki eru til beinar mælingar á poruhluta bergs í jarðhitakerfum eins og á Laugalandi, en áætla má að  $\phi_1 \approx \phi_2 \approx 0,1$ . Þá fæst að  $V_1 \approx 0,019 \text{ km}^3$  og að  $V_2 \approx 0,004 \text{ km}^3$ . Ef við síðan göngum út frá því að sameiginlega hermi geymarnir kassa með holur LJ-8 og LJ-5 í gagnstæðum hornum fæst að hæð kassans sé rúmlega 700 m. Þetta verða að teljast mjög sennilegar tölur, en þær staðfesta jafnframt það að niðurdælingarvatnið dreifist um mjög stórt rúmmál.

### 3.2.3 Breytingar í styrk ferilefna veturinn 1991/1992

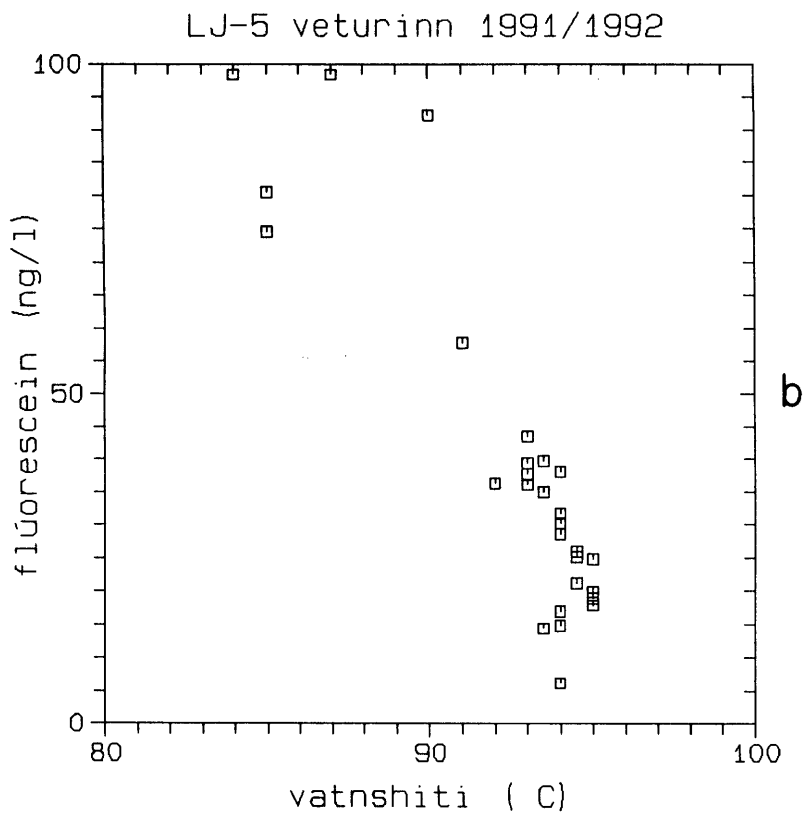
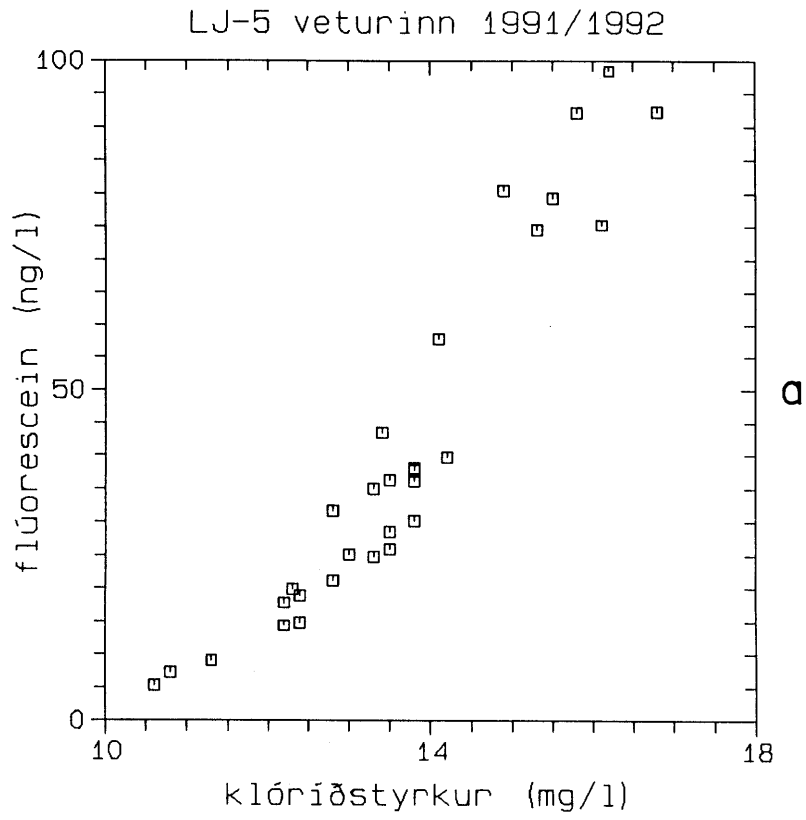
Eins og áður hefur komið fram þá verður mikil breyting í endurheimtu ferilefnanna frá og með september 1991. Í fyrsta lagi koma fram toppar í styrk þeirra í holu LJ-5 þegar holan er ræst á ný eftir hvíld (myndir 10, 11, 16 og 18). Einnig sjást slíkir toppar í holu LN-12 (myndir 13, 19 og 21). Í öðru lagi eykst meðalstyrkur ferilefnanna verulega í holu LJ-5 veturinn 1991/1992 án þess að þau skili sér í nokkru magni í holur LJ-7 eða LN-12. Þessum breytingum fylgja sambærilegar breytingar í klóríðstyrk (myndir 17 og 20).

Greinilegt er að topparnir tengjast því að holurnar eru ekki í jafnvægi er sýnin eru tekin og hlutfall vatns úr mismunandi æðum því annað en venjulega. Líklegast er talið að þegar ekki er dælt úr holu LJ-5 renni inn í hana vatn úr æðum ofan til í holunni, sem innihaldi meira af ferilefnunum og hafi hærri klóríðstyrk. Er hér væntanlega um æðina á 600 m dýpi að ræða, þó æðin á 200 m komi einnig til greina. Þegar dæling hefst á ný eftir hlé fæst því í fyrstu mun meira af vatni úr efri æðunum. Þetta er væntanlega einnig skýringin á toppunum í holu LN-12. Þar eru nokkrar smáæðar ofan til í holunni, þó þær gefi óverulega miðað við aðalæðina á 1600 m dýpi. Hóla LJ-7 er hins vegar fódruð í 930 m og smáæðar í efri hluta hennar því fódraðar af. Þess vegna sjást ekki toppar í þeirri holu. Reyndar sýndu djúpsýni úr holu LJ-8 að djúpri æðar holunnar væru klóríðríkari en grynri æðarnar (Hrefna Kristmannsdóttir og Sigfús Johnsen, 1981). Þessu er þá öfugt farið í holu LJ-5, og í holum LJ-7 og LN-12 hafa djúpu æðarnar lágan klóríðstyrk.

Aukningin í meðalstyrk ferilefnanna í holu LJ-5 veturinn 1991/1992 á sér væntanlega sömu skýringu, þ.e. að hlutur efri aðalæðarinnar (600 m) í holunni eykst. Þessi aukning sést greinilega á mynd 26 sem sýnir styrk flúoresceins í vatni úr LJ-5 til loka febrúar 1992 ásamt vinnslu úr jarðhitakerfinu, hita vatns úr holu LJ-5 og vatnsborðsbreytingum yfir sama tímabil. Lækkun vatnshitans yfir veturinn styður þessa túlkun því efri æðin er eitthvað kaldari en sú neðri. Þetta samspil grunnra og djúpra æða í holu LJ-5 sést einnig mjög vel á mynd 27 sem sýnir annars vegar samband flúoresceinstyrks og klóríðstyrks í vatni úr holunni og hins vegar samband flúoresceinstyrks og vatnshita.



Mynd 26. Styrkur flúoresceins, vatnsborð LJ-8, mánaðar meðalvatnshiti LJ-5 og heildarvinnsla á Laugalandi maí 1991 til febrúar 1992.



Mynd 27. Samband flúoresceinstyrks og klóríðstyrks annars vegar (a) og flúorescein-  
styrks og vatnshita hins vegar (b) í holu LJ-5 veturinn 1991/92.

Skýringarnar á því að hlutur efri æðarinnar í holu LJ-5 eykst veturinn 1991/1992 eru líklegast tvær:

1. Á mynd 26 sést hvernig vinnslan eykst á Laugalandi um veturinn og hvernig vatnsborð í jarðhitakerfinu lækkar við það. Þetta veldur því væntanlega að vinnsluholumar taka til sín meira af vatni úr kerfinu umhverfis holu LJ-8 og þá aðallega um grynri æðina í holu LJ-5. Hlutfallslega minna fæst þá af vatni úr dýpri æðunum í vinnsluholumum. Líkanið á mynd 23 getur skýrt þetta á einfaldan hátt því ef gert er ráð fyrir aukinni vinnslu án þess að fasta innstreymið breytist þá eykst rennslið milli tankanna og þar með styrkur ferilefnanna í vinnslunni.
2. Einnig hefur það áhrif að veturinn 1991/1992 var mest dælt úr holu LN-12. Ef gengið er út frá því að djúpu æðarnar í vinnsluholumum þremur séu tengdar þá veldur aukning í vinnslu úr holu LN-12 því að það dregur af dýpri æðinni í holu LJ-5 og hlutur efri æðarinnar eykst.

Ofangreindar niðurstöður virðast því í stuttu máli sýna það að vatn sem dælt er niður í holu LJ-8 dreifist um nokkuð stóran hluta jarðhitakerfisins í nánd við holuna. Þessi hluti er hins vegar ekki í beinum tengslum við aðalæðar vinnsluholanna, nema e.t.v. æðar í efri hluta holu LJ-5. Sveiflur í vatnshita og klóríðstyrk holu LJ-5 gegnum árin virðist eðlilegast að skýra með samspili grunnra og djúpra æða í holunni þar sem grynri æðarnar hafa hærri klóríðstyrk og eru eitthvað kaldari. Grynri æðarnar gætu verið í tengslum við dýpri æðar í holu LJ-8.

### 3.3 Spár um áhrif langtímaniðurdælingar

Rúmmál geyma líkansins sem notað var til þess að herma endurheimtu ferilefnanna í holu LJ-5 var að síðustu notað til þess að áætla kólnun vatns úr holu LJ-5 við langtímaniðurdælingu. Vatnshitinn var reiknaður með jöfnu E-24, en til einföldunar gengið út frá því að  $R \approx Q - I$ . Þá má umskrifa jöfnuna:

$$T_2(t) = T_0 e^{-\beta_2 Q t} + \frac{(Q-I)T_0 + IT_1}{Q} (1 - e^{-\beta_2 Q t}) + \frac{\beta_2 I (T_0 - T_1)}{(\beta_2 Q - \beta_1 I)} (e^{-\beta_1 I t} - e^{-\beta_2 Q t}) \quad (2)$$

Vatnshitinn var reiknaður fyrir eftirfarandi tilfelli:

$$\begin{aligned} I &= 10 \text{ kg/s (niðurdæling LJ-8)} \\ Q &= 40 \text{ kg/s (vinnsla LJ-5)} \\ T_0 &= 95^\circ\text{C (upphafshiti jarðhitakerfis)} \\ T_1 &= 15^\circ\text{C (hiti niðurdælingarvatns)} \end{aligned}$$

og reiknað með eftirfarandi eiginleikum:

$$\begin{aligned} \rho_v &= 970 \text{ kg/m}^3 \text{ (eðlismassi vatns í kerfinu)} \\ c_v &= 4200 \text{ J/kg}^\circ\text{C (varmarýmd vatns í kerfinu)} \\ \rho_b &= 3000 \text{ kg/m}^3 \text{ (eðlismassi bergs í kerfinu)} \\ c_b &= 700 \text{ J/kg}^\circ\text{C (varmarýmd bergs í kerfinu)} \\ \phi_i &= 0,1 \quad i=1,2 \text{ (poruhluti kerfisins)} \end{aligned}$$

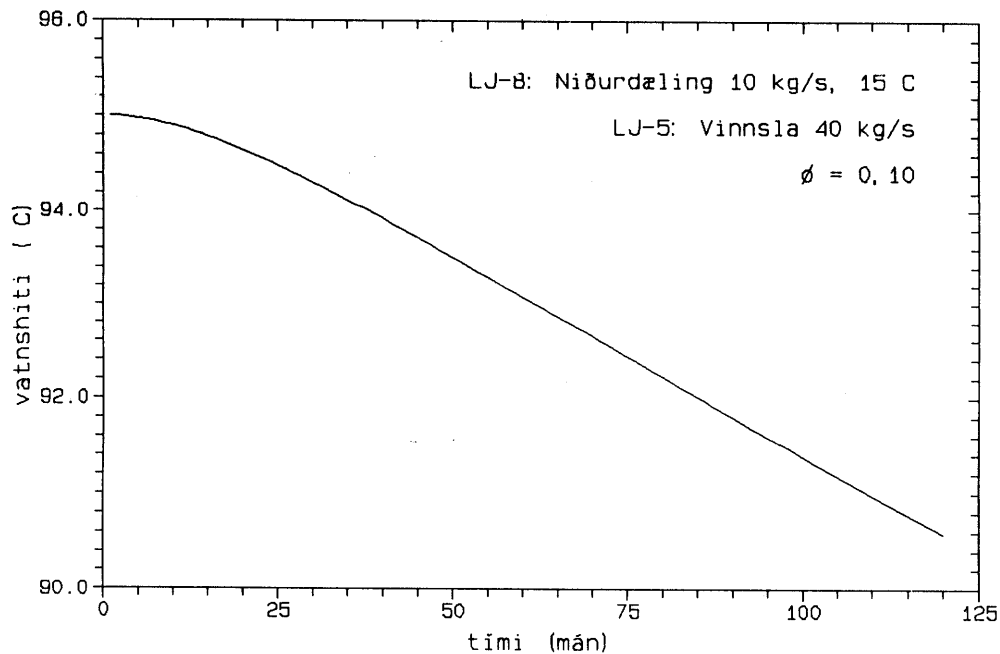
þannig að:

$$\beta_1 = \frac{c_v}{V_1(\rho c)_1} = 9,6 \times 10^{-11} \text{ kg}^{-1}$$

$$\beta_2 = \frac{c_v}{V_2(\rho c)_2} = 4,6 \times 10^{-10} \text{ kg}^{-1}$$

Þá fengust niðurstöðurnar á mynd 28, sem sýnir áætlaðar breytingar á vatnshita holu LJ-5 við 10 ára niðurdælingu í holu LJ-8. Þess ber að geta að spáin er mjög ónákvæm því að eins lítið brot flúoresceinsins skilaði sér á þeim 100 dögum sem notaðir voru við hermun ferilprófsins. Einnig er líkanið sem notað er hér mjög einfalt. Ef eitthvað af flúoresceininu hefur brotnað niður í jarðhitakerfinu þessa fyrstu 100 daga eru rúmmálin  $V_1$  og  $V_2$  ofmetin og kólnunin því vanmetin. Það verður þó að teljast ólíklegt því brómíðið skilaði sér í sambærilega lágum styrk. Auk þess eru niðurstöðurnar háðar poruhluta þannig að ef reiknað er með minni poruhluta verður kólnunin hægari.

Samkvæmt spánni kólnar vatn úr LJ-5 mjög hægt, eða úr  $95^\circ\text{C}$  niður í tæplega  $91^\circ\text{C}$  á tíu árum. Ef reiknað er með að auka megi vinnsluna um 10 l/s vegna niðurdælingarinnar má áætla að þetta þýði um 2,7 MW aflaukningu í upphafi, en um 2,0 MW aukningu eftir 10 ár. Þess má geta að ef unnið er úr holum LJ-7 og LN-12 í stað LJ-5 er þess að vænta að kólnunin verði enn minni.



Mynd 28 Reiknuð kólnun vatns úr holu LJ-5 við 10 kg/s niðurdælingu  $15^\circ\text{C}$  vatns og 40 kg/s vinnslu.

### 3.4 Framhald rannsókna

Niðurstöður tilraunarinnar benda til þess að niðurdæling sé mjög vænleg til þess að auka hámarksafl og vinnslugetu Laugalandssvæðisins. Enn eru þó nokkrir óvissuþættir sem leita þarf svara við og er fjallað lítillega um þá hér á eftir. Til greina kemur að nota annað



hvort bakrásarvatn eða kalt grunnvatn til niðurdælingarinnar.

- Seigja kalds grunnvatns er u.þ.b. fjórfalt meiri en seigja þess vatns sem dælt var niður í tilrauninni. Það gæti þýtt að mun meiri þrýsting þurfi til þess að dæla niður köldu vatni eða bakrásarvatni en þurfti í tilrauninni. Á móti þeim áhrifum vegur tvennt. Annars vegar það að þrýstifallið milli holu LJ-8 og jarðhitakerfisins er væntanlega að miklu leyti vegna iðustreymis í og næst holunni. Þá eru áhrif seigju miklu minni. Hins vegar það að við niðurdælingu kalds vatns kólnar berg næst holunni og dregst saman. Við það víkka sprungur næst holunni sem vegur upp á móti áhrifum meiri seigju. Ekki er hægt að segja fyrir um hvernig samspil þessara þátta verður nema gerð verði tilraun með það að dæla niður köldu vatni í holuna.
- Ólíklegt er að veruleg efnafræðileg áhrif verði ef bakrásarvatni er dælt niður á Laugalandssvæðinu. Það er því besti kosturinn frá jarðhitafræðilegu sjónarmiði.
- Í köldu grunnvatni er töluvert súrefni, en telja verður góðar líkur á því að það muni allt eyðast úr vatninu sem dælt verður niður áður en það berst til vinnsluholanna, enda er það niðurstaða þessarar tilraunar að vatnið berist mjög hægt milli holanna. Meiri hætta virðist hins vegar á því að kalk- og magnesíum-silikat-útfellingar verði við niðurdælingarholuna er kalda vatnið tekur að hitna. Slíkar útfellingar gætu stíflað æðar við holuna. Efnasamsetning kalds vatns á svæðinu er illa þekkt, en það er einn þeirra þátta sem nauðsynlegt er að hafa upplýsingar um til þess að meta útfellingarhættuna. Reikningar á grundvelli upplýsinga um efnasamsetningu kalds grunnvatns frá Grísará benda ekki til þess að mikil hætta sé á kalkútfellingum við upphitun þess, en líklegt er að magnesíum-siliköt muni falla út. Lauslega metið má gera ráð fyrir að hámarksmagn útfellinga verði um 4-5 m<sup>3</sup> af magnesíum-silikötum árlega við niðurdælingu á 10 l/s af köldu grunnvatni. Er þá gert ráð fyrir að styrkur Mg<sup>++</sup> í kalda vatninu sé 6 ppm. Ef við reiknum með 10% poruhluta bergsins ættu 400-500 m<sup>3</sup> bergs að þéttast á 10 árum, en það jafngildir rúmmáli tenings sem er u.þ.b. 7,5 m á kant. Mestu máli skiptir hins vegar hvar útfellingarnar verða. Ef þær verða alveg við holuna gætu þær fljótlega stíflað æðarnar sem dælt er úti í, en ef þær verða langt úti í jarðhitakerfinu myndu þær engin merkjanleg áhrif hafa.
- Hagkvæmni niðurdælingar á Laugalandi hefur verið metin gróflega af Ólafi G. Flóvenz o.fl. (1993). Samkvæmt því virðist niðurdæling 30 l/s bakrásarvatns mjög hagkvæm, en skoða þarf hagkvæmni niðurdælingar minna magns. Samkvæmt sömu skýrslu er líklegt að niðurdæling kalds grunnvatns sé enn hagkvæmari.

Útilokað er að meta hver áhrif útfellinga vegna niðurdælingar kalds grunnvatns gætu orðið nema með því að dæla köldu vatni niður í nokkurn tíma. Í ljósi þess er lagt til að hafinn verði undirbúningur að tilraun með niðurdælingu kalds grunnvatns í holu LJ-8. Fyrst þarf að kanna efnafræðilega eiginleika vatnsins sem dælt yrði niður. Óeðlileg hækkun í toppþrýstingi á holu LJ-8 og/eða minnkun í niðurdælingu í slíkri tilraun myndi benda til þess að lekt æða næst holunni væri að minnka vegna útfellinga og þá yrði að hætta niðurdælingu kalds vatns til þess að niðurdælingarholan eyðileggðist ekki.

#### 4. SAMANDREGNAR NIÐURSTÖÐUR

Þær niðurstöður sem fengist hafa af niðurdælingartilrauninni á Laugalandi í Eyjafjarðarsveit má draga saman á eftirfarandi hátt:

1. Samkvæmt mælingum í holu LN-10 hækkaði vatnsborð í jarðhitakerfinu við vinnsluholurnar nær samstundis er niðurdæling hófst í holu LJ-8. Ekki var hægt að mæla hækkunina í vinnsluholunum sjálfum. Talið er að auka megi vinnslu úr holu LJ-5 um nokkurn veginn sama magn og dælt er niður í holu LJ-8 án þess að vatnsborð í jarðhitakerfinu breytist verulega. Einhvern tíma gæti þó tekið holu LJ-5 að ná jafnvægi ef niðurdæling og sambærileg vinnsluaukning hæfust samtímis. Vatnsborðshækkun mældist einnig í holum LJ-6, LG-9 og KW-2 og e.t.v. í holum GG-1 og HW-9.
2. Ferilefni sem sett voru í holu LJ-8 skiluðu sér mjög hægt yfir í holu LJ-5. Um 10 dagar liðu frá því niðurdælingin hófst og þar til fyrst fór að votta fyrir efnunum. Síðan voru þau að skila sér í mjög lágum styrk allt þar til sýnatöku var hætt u.þ.b. ári síðar. Áætlað er að á þeim tíma hafi aðeins um 2,5% flúoresceinsins, sem sett var niður í upphafi tilraunarinnar, skilað sér. Þetta sýnir að vatnið sem dælt var niður dreifði sér um mjög stórt rúmmál og að ólíklegt er að það skili sér allt yfir í vinnsluholurnar. Ferilefnin bárust aðeins að óverulegu leyti yfir í holur LJ-7 og LN-12.
3. Einkennilegir toppar í styrk ferilefna í holu LJ-5 haustið 1991 og almenn hækkun á styrk þeirra næsta vetur eru talin stafa af auknum hlut efri æða holunnar. Er þessi niðurstaða studd af sambærilegum breytingum í klóríðstyrk og vatnshita. Efri æðarnar í holu LJ-5 virðast jafnframt vera einu æðarnar í vinnsluholunum á Laugalandi sem eru í einhverjum tengslum við holu LJ-8.
4. Herma má endurheimtu ferilefnanna í holu LJ-5 nokkuð vel með einföldu þjöppuðu líkani. Ef gert er ráð fyrir meðalporuhluta 0,1 þá er rúmmál líkansins  $0,023 \text{ km}^3$ . Líta má á þetta sem mat á því rúmmáli er niðurdælingarvatnið dreifðist um í tilrauninni.
5. Ekki varð vart breytinga á hita vatns úr holu LJ-5 meðan á niðurdælingunni stóð. Ofangreint líkan var því notað til þess að spá kólnun vatns úr holu LJ-5 við langtímaniðurdælingu. Spáð var fyrir tilfelli þar sem 10 l/s af  $15^\circ\text{C}$  heitu vatni er dælt niður í LJ-8 og vinnslan úr LJ-5 er 40 l/s. Samkvæmt spánni mun vatn úr LJ-5 kólna mjög hægt, eða úr  $95^\circ\text{C}$  niður í tæplega  $91^\circ\text{C}$  á tíu árum. Spáin er þó mjög ónákvæm því aðeins lítið brot ferilefnanna skilaði sér í tilrauninni. Væntanlega mun vatn úr holum LJ-7 og LN-12 kólna enn hægar við langtímaniðurdælingu.
6. Niðurdæling er því mjög vænleg til þess að auka hámarksafl og vinnslugetu Laugalandssvæðisins. Þó þarf að gera tilraun með niðurdælingu kalds grunnvatns í holu LJ-8 í nokkurn tíma til þess að kanna áhrif meiri seigju og kólnunar bergs við holuna. Tilraunin myndi einnig nýtast til þess að meta áhrif hugsanlegra útfellinga. Ekki er talin hætta á útfellingum ef bakrásarvatni er dælt niður. Niðurdæling kalds grunnvatns á Laugalandi virðist fjárhagslega mjög hagkvæm, en meta þarf hagkvæmni niðurdælingar bakrásarvatns frá Akureyri.

## 5. HEIMILDIR

- Axel Björnsson, Hrefna Kristmannsdóttir og Stefán Arnórsson, 1976: Borun við Syðra-Laugaland. Hóla LJ-5. Orkustofnun, OS JHD 7628, 24 s.
- Axel Björnsson, Kristján Sæmundsson, Sigmundur Einarsson, Freyr Þórarinnsson, Stefán Arnórsson, Hrefna Kristmannsdóttir, Ásgrímur Guðmundsson, Benedikt Steingrímsson og Þorsteinn Thorsteinsson, 1978: Hitaveita Akureyrar. Rannsókn jarðhita í Eyjafirði. Áfangaskýrsla. Orkustofnun, OS JHD 7827, 137 s.
- Guðni Axelsson, 1993: Forðufræði jarðhitans. Erindi flutt á Ársfundi Orkustofnunar 1993, Orkustofnun, OS-93013, 17 s.
- Guðni Axelsson, Helga Tulinius, Ólafur G. Flóvenz og Þorsteinn Thorsteinsson, 1988: Vatnsöflun Hitaveitu Akureyrar. Staða og horfur 1988. Orkustofnun, OS-88052/JHD-10, 34 s.
- Hrefna Kristmannsdóttir, Ásgrímur Guðmundsson og Benedikt Steingrímsson, 1977: Borun við Ytra-Laugaland í Eyjafirði. Hóla LJ-8, borun, jarðlög og frumtúlkun mælinga. Orkustofnun, OS JHD 7724, 67 s.
- Hrefna Kristmannsdóttir og Sigfús Johnsen, 1981: Eyjafjörður. Efnainnihald og ísótópa-hlutföll jarðhitavatns. Orkustofnun, OS-81023/JHD-14, 49 s.
- Jón Benjamínsson, 1984: Kenniefni. Um notkun flúrefnanna rhódamíns-WT og flúor-esceins við ferlunar- og streymisathuganir. Heimildakönnun. Orkustofnun, OS-84076/JHD-14, 44 s.
- Ólafur G. Flóvenz, Grímur Björnsson og Guðni Axelsson, 1993: Vatnsöflun Hitaveitu Akureyrar. Staða og horfur í febrúar 1993. Bráðabirgðaskýrsla. Orkustofnun, OS-93006/JHD-02 B, 18 s.
- Ólafur G. Flóvenz, Guðni Axelsson og Guðrún Sverrisdóttir, 1992: Hitaveita Akureyrar. Vinnslueftirlit 1991. Orkustofnun, OS-92020/JHD-07 B, 34 s.
- Ólafur G. Flóvenz, Guðni Axelsson og Hrefna Kristmannsdóttir, 1991: Niðurdæling vatns á lághitasvæðum. Erindi flutt á Orkuþingi 91, Reykjavík, nóvember 1991, 5 s.
- Ólafur G. Flóvenz, Magnús Ólafsson og Auður Ingimarsdóttir, 1990: Vísbending um staðbundið varmanám á lághitasvæði (ágrip). Í: Vatnið og Landið (Guttormur Sigbjarnarson ritstj.), vatnafræðiráðstefna, október 1987. Orkustofnun, Reykjavík, 296-297.

## ENGLISH SUMMARY

In the spring of 1991 the Akureyri District Heating Service and Orkustofnun jointly performed an injection experiment at the Laugaland low-temperature geothermal field in Eyjafjörður county in N-Iceland. The purpose of the experiment was to determine whether the production potential of the field could be increased by injecting warm or cold water into unused wells in the area.

During the experiment, 80°C water from the geothermal field at Ytri-Tjarnir was injected into well LJ-8 at Laugaland, which is about 2800 m deep. This well should be suitable for injection since injected water is expected to enter the geothermal system through many small feed-zones. Therefore the injected water should come into contact with a large volume of hot rock before being produced. At first 8 l/s were injected without a significant well-head pressure. During the experiment 40 l/s of 95°C water were produced from well LJ-5 which is about 250 m away from well LJ-8. Concurrently the water-level in nearby wells was monitored carefully.

Two chemical tracers were employed during the injection experiment. First, 1 kg of sodium-fluorescein was injected into well LJ-8 at the beginning of the experiment. Secondly, sodium-bromide was released continuously into the injection water throughout the experiment. The purpose was to investigate the connection between the injection well, LJ-8, and the production well LJ-5. The return of the tracers was very slow, and in fact only about 1.7 g of sodium-fluorescein was recovered during the 40 day experiment. This shows that the injected water diffused into a very large volume. The water level in the geothermal system rose almost instantaneously, however, in response to the injection. No change in the production temperature of well LJ-5 was observed during the experiment.

The return of the tracers in well LJ-5 was simulated successfully by a very simple lumped model. This model was, in turn, used to predict the cooling of water from well LJ-5 during long-term injection into well LJ-8. Predictions were made for a case where 10 l/s of 15°C water were injected and 40 l/s produced from well LJ-5. According to the model the production temperature of the well will decline very slowly, or from 95°C down to 91°C in 10 years. This prediction is, however, uncertain. Water from other production wells in the Laugaland area, LJ-7 and LN-12, will probably cool down even more slowly.

The results of the injection experiment indicate that injection is viable as the means to increase the production potential of the Laugaland geothermal system. Problems like scaling in the injection well would probably be minimal if return water from the district heating service was injected. Yet injection of cold ground water would be more economical. To investigate the effects of greater viscosity, cooling of the wellbore and scaling it is proposed that injection of cold water into well LJ-8 be tested for some time.



**VIÐAUKI A: Niðurdæling í holu LJ-8**



Niðurdæling í holu LJ-8		
dagsetning	klukkan	niðurdæling síðasta tímabil (l/s)
91-05-07	14:30	0.0
91-05-07	15:05	6.7
91-05-07	15:55	7.7
91-05-07	17:00	9.5
91-05-07	17:48	7.6
91-05-07	18:44	9.5
91-05-07	20:17	8.8
91-05-07	21:20	8.5
91-05-07	22:15	8.2
91-05-07	23:15	8.1
91-05-08	00:15	7.8
91-05-08	02:13	9.0
91-05-08	10:15	8.2
91-05-08	16:05	8.0
91-05-08	18:28	8.4
91-05-08	23:38	8.3
91-05-09	07:45	8.4
91-05-09	13:52	8.0
91-05-10	08:15	8.1
91-05-10	16:00	8.0
91-05-11	00:10	7.9
91-05-11	10:15	8.0
91-05-11	23:59	7.9
91-05-12	23:25	8.0
91-05-14	23:05	7.9
91-05-15	10:40	7.8
91-05-15	22:55	7.9
91-05-16	11:15	7.8
91-05-16	16:10	7.9
91-05-17	11:10	7.8
91-05-17	16:00	7.6
91-05-17	22:47	7.9
91-05-18	11:50	7.8
91-05-18	17:00	7.7
91-05-19	16:30	7.8
91-05-20	00:00	7.7
91-05-20	09:36	7.8
91-05-20	16:25	8.1
91-05-21	05:00	7.8
91-05-22	14:24	5.7
91-05-24	14:40	4.7
91-05-25	10:30	4.9
91-05-26	10:20	4.7
91-05-27	10:30	4.8
91-05-31	10:43	4.6
91-06-01	09:35	4.3
91-06-02	10:30	4.6
91-06-03	11:25	4.5
91-06-04	10:55	4.1
91-06-05	11:40	4.3
91-06-07	10:10	4.2
91-06-08	11:40	4.1
91-06-09	09:50	4.0
91-06-10	11:00	4.3
91-06-12	10:45	4.1
91-06-13	11:05	4.5
91-06-14	10:40	6.9

Hiti niðurdælingar í holu LJ-8		
dagsetning	klukkan	vatnshiti (°C)
91-05-07	15:05	79.5
91-05-07	15:55	80.3
91-05-07	17:00	79.4
91-05-07	17:48	80.4
91-05-07	18:44	80.5
91-05-07	20:17	80.3
91-05-07	21:20	80.2
91-05-07	22:15	80.2
91-05-07	23:15	80.3
91-05-08	00:15	80.2
91-05-08	02:13	80.7
91-05-08	04:25	80.2
91-05-08	07:02	80.6
91-05-08	10:15	80.6
91-05-08	13:25	80.4
91-05-08	16:05	80.5
91-05-08	18:28	80.7
91-05-08	23:38	80.8
91-05-09	07:45	80.8
91-05-09	13:52	80.8
91-05-09	19:25	80.4
91-05-10	00:10	80.4
91-05-10	08:15	80.8
91-05-10	16:00	80.4
91-05-11	00:10	80.5
91-05-11	10:15	80.8
91-05-11	23:59	80.8
91-05-12	09:06	80.8
91-05-12	23:25	80.8
91-05-13	08:20	80.8
91-05-14	23:05	80.8
91-05-15	10:40	80.7
91-05-15	22:55	80.7
91-05-16	11:15	80.8
91-05-16	16:10	80.8
91-05-16	23:15	80.8
91-05-17	11:10	80.8
91-05-17	16:00	80.8
91-05-17	22:47	80.8
91-05-18	11:50	80.8
91-05-18	17:00	80.8
91-05-18	23:45	80.8
91-05-19	11:55	80.8
91-05-19	16:30	80.8
91-05-20	00:00	80.8
91-05-20	09:36	80.7
91-05-20	16:25	80.8
91-05-20	22:30	80.8
91-05-21	05:00	86.4
91-05-22	14:24	82.0
91-05-23	12:00	88.3
91-05-24	14:40	88.2
91-05-25	10:30	88.3
91-05-26	10:20	93.1
91-05-27	10:30	88.1
91-05-28	10:25	88.2
91-05-29	10:32	93.1
91-05-30	10:11	88.1
91-05-31	10:43	90.0
91-06-01	09:35	90.5
91-06-02	10:30	88.0
91-06-03	11:25	89.0



Hiti niðurdælingar í holu LJ-8, frh		
dagsetning	klukkan	vatnshiti (°C)
91-06-04	10:55	88.5
91-06-05	11:40	89.0
91-06-06	11:05	88.6
91-06-07	10:10	88.7
91-06-08	11:40	89.0
91-06-09	09:50	88.3
91-06-10	11:00	88.3
91-06-11	10:55	88.2
91-06-12	10:45	88.4
91-06-13	11:05	88.4
91-06-14	10:40	88.4

Toppþrýstingur á holu LJ-8 í niðurdælingu		
dagsetning	klukkan	toppþrýstingur (bör)
91-05-08	04:25	0.95
91-05-08	07:02	1.10
91-05-08	10:15	1.05
91-05-08	13:25	1.05
91-05-08	16:05	1.07
91-05-08	18:28	1.07
91-05-08	23:38	1.08
91-05-09	07:45	1.07
91-05-09	13:52	1.08
91-05-09	19:25	1.08
91-05-10	00:10	1.05
91-05-10	08:15	1.08
91-05-10	16:00	1.08
91-05-11	00:10	1.08
91-05-11	10:15	1.09
91-05-11	23:59	1.17
91-05-12	09:06	1.17
91-05-12	23:25	1.18
91-05-13	08:20	1.18
91-05-14	23:05	1.18
91-05-15	10:40	1.18
91-05-15	22:55	1.18
91-05-16	11:15	1.18
91-05-16	16:10	1.18
91-05-16	23:15	1.18
91-05-17	11:10	1.18
91-05-17	16:00	1.18
91-05-17	22:47	1.18
91-05-18	11:50	1.18
91-05-18	17:00	1.18
91-05-18	23:45	1.18
91-05-19	11:55	1.18
91-05-19	16:30	1.18
91-05-20	00:00	1.19
91-05-20	09:36	1.18
91-05-20	16:25	1.18
91-05-20	22:30	1.18
91-05-21	05:00	0.00
91-05-22	14:24	0.30
91-05-23	12:00	0.30
91-05-25	10:30	0.28
91-05-26	10:20	0.28
91-05-27	10:30	0.28
91-05-28	10:25	0.28
91-05-29	10:32	0.28
91-05-30	10:11	0.27
91-05-31	10:43	0.27
91-06-01	09:35	0.27
91-06-02	10:30	0.27
91-06-03	11:25	0.27
91-06-04	10:55	0.27
91-06-05	11:40	0.28
91-06-06	11:05	0.27
91-06-07	10:10	0.28
91-06-08	11:40	0.28
91-06-09	09:50	0.28
91-06-10	11:00	0.37
91-06-11	10:55	0.38
91-06-12	10:45	0.37
91-06-13	11:05	0.38
91-06-14	10:40	0.39

**VIÐAUKI B: Dæling og hiti í holu LJ-5**



Vinnsla úr holu LJ-5		
dagsetning	klukkan	meðalvinnsla síðasta tímabil (l/s)
91-04-23	11:00	38.5
91-04-24	14:30	38.1
91-04-25	14:20	38.3
91-04-26	11:10	38.0
91-04-27	11:50	38.4
91-04-28	12:50	38.6
91-04-29	11:20	38.3
91-04-30	10:35	37.0
91-05-01	12:10	38.4
91-05-02	10:40	38.3
91-05-03	11:35	38.4
91-05-04	12:00	38.5
91-05-05	13:00	38.4
91-05-06	12:00	38.4
91-05-07	14:30	38.5
91-05-07	16:40	35.9
91-05-07	19:10	36.7
91-05-07	22:10	41.7
91-05-08	02:02	39.1
91-05-08	06:53	38.4
91-05-08	13:37	38.8
91-05-08	18:43	38.1
91-05-09	07:53	41.7
91-05-09	14:08	39.5
91-05-09	19:35	39.2
91-05-10	00:20	38.6
91-05-10	08:35	41.9
91-05-10	16:15	39.9
91-05-11	00:25	38.8
91-05-11	10:47	39.9
91-05-11	23:42	39.4
91-05-12	08:52	39.4
91-05-12	23:42	39.3
91-05-13	08:30	41.5
91-05-13	14:30	40.3
91-05-13	22:15	38.7
91-05-14	11:10	40.0
91-05-14	22:50	39.3
91-05-15	10:50	39.1
91-05-15	17:40	39.8
91-05-15	23:05	39.5
91-05-16	11:25	39.4
91-05-16	16:00	38.8
91-05-16	23:25	39.3
91-05-17	11:10	39.5
91-05-17	16:10	38.3
91-05-17	22:27	40.7
91-05-18	12:00	39.4
91-05-18	16:50	39.1
91-05-18	23:30	40.0
91-05-19	12:05	39.5
91-05-19	16:20	38.6
91-05-19	23:45	40.1
91-05-20	09:10	39.2
91-05-20	16:15	39.2
91-05-20	22:18	39.5
91-05-21	17:55	39.2
91-05-22	14:55	37.3
91-05-23	10:55	39.6
91-05-24	10:55	39.6
91-05-25	10:18	39.7
91-05-26	10:10	39.7

Vinnsla úr holu LJ-5, frh.		
dagsetning	klukkan	meðalvinnsla síðasta tímabil (l/s)
91-05-27	10:15	39.8
91-05-28	10:35	39.2
91-05-29	10:18	39.8
91-05-30	10:50	39.9
91-05-31	10:26	39.9
91-06-01	09:20	40.0
91-06-02	10:14	39.9
91-06-03	11:15	40.0
91-06-04	11:00	40.2
91-06-05	11:30	40.1
91-06-06	10:50	40.2
91-06-07	08:15	40.3
91-06-08	11:30	41.0
91-06-09	09:35	40.4
91-06-10	10:45	40.3
91-06-11	11:05	40.3
91-06-12	10:35	40.3
91-06-13	10:40	40.4
91-06-14	10:30	40.1
91-06-15	11:20	22.0
91-06-15	19:10	38.1
91-06-16	10:20	42.7
91-06-16	19:50	42.1
91-06-17	11:45	42.6
91-06-17	20:05	42.3
91-06-18	08:10	42.5
91-06-19	10:30	28.9
91-06-20	10:05	25.4
91-06-21	09:50	41.8
91-06-25	11:10	5.0
91-06-28	10:20	40.4
91-07-02	11:35	19.7

Hiti vatns úr holu LJ-5		
dagsetning	klukkan	vatnshiti (°C)
91-04-22	14:35	93.5
91-04-23	11:00	95.0
91-04-24	14:30	94.0
91-04-25	14:20	94.5
91-04-26	11:10	94.5
91-04-27	11:50	94.5
91-04-28	12:50	94.0
91-04-29	11:20	95.0
91-04-30	10:35	95.0
91-05-01	12:10	95.0
91-05-02	10:40	94.5
91-05-03	11:35	95.0
91-05-04	12:00	95.5
91-05-05	13:00	94.0
91-05-06	12:00	94.5
91-05-07	14:30	95.0
91-05-07	16:40	94.5
91-05-07	19:10	94.0
91-05-07	22:10	94.0
91-05-08	02:02	94.0
91-05-08	06:53	95.0
91-05-08	13:37	95.0
91-05-08	18:43	94.0
91-05-09	07:53	94.0
91-05-09	14:08	94.0
91-05-09	19:35	94.0
91-05-10	00:20	95.0
91-05-10	08:35	95.0
91-05-10	16:15	95.5
91-05-11	00:25	95.0
91-05-11	10:47	94.0
91-05-11	23:42	95.0
91-05-12	08:52	95.0
91-05-12	23:42	94.0
91-05-13	08:30	94.0
91-05-13	14:30	94.0
91-05-13	22:15	94.0
91-05-14	11:10	94.5
91-05-14	22:50	94.5
91-05-15	10:50	94.5
91-05-15	17:40	94.5
91-05-15	23:05	94.5
91-05-16	11:25	94.5
91-05-16	16:00	95.0
91-05-16	23:25	94.5
91-05-17	11:10	94.5
91-05-17	16:10	95.0
91-05-17	22:27	94.0
91-05-18	12:00	94.0
91-05-18	16:50	94.5
91-05-18	23:30	94.5
91-05-19	12:05	95.0
91-05-19	16:20	94.5
91-05-19	23:45	94.5
91-05-20	09:10	95.0
91-05-20	16:15	95.0
91-05-20	22:18	95.0
91-05-21	17:55	95.0
91-05-22	14:55	94.5
91-05-23	10:55	94.0
91-05-24	10:55	94.5
91-05-25	10:18	95.0

Hiti vatns úr holu LJ-5, frh.		
dagsetning	klukkan	vatnshiti (°C)
91-05-26	10:10	94.5
91-05-27	10:15	94.5
91-05-28	10:35	94.5
91-05-29	10:18	95.0
91-05-30	10:50	95.0
91-05-31	10:26	95.0
91-06-01	09:20	95.0
91-06-02	10:14	95.0
91-06-03	11:15	95.5
91-06-04	11:00	95.5
91-06-05	11:30	94.5
91-06-06	10:50	95.0
91-06-07	08:15	95.0
91-06-08	11:30	95.5
91-06-09	09:35	94.5
91-06-10	10:45	95.0
91-06-11	11:05	95.0
91-06-12	10:35	94.5
91-06-13	10:40	94.5
91-06-14	10:30	94.5
91-06-15	11:20	94.0
91-06-15	19:10	94.0
91-06-16	10:20	95.0
91-06-16	19:50	94.0
91-06-17	11:45	95.0
91-06-17	20:05	95.0
91-06-18	08:10	95.5
91-06-19	10:30	95.5
91-06-20	10:05	95.0
91-06-21	09:50	96.0
91-06-25	11:10	95.5
91-06-28	10:20	94.5
91-07-02	11:35	95.5

**VIÐAUKI C: Vatnsborðsmælingar í borholum**



Vatnsborðsmælingar í holu LN-10		
dagsetning	klukkan	vatnsborð (m)
91-04-22	14:40	115.4
91-04-23	11:15	115.9
91-04-24	14:35	115.0
91-04-25	14:25	114.9
91-04-26	11:15	114.7
91-04-27	12:00	114.5
91-04-28	13:00	114.6
91-04-29	11:15	114.4
91-04-30	10:30	114.1
91-05-01	12:05	114.1
91-05-02	10:40	113.9
91-05-03	11:35	113.8
91-05-04	12:15	112.9
91-05-05	12:55	112.5
91-05-06	12:00	112.4
91-05-07	10:05	112.4
91-05-07	10:23	112.6
91-05-07	14:10	112.1
91-05-07	14:30	112.1
91-05-07	14:40	112.1
91-05-07	14:48	112.0
91-05-07	15:05	111.9
91-05-07	15:12	111.8
91-05-07	15:18	111.7
91-05-07	15:24	111.6
91-05-07	15:45	111.4
91-05-07	15:55	111.2
91-05-07	16:18	110.9
91-05-07	16:35	110.7
91-05-07	16:58	110.5
91-05-07	17:31	110.2
91-05-07	17:51	110.0
91-05-07	18:26	109.7
91-05-07	19:08	109.5
91-05-07	20:22	109.1
91-05-07	21:15	108.7
91-05-07	22:03	108.6
91-05-07	22:55	108.3
91-05-07	23:59	108.1
91-05-08	01:35	107.9
91-05-08	02:42	107.8
91-05-08	04:20	107.7
91-05-08	06:57	107.2
91-05-08	09:50	107.0
91-05-08	13:45	106.6
91-05-08	16:25	106.2
91-05-08	18:21	106.1
91-05-08	23:50	106.0
91-05-09	08:00	105.9
91-05-09	14:04	105.9
91-05-09	19:30	105.7
91-05-10	00:20	105.5
91-05-10	08:25	105.2
91-05-10	16:10	105.0
91-05-11	00:20	104.9
91-05-11	11:00	104.8
91-05-11	23:40	104.6
91-05-12	09:07	104.4
91-05-12	23:40	104.0
91-05-13	08:30	104.0
91-05-13	22:10	103.9
91-05-14	11:10	103.9

Vatnsborðsmælingar í holu LN-10, frh.		
dagsetning	klukkan	vatnsborð (m)
91-05-14	22:47	103.8
91-05-15	10:45	103.7
91-05-15	17:10	103.7
91-05-15	23:00	103.6
91-05-16	11:20	103.1
91-05-16	16:00	103.0
91-05-16	23:20	102.9
91-05-17	11:05	102.9
91-05-17	16:05	102.8
91-05-17	22:24	102.3
91-05-18	11:55	102.7
91-05-18	16:55	102.7
91-05-18	23:40	101.9
91-05-19	12:00	102.0
91-05-19	16:25	102.0
91-05-19	23:55	101.9
91-05-20	09:00	102.1
91-05-20	16:20	102.0
91-05-20	22:27	101.7
91-05-21	17:50	102.5
91-05-22	14:50	102.0
91-05-23	11:05	103.7
91-05-24	10:50	103.7
91-05-25	10:07	103.7
91-05-26	10:05	103.6
91-05-27	10:35	103.6
91-05-28	10:30	103.6
91-05-29	10:27	103.6
91-05-30	10:06	103.5
91-05-31	10:39	103.6
91-06-01	09:30	103.6
91-06-02	10:24	103.4
91-06-04	10:54	103.4
91-06-05	11:35	103.0
91-06-06	11:00	103.0
91-06-08	11:25	103.0
91-06-09	09:44	102.9
91-06-10	10:55	102.8
91-06-11	11:00	102.8
91-06-12	11:15	102.4
91-06-13	10:50	102.1
91-06-14	10:40	100.6
91-06-14	13:25	100.0
91-06-14	18:45	102.6
91-06-15	11:30	106.4
91-06-15	19:15	106.3
91-06-16	10:35	106.9
91-06-16	19:55	106.9
91-06-17	11:35	107.0
91-06-17	20:10	106.9
91-06-18	08:15	107.1
91-06-19	10:35	103.9
91-06-20	10:15	102.8
91-06-23	11:30	103.9
91-06-25	10:45	102.3
91-06-27	10:20	105.1
91-06-28	10:40	105.4
91-07-01	08:00	94.0



Vatnsborðsmælingar í holu LG-9		
dagsetning	klukkan	vatnsborð (m)
91-04-22	14:45	107.8
91-04-23	14:25	107.5
91-04-24	14:40	107.5
91-04-25	14:40	107.3
91-04-26	11:30	107.0
91-04-27	12:10	106.8
91-04-28	13:15	106.2
91-04-29	11:30	106.5
91-04-30	11:10	106.1
91-05-01	12:30	106.0
91-05-02	11:00	106.0
91-05-03	12:00	106.0
91-05-04	11:55	106.0
91-05-05	12:30	106.0
91-05-06	11:40	105.9
91-05-07	17:10	106.1
91-05-07	23:10	105.9
91-05-08	06:46	105.7
91-05-08	10:05	105.6
91-05-08	16:10	105.6
91-05-09	00:20	105.6
91-05-09	08:05	105.6
91-05-09	14:15	105.4
91-05-10	00:00	105.4
91-05-10	08:55	105.4
91-05-10	16:25	105.3
91-05-11	00:05	105.2
91-05-11	11:10	105.2
91-05-11	23:23	105.1
91-05-12	08:47	105.0
91-05-12	23:20	104.9
91-05-13	10:25	104.9
91-05-13	22:00	104.9
91-05-15	11:00	104.6
91-05-16	11:45	104.4
91-05-17	11:25	104.2
91-05-18	12:20	104.0
91-05-19	12:20	103.7
91-05-20	08:47	103.7
91-05-21	18:15	103.6
91-05-23	10:45	103.4
91-05-25	10:03	103.3
91-05-27	10:05	103.1
91-05-29	10:12	103.0
91-05-31	10:09	102.9
91-06-02	10:10	102.7
91-06-04	10:45	102.0
91-06-06	10:45	102.1
91-06-08	11:15	101.9
91-06-10	10:25	101.7
91-06-12	10:30	101.5
91-06-14	10:20	101.3
91-06-15	11:10	102.6
91-06-16	10:50	102.4
91-06-17	11:30	102.3
91-06-18	10:50	102.3
91-06-25	11:25	99.5
91-06-28	10:15	101.9
91-07-02	13:30	99.5

Vatnsborðsmælingar í holu LJ-6		
dagsetning	klukkan	vatnsborð (m)
91-04-22	14:30	56.0
91-04-24	14:20	55.0
91-04-26	11:05	55.0
91-04-27	11:45	55.2
91-04-29	10:55	55.2
91-04-30	11:25	54.9
91-05-01	11:50	54.8
91-05-02	10:30	55.0
91-05-03	11:25	54.5
91-05-04	11:45	54.5
91-05-05	12:25	54.2
91-05-06	11:30	54.2
91-05-07	10:50	54.21
91-05-07	15:36	54.17
91-05-07	17:05	54.16
91-05-07	17:58	54.15
91-05-07	19:03	54.14
91-05-07	20:42	54.12
91-05-07	22:26	54.10
91-05-08	00:16	54.07
91-05-08	01:43	54.04
91-05-08	03:31	54.02
91-05-08	06:26	53.99
91-05-08	13:05	53.91
91-05-08	18:40	53.88
91-05-08	23:20	53.86
91-05-09	07:25	53.83
91-05-09	13:30	53.83
91-05-09	19:00	53.83
91-05-09	23:50	53.84
91-05-10	08:00	53.80
91-05-10	16:30	53.71
91-05-10	23:55	53.68
91-05-11	09:55	53.67
91-05-11	23:15	53.62
91-05-12	08:29	53.56
91-05-12	23:10	53.50
91-05-13	10:15	53.49
91-05-14	10:33	53.41
91-05-14	22:40	53.38
91-05-15	10:20	53.28
91-05-16	10:55	53.17
91-05-17	10:30	52.95
91-05-18	11:25	52.72
91-05-19	11:40	52.53
91-05-20	08:30	52.48
91-05-21	17:15	52.38
91-05-23	10:30	52.36
91-05-25	09:47	52.13
91-05-27	09:50	52.00
91-05-29	09:58	51.92
91-05-31	09:55	51.84
91-06-02	09:27	51.69
91-06-04	10:30	51.48
91-06-06	10:30	51.50
91-06-08	10:45	51.20
91-06-10	10:05	51.18
91-06-12	10:15	50.93
91-06-14	10:15	50.85
91-06-15	10:55	51.02
91-06-16	10:20	51.10
91-06-17	11:15	51.15
91-06-18	11:15	51.07
91-06-25	11:40	50.50
91-06-28	09:55	50.20
91-07-02	13:10	49.10

Vatnsborðsmælingar í holu KW-2		
dagsetning	klukkan	vatnsborð (m)
91-04-26	11:35	83.0
91-04-27	12:15	83.0
91-04-28	13:20	83.0
91-04-29	11:05	83.0
91-04-30	11:15	83.0
91-05-01	12:40	83.0
91-05-02	11:05	83.0
91-05-03	11:55	83.0
91-05-04	12:45	83.0
91-05-05	12:45	82.9
91-05-06	11:45	83.0
91-05-07	10:35	83.01
91-05-07	15:45	83.03
91-05-07	16:50	82.99
91-05-07	18:55	82.99
91-05-07	20:35	82.98
91-05-07	22:15	82.98
91-05-08	00:05	82.97
91-05-08	01:52	82.95
91-05-08	03:40	82.95
91-05-08	06:33	82.93
91-05-08	10:35	82.91
91-05-08	13:15	82.90
91-05-08	16:25	82.89
91-05-08	18:30	82.87
91-05-08	23:25	82.86
91-05-09	07:30	82.88
91-05-09	13:40	82.80
91-05-09	19:10	82.80
91-05-09	23:55	82.78
91-05-10	08:10	82.80
91-05-11	10:00	82.78
91-05-12	08:37	82.80
91-05-13	10:15	82.79
91-05-14	10:40	82.80
91-05-15	10:25	82.80
91-05-16	11:00	82.80
91-05-17	10:50	82.78
91-05-18	11:30	82.67
91-05-19	11:50	82.58
91-05-20	08:35	82.52
91-05-21	17:25	82.59
91-05-23	10:35	82.37
91-05-25	09:45	82.50
91-05-27	10:00	82.45
91-05-29	10:05	82.47
91-05-31	10:02	82.47
91-06-02	10:05	82.41
91-06-04	10:37	82.33
91-06-06	10:36	82.23
91-06-08	11:05	82.12
91-06-10	10:15	82.12
91-06-12	10:25	82.10
91-06-15	11:05	82.09
91-06-17	11:20	82.17
91-06-25	11:30	82.10
91-06-28	10:05	82.20
91-07-02	13:25	82.10

Vatnsborðsmælingar í holu HW-9		
dagsetning	klukkan	vatnsborð (m)
91-04-22	13:42	22.50
91-04-23	15:25	22.90
91-04-24	13:45	22.80
91-04-25	13:20	23.30
91-04-26	10:35	23.00
91-04-27	11:05	23.10
91-04-28	12:05	23.40
91-04-29	10:25	23.30
91-04-30	12:13	23.10
91-05-01	11:20	23.00
91-05-02	10:05	23.20
91-05-03	10:43	23.20
91-05-04	11:20	23.20
91-05-05	11:55	22.90
91-05-06	11:05	23.30
91-05-07	20:58	22.93
91-05-08	03:57	22.85
91-05-08	10:58	22.80
91-05-08	19:13	22.78
91-05-09	07:15	22.81
91-05-09	14:43	22.87
91-05-09	19:58	22.85
91-05-10	09:03	22.84
91-05-11	09:13	22.85
91-05-12	08:16	22.85
91-05-13	10:03	22.85
91-05-14	10:23	22.89
91-05-15	10:08	22.92
91-05-16	10:45	22.78
91-05-17	10:23	22.68
91-05-18	11:13	22.64
91-05-19	11:33	22.47
91-05-20	08:09	22.51
91-05-21	16:53	22.52
91-05-23	10:18	22.54
91-05-25	09:36	22.42
91-05-27	09:43	22.33
91-05-29	09:47	22.34
91-05-31	09:40	22.31
91-06-02	09:18	22.22
91-06-04	10:09	22.04
91-06-06	10:08	21.87
91-06-08	10:35	21.85
91-06-10	09:58	21.81
91-06-12	10:05	21.70
91-06-15	10:45	21.70
91-06-17	11:08	21.74
91-06-18	12:08	21.61
91-06-25	13:38	21.50
91-07-02	14:28	21.10

Vatnsborðsmælingar í holu GG-1		
dagsetning	klukkan	vatnsborð (m)
91-04-22	13:42	14.00
91-04-23	15:25	14.00
91-04-24	13:45	14.60
91-04-25	13:20	14.75
91-04-26	10:35	14.60
91-04-27	11:05	14.50
91-04-28	12:05	14.60
91-04-29	10:25	14.75
91-04-30	12:13	14.85
91-05-01	11:20	14.90
91-05-02	10:05	14.90
91-05-03	10:43	14.75
91-05-04	11:20	14.80
91-05-05	11:55	14.85
91-05-06	11:05	14.85
91-05-07	20:58	14.59
91-05-08	03:57	14.51
91-05-08	10:58	14.48
91-05-08	19:13	14.46
91-05-09	07:15	14.50
91-05-09	14:43	14.60
91-05-09	19:58	14.61
91-05-10	09:03	14.63
91-05-11	09:13	14.65
91-05-12	08:16	14.65
91-05-13	10:03	14.45
91-05-14	10:23	14.75
91-05-15	10:08	14.76
91-05-16	10:45	14.67
91-05-17	10:23	14.61
91-05-18	11:13	14.57
91-05-19	11:33	14.43
91-05-20	08:09	14.52
91-05-21	16:53	14.57
91-05-23	10:18	14.63
91-05-25	09:36	14.55
91-05-27	09:43	14.51
91-05-29	09:47	14.54
91-05-31	09:40	14.52
91-06-02	09:18	14.47
91-06-04	10:09	14.32
91-06-06	10:08	14.34
91-06-08	10:35	14.13
91-06-10	09:58	14.13
91-06-12	10:05	14.00
91-06-15	10:45	13.96
91-06-17	11:08	13.97
91-06-18	12:08	13.13
91-06-25	13:38	13.60
91-07-02	14:28	13.40

**VIÐAUKID: Mælingar á styrk flúoresceins og brómíðs**



### Mælingar á styrk natríum-flúoresceins

Natríum-flúorescein er sterkt flúrljómandi litarefni, sem er mælanlegt í lágum styrk og er greiningin fljótleg og fremur ódýr. Efnið hefur litlar eiturverkanir og því ekki hættulegt að blanda því í grunnvatn í lágum styrk. Hitapol efnisins er ekki mjög mikið, en talið var að innan við 100°C hita brotnaði það ekki verulega niður þann tíma sem líklegt væri að prófunin næði yfir. Flúrljómun vatnsins er mæld og er hún mælikvarði á styrk efnisins í vatninu. Við mælingarnar var notaður Perkin Elmer 204S fluorescence spectrophotometer með photomultiplier og mælt við um 520 nm. Greiningarmörk reyndust vera um 5 ng/l, en áður var talið að þau væru um 20 ng/l (Jón Benjamínsson, 1984). Tekið var sýni af vatnsblöndu með þeim styrk ferlunarefnisins er sett var niður í niðurdælingarholuna og það notað til blöndunar á stöðlum til mælinga. Áður en niðurdæling hófst var einnig tekið um 20 l sýni af vatni úr mæliholu og það notað til þynningar við blöndun staðla.

### Mælingar á styrk brómíðs

Brómíð var valið vegna þess að styrkur þess í jarðhitavatninu er lágur og greining þess einföld og ódýr miðað við t.d. greiningu á jodíði, sem oft er notað sem ferlunarefni. Natríumbrómíð var valið fremur en kalíumbrómíð vegna þess að það er ódýrara. Brómíð er mælt með jónagreini samhliða greiningu á klóríði. Byggir mælingin á því að ferðahraða mismunandi jóna er seinkað mismikið og síðan er leiðni lausnarinnar mæld á endastöð og er hún mælikvarði á styrk hvarrar jónar. Greiningarmörk fyrir brómíð eru talin vera 5-10 µg/l eftir efnasamsetningu og hlutföllum annarra efna í vatninu.

Tafla D.1 Efnagreiningar sýna úr holu LJ-5.

Dagsetning	Númer	Hiti (°C)	SiO <sub>2</sub> (mg/l)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	Br <sup>-</sup> (mg/l)	Flúorescein (ng/l)
91-05-07	91-4001	93,5	100,1	11,7	0,030	2,80
91-05-07	91-4002	93,5	100,2	11,8	0,029	2,88
91-05-07	91-4003	94,0	-	11,8	0,030	3,59
91-05-07	91-4004	94,0	-	11,8	0,029	3,23
91-05-07	91-4005	94,5	-	11,8	0,030	2,88
91-05-07	91-4006	94,5	-	11,7	0,029	-
91-05-07	91-4007	94,0	-	11,7	0,029	3,51
91-05-07	91-4008	94,0	-	11,7	0,030	3,67
91-05-07	91-4009	94,0	-	11,7	0,029	3,88
91-05-07	91-4010	93,5	-	11,7	0,031	2,72
91-05-07	91-4011	93,8	-	11,6	0,030	3,51
91-05-07	91-4012	93,8	-	11,4	0,028	3,67
91-05-07	91-4013	94,0	-	11,7	0,030	2,80
91-05-08	91-4014	-	-	11,7	0,030	2,48
91-05-08	91-4015	-	-	11,7	0,029	3,43
91-05-08	91-4016	-	-	11,7	0,028	3,43
91-05-08	91-4017	94,0	-	11,7	0,029	2,48
91-05-08	91-4018	95,0	99,9	11,6	0,030	2,48
91-05-08	91-4019	95,0	-	11,7	0,029	3,59
91-05-08	91-4020	95,0	-	11,6	0,030	2,88
91-05-08	91-4021	94,0	-	11,7	0,030	2,88
91-05-08	91-4022	94,0	-	11,4	0,029	2,80
91-05-09	91-4023	94,0	100,1	11,5	0,030	3,51
91-05-09	91-4024	94,0	-	11,6	0,029	2,88
91-05-09	91-4025	94,5	-	11,6	0,029	2,24
91-05-10	91-4026	94,2	-	11,6	0,030	3,83
91-05-10	91-4027	95,0	102,5	10,9	0,030	2,80
91-05-10	91-4028	95,5	-	11,6	0,028	3,27
91-05-11	91-4029	95,2	-	11,6	0,028	2,80
91-05-11	91-4030	94,0	100,5	11,5	0,030	2,56
91-05-11	91-4031	95,0	100,9	11,5	0,031	2,80
91-05-12	91-4032	94,8	101,9	11,4	0,030	2,80
91-05-12	91-4033	94,0	-	11,1	0,029	2,80
91-05-13	91-4034	94,2	100,9	11,3	0,039	2,56
91-05-13	91-4035	94,0	-	11,4	0,029	2,25
91-05-13	91-4036	94,0	-	11,4	0,029	3,71
91-05-14	91-4037	94,5	103,6	11,5	0,029	2,14
91-05-14	91-4038	94,5	101,3	11,5	0,029	2,90
91-05-15	91-4039	94,5	101,7	11,5	0,029	2,48
91-05-15	91-4040	94,5	-	11,5	0,030	2,37
91-05-15	91-4041	94,5	-	11,5	0,030	2,93
91-05-16	91-4042	94,5	100,8	11,5	0,031	3,15
91-05-16	91-4043	95,0	-	11,5	0,029	2,82
91-05-16	91-4044	94,5	-	11,5	0,030	2,97
91-05-17	91-4045	94,5	101,3	11,5	0,029	3,73
91-05-17	91-4046	95,0	-	11,5	0,029	4,00
91-05-17	91-4047	94,2	-	11,6	0,028	3,71
91-05-18	91-4048	94,0	-	11,7	0,029	4,00
91-05-18	91-4051	94,5	-	11,6	0,030	4,27
91-05-18	91-4049	94,5	-	11,5	0,028	4,83
91-05-18	91-4050	94,5	-	11,5	0,029	4,76
91-05-19	91-4052	95,0	100,3	11,6	0,032	4,72

Dagsetning	Númer	Hiti (°C)	SiO <sub>2</sub> (mg/l)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	Br <sup>-</sup> (mg/l)	Flúorescein (ng/l)
91-05-19	91-4053	94,5	-	11,6	0,029	5,39
91-05-20	91-4054	95,0	100,1	11,6	0,030	6,73
91-05-20	91-4055	95,0	-	11,6	0,030	5,72
91-05-20	91-4056	95,0	-	11,6	0,029	6,06
91-05-21	91-4057	95,0	99,2	11,8	0,030	7,85
91-05-22	91-4058	94,5	100,3	11,5	0,029	9,90
91-05-23	91-4059	94,0	-	11,7	0,029	9,90
91-05-24	91-4060	94,5	-	11,8	0,030	10,92
91-05-25	91-4061	95,0	-	11,7	0,030	10,63
91-05-26	91-4062	94,5	-	11,6	0,030	11,65
91-05-27	91-4063	94,5	-	11,5	0,030	14,00
91-05-28	91-4064	94,5	-	11,6	0,030	13,51
91-05-29	91-4065	95,0	-	11,7	0,031	14,56
91-05-30	91-4066	95,0	-	11,8	0,030	16,52
91-05-31	91-4067	95,0	-	11,7	0,030	17,73
91-06-01	91-4068	95,0	-	11,7	0,032	16,97
91-06-02	91-4069	95,0	-	11,7	0,031	17,43
91-06-03	91-4070	95,5	-	11,7	0,031	17,86
91-06-04	91-4071	95,5	-	11,7	0,031	19,32
91-06-05	91-4072	94,5	-	11,7	0,031	19,46
91-06-06	91-4073	95,0	-	12,5	0,033	19,46
91-06-07	91-4074	95,0	-	11,5	0,030	19,17
91-06-08	91-4075	95,3	-	11,4	0,030	20,00
91-06-09	91-4076	94,5	-	11,3	0,031	20,40
91-06-10	91-4077	95,0	-	11,4	0,030	21,60
91-06-11	91-4078	95,0	-	11,4	0,031	22,20
91-06-12	91-4079	94,5	-	11,3	0,031	22,20
91-06-13	91-4080	94,5	-	11,4	0,032	23,80
91-06-14	91-4081	94,5	-	11,2	0,032	23,90
91-06-15	91-4082	94,0	-	11,2	0,032	24,30
91-06-15	91-4083	94,0	-	11,2	0,032	24,60
91-06-16	91-4084	95,0	-	11,2	0,032	25,30
91-06-16	91-4085	94,0	-	11,1	0,032	25,00
91-06-17	91-4086	95,0	-	11,1	0,031	23,90
91-06-17	91-4087	95,0	-	11,2	0,032	25,00
91-06-18	91-4088	95,5	-	11,2	0,032	25,70
91-06-19	91-4089	95,5	-	11,1	0,031	23,88
91-06-20	91-4090	95,0	-	10,9	0,032	22,62
91-06-21	91-4091	96,0	-	11,3	0,033	22,94
91-06-25	91-4092	95,5	-	11,6	0,036	25,02
91-06-26	91-4093	95,0	-	11,6	0,034	21,62
91-06-27	91-4094	95,0	-	11,5	0,035	23,13
91-06-28	91-4095	94,5	-	11,6	0,034	25,02
91-07-02	91-4096	95,5	-	11,2	0,035	24,55
91-07-03	91-4097	88,0	-	10,6	0,030	10,89
91-07-08	91-4098	-	-	10,4	0,030	14,73
91-07-10	91-4099	93,0	-	10,4	0,029	18,80
91-07-10	91-4100	95,5	-	10,7	0,031	23,00
91-07-12	91-4101	94,0	-	10,5	0,029	21,30
91-07-15	91-4102	95,0	-	10,7	0,031	22,10
91-07-16	91-4103	95,5	-	10,8	0,033	18,90
91-07-19	91-4104	96,0	-	10,8	0,033	18,50
91-07-24	91-4105	95,0	-	10,9	0,031	21,90
91-07-26	91-4106	96,0	-	10,9	0,034	20,00
91-07-29	91-4107	95,5	-	10,9	0,032	20,90
91-08-02	91-4108	95,0	-	10,8	0,031	16,00
91-08-05	91-4109	93,0	-	10,4	0,029	11,67



Dagsetning	Númer	Hiti (°C)	SiO <sub>2</sub> (mg/l)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	Br <sup>-</sup> (mg/l)	Flúorescein (ng/l)
91-08-09	91-4110	95,0	-	11,1	0,031	18,50
91-08-12	91-4111	95,5	-	11,0	0,035	18,20
91-08-19	91-4112	93,8	-	12,1	0,030	17,10
91-08-22	91-4113	94,5	-	12,2	0,030	18,50
91-08-23	91-4114	95,0	-	12,1	0,031	18,00
91-08-26	91-4115	94,5	-	12,1	0,026	16,80
91-08-28	91-4116	95,0	-	12,0	0,029	18,90
91-09-02	91-4117	95,0	-	12,4	0,030	18,90
91-09-09	91-4118	95,0	-	12,2	0,027	17,80
91-09-16	91-4119	95,0	-	12,3	0,029	19,90
91-09-23	91-4120	85,0	-	15,3	0,055	74,60
91-09-25	91-4196	85,0	-	14,9	0,052	80,50
91-09-25	91-4197	93,0	-	13,4	0,038	43,40
91-09-25	91-4198	94,0	-	12,8	0,034	31,70
91-10-04	91-4199	82,0	-	10,8	0,023	7,20
91-10-04	91-4200	84,0	-	16,2	0,066	98,40
91-10-04	91-4201	87,0	-	16,2	0,058	98,40
91-10-04	91-4202	93,0	-	15,8	0,058	92,10
91-10-07	91-4203	87,0	-	10,6	0,024	5,30
91-10-07	91-4204	90,0	-	11,3	0,025	9,10
91-10-07	91-4205	91,0	-	14,1	0,045	57,90
91-10-14	91-4206	94,5	-	13,0	0,032	25,10
91-10-21	91-4207	94,0	-	13,5	0,035	28,60
91-10-28	91-4208	94,5	-	12,8	0,031	21,20
91-11-18	91-4209	94,0	-	13,8	0,030	30,20
91-11-25	91-4210	93,0	-	15,5	0,050	79,30
91-12-17	91-4211	93,0	-	-	0,040	39,30
92-01-21	92-4001	92,0	-	13,5	0,043	36,30
92-02-04	92-4002	93,5	-	13,3	0,039	34,90
92-02-18	92-4003	93,0	-	13,8	0,047	36,00
92-03-03	92-4004	93,0	-	13,8	0,049	37,70
92-03-17	92-4005	93,5	-	14,2	0,050	39,70
92-03-31	92-4006	94,0	-	13,8	0,047	38,00
92-04-21	92-4007	92,5	-	16,1	0,049	75,30
92-05-12	92-4028	94,5	-	13,5	0,040	25,90
92-05-21	92-4029	90,0	-	16,8	0,073	92,20
92-05-26	92-4030	95,0	-	13,3	0,038	24,80
92-06-16	92-4031	94,0	-	12,4	0,032	14,80
92-06-23	92-4032	93,5	-	12,2	0,030	14,40
92-07-21	92-4033	94,0	-	-	0,031	16,90
92-08-12	92-4034	94,0	-	-	0,028	6,20

Tafla D.2 Efnagreiningar sýna úr holu LN-12.

Dagsetning	Númer	Hiti (°C)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	Br <sup>-</sup> (mg/l)	Flúorescein (ng/l)
91-06-21	91-4184	92,0	10,5	0,064	128,0
91-06-21	91-4185	90,0	10,1	0,042	55,34
91-06-22	91-4186	97,5	9,5	0,034	22,62
91-06-23	91-4187	97,5	9,9	0,028	13,50
91-06-24	91-4188	97,5	9,9	0,029	11,29
91-07-04	91-4189	96,0	10,0	0,031	119,9
91-07-04	91-4190	87,0	10,8	0,071	11,36
91-07-11	91-4191	96,0	9,6	0,030	15,50
91-07-11	91-4192	97,0	9,5	0,030	10,50
91-07-22	91-4193	92,0	9,6	0,030	17,76
91-07-22	91-4194	97,0	9,6	0,029	11,30
91-07-23	91-4195	97,0	9,6	0,027	9,40
91-09-30	91-4245	97,0	10,8	0,027	5,30
91-11-04	91-4246	97,0	11,3	0,027	5,90
91-11-18	91-4247	96,5	11,2	0,026	6,70
91-11-25	91-4248	96,5	11,3	0,027	4,60
91-12-10	91-4249	96,5	11,4	0,025	4,50
91-12-17	91-4250	97,0	-	0,026	4,30
92-02-18	92-4023	96,5	11,2	0,033	4,80
92-03-03	92-4024	96,0	11,2	0,032	4,90
92-03-17	92-4025	96,5	11,1	0,030	5,50
92-03-31	92-4026	97,0	10,9	0,028	5,00
92-05-12	92-4027	97,0	11,3	0,026	5,40

Tafla D.3 Efnagreiningar sýna úr holu LJ-7.

Dagsetning	Númer	Hiti (°C)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	Br <sup>-</sup> (mg/l)	Flúorescein (ng/l)
91-06-14	91-4182	93,5	9,6	0,026	3,16
91-06-16	91-4183	96,0	9,7	0,027	3,16
91-10-18	91-4243	96,0	11,1	0,025	3,4
92-02-04	92-4022	93,0	10,6	0,024	5,0

Tafla D.4 Efnagreiningar sýna úr holu HN-10.

Dagsetning	Númer	Hiti (°C)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	Br <sup>-</sup> (mg/l)	Flúorescein (ng/l)
91-05-24	91-4152	84,0	7,0	0,022	2,29
91-05-27	91-4153	83,0	6,8	0,021	3,17
91-05-31	91-4154	84,0	6,8	0,020	4,16
91-06-04	91-4155	83,5	6,2	0,021	3,21
91-06-07	91-4156	83,5	6,8	0,021	2,92
91-06-10	91-4157	82,5	6,8	0,021	3,10
91-06-13	91-4158	83,0	6,7	0,022	3,10
91-06-17	91-4159	83,8	6,8	0,022	0,98
91-06-21	91-4160	85,0	6,9	0,023	1,54
91-06-28	91-4161	85,0	6,2	0,023	1,54
91-07-01	91-4162	83,0	6,6	0,021	2,67
91-07-02	91-4163	84,0	6,8	0,022	2,36
91-07-09	91-4164	83,2	6,3	0,019	3,80
91-07-16	91-4165	84,0	6,4	0,021	5,04
91-07-19	91-4166	84,0	6,4	0,021	1,96
91-07-23	91-4167	85,0	6,7	0,022	1,60
91-07-30	91-4168	83,5	6,5	0,021	3,00
91-08-02	91-4169	83,5	6,4	0,021	3,00
91-08-05	91-4170	83,5	6,5	0,021	5,60
91-08-10	91-4171	83,0	6,4	0,020	3,50
91-08-12	91-4172	83,0	6,4	0,020	5,00
91-08-16	91-4173	83,0	6,5	0,021	3,70
91-08-19	91-4174	83,5	7,4	0,023	2,50
91-08-22	91-4175	82,5	7,0	0,021	3,60
91-08-26	91-4176	82,5	6,8	0,020	2,40
91-08-28	91-4177	83,5	7,2	0,021	3,80
91-09-02	91-4178	84,0	7,1	0,021	4,20
91-09-09	91-4179	84,0	7,4	0,022	3,40
91-09-16	91-4180	86,0	7,0	0,020	3,50
91-09-23	91-4181	84,0	7,5	0,022	2,50
91-09-30	91-4230	83,0	7,0	0,021	4,40
91-10-07	91-4231	82,5	7,0	0,021	3,70
91-10-14	91-4232	84,0	6,9	0,021	6,10
91-10-21	91-4233	84,5	7,4	0,021	2,40
91-10-28	91-4234	83,0	7,3	0,021	4,20
91-11-04	91-4235	84,0	7,4	0,021	2,80
91-11-18	91-4236	84,0	7,3	0,021	2,90
91-11-25	91-4237	82,5	7,3	0,020	2,70
91-12-10	91-4238	82,0	7,5	0,020	3,80
92-01-21	92-4015	83,0	7,8	0,022	2,10
92-02-04	92-4016	82,0	7,0	0,019	3,80
92-02-18	92-4017	82,0	7,2	0,020	4,00
92-03-03	92-4018	82,0	7,1	0,024	3,40
92-03-17	92-4019	82,0	6,8	0,022	3,10
92-03-31	92-4020	82,0	6,8	0,021	2,80
92-04-21	92-4021	82,0	7,2	0,018	3,20
92-05-12	92-4038	82,5	7,3	0,017	4,00
92-06-16	92-4039	83,0	7,0	0,017	3,30
92-06-23	92-4040	82,5	7,0	0,017	3,70
92-07-21	92-4041	-	-	0,017	5,70

Tafla D.5 Efnagreiningar sýna úr holu BN-1.

Dagsetning	Númer	Hiti (°C)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	Br <sup>-</sup> (mg/l)	Flúoresceín (ng/l)
91-05-24	91-4121	94,0	9,6	0,026	1,71
91-05-27	91-4122	94,0	9,8	0,026	2,58
91-05-31	91-4123	94,0	9,8	0,027	5,97
91-06-04	91-4124	94,0	10,0	0,027	3,50
91-06-07	91-4125	94,0	10,1	0,028	3,35
91-06-10	91-4126	95,0	9,7	0,027	1,90
91-06-13	91-4127	96,0	10,1	0,027	2,20
91-06-17	91-4128	96,5	10,0	0,028	1,34
91-06-21	91-4129	96,0	9,8	0,028	3,12
91-06-25	91-4130	96,0	10,0	0,027	10,25
91-06-28	91-4131	97,0	9,8	0,029	5,33
91-07-01	91-4132	96,0	9,9	0,028	3,43
91-07-02	91-4133	96,0	9,7	0,028	1,08
91-07-16	91-4134	94,0	9,5	0,027	5,81
91-07-19	91-4135	93,0	9,2	0,027	3,50
91-07-23	91-4136	94,0	9,2	0,028	3,10
91-07-26	91-4137	94,0	9,2	0,028	3,80
91-07-30	91-4138	94,0	9,4	0,028	2,60
91-08-02	91-4139	95,0	9,7	0,027	4,30
91-08-05	91-4140	93,0	9,5	0,026	3,00
91-08-10	91-4141	93,0	9,7	0,028	3,10
91-08-12	91-4142	94,0	9,8	0,027	3,50
91-08-16	91-4143	94,5	11,4	0,027	1,80
91-08-19	91-4144	91,0	10,9	0,026	2,90
91-08-22	91-4145	94,0	11,2	0,030	4,40
91-08-26	91-4146	94,0	11,2	0,028	2,80
91-08-28	91-4147	93,5	11,3	0,028	5,40
91-09-02	91-4148	94,0	11,1	0,026	3,80
91-09-09	91-4149	94,0	10,8	0,027	4,50
91-09-16	91-4150	94,0	11,0	0,028	4,40
91-09-23	91-4151	94,0	10,9	0,026	4,60
91-09-30	91-4226	94,5	11,3	0,027	4,10
91-10-07	91-4227	94,0	11,5	0,028	4,10
91-10-14	91-4228	95,0	11,5	0,028	2,60
91-10-21	91-4229	94,0	11,3	0,027	2,40
91-10-28	91-4216	94,0	11,2	0,026	2,70
91-11-04	91-4217	94,0	11,2	0,028	2,30
91-11-18	91-4218	94,0	11,4	0,027	3,30
91-11-25	91-4219	94,0	11,5	0,028	3,40
91-12-10	91-4220	95,0	11,6	0,026	2,60
91-12-17	91-4221	97,0	-	0,026	5,00
92-01-21	92-4008	97,0	11,2	0,027	2,50
92-02-04	92-4009	96,0	11,2	0,028	3,00
92-02-18	92-4010	96,0	11,4	0,027	2,00
92-03-03	92-4011	96,0	11,6	0,033	2,00
92-03-17	92-4012	96,0	11,2	0,029	2,40
92-03-31	92-4013	96,0	11,3	0,030	2,40
92-04-21	92-4014	96,0	11,6	0,030	2,90
92-05-12	92-4035	96,0	11,4	0,028	4,00
92-06-16	92-4036	95,0	11,3	-	2,60
92-07-21	92-4037	95,0	-	0,026	4,40



**VIÐAUKI E:**

**Þjappað líkan af niðurdælingu í lokaðan geymi með föstu innstreymi**



Líkanið sem notað er til þess að herma viðbrögð jarðhitakerfisins á Laugalandi við niðurdælingu er sýnt á mynd 23 hér að framan. Það er mjög einfalt, gert úr tveim tönkum sem tengdir eru með viðnámi. Fyrri geymirinn (1) hermir hluta jarðhitakerfisins umhverfis niðurdælingarholuna LJ-8. Í þann geymi er dælt niður  $I$  kg/s. Seinni geymirinn (2) hermir þann hluta jarðhitakerfisins sem er umhverfis vinnsluholurnar. Úr þeim geymi eru unnin  $Q$  kg/s og inn í hann er einnig fast innstreymi  $R$  kg/s. Þetta innstreymi hermir í raun áhrif jarðhitakerfisins utan geymanna tveggja. Geymarnir eru síðan tengdir með viðnámi sem hermir rennslisviðnám í þeim hluta jarðhitakerfisins sem líkanið nær yfir.

### EIGINLEIKAR OG UPPHAFSGILDI

Geymarnir tveir í líkaninu hafa rúmmál  $V_1$  og  $V_2$ , poruhluta  $\phi_1$  og  $\phi_2$ , vatnsrýmd  $\kappa_1$  og  $\kappa_2$  (kg/Pa) og rúmvarmarýmd  $(\rho c)_1$  og  $(\rho c)_2$  ( $J/m^3 \cdot ^\circ C$ ). Vatnsrýmdin og varmarýmdin eru skilgreindar af:

$$\begin{aligned}\kappa_i &= V_i \rho_v (s_v \phi_i + s_b(1-\phi_i)) \quad i=1,2 \\ (\rho c)_i &= \rho_v c_v \phi_i + \rho_b c_b(1-\phi_i) \quad i=1,2\end{aligned}\tag{E-1}$$

þar sem  $\rho_v$  er eðlismassi vatnsins ( $kg/m^3$ ),  $\rho_b$  eðlismassi bergsins,  $s_v$  þjappanleiki vatnsins (1/Pa),  $s_b$  þjappanleiki bergsins,  $c_v$  varmarýmd vatnsins ( $J/kg \cdot ^\circ C$ ) og  $c_b$  varmarýmd bergsins.

Þrýstingur í geymunum er  $p_1(t)$  og  $p_2(t)$  við tímann  $t$ . Efnastyrkur, t.d. styrkur ferilefnanna, er  $C_1(t)$  og  $C_2(t)$  og vatnshitinn er  $T_1(t)$  og  $T_2(t)$ . Efnastyrkur í niðurdælingunni er  $C_I(t)$  og í innstreyminu  $C_R$ . Hiti niðurdælingarvatnsins er  $T_I$  og innstreymisins  $T_R$ . Leiðni viðnámsins er  $\sigma$  (kg/sPa) og vatnsrennslid milli geymanna er  $q$  (kg/s), sem er gefið af jöfnunni:

$$q = \sigma (p_1 - p_2)$$

Við upphaf niðurdælingarinnar ( $t = 0$ ) gildir:

$$\begin{aligned}p_1(0) &= p_2(0) = p_0 \\ C_1(0) &= C_2(0) = C_0 \\ T_1(0) &= T_2(0) = T_0\end{aligned}$$

auk þess sem  $C_R = C_0$  og  $T_R = T_0$ .

### GRUNDVALLARJÖFNUR

Eftirfarandi jöfnur, sem byggðar eru á varðveislu massans, lýsa þrýstingsbreytingum í líkaninu og einnig streymi vatns í því:

$$\kappa_1 \frac{dp_1}{dt} = I - q\tag{E-2}$$

$$\kappa_2 \frac{dp_2}{dt} = R - Q + q\tag{E-3}$$

Um varðveislu styrks efna í líkaninu, sem ekki taka þátt í efnahvörfum við steindir í berginu, t.d. ferilefnanna, gilda eftirfarandi tvær jöfnur:



$$V_1 \frac{d(\rho_v \phi_1 C_1)}{dt} = I C_1 - q C_1 \quad (\text{E-4})$$

$$V_2 \frac{d(\rho_v \phi_2 C_2)}{dt} = R C_0 - Q C_2 + q C_1 \quad (\text{E-5})$$

Þær þarf að umskrifa og er það gert á eftirfarandi máta. Í fyrsta lagi má rita:

$$V_i \frac{d(\rho_v \phi_i C_i)}{dt} = V_i \frac{d(\rho_v \phi_i)}{dt} C_i + V_i \rho_v \phi_i \frac{dC_i}{dt} \quad i = 1, 2$$

og í öðru lagi gildir:

$$V_i \frac{d(\rho_v \phi_i)}{dt} = \kappa_i \frac{dp_i}{dt} \quad i = 1, 2$$

Samkvæmt jöfnum E-2 og E-3 gildir því

$$V_1 \frac{d(\rho_v \phi_1)}{dt} = I - q, \quad V_2 \frac{d(\rho_v \phi_2)}{dt} = R - Q + q$$

Þessar jöfnur lýsa því í reynd hvernig massi vatns og ferilefna safnast fyrir í þorum bergsins vegna hækkandi þrýstings og þjappanleika vatns og bergs. Þannig fást grundvallarjöfnumar fyrir efnastyrksbreytingar í líkaninu:

$$V_1 \rho_v \phi_1 \frac{dC_1}{dt} + I C_1 = I C_1 \quad (\text{E-6})$$

$$V_2 \rho_v \phi_2 \frac{dC_2}{dt} + (R + q) C_2 = R C_0 + q C_1 \quad (\text{E-7})$$

Hér verður gert ráð fyrir tvenns konar niðursetningu ferilefnis, líkt og í niðurdælingartilrauninni á Laugalandi. Annars vegar niðursetningu ákveðins massa af efni A við tímann  $t = 0$  og hins vegar niðurdælingu vatns með fastan styrk af efni B. Þessu má lýsa stærðfræðilega með

$$\text{Efni A: } C_1(t) = C_0 + M \delta_+(t)$$

$$\text{Efni B: } C_1(t) = C_1 \neq C_0, \text{ fyrir } t > t_0$$

þar sem  $\delta_+(t)$  er svokallað deltafall, sem nota má til þess að lýsa skyndilegri innspýtingu efnis A, og M er skilgreint þannig að  $I \cdot M$  sé jafnt massa efnisins sem sett er niður.

Um varðveislu orkunnar í líkaninu gilda eftirfarandi tvær jöfnur:

$$V_1 \frac{d((\rho c)_1 T_1)}{dt} = I c_v T_1 - q c_v T_1 \quad (\text{E-8})$$

$$V_2 \frac{d((\rho c)_2 T_2)}{dt} = R c_v T_0 - Q c_v T_2 + q c_v T_1 \quad (\text{E-9})$$

Hér má rita:

$$V_i \frac{d((\rho c)_i T_i)}{dt} = V_i \frac{d((\rho c)_i)}{dt} T_i + V_i (\rho c)_i \frac{dT_i}{dt} \quad i = 1, 2$$

og með því að nota skilgreininguna á rúmvarmarýmdinni (jafna E-1) má skrifa

$$V_i \frac{d((\rho c)_i)}{dt} = V_i c_v \frac{d(\rho_v \phi_i)}{dt} + V_i c_b \frac{d(\rho_b(1-\phi_i))}{dt} \quad i = 1, 2$$

Hér má tengja fyrri liðinn hægra megin við jafnaðarmerkið jöfnum E-2 og E-3, líkt og hér að framan, en seinni liðurinn hverfur (= 0). Því gildir:

$$V_1 \frac{d((\rho c)_1)}{dt} = c_v I - c_v q$$

$$V_2 \frac{d((\rho c)_2)}{dt} = c_v R - c_v Q + c_v q$$

Þá eru grundvallarjöfnur fyrir hitabreytingar í líkaninu:

$$V_1 (\rho c)_1 \frac{dT_1}{dt} + c_v I T_1 = c_v I T_I \quad (E-10)$$

$$V_2 (\rho c)_2 \frac{dT_2}{dt} + c_v (R + q) T_2 = c_v R T_0 + c_v q T_I \quad (E-11)$$

### ÞRÝSTINGSBREYTINGAR OG MASSASTREYMI

Til þess að leiða út þær jöfnur sem lýsa þrýstingsbreytingum í geimum líkansins og massastreymi milli þeirra þarf að leysa jöfnur E-2 og E-3. Ekki er hægt að leysa þær hvora fyrir sig heldur þarf að leysa þær sameiginlega. Til þess er notað svokallað Laplace-myndvarp. Þannig fæst að:

$$p_1(t) = p_0 + \left[ \frac{\kappa_1 \kappa_2 (Q-R) + \kappa_2^2 I}{\sigma(\kappa_1 + \kappa_2)^2} \right] (1 - e^{-\lambda t}) + \frac{(R + I - Q)}{(\kappa_1 + \kappa_2)} t \quad (E-12)$$

$$p_2(t) = p_0 + \left[ \frac{\kappa_1^2 (R-Q) - \kappa_1 \kappa_2 I}{\sigma(\kappa_1 + \kappa_2)^2} \right] (1 - e^{-\lambda t}) + \frac{(R + I - Q)}{(\kappa_1 + \kappa_2)} t \quad (E-13)$$

$$q(t) = \frac{\kappa_1(Q-R) + \kappa_2 I}{(\kappa_1 + \kappa_2)} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (E-14)$$

$$\text{með } \lambda = \frac{\sigma(\kappa_1 + \kappa_2)}{\kappa_1 \kappa_2}$$

Einnig má skrifa:

$$q(t) = A (1 - e^{-\lambda t}), \text{ með } A = \frac{\kappa_1(Q-R) + \kappa_2 I}{(\kappa_1 + \kappa_2)}$$

### EFNASTYRKSBREYTINGAR

Jöfnur E-6 og E-7 má umskrifa:

$$\frac{dC_1}{dt} + \alpha_1 I C_1 = \alpha_1 I C_I(t), \text{ með } \alpha_1 = \frac{1}{V_1 \rho_v \phi_1} \quad (E-15)$$

$$\frac{dC_2}{dt} + \alpha_2(R + q(t))C_2 = \alpha_2RC_0 + \alpha_2q(t)C_1(t), \text{ með } \alpha_2 = \frac{1}{V_2\rho_v\phi_2} \quad (\text{E-16})$$

Lausnin á jöfnu E-15 er gefin af:

$$C_1(t) = C_0 e^{-\alpha_1 I t} + \alpha_1 I e^{-\alpha_1 I t} \int_0^t C_1(\tau) e^{\alpha_1 I \tau} d\tau \quad (\text{E-17})$$

Til þess að leysa E-16 göngum við út frá því að  $q(t) \approx A$ . Það er réttlætanlegt því sýna má fram á að  $\alpha_2 R/\lambda \ll 1$ , þ.e. að þrýstingsbreytingarnar gerast miklu hraðar en efnastyrksbreytingarnar. Þá fæst:

$$C_2(t) = C_0 e^{-\alpha_2(R+A)t} + \alpha_2 e^{-\alpha_2(R+A)t} \int_0^t [RC_0 + AC_1(\tau)] e^{\alpha_2(R+A)\tau} d\tau \quad (\text{E-18})$$

#### EFNI A

Í þessu tilfalli er styrkur ferilefnis í vatninu sem dælt er niður  $C_1(t) = C_0 + M \delta_+(t)$ . Þá fæst skv. jöfnu E-17 að styrkur efnisins í fyrri tankinum sé:

$$C_1(t) = C_0 + \alpha_1 I M e^{-\alpha_1 I t}, \text{ fyrir efni A} \quad (\text{E-19})$$

og skv. jöfnum E-18 og E-19 að styrkurinn í seinni tankinum, og þar með vinnsluholum, sé:

$$C_2(t) = C_0 + \frac{\alpha_1 \alpha_2 A I M}{(\alpha_2 (R+A) - \alpha_1 I)} (e^{-\alpha_1 I t} - e^{-\alpha_2(R+A)t}), \text{ fyrir efni A} \quad (\text{E-20})$$

#### EFNI B

Í þessu tilfalli er styrkur ferilefnis stöðugur í vatninu sem dælt er niður, þ.e.  $C_1(t) = C_I$ . Þá fæst skv. jöfnu E-17 að styrkur efnisins í fyrri tankinum sé:

$$C_1(t) = (C_0 - C_I) e^{-\alpha_1 I t} + C_I, \text{ fyrir efni B} \quad (\text{E-21})$$

og skv. jöfnum E-18 og E-21 að styrkurinn í seinni tankinum, og þar með vinnsluholum, sé:

$$C_2(t) = C_0 e^{-\alpha_2(R+A)t} + \frac{RC_0 + AC_I}{R + A} (1 - e^{-\alpha_2(R+A)t}) + \frac{\alpha_2 A (C_0 - C_I)}{(\alpha_2 (R+A) - \alpha_1 I)} (e^{-\alpha_1 I t} - e^{-\alpha_2(R+A)t}), \text{ fyrir efni B} \quad (\text{E-22})$$

Jöfnur E-20 og E-22 hér að ofan eru lagðar til grundvallar við túlkun breytinga á styrk ferilefnanna í niðurdælingartilrauninni á Laugalandi.

### HITABREYTINGAR

Hér er gengið út frá því að hiti niðurdælingarvatnsins ( $T_I$ ) sé stöðugur, en til þess að leiða út jöfnur fyrir hitabreytingarnar þarf að leysa jöfnur E-10 og E-11. Svo vill til að stærð-

fræðilega eru það sömu jöfnurnar og jöfnur E-6 og E-7 fyrir efnastyrksbreytingarnar. Lausnir má því byggja á jöfnum E-21 og E-22 ef aðeins er víxlað á efnastyrk ( $C_i$ ) og hita ( $T_i$ ) og í stað  $\alpha_1$  og  $\alpha_2$  eru sett

$$\beta_1 = \frac{c_v}{V_1 (\rho c)_1}, \quad \beta_2 = \frac{c_v}{V_2 (\rho c)_2}$$

Þess má geta að  $\beta_i \ll \alpha_i$  þannig að hitabreytingarnar eru mun hægari en efnastyrksbreytingarnar. Hitinn í fyrri tankinum er þá gefinn af:

$$T_1(t) = (T_0 - T_I) e^{-\beta_1 I t} + T_I \quad (\text{E-23})$$

og hitinn í seinni tankinum, og þar með vatnshiti í vinnsluholunum, af:

$$\begin{aligned} T_2(t) = & T_0 e^{-\beta_2(R+A)t} + \frac{RT_0 + AT_I}{R + A} (1 - e^{-\beta_2(R+A)t}) \\ & + \frac{\beta_2 A(T_0 - T_I)}{(\beta_2(R+A) - \beta_1 I)} (e^{-\beta_1 I t} - e^{-\beta_2(R+A)t}) \end{aligned} \quad (\text{E-24})$$

Jöfnu E-24 má nota til þess að áætla hitabreytingar í jarðhitakerfinu við langtímaniðurdælingu.

#### NIÐURDÆLINGU HÆTT

Eftir tímann  $t_0$  er niðurdælingunni hætt. Á sama tíma er vinnslunni breytt, en gengið verður út frá því að fasta innstreymið ( $R$ ) haldist óbreytt. Þá má rita:

$$I = \begin{cases} I & t \leq t_0 \\ 0 & t > t_0 \end{cases} \quad Q = \begin{cases} Q_1 & t \leq t_0 \\ Q_2 & t > t_0 \end{cases}$$

Til þess að leiða út þær jöfnur sem lýsa þrýstingsbreytingum og massastreymi í líkaninu þarf aftur að leysa jöfnur E-2 og E-3 með Laplace-myndvarpi. Hér verður aðeins birt niðurstaðan fyrir massastreymið:

$$q(t) = \frac{\kappa_1(Q_1 - R) + \kappa_2 I}{(\kappa_1 + \kappa_2)} (1 - e^{-\lambda t}) + \frac{\kappa_1(Q_2 - Q_1) - \kappa_2 I}{(\kappa_1 + \kappa_2)} (1 - e^{-\lambda(t-t_0)}) \quad (\text{E-25})$$

fyrir  $t > t_0$

Þá má skrifa:

$$q(t) = \begin{cases} A (1 - e^{-\lambda t}) & t \leq t_0 \\ A (1 - e^{-\lambda t}) - A' (1 - e^{-\lambda(t-t_0)}) & t > t_0 \end{cases} \quad (\text{E-26})$$

með  $A = \frac{\kappa_1(Q_1 - R) + \kappa_2 I}{(\kappa_1 + \kappa_2)}$  og  $A' = \frac{\kappa_1(Q_1 - Q_2) + \kappa_2 I}{(\kappa_1 + \kappa_2)}$

Efnabreytingunum eftir að niðurdælingunni er hætt er lýst með jöfnunum (sjá jöfnur E-15 og E-16):

$$\frac{dC_1}{dt} = 0, \text{ fyrir } t > t_0 \quad (\text{E-27})$$

$$\frac{dC_2}{dt} + \alpha_2(R + q(t))C_2 = \alpha_2RC_0 + \alpha_2q(t)C_1(t), \text{ fyrir } t > t_0 \quad (\text{E-28})$$

Samkvæmt jöfnu E-27 er styrkur ferilefnisins í fyrri tankinum einfaldlega:

$$C_1(t) = C_1(t_0), \text{ fyrir } t > t_0 \quad (\text{E-29})$$

þar sem  $C_1(t_0)$  er gefinn af jöfnu E-19 ef um efni A er að ræða, en af jöfnu E-21 ef um efni B er að ræða. Til þess að leysa jöfnu E-28 göngum við, eins og hér að framan, út frá því að  $q(t) \approx B$ , þar sem B er fasti skilgreindur af:

$$B = A - A' = \frac{\kappa_1(Q_2 - R)}{(\kappa_1 + \kappa_2)} \quad (\text{E-30})$$

Þá fæst að styrkur efnisins í seinni tankinum (vinnsluholunum) sé:

$$C_2(t) = C_2(t_0) e^{-\alpha_2(R+B)(t-t_0)} + \frac{[RC_0 + BC_1(t_0)]}{R+B} (1 - e^{-\alpha_2(R+B)(t-t_0)}) \quad (\text{E-31})$$

fyrir  $t > t_0$

þar sem  $C_1(t_0)$  er gefinn af jöfnu E-19 og  $C_2(t_0)$  af jöfnu E-20 ef um efni A er að ræða, en  $C_1(t_0)$  af jöfnu E-21 og  $C_2(t_0)$  af jöfnu E-22 ef um efni B er að ræða.

Um hitabreytingar eftir að niðurdælingu er hætt gilda eftirfarandi jöfnur:

$$T_1(t) = (T_0 - T_I) e^{-\beta_1 t t_0} + T_I, \text{ fyrir } t > t_0 \quad (\text{E-32})$$

$$T_2(t) = T_2(t_0) e^{-\beta_2(R+B)(t-t_0)} + \frac{[RT_0 + BT_1(t_0)]}{R+B} (1 - e^{-\beta_2(R+B)(t-t_0)}) \quad (\text{E-33})$$

fyrir  $t > t_0$

þar sem  $T_2(t_0)$  er gefinn af jöfnu E-24.

## TÚLKUN EFNASTYRKSBRÉYTINGA

Til þess að túlka breytingar í styrk ferilefnanna í og eftir niðurdælingartilraunina á Laugalandi er stuðst við jöfnur E-19 til E-22 ásamt jöfnu E-31 hér að ofan. Ýmsar einfaldanir eru þó gerðar til þess að einfalda túlkunina. Þær eru byggðar á eftirfarandi:

$$C_0 = 0$$

$$R = Q_1 - I, \text{ fyrir } t \leq t_0$$

$$R = Q_2, \text{ fyrir } t > t_0$$

Þá gildir að  $A = I$ ,  $R + A = Q_1$ ,  $B = 0$  og  $R + B = Q_2$ . Jöfnumar fyrir efnastyrksbreytingarnar einfaldast þá:

EFNI A:

$$C_2(t) = \frac{\alpha_1 \alpha_2 I (IM)}{(\alpha_2 Q_1 - \alpha_1 I)} (e^{-\alpha_1 I t} - e^{-\alpha_2 Q_1 t}), \text{ fyrir } t \leq t_0 \quad (E-34)$$

$$C_2(t) = C_2(t_0) e^{-\alpha_2 Q_2 (t-t_0)}, \text{ fyrir } t > t_0 \quad (E-35)$$

EFNI B:

$$C_2(t) = \frac{I C_I}{Q_1} (1 - e^{-\alpha_2 Q_1 t}) - \frac{\alpha_2 I C_I}{(\alpha_2 Q_1 - \alpha_1 I)} (e^{-\alpha_1 I t} - e^{-\alpha_2 Q_1 t}), \quad (E-36)$$

fyrir  $t \leq t_0$

$$C_2(t) = C_2(t_0) e^{-\alpha_2 Q_2 (t-t_0)}, \text{ fyrir } t > t_0 \quad (E-37)$$

### ENDURHEIMTA EFNIS A

Reikna má endurheimtu efnis A, sem sett er niður í ákveðnu magni (IM) við tímann  $t = 0$ , á eftirfarandi máta. Fyrst endurheimtuna til þess tíma að niðurdælingunni er hætt ( $t_0$ ):

$$m_1 = Q_1 \int_0^{t_0} C_2(\tau) d\tau \quad (E-38)$$

Hér er  $C_2(\tau)$  gefinn af jöfnu E-34 þannig að

$$\frac{m_1}{IM} = \frac{Q_1 \alpha_1 \alpha_2 I}{(\alpha_2 Q_1 - \alpha_1 I)} \left[ \left( \frac{1}{\alpha_1 I} - \frac{1}{\alpha_2 Q_1} \right) - \left( \frac{e^{-\alpha_1 I t_0}}{\alpha_1 I} - \frac{e^{-\alpha_2 Q_1 t_0}}{\alpha_2 Q_1} \right) \right] \quad (E-39)$$

Á þessari jöfnu sést að ef niðurdælingin stendur yfir nógu lengi ( $t_0 \rightarrow \infty$ ) þá endurheimtist allt efnið ( $m_1 \rightarrow IM$ ).

Endurheimtuna eftir að niðurdælingunni er hætt má reikna með:

$$m_2 = Q_2 \int_{t_0}^t C_2(\tau) d\tau \quad (E-40)$$

Hér er  $C_2(\tau)$  gefinn af jöfnu E-35 þannig að

$$\frac{m_2}{IM} = \frac{\alpha_1 I}{(\alpha_2 Q_1 - \alpha_1 I)} (e^{-\alpha_1 I t_0} - e^{-\alpha_2 Q_1 t_0}) (1 - e^{-\alpha_2 Q_2 (t-t_0)}) \quad (E-41)$$

Með því að leggja saman jöfnur E-39 og E-41 fæst heildar endurheimtan:

$$\frac{m_1 + m_2}{IM} = (1 - e^{-\alpha_1 I t_0}) - \frac{\alpha_1 I (e^{-\alpha_1 I t_0} - e^{-\alpha_2 Q_1 t_0})}{(\alpha_2 Q_1 - \alpha_1 I)} \cdot e^{-\alpha_2 Q_2 (t-t_0)} \quad (E-42)$$

og þegar  $t \rightarrow \infty$  gildir að

$$\frac{m_1 + m_2}{IM} \rightarrow (1 - e^{-\alpha_1 I t_0})$$