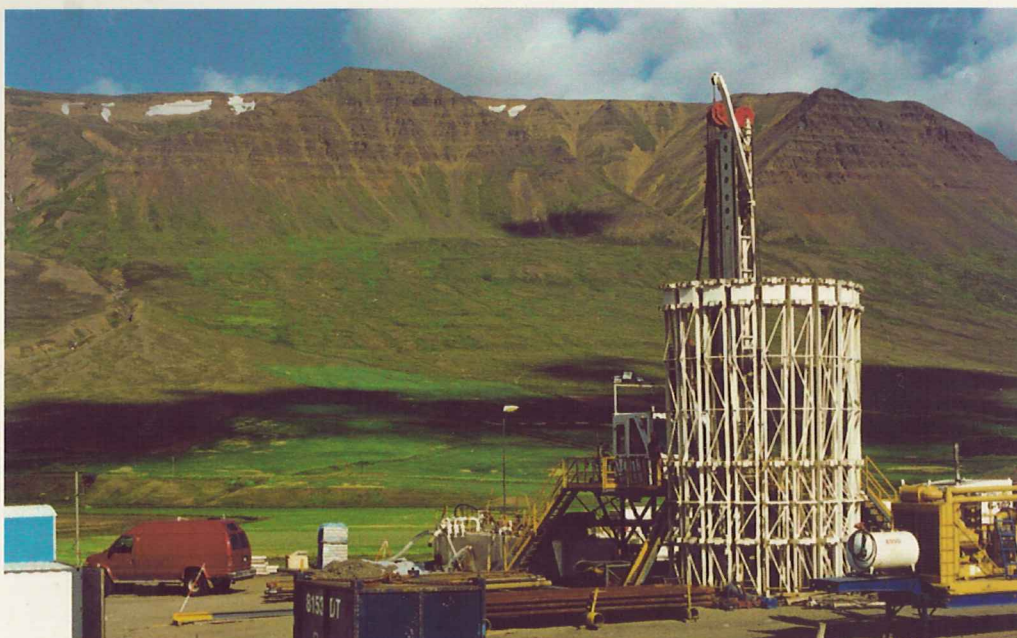




ORKUSTOFNUN

RANNSÓKNASVIÐ - Reykjavík, Akureyri

Vinnsluprófun holu LFN-10 á Laugalandi á Þelamörk



**Arnar Hjartarson
Guðni Axelsson
Steinunn Hauksdóttir**

Unnið fyrir Norðurorku

2001

OS-2001/056



**Arnar Hjartarson
Guðni Axelsson
Steinunn Hauksdóttir**

Vinnsluprófun holu LPN–10 á Laugalandi á Þelamörk

Unnið fyrir Norðurorku

OS–2001/056

Desember 2001

ORKUSTOFNUN — RANNSÓKNASVIÐ

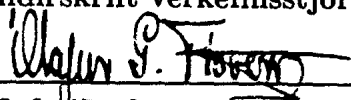
Reykjavík: Grensásvegi 9, 108 Rvk. — Sími: 569 6000 — Fax: 568 8896

Akureyri: Háskólinn á Akureyri, Sólborg v/ Norðurslóð, 600 Akureyri.

Sími: 463 0559 — Fax: 463 0999

Netfang: os@os.is — Heimasíða: <http://www.os.is>



Skýrsla nr: OS-2001/056	Dags: Desember 2001	Dreifing: <input checked="" type="checkbox"/> Opin <input type="checkbox"/> Lokuð til
Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill: Vinnsluprófun holu LÞN-10 á Laugalandi á Þelamörk	Upplag: 50	
	Fjöldi síðna: 49	
Höfundar: Arnar Hjartarson Guðni Axelsson Steinunn Hauksdóttir	Verkefnisstjóri: Ólafur G. Flóvenz	
Gerð skýrslu / Verkstig: Afkastamat jarðhitasvæðis	Verknúmer: 8-610-606	
Unnið fyrir: Norðurorku		
Samvinnuaðilar:		
Útdráttur: Skýrsla þessi greinir frá niðurstöðum vinnsluprófunar holu LÞN-10 á Laugalandi á Þelamörk sem dýpkuð var sumarið 2000. Í fimm mánuði veturinn 2000 til 2001 var grannt fylgst með vinnslu, vatnsborði og hita í holu LÞN-10 og vatnsborði í 5 öðrum holum á svæðinu. Gögnin sem söfnuðust voru túlkuð með einföldum forðafræðilíkönum til að meta afkastagetu svæðisins eftir dýpkun holunnar og jafnframt öðlast betri skilning á jarðhitakerfinu. Samkvæmt spám reiknuðum til átta ára annar jarðhitakerfið nú fastri árlegri vinnslu kringum 211/s. Vatnið úr holunni er um 103 °C og er fengið á rúmlega 1700 m dýpi þannig að hætta á innstreymi kalds grunnvatns er lítil. Afkastageta svæðisins hefur aukist úr 40 GWh á ári í 56 GWh á ári ef gert er ráð fyrir að hægt verði að dæla til viðbótar 15 l/s í 30 daga á ári úr holu LÞN-11. Afkastageta svæðisins hefur aukist um tæp 50 % við dýpkun holu 10. Talið er að skilyrði til niðurdælingar í jarðhitakerfið hafi batnað mikið sem gæti aukið afköst þess töluvert til viðbótar.		
Lykilorð: Lághitasvæði, borholur, vinnsla, vatnsborð, prepapróf, víxlpróf, dæluþróf, lekt, vatnsrýmd, sprunga, geymislíkön, afkastageta og orkuvinnsla.	ISBN-númer:	
	Undirskrift verkefnisstjóra: 	
	Yfirfarið af: ÓGF, PI	

Efnisyfirlit

1	Inngangur	5
2	Vinnsluprófun holu LPN–10	7
3	Þrepapróf í LPN–10	9
3.1	Um þrepapróf og iðustreymi	9
3.2	Hola LPN–10 þrepaprófuð	10
4	Vatnsborðsbreytingar í jarðhitakerfinu	11
4.1	Um mat á lektarþykkt og vatnsýmd	12
4.2	Niðurstöður túlkanna á vatnsborðsbreytingum í eftirlitsholum	13
4.3	Niðurstöður túlkana á vatnsborðsbreytingum í LPN–10	14
4.4	Samantekt á niðurstöðum túlkana vatnsborðsbreytinga	15
5	Spár um vinnslu og vatnsborð á Laugalandi á Þelamörk	16
5.1	Um þjöppuð geymslíkön	16
5.2	Niðurstöður líkanreikninga	17
5.3	Túlkun á niðurstöðum líkanreikninga	20
5.4	Mat á afkastagetu jarðhitakerfisins	22
5.5	Samspil LPN–10 og LPN–11	25
6	Kísill og magnesíum í LPN–10	26
7	Árangur dýpkunar LPN–10	28
7.1	Aukin orkuvinnsla með niðurdælingu	28
8	Samanteknar niðurstöður	29
9	Heimildir	30
10	English Summary	31
	Viðauki A: Vinnslugögn frá holu LPN–10	32

Viðauki B: Vatnsborðsmælingar í borholum	36
Viðauki C: Mæld gögn í þrepprófi í LÞN-10	41
Viðauki D: Mælt og reiknað vatnsborð í borholum	43
Viðauki E: Líkanstuðlar þjappaðra geymislíkana	49

Myndaskrá

1	Rannsóknasvæðið á Laugalandi á Þelamörk	6
2	Mæld vinnsla, hiti og vatnsborð í holu LÞN-10	7
3	Vatnsborð í borholum H-2, LÞN-11, LÞ-17 og LÞN-10 á Laugalandi á Þelamörk frá 29. október 2000 til 5. júní 2001.	8
4	Vatnsborð í borholum LÞÝ-5, LÞÝ-8 og LÞN-10 á Laugalandi á Þelamörk frá 29. október 2000 til 5. júní 2001.	8
5	Mæld gögn í þrepprófi í holu LÞN-10	10
6	Niðurstöður þrepprófs í holu LÞN-10	11
7	Tvö dæmi um þjöppuð geymislíkön	17
8	Samanburður á mældu vatnsborði í holu LÞN-11 og reiknuðu í holu LÞN-10	18
9	Mælt og reiknað vatnsborð í holu LÞN-10 auk eldri vinnslusögu úr LÞN-11	19
10	Vinnslusaga og mælt og reiknað vatnsborð í holu LÞN-10	19
11	Reiknuð vatnsborðsbreyting í LÞN-10 með opnu tveggja geyma líkani og lokuðu þriggja geyma líkani miðað við m.v. 201/s dælingu	21
12	Reiknaður einingarniðurdráttur með opnu tveggja geyma líkani og lokuðu þriggja geyma líkani.	22
13	Spár um vatnsborð í holu LÞN-10 samkvæmt opnu tveggja geyma líkani	23
14	Spár um vatnsborð í holu LÞN-10 samkvæmt lokuðu þriggja geyma líkani	24
15	Spár um vatnsborð í holu LÞN-10 við breytingu á dælingu úr 21 l/s í 30 l/s	24
16	Spár um vatnsborð í holu LÞN-10 vegna 21 l/s dælingu úr holunni að viðbætti 15 l/s dælingu úr LÞN-11.	25
17	Styrkur kísils í vatni úr holum LÞN-10 og LÞN-11	26
18	Styrkur kísils í vatni úr holum LÞN-10 og LÞN-11 frá upphafi vinnslu þeirra	27

19	Styrkur magnesíums í vatni úr holum LPN-10 og LPN-11 frá upphafi vinnslu þeirra	27
20	Niðurstöður víxlprófs í holu H-2 (í viðauka D)	43
21	Niðurstöður víxlprófs í holu LPÝ-5 (í viðauka D)	44
22	Niðurstöður víxlprófs í holu LPÝ-8 (í viðauka D)	45
23	Niðurstöður víxlprófs í holu LPN-11 (í viðauka D)	46
24	Niðurstöður víxlprófs í holu LP-17 (í viðauka D)	47
25	Niðurstöður dæluþrófs í holu LPN-10 (í viðauka D)	48

Töfluskrá

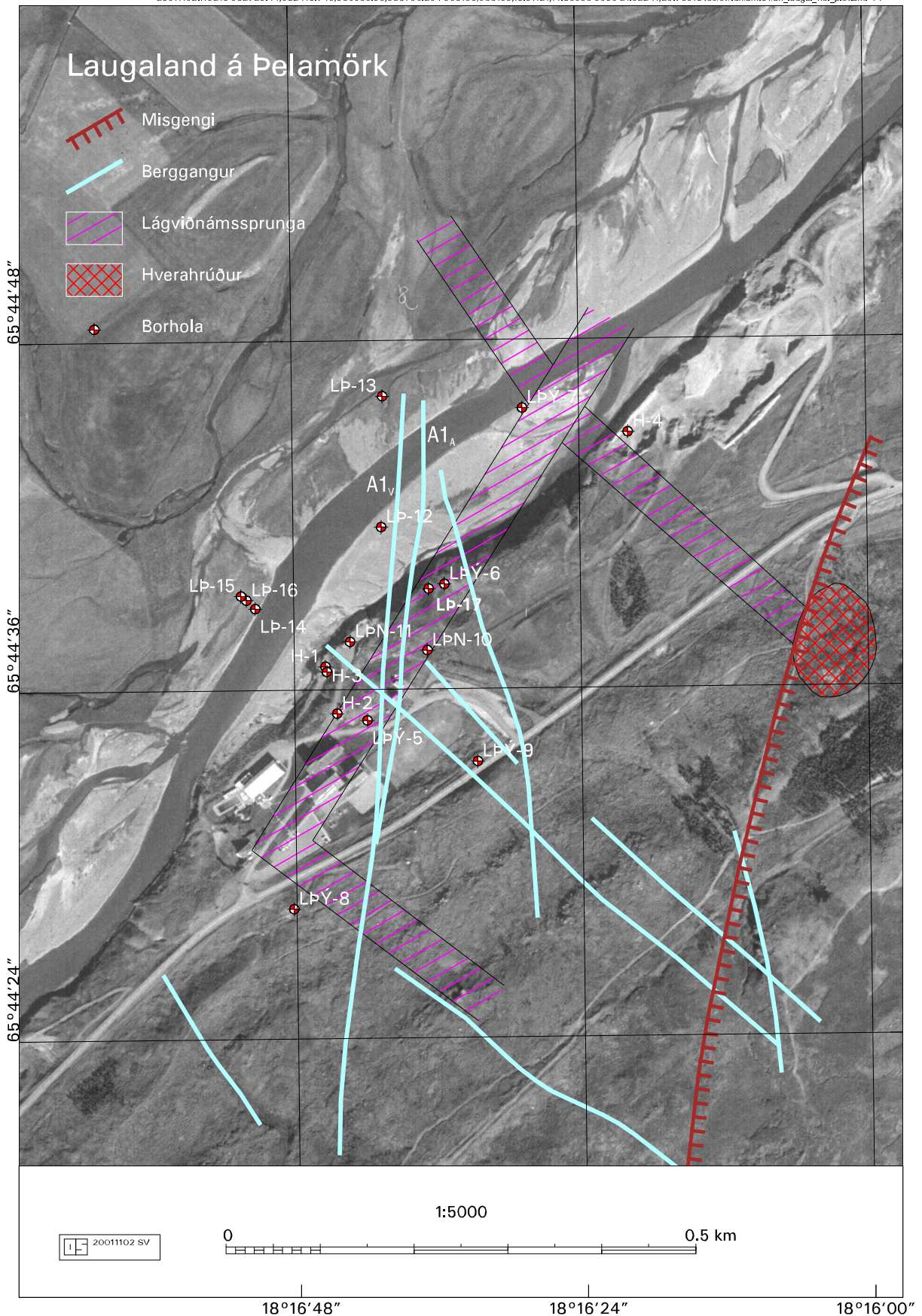
1	Borholur notaðar til vatnsborðsmælinga á Laugalandi á Þelamörk	9
2	Niðurstöður túlkanna á vatnsborðsbreytingum í styttri víxlprófum	13
3	Niðurstöður túlkanna á vatnsborðsbreytingum í lengri prófum	14
4	Niðurstöður túlkana á vatnsborðsbreytingum í holu LPN-10	15
5	Áætuð lektarþykkt (kh), vatnsleiðni (T), vatnsrýmd ($c_t h$ og S) og sprungulengd (L) í jarðhitakerfinu á Laugalandi á Þelamörk	16
6	Stuðlar sem lýsa eiginleikum líkana af jarðhitakerfinu á Laugalandi á Þelamörk	20
7	Vinnsla, hiti og vatnsborð í holu LPN-10 frá 30. október 2000 til 5. júní 2001 (í viðauka A)	32
8	Vatnsborð holu H-2 frá 29 október 2000 til 5. júní 2001 (í viðauka B)	36
9	Vatnsborð holu LPÝ-5 frá 29 október 2000 til 5. júní 2001 (í viðauka B)	37
10	Vatnsborð holu LPÝ-8 frá 29 október 2000 til 5. júní 2001 (í viðauka B)	38
11	Vatnsborð holu LPN-11 frá 29 október 2000 til 5. júní 2001 (í viðauka B)	39
12	Vatnsborð holu LP-17 frá 29 október 2000 til 5. júní 2001 (í viðauka B)	40
13	Mæld gögn í þrepprófi í holu LPN-10 (í viðauka C)	41
14	Stuðlar í opnu tveggja geyma þjöppuðu líkani (í viðauka E)	49
15	Stuðlar í lokuðu þriggja geyma þjöppuðu líkani (í viðauka E)	49

1 Inngangur

Í nóvember árið 1992 hófst vinnsla úr jarðhitakerfinu á Laugalandi á Þelamörk eftir árangursríka borun holu LPN-11. Sú hola var boruð með því markmiði að skera sprungu í kerfinu sem fannst eftir ítarlegar rannsóknir á svæðinu. Áformað var að holan yrði allt að 1400 m djúp, háð því á hvaða dýpi sprungan kæmi fram í holunni. Borun holunnar gekk vel uns hún lenti í góðri vatnsæð á 430 m dýpi í gangbergi og varð algjört skoltap. Þá var ákveðið að halda fengnum hlut og bora holuna ekki dýpri. Ljóst var að holan skar ganga sem eru tengdir sprungunni sem hefur verið talin meginaðfærsluæð kerfisins (Ólafur G. Flóvenz, 2000). Holan var vinnsluprófuð í um 10 mánuði frá nóvember 1992 og fram í ágúst 1993. Túlkanir á niðurstöðum vinnsluprófsins sýndu að kerfið gæti annað allt að 161/s vinnsla til 10 ára miðað við að vatnsborð héldist ofan við 240 m dýpi. Þessar jákvæðu niðurstöður leiddu til þess að ákveðið var að virkja holuna og leggja aðveituæð til Akureyrar.

Síðan 1993 hefur árleg meðalvinnsla á svæðinu verið í kringum 141/s af 91 °C heitu vatni. Talið var að hægt væri að fá meira vatn og heitara ef sprungan sem um ræðir væri skorin djúpt í kerfinu. Rökin fyrir því voru eftirfarandi (Ólafur G. Flóvenz, 2000): Hár kísilhiti á svæðinu benti til um eða yfir 100 °C hita niðri í jarðhitakerfinu. Reynslan af borunum í Eyjafirði sýnir að bestu vatnsæðarnar finnast á 1000 til 1500 m dýpi. Þá er búist við því að vatn úr holu LPN-11 kólni með tíma, sökum þess hversu grunnt æðin er, og til að viðhalda vinnslugetunni þarf að hitta vatnsæðarnar dýpra í jarðhitakerfinu. Frá desember 1998 til mars 2000 var rannsóknum haldið áfram eftir nokkurra ára hlé og voru boraðar 4 grunnar rannsóknarholur. Samkvæmt upplýsingum úr þeim holum var ljóst að uppstreymissvæðið djúpt í kerfinu var afar takmarkað og það væri tengt sprungu með stefnu kringum 35° og halla nálægt 2° til vesturs frá lóðréttu (Ólafur G. Flóvenz, 2000; Bjarni Gautason og Steinunn Hauksdóttir, 2000). Mynd 1 sýnir rannsóknarsvæðið á Laugalandi á Þelamörk.

Út frá hitamælingum í borholum á svæðinu var talið heppilegast að hitta sprunguna og gangnana á um 1500 m dýpi milli holna LPÝ-6 og LPN-11, beint undir Hörgá. Til að ná því markmiði var um tvo kosti að ræða. Bora lóðréttu holu á Hörgáreyrum eða skáboru til norðvesturs frá holu LPN-10. Síðari kosturinn varð fyrir valinu. Í júlí 2000 settist jarðborinn Sleipnir í eigu Jarðboranna h/f á holu LPN-10. Holan, sem var fyrir um 925 m að dýpt, var dýpkuð og skáboruð frá 950 m dýpi til norðvesturs með um 20° halla. Holan skar sprunguna á tilætluðum stað en án verulegs árangurs. Á rúmlega 1700 m dýpi varð algjört skoltap þegar borað var í gangana og gaf loftdæling til kynna góðan árangur. Haustið 2000 var dæla sett í holuna og hún tengd við dreifikerfi Norðurorku. Þann 28. nóvember hófst vinnsluprófun holu LPN-10 og var henni lokið 3. maí 2001 rúmum fimm mánuðum seinna, en niðurstöður slíkra prófa verða áreiðanlegri eftir því sem þau eru lengri. Tilgangurinn með prófinu var að meta afköst jarðhitasvæðisins og sjá hvort þau hefðu aukist með dýpkun holunnar. Dælt var úr holunni kringum 201/s af vatni sem náði milli 103 og 104 °C hita. Meðan á prófuninni stóð var vel fylgst með viðbrögðum holunnar og jarðhitakerfisins í heild.

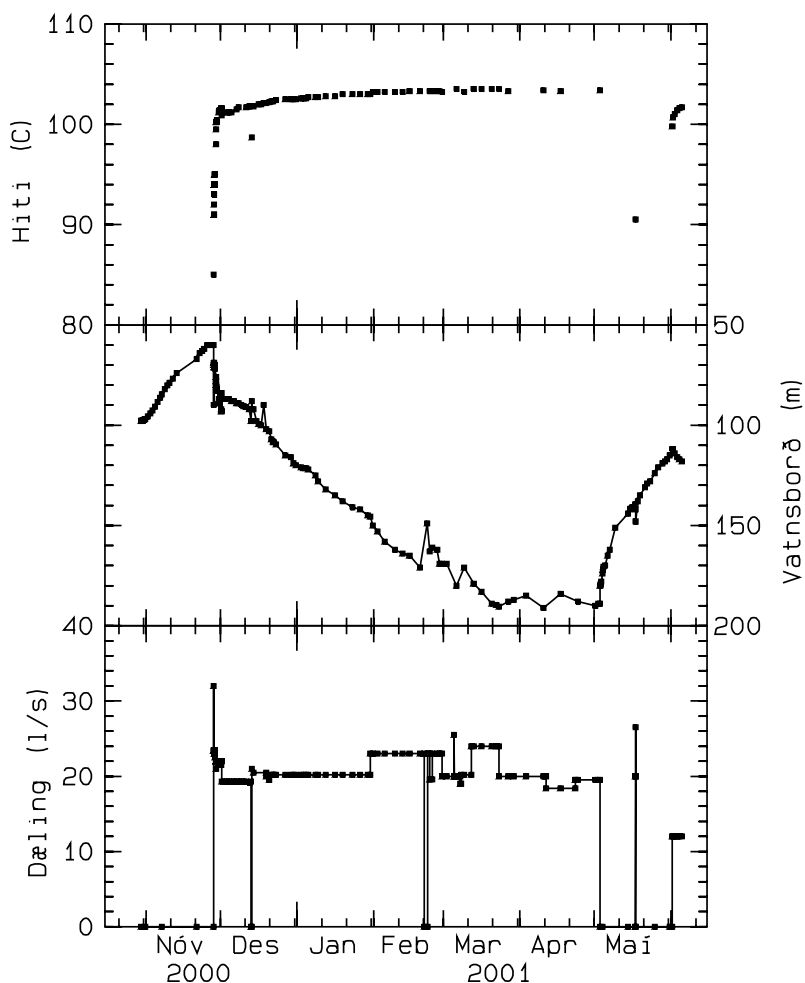


Mynd 1: *Rannsóknasæðið á Laugalandi á Pelamörk.*

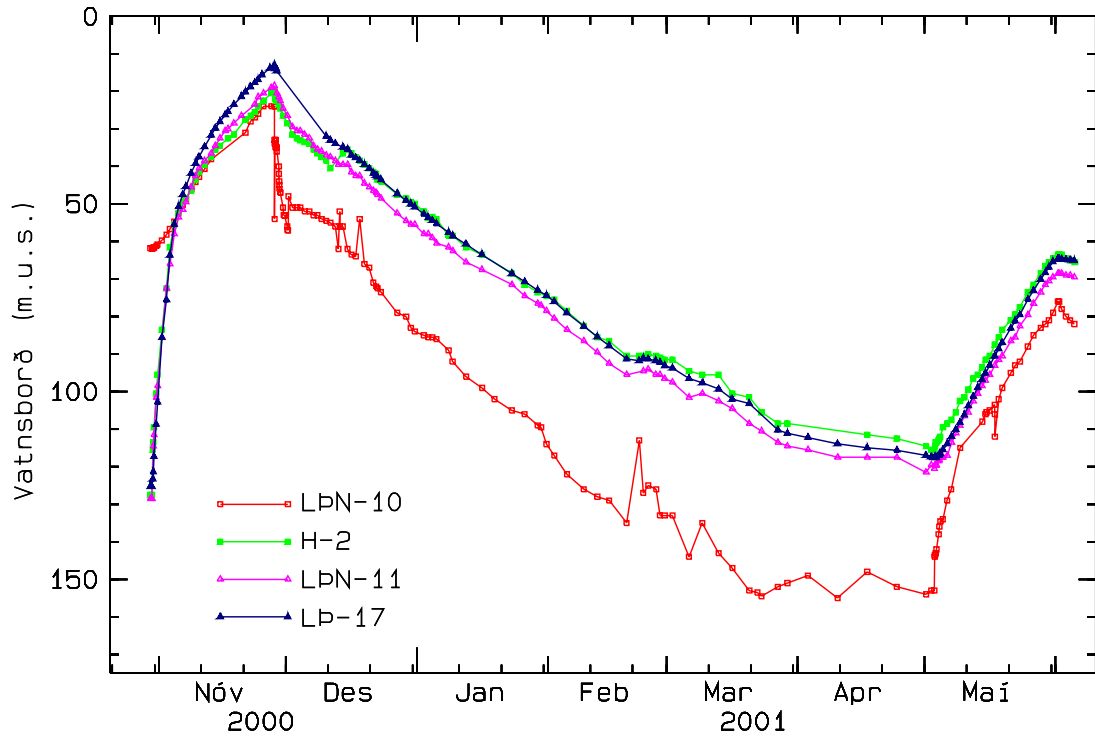
Þessi skýrsla fjallar um úrvinnslu á þessum gögnum. Í henni greinir frá mati á lekt og vatnsrýmd jarðhitakerfisins, viðbrögðum þess við vinnslu, spám um afkastagetu kerfisins og fleiru sem lesa má úr gögnunum. Ekki verður fjallað um borunina sem slíka né bergið sem holan er mynduð í eða jarðlagamælingar sem gerðar voru í holunni. Greint verður frá því í annarri skýrslu Orkustofnunar (Bjarni Gautason *o.fl.* í vinnslu).

2 Vinnsluprófun holu LPN-10

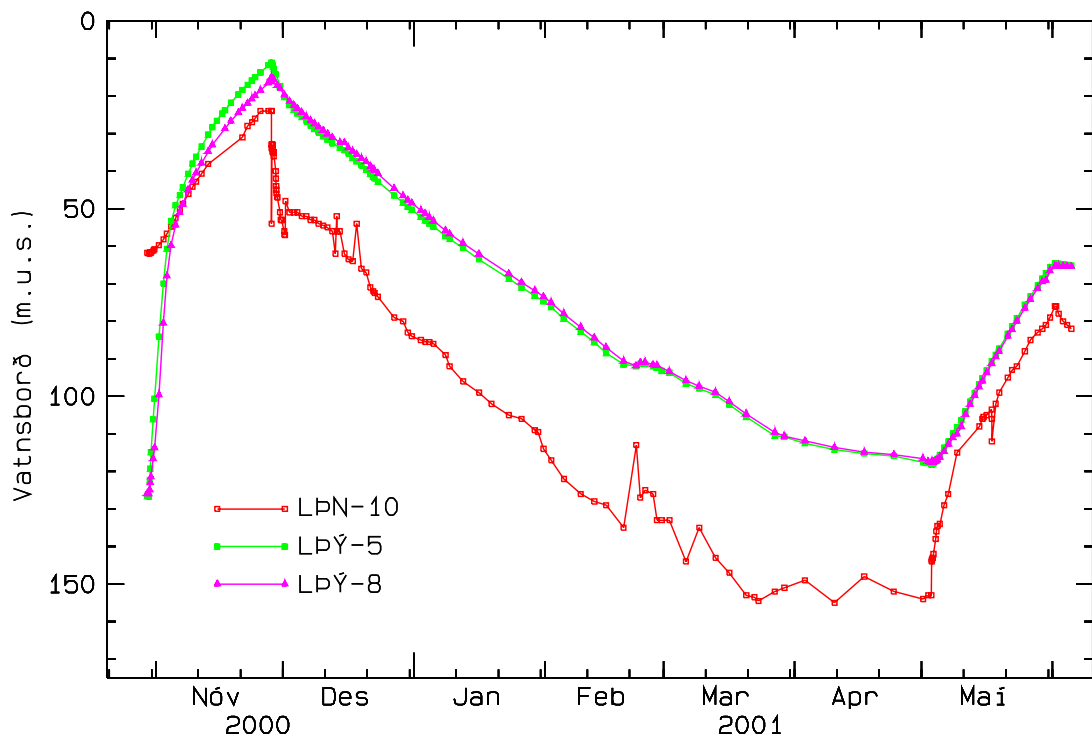
Vinnsluprófun holu LPN-10 í jarðhitakerfinu á Laugalandi á Þelamörk hófst þann 28. nóvember 2000 kl. 8:20. Þá var kerfið búið að vera í hvíld frá 29. október, þegar vinnslu var hætt í holu LPN-11. Þann 5. maí má segja að prófinu hafi verið lokið, þegar dælingu var hætt í um mánuð, en þann 31. maí hófst dæling aftur úr holunni. Í þá fimm mánuði sem prófið stóð yfir var meðaldælingin úr holunni um 20,5 l/s og samtals var magnið um 275.870 m³. Eftir að holan var búin að hitna eftir rúma tveggja mánaða vinnslu var hiti vatnsins rúmar 103 °C við 23 l/s dælingu.



Mynd 2: Mæld vinnsla, hiti og vatnsborð miðað við holutopp í holu LPN-10 meðan á vinnsluprófi stóð.



Mynd 3: Vatnsborð í borholum H-2, LPN-11, LP-17 og LPN-10 á Laugalandi á Þelamörk frá 29. október 2000 til 5. júní 2001, mælt í metrum undir sjávarmáli.



Mynd 4: Vatnsborð í borholum LPÝ-5, LPÝ-8 og LPN-10 á Laugalandi á Þelamörk frá 29. október 2000 til 5. júní 2001, mælt í metrum undir sjávarmáli.

Mæld vinnslugögn úr holu LPN–10 má sjá á mynd 2 en frumgögnin, ásamt skýringum við vinnsluna, er að finna í töflu 7 í viðauka A. Einnig var grannt fylgst með vatnsborði á svæðinu í nokkrum borholum bæði fyrir, eftir og á meðan prófuninni stóð. Yfirlit yfir þær holur sem notaðar voru til vatnsborðsmælinga má finna í töflu 1. Tími milli skráninga var frá hálf tíma, þegar dæling hófst úr LPN–10, og allt upp í viku þegar litlar breytingar voru í vatnsborði í apríl 2001. Samanburð á vatnsborði í mæliholunum á svæðinu miðað við vatnsborðið í holu LPN–10 má sjá á myndum 3 og 4. Vatnsborðsgögnin er einnig að finna í töflum 8 til 12 í viðauka B. Nánar verður fjallað um vatnsborðsbreytingarnar í jarðhitakerfinu í kafla 4.

Tafla 1: Borholur notaðar til vatnsborðsmælinga á Laugalandi á Þelamörk.

Hola	Dýpi (m)	Lengd fóðringar (m)	Hæð yfir sjó (m)
H–2	1088	20	29,5
LPÝ–5	239	23	33,4
LPÝ–8	251	12	42,8
LPN–11	451	250	23,0
LP–17	252	12	14,0

3 Preparafróf í LPN–10

Preparafróf eru framkvæmd í þeim tilgangi að meta iðustreymistap við borholur. Iðustreymisstapið segir til um hversu mikið vatnsborð fellur í borholu vegna dælingarinnar sjálfvar. Áður en farið verður í niðurstöður þreparafrófsins í LPN–10, sem framkvæmt var þann 22. desember 2000, verður fjallað nánar um þreparafróf og framkvæmd þess.

3.1 Um þreparafróf og iðustreymi

Þegar vatni er dælt upp úr borholu verður niðurdráttur í vatnskerfinu umhverfis holuna vegna viðnáms bergsins við vatnið þegar það rennur. Breytingar á vatnsborði inni í borholunni endurspeglar því breytingar í vatnskerfinu umhverfis. Þó er heildarniðurdrátturinn í borholum ekki eingöngu tilkominn vegna aðstæðna berginu í kringum holuna, heldur verður einnig niðurdráttur í holunni sjálfri.

Þegar dælt er upp úr holu streymir vatnið lagstreymt í átt til holunnar. Þegar vatnið kemur nær holunni fer það hraðar og þegar það fer upp fyrir ákveðin hraðamörk breytist streymið og verður ekki lengur lagstreymt heldur verður iðustreymi. Þetta iðustreymi veldur meira þrýstifalli og minni hraða og þar af leiðandi meiri niðurdrætti.

Til að kanna hversu mikil áhrif dælingarinnar eru er framkvæmt þreparafróf. Það er vanalega framkvæmt á eftirfarandi hátt: Í upphafi er ákveðnu magni dælt úr holunni og vatnsborð skráð. Svo er dælingin aukin þar til vatnsborð er orðið stöðugt á ný og

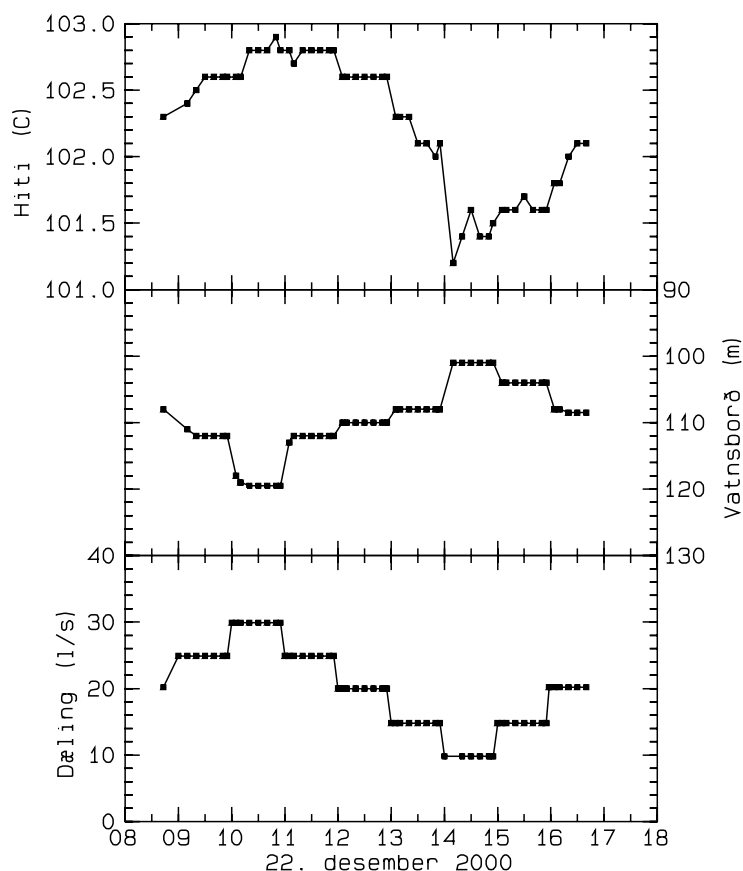
það skráð. Þetta er gert í jöfnum þrepum og varir hvert þrep í um klukkustund en dælingin er háð gæfni hverri holu fyrir sig. Í sumum tilfellum þar sem upphafsþrepið er hlutfallslega hátt, er farið upp um t.d. tvo þrep og þá niður um nokkur, þ.e. dælingin er minnkuð í stað þess að vera aukin.

Með því að teikna vatnshæð í borholunni sem fall af dælingu í lok hvers þreps má áætla hluta iðustreymisins af heildarniðurdraettinum. Sé um iðustreymi að ræða ættu gögnin að falla á annarar gráðu feril sem má lýsa með:

$$\Delta h = Bq + Cq^2$$

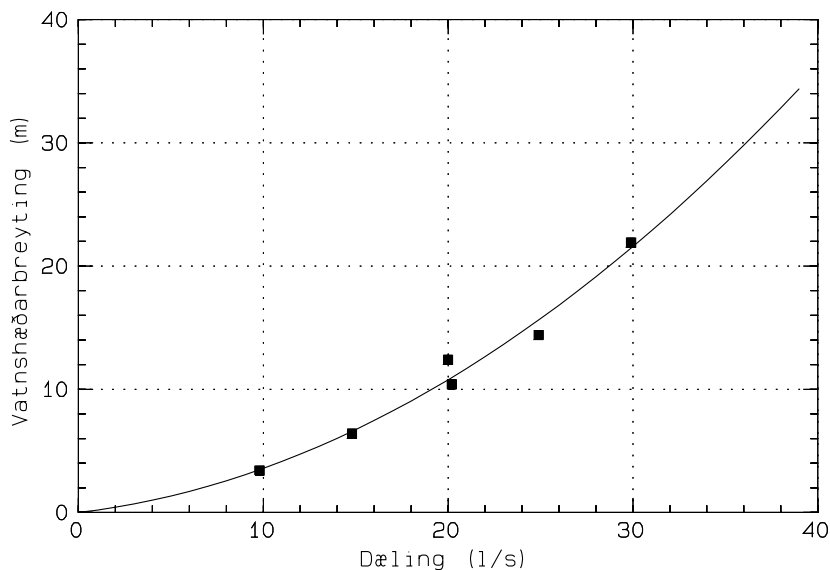
þar sem Δh er vatnshæðarbreytingin (m), q er dælingin (l/s), B er lagstreymisstuðull og C er iðustreymisstuðull. Jöfnuna má því nota til að áætla hver vatnshæðarbreytingin er vegna breyttrar dælingar. Nánari fróðleik um þreppróf má finna í bókinni Groundwater Hydrology eftir Todd (1959).

3.2 Hóla LPN-10 þrepprófuð



Mynd 5: Mæld gögn í þrepprófi í holu LPN-10. Vatnsborð er mælt jákvætt niður frá holutopp.

Þrepprófið í LPN-10 á Laugalandi á Þelamörk var framkvæmt þann 22. desember 2000. Prófið hófst kl. 8:43 og var lokið 16:40. Fyrst var dæling aukin í tveimur þrepum úr



Mynd 6: Niðurstöður þrepaprófs í holu LPN-10.

20,21/s í 29,91/s og síðan lækkuð í fjórum þrepum niður í 9,81/s. Að lokum var dælingin aftur aukin í tveimur þrepum og endaði hún aftur í 20,21/s. Vatnsborðið var í upphafi 108 m en fór lægst í 119,5 m við 29,91/s dælingu en hæst í 101 m við 9,81/s dælingu. Holan var fullheit allan tímann og mældist hitinn á milli 101,2°C og 102,9°C og því eru hitaleiðréttingar óþarfar. Mældan hita, dælingu og vatnsborð, meðan á prófinu stóð má sjá á mynd 5 en gögnin er að finna í töflu 13 í viðauka C.

Niðurstöður þrepaprófsins má sjá á mynd 6. Hún sýnir vatnshæðarbreytingu sem fall af dælingu fyrir þrepin sex. Á myndinni hefur annarrar gráðu ferill verið felldur að gögnunum. Það er því greinilega um iðustreymistap að ræða í holunni. Ferlinum má lýsa með jöfnunni:

$$\Delta h = 0,18q + 0,018q^2$$

Ef t.d. dælingin er 10 l/s lækkar vatnsborðið um 1,8 m vegna bergsins umhverfis holun og 1,8 m vegna iðustreymis; samtals um 3,6 m. Sé dælingin hins vegar 30 l/s verða vatnsborðsbreytingarnar um 5,4 og 16,2 m; samtals um 21,6 m. Vatnsborðslækkun vegna iðustreymis verður því æ meiri eftir því sem dælingin er aukin.

4 Vatnsborðsbreytingar í jarðhitakerfinu

Vatnsborðsbreytingarnar sem fram komu í kerfinu við vinnsluna úr LPN-10 voru notaðar til að meta lektarþykkt og vatnsrýmd jarðhitakerfisins. Það var gert með því að túlka vatnsborðsbreytingarnar í kerfinu við lok vinnsluprófsins sem einfalt dælupróf á LPN-10 og víxlpróf við aðrar holur í kerfinu (H-2, LPÝ-5, LPÝ-8, LPN-11 og LP-17). Víxlpróf er dælupróf þar sem vatnsborð er mælt í annarri borholu en þeirri sem dælt er úr en víxlpróf eru betri en einföld dælupróf að því leyti að ekki þarf að taka tillit til borholuáhrifa og tregðu holunnar sem dælt er úr.

Til að túlkun á vatnsborðsbreytingum í jarðhitakerfum séu sem auðveldastar er mikilvægt að kerfin sé í jafnvægi áður en breyting verður á massatöku. Gögnin sem eru grundvöllur prófanna sem hér verður fjallað um á eftir eru frá 5. maí 2001 og fram til 1. júní 2001, eða 29 dagar. Mánuðina á undan því tímabili var búin að dæla stöðugt úr kerfinu kringum 20l/s og hlutfallslega litlar breytingar voru í vatnsborði eins og sést á myndum 3 og 4. Áður en farið verður í úrvinnslu og niðurstöður prófanna verður rætt lítillega um mat á þeim stærðum sem stjórna vinnslugetu jarðhitakerfa: lektarþykkt og vatnsrýmd.

4.1 Um mat á lektarþykkt og vatnsrýmd

Þegar vatni er dælt upp úr borholu úr jarðhitakerfi, eða öðru vatnskerfi, fellur þrýstingur í kerfinu sem endurspeglast í lægra vatnsborði. Hversu mikið og hratt vatnsborðið fellur er háð lektarþykkt, kh (k =lekt, h =þykkt), og vatnsrýmd, $c_t h$ (c_t =samþjappanleiki), bergsins umhverfis borholuna. Með því að mæla reglulega vatnsborðsbreytingarnar í jarðhitakerfinu þegar dælt er má áætla eiginleika kerfisins og spá fyrir um viðbrögð þess við vinnslu. Það er gert með því að herma vatnsborðsgögnin, þ.e. láta reiknaða ferla út frá viðeigandi líkani falla sem best að gögnunum. Tvö algeng líkön voru notuð til að meta bergeiginleika jarðhitakerfisins á Laugalandi á Þelamörk: Líkan Theis og sprungulíkan.

Líkan Theis gerir ráð fyrir að dælt sé úr óendanlega stórum, einsleitum vatnsgeymi með lekt k , poruhluta ϕ og þykkt h . Þjappanleiki geymisins er $c_t = \phi c_v + (1 - \phi)c_b$ þar sem c_v og c_b er þjappanleiki vatns og bergs. Gert er ráð fyrir að vatnið í kerfinu sé við sama hita og hafi seigju μ . Í sprungulíkani er gert ráð fyrir að vatnsgeymirinn, sem lýst er hér að ofan, sé skorinn af einni lóðréttri sprungu með hálf lengd x_f .

Flest lághitakerfi á Íslandi eru tilkomin vegna hræringar í lóðréttum sprungum (Axel Björnsson *o.fl.*, 1990). Hversu djúpt í berggrunnin kerfin ná er yfirleitt ekki vitað og þar með er þykkt þeirra, h , óþekkt stærð. Dælupróf í borholum geta ekki ein og sér greint á milli þeirra eiginleka sem notuð eru í líkanreikningunum heldur aðeins ákveðin margfeldi þeirra. Þessar stærðir eru lektarþykkt, kh , og vatnsrýmd, $c_t h$. Séu sprunguáhrif ráðandi hefur það þau áhrif að vatnsrýmdina er ekki hægt að greina frá lengd sprungunnar, x_f , heldur aðeins margfeldi stærðanna sem er $c_t h x_f^2$. Þó að ekki sé hægt að greina beint einstaka liði í sundur í þessum stærðum er þekking á margfeldi þeirra nægjanleg til að meta vinnslueiginleka jarðhitakerfa. Þó má reikna aðra stærðina ef hin er metin, eða fengin með öðrum aðferðum eða prófum.

Til að velja viðeigandi líkan til úrvinnslu á prófunum, sem þessi kafli greinir frá, voru gögnin teiknuð sem vatnsborðsbreyting á móti tíma, með báða ása á lógaritmískum kvarða. Gögnin voru svo borin saman við fyrirframreiknaða ferla sem einkenna sprungulíkan og líkan Theis. Eftir að búíð var að ákveða viðeigandi líkan var forritið Lokur notað til ákvörðunar á líkanstuðlunum.

4.2 Niðurstöður túlkanna á vatnsborðsbreytingum í eftirlitshol- um

Mældar vatnshæðarbreytingar í borholum H-2, LPÝ-5, LPÝ-8, LPN-11 og LP-17 vegna stöðvunar á dælingu í holu LPN-10 í lok vinnsluprófsins voru túlkaðar sem víxlpróf. Gögnin sem notuð voru ná yfir tímabil sem spanna 29 daga eða um 700 klukkustundir en þau eru að finna í töflum 8 til 12 í viðauka B. Þegar gögnin voru hermd kom í ljós að þau sýndu breytta hegðun eftir 5 til 6 daga. Ástæðan er líklega sú að eftir því sem prófin eru lengri verða vatnsborðsbreytingarnar háðar bergeiginleikum sem eru fjær prófunarsvæðinu. Því var gögnunum í hverju prófi skipt í langt og stutt próf. Styttri prófin spanna því fyrstu 5 til 6 dagana meðan lengri prófin spanna dagana þar á eftir. Prófin gefa því mat á bergeiginleika í innsta hluta kerfisins sem og í kringum hann, en rúmmál hlutanna er ekki hægt að meta með þessum prófum.

Niðurstöður túlkana víxlprófanna má finna í töflum 2 og 3 og á myndum 20 til 24 í viðauka D. Myndirnar sýna samanburð á milli mælds og reiknaðs vatnsborðs auk líkanstuðla fyrir hvert víxlpróf. Tafla 2 inniheldur niðurstöður styttri prófanna meðan tafla 3 inniheldur niðurstöður lengri prófanna. Í úrvinnslu prófanna var breyting á dælingu (Δq) höfð 20 l/s og var reiknað með föstum segjustuðli í öllum prófum $\mu = 0,28 \cdot 10^{-3}$ Pa·s. Við úrvinnslu á víxlprófum þarf að ákvarða vegalengdina, r , á milli aðal æðanna í borholunum sem um ræðir. Hér var gert ráð fyrir að sprungan, eða sprungubeltið, í kerfinu sé aðal vatnsleiðarinn og fjarlægðirnar voru gróflega metnar útfrá aðalæðinni í LPN-10 á 1700 m dýpi og dýpt og staðsetningu hinna holnanna. Veitirinn er því lóðréttur, en ekki láréttur, með þykkt, h , sem túlkast hér sem þykkt sprungubeltisins.

Tafla 2: Niðurstöður túlkanna á vatnsborðsbreytingum í styttri víxlprófum. †Áætlað gildi.

Mæliholi	Fjarlægð r (m)	Líkan	Lektarþykkt kh (Dm)	Vatnsrýmd $c_t h$ (m/Pa · 10 ⁻⁹)	Hálf lengd sprungu x_f (m)
H-2	1000	Theis	5,5	8,2	–
LPÝ-5	1500	Theis	3,9	4,7	–
LPÝ-8	1600	Theis	3,4	5,1	–
LPN-11	1200	Sprungu	2,1	6,0 [†]	1260
LP-17	1500	Sprungu	3,3	6,0 [†]	1360

Í töflu 2 sést að holur LPN-11 og LP-17 falla betur að sprungulíkani meðan holur H-2, LPÝ-5 og LPÝ-8 falla betur að líkani Theis. Lektarþykktin gefur til kynna að hola 11 sé töluvert betur tengd við LPN-10 heldur en hinar holurnar, jafnvel þó að hola 17 sýni líka sprunguhegðun. Þetta er trúverðugt í ljósi þess að á mynd 3 sést að vatnsborðið í holu 11 stendur alltaf neðar en í holu 17. Holur 5 og 8 virðast vera í jafnmiklum tengslum við holu 10 enda eru vatnsborðsbreytingarnar í þeim mjög líkar eins og kemur fram á mynd 4. Tengslin milli holna 10 og 2 eru þó betri en milli holu 10 og 5 og 8. Hafa ber í huga að hola 2 er meira en fjórfalt dýpri en holur 5 og 8. Meðalgildi lektarþykktar í töflu 2 er um 3,6 Dm (Darcy-metrar: 1 Dm = 1 · 10⁻¹² m³).

Tafla 3: Niðurstöður túlkanna á vatnsborðsbreytingum í lengri prófum. †Áætlað gildi.

Mæliholi	Fjarlægð r (m)	Líkan	Lektarþykkt kh (Dm)	Vatnsrýmd $c_t h$ (m/Pa · 10 ⁻⁹)	Hálf lengd sprungu x_f (m)
H-2	100	Theis	1,1	8,5	–
LPÝ-5	1600	Theis	0,92	3,8	–
LPÝ-8	1600	Theis	0,90	3,5	–
LPN-11	1200	Sprungu	1,0	6,0 [†]	1200
LP-17	1500	Sprungu	0,90	6,0 [†]	1200

Meðal vatnsrýmd í holum H-2, LPÝ-5 og LPÝ-8 er um $6,0 \cdot 10^{-9}$ m/Pa. Til að áætla lengd sprungnanna sem tengjast holum LPN-11 og LP-17 var vatnsrýmdin höfð $6,0 \cdot 10^{-9}$ m/Pa. Þá gefur sprungulíkanið að hálf lengdir sprungnanna, sem skera holur 11 og 17, séu um 1260 og 1360 m. Þetta eru ekki mjög nákvæm gildi og ætti að líta á þau sem nálganir. Heildarlengd sprungnanna fæst svo með því að tvöfalda hálf lengdirnar. Séu holurnar að skera sömu sprunguna, eins og lagt var útfra í upphafi, er heildarlengd hennar áætluð á bilinu 2 til 3 km.

Túlkun lengri prófananna er að finna í töflu 3. Holur LPN-11 og LP-17 sýna veik merki um sprunguhegðun, en sökum hárra vatnsrýmdargilda var sprungulíkan áfram notað við túlkun á vatnsborðsbreytingunum, meðan hinar holurnar fylgja líkani Theis. Mjög gott samræmi er á milli lektarþykktargilda úr prófunum og er meðalgildið um 0,96 Dm. Það bendir til þess að holurnar séu að greina svæði sem er fyrir utan innsta hluta jarðhitakerfisins þar sem sprunguáhrifa gætir minna. Þar er lektarþykktin stærðargráðu minni en í innsta hlutanum.

Meðal vatnsrýmd í holum H-2, LPÝ-5 og LPÝ-8 er um $5,3 \cdot 10^{-9}$ m/Pa og er aðeins lægra en meðalgildið sem fékkst úr styttri prófunum. Þetta bendir einnig til minni sprunguáhrifa. Hálf lengd sprungunnar sem tengist holum 11 og 17 er eins í báðum prófum, eða um 1200 m.

4.3 Niðurstöður túlkana á vatnsborðsbreytingum í LPN-10

Sprungulíkan var fellt að vatnsborðsgögnunum sem mældust þegar slökkt var á dælunni í holu LPN-10. Gögnin sýna breytilega hegðun eftir 4 daga og voru því túlkuð tvö próf eins og í víxlprófunum. Í fyrra prófinu eru gögnin hermd fyrstu 4 dagana en í því síðara eru gögnin hermd frá 4. degi til þess 29. Mælt vatnsborð eftir 6 daga var ekki haft með í útreikningunum því hugsanlega er um ranga skráningu að ræða í því tilviki. Leiðrétt var fyrir borholuáhrifum og iðustreymi með því að hækka vatnsborðið í upphafspunkti um 7 m. Ekki var tekið tillit til þess að vatnið í holunni kólnar með tíma en áhrifin eru þau að vatnssúlan í holunni dregst saman og vatnsborðið stendur neðar í holunni en ef hún væri fullheit. Þessi munur er um 15 m.

Niðurstöður reikninganna er að finna í töflu 4. Samanburð á mældu og reiknuðu vatnsborð í holu LPN-10 er að finna á mynd 25 í viðauka D. Líkt og í víxlprófunum kemur

Tafla 4: Niðurstöður túlkana á vatnsborðsbreytingum í holu LPN-10. †Áætlað gildi.

Mæliholi	Gögn (dagar)	Líkan	Lektarþykkt kh (Dm)	Vatnsrýmd $c_t h$ (m/Pa · 10 ⁻⁹)	Hálf lengd sprungu x_f (m)
LPN-10	0-4	Sprungu	4,6	6,0 [†]	640
LPN-10	11-29	Sprungu	1,1	6,0 [†]	940

fram hærri lekt næst holunni en fjær henni. Lektin nálægt holunni er um 4,6 Dm en 1,1 Dm fjær henni. Þetta getur verið mælikvarði á lekt sprungunnar eða áhrifasvæði hennar. Lektargildin sem fást úr prófinu eru í góðu samræmi við víxlprófin (sjá töflur 2 og 3). Með því að nota 6,0 · 10⁻⁹ m/Pa fyrir vatnsrýmd, fæst að hálf lengd sprungunnar er 600 til 1000 m. Heildarlengd hennar gæti því verið 1,5 til 2 km samkvæmt þessari túlkun.

4.4 Samantekt á niðurstöðum túlkana vatnsborðsbreytinga

Tafla 5 sýnir samantekt á niðurstöðum dæluþrófanna sem fjallað var um hér að ofan. Í styttri prófunum er meðallektarþykktin úr öllum prófum 3,6 Dm en í þeim lengri 0,99 Dm, eða tæplega fjórum sinnum lægri. Ef þessar tölur eru reiknaðar yfir í leiðnistuðul (T) fæst 1,2 · 10⁻⁴ m²/s fyrir styttri prófin og 0,33 · 10⁻⁴ m²/s fyrir lengri prófin. Þessi gildi má bera saman við niðurstöður úr prófunum sem framkvæmd voru á Þelamörk á árunum 1992 til '93 í tengslum við vinnsluþrófun á holu LPN-11. Niðurstöður þeirra prófa er að finna í skýrslu Orkustofnunar frá 1994 (Ólafur G. Flóvenz *o.fl.*, 1994). Í töflu 13 á bls. 47 í þeirri skýrslu kemur fram að meðal leiðnistuðull í stuttum prófum (1 sólarhringur) er 0,63 · 10⁻⁴ m²/s en 0,38 · 10⁻⁴ m²/s í löngum prófum (150 dagar). Séu þessi gildi borin saman við gildin í töflu 5 er ágætis samræmi milli vatnsleiðni í löngu prófunum en fyrir styttri prófin er gildið frá '94 helmingi lægra.

Meðallektarþykktin í stuttu prófunum er hér túlkað sem meðalgildi fyrir innsta hluta jarðhitakerfisins þar sem sprunga, ein eða fleiri, ráða mestu um lektina en meðalgildið úr löngu prófunum er túlkað sem meðalgildi fyrir utan innsta hlutann þar sem áhrif sprungunnar eru minni. Mismunandi lektargildi úr stuttu prófunum fyrir holur LPN-10, LPN-11 og LP-17, sem allar eru taldar tengjast aðalsprungunni í kerfinu, gefur til kynna að sprungan geti verið mislek á mismunandi stöðum.

Meðalvatnsrýmd kerfisins, samkvæmt líkani Theis úr stuttu og löngu prófununum, er $c_t h = 5,6 \cdot 10^{-9}$ m/Pa og reiknast sem $S = 0,53 \cdot 10^{-4}$ (einingarlaus) sé notaður sami ritháttur og í skýrslunni frá '94, en vatnsrýmd er hægt að setja fram á fleiri en einn veg. Meðalvatnsrýmdin er metin $S = 5,0 \cdot 10^{-4}$ í prófunum frá '94 og er það gildi stærðargráðu hærri en hér er upp gefin. Ástæðan fyrir þessum mun er líklega sá að í víxlprófununum frá '94 var æðin sem unnið var úr mun ofar í jarðhitakerfinu og þar með í betri tengslum við grunnvatnskerfið. Meðalvatnsrýmdin stjórnað því að hluta til af sveiflum í frjálsu vatnsborði. Með því að yfirfæra vatnsrýmdina sem fæst í prófunum með líkani Theis yfir á sprungulíkanið, fæst að hálf lengd sprungubeltisins er frá 640 til 1340 m. Því má

Tafla 5: Áætuð lektarþykkt (kh), vatnsleiðni (T), vatnsrýmd ($c_t h$ og S) og sprungulengd (L) í jarðhitakerfinu á Laugalandi á Þelamörk.

<i>Stytttri próf, 5–6 dagar</i>	
Lektarþykkt: kh	3,6 Dm
Leiðnistuðull: $T = \frac{kh\rho g}{\mu}$	$1,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
<i>Lengri próf, 29 dagar</i>	
Lektarþykkt: kh	0,99 Dm
Leiðnistuðull: $T = \frac{kh\rho g}{\mu}$	$0,33 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
Vatnsrýmd:	
$c_t h$	$5,6 \cdot 10^{-9} \text{ m}/\text{Pa}$
$S = c_t h \rho g$	$0,53 \cdot 10^{-4}$
Sprungulengd:	
L	1–3 km

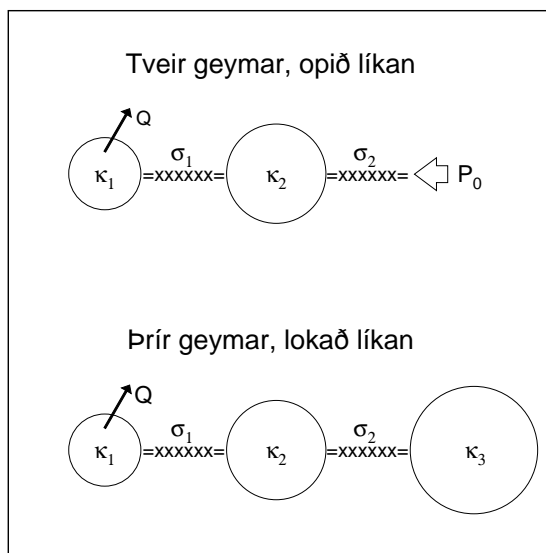
búast við að heildarlengd þess geti verið 1 til 3 km. Með því að nota meðalvatnsrýmd jarðhitakerfisins, $c_t h = 5,6 \cdot 10^{-9} \text{ m}/\text{Pa}$, og gera ráð fyrir að þjappanleiki bergsins og vatnsins í jarðhitakerfinu sé $c_b = 2 \cdot 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$ og $c_v = 5 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$ og poruhluti kerfisins sé $\phi = 7,5\%$, fæst að þykkt sprungubeltisins í kerfinu sé um 100 m.

5 Spár um vinnslu og vatnsborð á Laugalandi á Þelamörk

Í þessum kafla verður gert grein fyrir þjöppuðum geymislíkönunum sem notuð voru til að herma vinnsluprófun LÞN–10 og meta á afkastagetu jarðhitakerfisins á Laugalandi á Þelamörk. Þjöppuð geymislíkön hafa verið notuð undanfarin ár við afkastamat á jarðhitasvæðunum fimm sem Norðurorka nýtir til orkuvinnslu. Líkönin sem hér eru sett fram koma því í stað eldra líkans sem til er fyrir jarðhitakerfið og var síðast uppfært árið 1999 (Guðni Axelsson *o.fl.*, 1999).

5.1 Um þjöppuð geymislíkön

Þjöppuð geymislíkön hafa verið notuð með góðum árangri undanfarin ár hér á Íslandi við að herma vatnsborð á lághitasvæðum og spá fyrir um afköst þeirra. Áreiðanleiki spánna fer mikið eftir því hversu lengi hefur verið dælt úr viðkomandi svæði og hversu náð hefur verið fylgst með vatnsborðsbreytingum. Því lengri sem vinnslusagan er, því áreiðanlegra verður afkastamat kerfisins. Þjöppuð líkön byggja á þeirri líkingu að geymar séu tengdir saman sem eiga að tákna hina mismunandi hluta jarðhitakerfisins sem um ræðir. Líkönin geta bæði verið opin eða lokuð. Í opnum líkönunum næst jafnvægi milli vinnslu og innrennslis inn í jarðhitakerfið og því nær vatnsborðið jafnvægi við stöðuga vinnslu



Mynd 7: Tvö dæmi um þjöppuð geymislíkön.

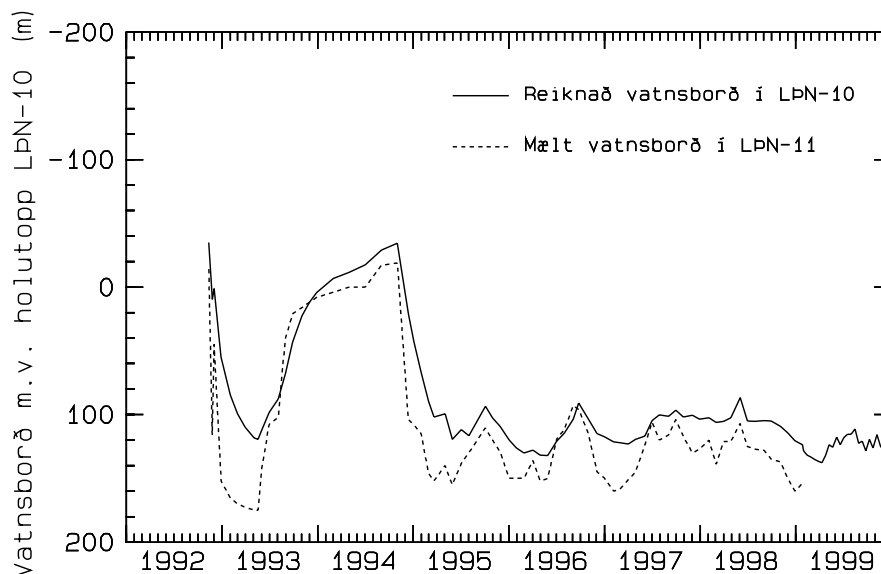
til lengri tíma litið. Í lokaðum líkönum næst ekki slíkt jafnvægi þar sem ekkert rennsli er inn í jarðhitakerfið og vatnsborðið lækkar stöðugt með fastri langtímavinnslu. Opin líkön gefa því bjartsýnisspár meðan þau lokuðu gefa svartsýnisspár (Guðni Axelsson *o.fl.*, 1994).

Mynd 7 sýnir mynd af tveimur þjöppuðum líkönum. Efra líkanið er opið tveggja geyma líkan meðan það neðra er lokað þriggja geyma líkan. Hver geymir á að herma ákveðinn hluta jarðhitakerfis eða nágrenni þessi. Fyrsti geymirinn er minnstur og táknar innsta hluta jarðhitakerfis þar sem vinnslan, Q , fer fram. Geymirinn þar við hliðina er stærri og táknar bergmassann umhverfis þann minnsta. Á milli geymanna eru rennslisviðnám sem ráða vatnsrennslinu á milli þeirra. Skammtímasveiflur í vatnsborði stjórnast mest af minnsta geyminum meðan langtímasveiflur stjórnast af þeim stærri. Stærðirnar κ_1 , κ_2 og κ_3 lýsa vatnsrýmd meðan σ_1 , σ_2 og σ_3 lýsa lekt jarðhitakerfisins.

Í lokaða líkaninu táknar þriðji geymirinn lokað grunnvatnskerfi ofan við jarðhitakerfið og stjórnar innrennsli í það. Þar sem ekkert innrennsli er í þriðja geyminn fellur þrýstingur jafnt með fastri dælingu til lengri tíma litið. Í opna líkaninu er annar geymirinn tengdur við vatnskerfi sem hefur fastann þrýsting P_0 sem leiðir til þess að vatnsborð nær jafnvægi við fasta dælingu. Nánari fróðleik um hermireikninga með þjöppuðum líkönum má finna í skýrslu Orkustofnunar frá 1988 (Guðni Axelsson *o.fl.*, 1988) og í greinum eftir Guðna Axelsson (1989 og 1993).

5.2 Niðurstöður líkanreikninga

Vinnsla hófst úr jarðhitakerfinu á Laugalandi á Þelamörk í lok árs 1992 með vinnsluprófun á LÞN-11. Árleg vinnsla hefur verið að jafnaði í kringum 12 til 14 l/s og vatnsborðið sveiflast á milli 100 til 150 m dýpis. Jarðhitakerfið var því í ójafnvægi þegar vinnslupróf-

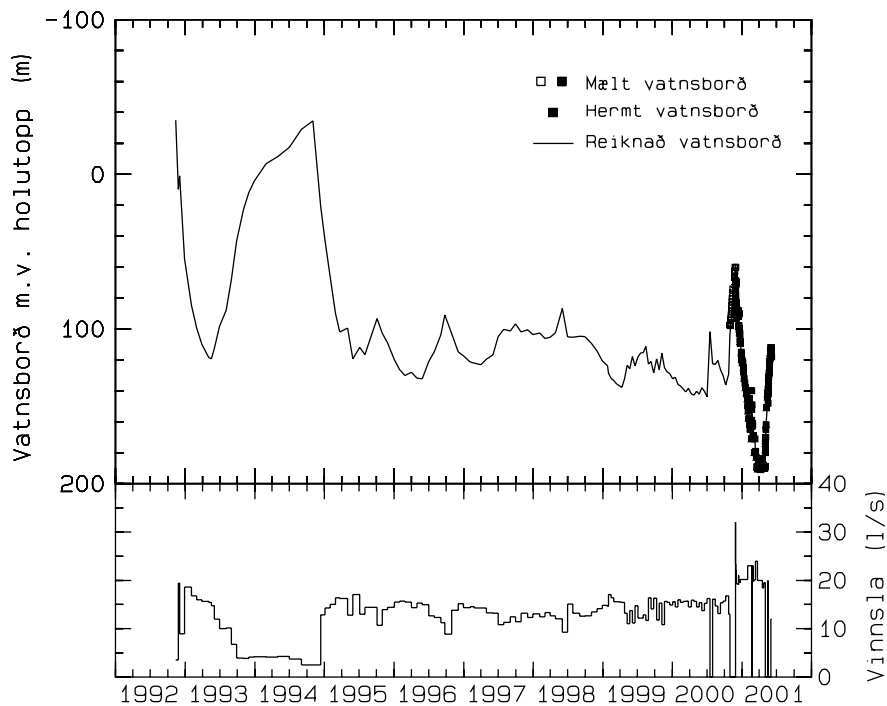


Mynd 8: Samanburður á mældu vatnsborði í holu LPN-11 og reiknuðu í holu LPN-10.

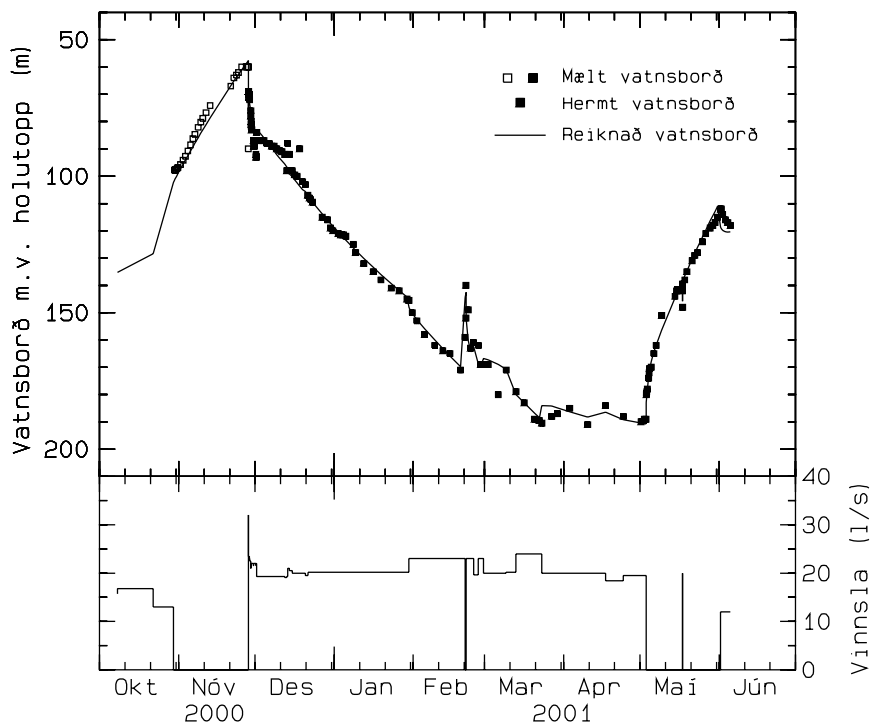
anir á LPN-10 hófust þann 28. nóvember 2000. Hermun á vinnslugögnunum úr holu 10 eingöngu hefðu því gefið rangar niðurstöður um gæfni holunnar og þar með vinnslugetu jarðhitakerfisins. Til að leiðrétta fyrir þessu var vinnslusaga kerfisins, þ.e. vinnslan úr LPN-11 frá 1992, yfirfærð á holu LPN-10 og látið sem ávallt hafi verið dælt úr þeirri holu.

Til að niðurstöður líkanreikninganna bæru ekki keim af fyrri niðurstöðum var fyrst byrjað með mjög einfalt líkan sem var gert flóknara og flóknara þar til reiknaða vatnsborðið hermdi það mælda ágætlega. Niðurstaðan var sú að hægt er að herma vatnsborðsgögnin bæði með opnu, tveggja geyma líkani og lokuðu, þriggja geyma líkani. Í báðum tilvikum var gert ráð fyrir því að afrennslið úr jarðhitakerfinu hafi verið 3,0 l/s fyrir upphaf vinnslu úr LPN-11, en minna afrennsli gerir spárnar bjartsýnni. Þrýstingur kerfisins við upphaf vinnslu hafði tölurverð áhrif á niðurstöður reikninganna og leiðir hærri upphafsþrýstingur til meiri langtímaniðurdráttar. Upphafsþrýstingur holu LPN-11, sem var tæp 2 bör, var of lágur til að hægt væri að yfirfæra hann á LPN-10 þar sem aðalæðin er á um 1700 m dýpi. Upphafsþrýstingurinn var fundinn með því að bera saman reiknað vatnsborð í LPN-10 og mælt vatnsborð í LPN-11 og fíkta með upphafsþrýstinginn þangað til að hallinn á langtímaniðurdrættinum væri sá sami. Þetta má sjá á mynd 8. Á henni má sjá að reiknað vatnsborð í holu 10 er að jafnaði 20 til 40 m hærra en í holu 11 og langtímaniðurdrátturinn hefur svipaðan halla. Ástæðan er líklega sú að hola 10 er dýpri og í betri tengslum við jarðhitakerfið en hola 11 og þetta krefst meiri upphafsþrýstings. Í líkanreikningunum var upphafsþrýstingurinn í LPN-10 hafður 3,5 bör sem jafngildir 35 m vatnshæð yfir holutopp.

Myndir 9 og 10 sýna því niðurstöður hermireikninganna með lokuðu þriggja geyma líkani og opnu tveggja geyma líkani. Enginn sýnilegur munur er á reiknuðu ferlunum á milli líkananna. Mynd 9 sýnir vinnslusögu svæðisins, frá 11. nóvember 1992 og fram til 5. júní 2001, mælt vatnsborð meðan á vinnsluprófun LPN-10 stóð (opnir og fylltir kassar) og



Mynd 9: Mælt og reiknað vatnsborð í holu LPN-10 auk eldri vinnslusögu LPN-11 sem var yfirfærð á LPN-10.



Mynd 10: Vinnslusaga og mælt og reiknað vatnsborð í holu LPN-10.

reiknað vatnsborð í kerfinu (heildreginn ferill) samkvæmt líkönunum.

Mynd 10 sýnir nánar tímabilið meðan á vinnsluprófun LPN–10 stóð. Eins og áður sýnir ferillinn reiknað vatnsborð og kassar sýna mælt vatnsborð. Fylltir kassar eru hermt vatnsborð en opnir kassar eru vatnsborðsgögn sem ekki voru hermd. Ástæðan fyrir því að gögnin í upphafi voru ekki hermd er sú að holan var búin að standa í mánuð og gætti því breytinga í hita vatnssúlunnar inni í holunni þegar byrjað var að dæla úr henni sem leiðir til breytinga á vatnsborði. Þjappaða líkanið gerir ekki ráð fyrir slíku og því voru vatnsborðsgögnin fyrir vinnsluprófun ekki hermd. Á myndinni sést að tekist hefur að herma gögnin því reiknaði ferillinn fylgir mældu gögnunum ágætlega. Meðalfrávik frá mældu vatnsborði og reiknuðu í hverjum gagnapunkti er um 1%. Í töflu 6 er að finna þær stærðir sem lýsa bæði opna og lokaða líkaninu sem reikningarnir byggja á. Í töflum 14 og 15 í viðauka E má finna stuðlana sem notaðir voru við líkanreikninganna og gefa niðurstöðurnar sem er að finna í töflu 6.

Tafla 6: *Stuðlar sem lýsa eiginleikum líkana af jarðhitakerfinu á Laugalandi á Pelamörk.*

Opið tveggja geyma líkan	$\kappa_1 = 11,3 \text{ ms}^2$ $\kappa_2 = 55,2 \text{ ms}^2$ $\sigma_1 = 9,6 \cdot 10^{-4} \text{ ms}$ $\sigma_2 = 0,76 \cdot 10^{-4} \text{ ms}$
Lokað þriggja geyma líkan	$\kappa_1 = 12,0 \text{ ms}^2$ $\kappa_2 = 53,8 \text{ ms}^2$ $\kappa_3 = 21600 \text{ ms}^2$ $\sigma_1 = 10,5 \cdot 10^{-4} \text{ ms}$ $\sigma_2 = 0,81 \cdot 10^{-4} \text{ ms}$

5.3 Túlkun á niðurstöðum líkanreikninga

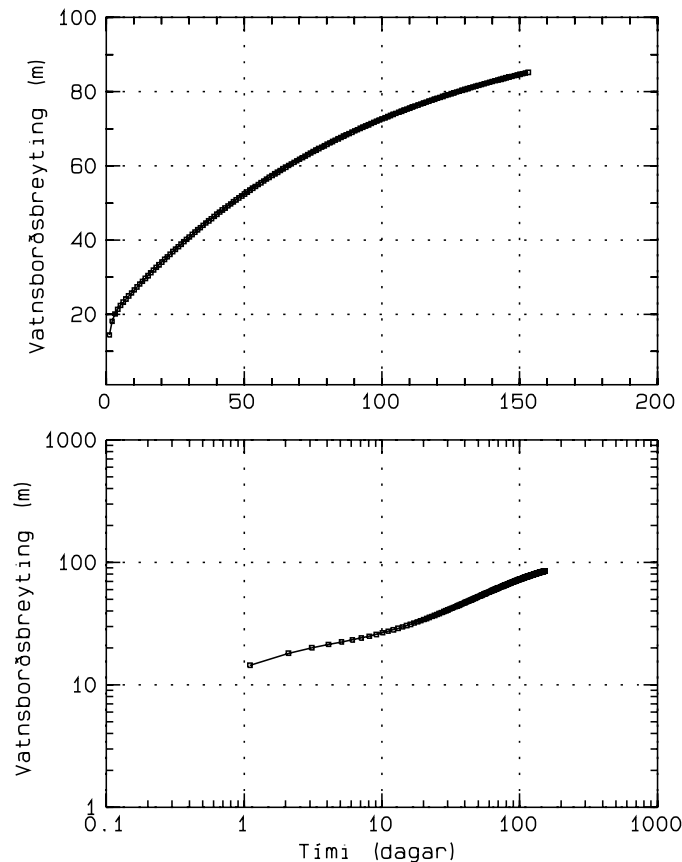
Stærðirnar κ í töflu 6 lýsa vatnsrýmd og má nota þær til að áætla stærð jarðhitakerfisins. Vatnsrýmdin er háð rúmmáli geymanna og því hvort hún stjórnast af þjappanleika vatns og bergs eða sveiflum í frjálsum vatnsborði. Í fyrra tilfellinu gildir $\kappa = V\rho_v(c_v\phi + c_b(1-\phi))$, þar sem V er rúmmál þess hluta jarðhitakerfisins sem geymirinn hermir, ρ_v eðlismassi jarðhitavatnsins, c_v og c_b þjappanleiki vatns og bergs og ϕ poruhluti bergs. Í seinna tilfellinu gildir $\kappa = A\phi/g$ þar sem A er yfirborðsflatarmál viðkomandi hluta kerfisins og g er þyngdarhröðun jarðar.

Eins og áður hefur verið minnst á má túlka geyma 1 og 2 í opna og lokaða líkaninu sem vinnsluhluta jarðhitakerfisins og jarðhitakerfið í heild sinni. Þriðja geyminn í lokaða líkaninu má svo túlka sem öll önnur vatnskerfi í kringum jarðhitakerfið og í tengslum við það. Hegðun þriðja tanksins stjórnast líklega mest af grunnvatnskerfinu þó önnur kerfi eins og t.d. jarðhitakerfi sem liggur dýpra geti spilað þar inn í. Ef gert er ráð fyrir að vatnsrýmd geyma 1 og 2 í báðum líkönunum stjórnist af þjappanleika vatns og bergs, og að poruhlutinn sé 7%, fæst að vinnsluhlutinn hafi rúmmál um $0,2 \text{ km}^3$ og kerfið í heild hafi rúmmál um $1,1 \text{ km}^3$. Í töflu 6 sést að gildi κ_1 og κ_2 eru svipuð

fyrir bæði opna og lokaða líkanið og því reiknast rúmmálin svipuð með báðum líkönum. Þriðji geymirinn í lokaða líkaninu gefur að flatarmál grunnvatnskerfisins sé um $3,0 \text{ km}^2$ ef gert er ráð fyrir 7% poruhluta eins og áður og að vatnsrýmdin í geyminum stjórnist af frjálsum vatnsborði. Rúmmál jarðhitakerfisins er mjög lítið samanborið við rúmmál hinna jarðhitakerfanna sem Norðurorka nýtir: Syðra-Laugaland 33 km^3 , Ytri-Tjarnir 10 km^3 , Glerárdalur 10 km^3 og Botn $3,6 \text{ km}^3$ (Guðni Axelsson *o.fl.*, 1988).

Rúmmál innsta hluta jarðhitakerfisins á Laugalandi á Þelamörk er um $0,2 \text{ km}^3$. Ef gert er ráð fyrir að hann tákni sprungubelti sem liggja í gegnum kerfið, hæð þess sé $1,5 \text{ km}$ og að breidd þess sé um 100 m (sjá bls 16) fæst að lengd sprungbeltisins sé um $1,5 \text{ km}$. Þetta er í samræmi við niðurstöður dæluþrófanna (sjá töflu 5).

Stærðirnar σ_1 og σ_2 í töflu 6, sem lýsa lekt í jarðhitakerfinu, eru mjög áþekkar fyrir bæði opna og lokaða líkanið. Ef gengið er út frá því að innsti hluti jarðhitakerfisins hafi lögungu sívalnings inni í ytra kerfinu, sem sé eins og krangi utan um, fæst með útreikningum að meðallektin milli vinnsluhlutans og ytri hlutans sé um 17 mD og að meðallektin milli jarðhitakerfisins og grunnvatnskerfisins sé um $2,2 \text{ mD}$. Hafa ber í huga að ofangreindar rúmmálstölur og lektargildi eru aðeins grófar áætlanir á þessum stærðum fyrir jarðhitakerfið. Rúmmálgildin eru t.d. mikið háð poruhlutanum, sem gengið er út frá.



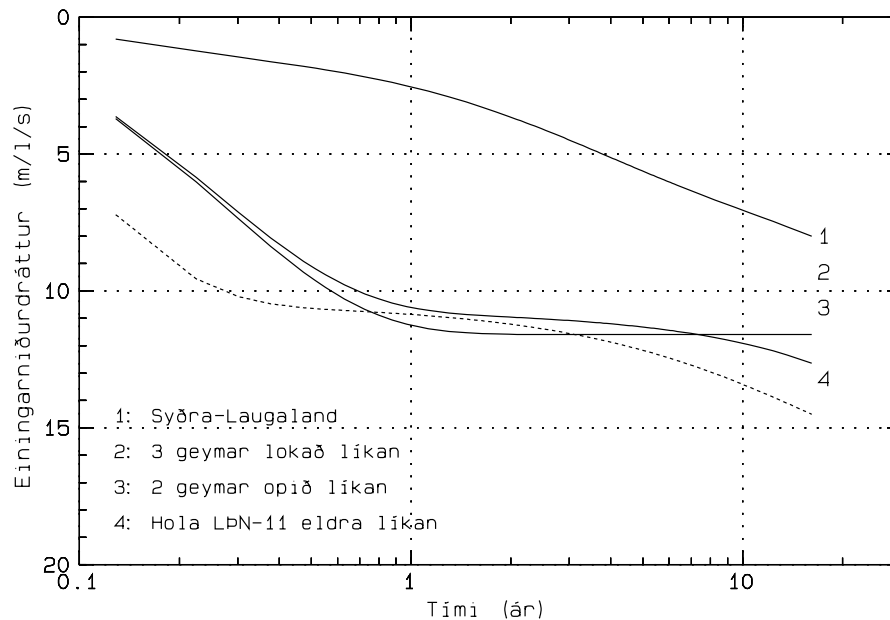
Mynd 11: Reiknuð vatnsborðsbreyting í LPN-10 með opnu tveggja geyma líkani og lokuðu þriggja geyma líkani m.v. 20 l/s dælingu. Myndin sýnir breytinguna á bæði línulegum og lógaritmískum kvarða.

Lektargildin eru svo háð rúmmálunum og afstöðu í rúmi en að ofansögðu getur innsti hluti kerfisins táknað sprungubelti og þá er forsendan um sívalningssamhverfu vafasöm.

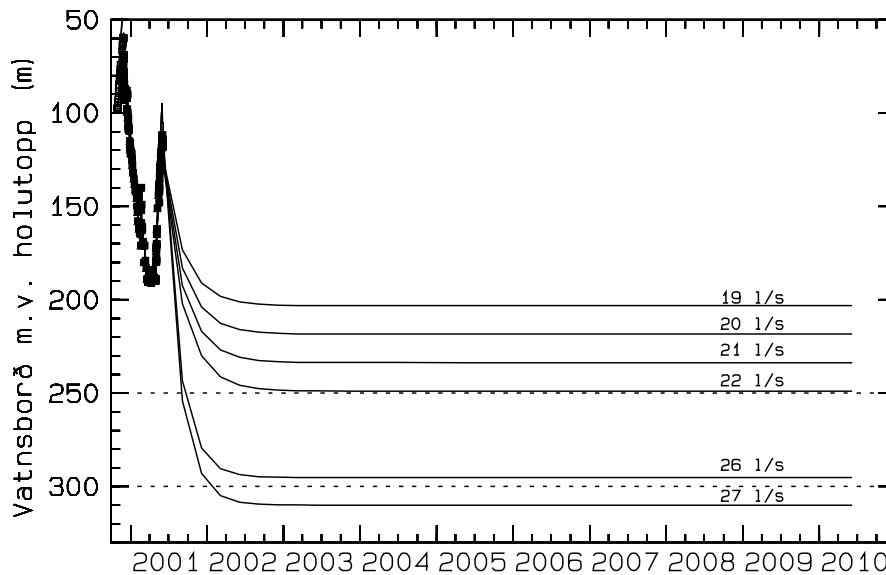
Önnur aðferð til að meta lektina í þjöppuðu líkönunum felst í því að reikna vatnsborðsbreytingar í kerfinu út frá ákveðinni dælingu og nota líkan Theis eða sprungulíkanið til að meta lektina. Þetta var gert fyrir bæði opna og lokaða líkanið með fastri 20 l/s dælingu úr kerfinu í fjóra mánuði frá 1. júní 2001. Mynd 11 sýnir reiknaða vatnsborðsbreytingu með opnu og lokuðu líkani á línulegum og lógaritmískum kvarða en aðeins er byrtur einn ferill því þeir voru nánast eins fyrir bæði líkoni. Vatnsborðsbreytingin sýnir mjög skýr merki um sprunguhegðun sem einkennist af hallatölu $1/2$ (1 lota / 2 lotur). Sprungulíkan var því notað til að herma vatnsborðsbreytingarnar. Á myndinni má sjá að eftir 12 daga verður breyting á ferlinum og hann leitar meira upp á við. Þetta eru merki um það að vatnsborðið stjórnast meira af eiginleikum bergsins utan við innsta hluta kerfisins líkt og sést í dæluprófunum í kafla 4. Lektin fyrir innri hlutann reiknast 8,6 Dm og 1,2 Dm fyrir ytri hlutann. Seinna gildið er í góðu samræmi við meðallektargildip sem fékkst úr styttri dæluprófunum (sjá töflu 5) en það fyrra er rúmlega tvöfalt hærra en það sem fékkst með lengri dæluprófunum. Vatnsrýmdin sem fékkst með sprungulíkaninu var allt of há og er líklega um áhrif frjáls vatnsborðs að ræða.

5.4 Mat á afkastagetu jarðhitakerfisins

Jarðhitakerfi eru stundum metin út frá einingarniðurdrætti, þ.e. hver niðurdrátturinn er í kerfinu við dælingu á 1 l/s til lengri tíma litið. Einingarniðurdráttur er í raun mælikvarði á afkastagetu því að minni niðurdráttur táknar meiri afkastagetu. Á mynd 12 má sjá



Mynd 12: Reiknaður einingarniðurdráttur með opnu tveggja geyma líkani og lokuðu þriggja geyma líkani ásamt einingarniðurdrætti í holu LPN-11 og jarðhitakerfinu á Syðra-Laugalandi til samanburðar.

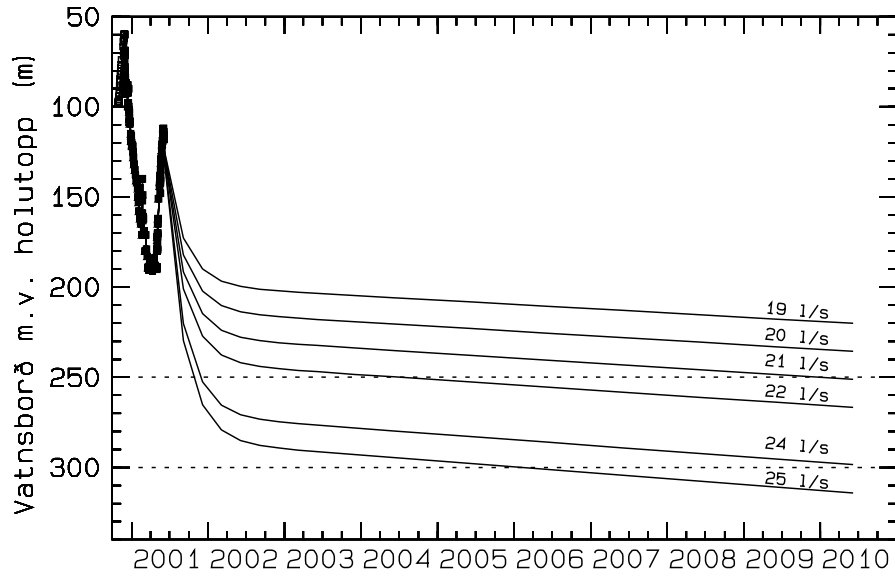


Mynd 13: Spár um vatnsborð í holu LPN-10 samkvæmt opnu tveggja geyma líkani.

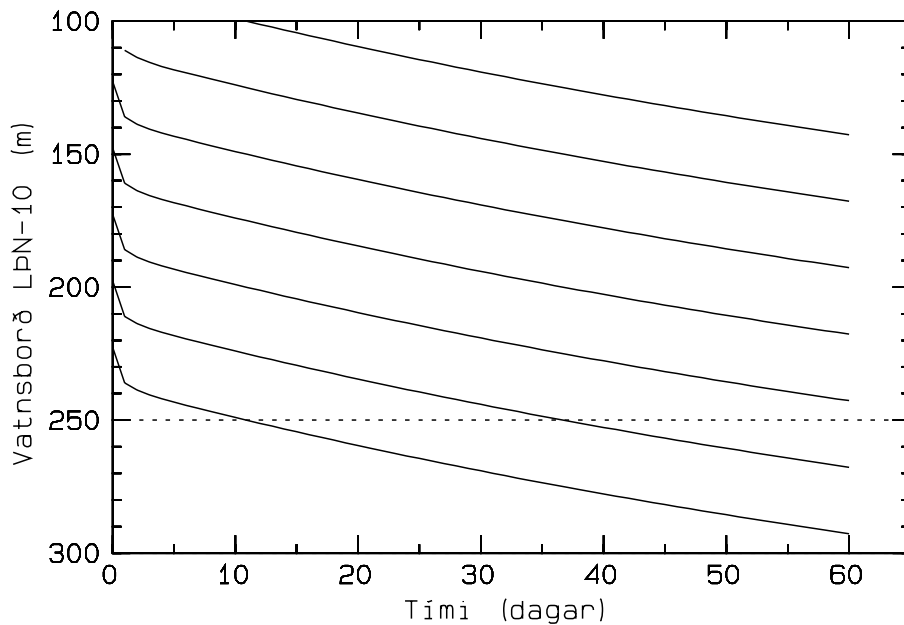
einingarniðurdrátt í jarðhitakerfinu á Laugalandi á Pelamörk samkvæmt opnu tveggja geyma líkani og lokuðu þriggja geyma líkani sem fjallað var um hér að ofan. Á myndinni kemur fram samanburður við reikninga með þjöppuðu líkani á vinnslugögnunum úr holu LPN-11 sem var endurskoðað árið 1998 (Guðni Axelsson *o.fl.*, 1999). Greinilegt er að kerfið sýnir meiri vinnslugetu eftir dýpkun LPN-10. Sökum þess hve grunnvatnskerfið ofan við jarðhitakerfið er stórt hagar lokaða líkanið sér svipað og opna líkanið til skemmri tíma litið. Þetta eru jákvæðar niðurstöður sem benda til þess að kerfið sé nær því að vera opið heldur en lokað. Á mynd 12 má einnig sjá einingarniðurdrátt í jarðhitakerfinu á Syðra-Laugalandi sem er öflugasta jarðhitakerfið í vinnslu hjá Norðurorku. Það kerfi er mun stærra með meiri lekt og sýnir því mun meiri vinnslugetu til lengri tíma litið. Þó eykst einingarniðurdrátturinn hlutfallslega hraðar á Syðra-Laugalandi en á Pelamörk eftir nokkurra ára vinnslu.

Þjöppuðu líkönin sem hér hafa verið sett fram voru notuð til að spá fyrir um vinnslugetu jarðhitakerfisins á Laugalandi á Pelamörk til ársins 2010. Þar sem ekki er hægt að gera upp á milli hvort opna tveggja geyma líkanið sé líkleggra en lokaða þriggja geyma líkanið, eru birtar vatnsborðspár frá báðum líkönum þar sem gert er ráð fyrir fastri ársmeðalvinnslu úr kerfinu. Á myndum 13 og 14 má finna spárnar sem gerðar voru fyrir nokkur gildi ársmeðalvinnslu. Samkvæmt opna líkaninu ætti jarðhitakerfið örugglega að geta staðið undir fastri 21 l/s ársmeðalvinnslu til 8 ára ef dælur ná niður á um 250 m dýpi. Dælur ættu að komast á þurrt í lok árs 2009 samkvæmt lokaða líkaninu miðað við sömu vinnslu. Séu hinsvegar settar niður dælur sem þola allt að 300 m niðurdrátt er hægt að auka ársmeðalvinnsluna upp í 24 til 26 l/s næstu 8 árin. Í spánum er tekið tillit til vatnsborðslækkunar vegna iðustreymis við holu.

Mynd 15 sýnir spár um vatnsborðsbreytingar í holu LPN-10 vegna aukinnar dælingar úr 21 í 30 l/s úr holunni. Gengið er út frá því að kerfið sé í jafnvægi þegar dælingunni er breytt. Á myndinni má lesa hvernig búist er við að vatnsborðið breytist með tíma



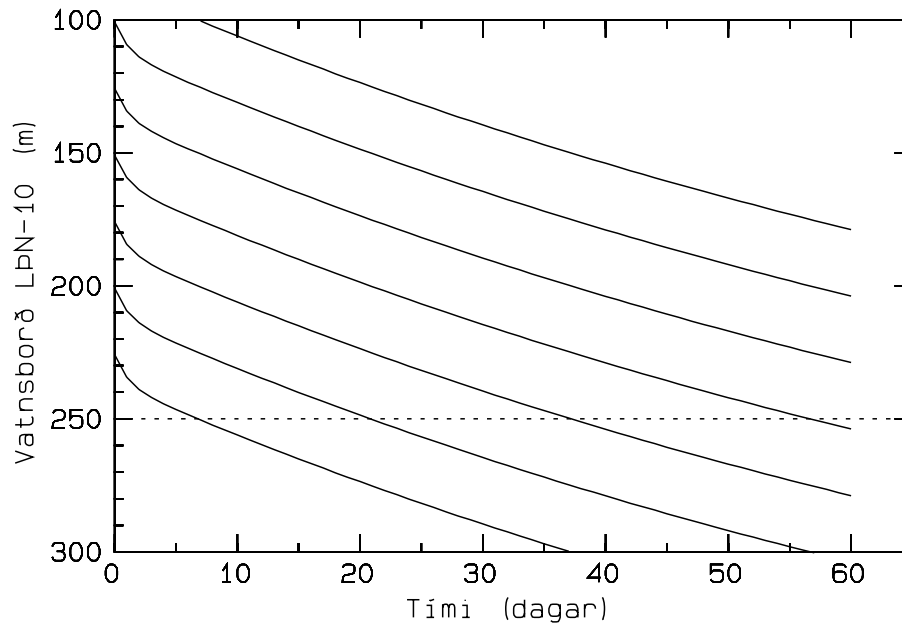
Mynd 14: Spár um vatnsborð í holu LPN-10 samkvæmt lokuðu þriggja geyma likani.



Mynd 15: Spár um vatnsborðsbreytingar í holu LPN-10 vegna aukinnar dælingar úr 21 l/s í 30 l/s. Sýndir eru nokkrir ferlar sem hafa mismunandi upphafsvatnsborð. Dælingu er breytt við tímann 0 dagar.

miðað við mismunandi vatnshæð þegar dælingu er breytt. Af myndinni má t.d. ráða að hægt er að dæla 30 l/s í um 35 daga áður en vatnsborðið nær 250 m dýpi ef vatnsborðið var í jafnvægi í 200 m við 21 l/s dælingu við tíma núll.

Hafa ber í huga að gögnin sem hermd voru spanna aðeins rúmlega 6 mánuði, sem er frekar stuttur tími, en spárnar verða nákvæmari eftir því sem vinnslusagan lengist. Niðurstöður hermireikninga fyrir jarðhitakerfið gætu því breyst þegar hermireikningar og afkastamat fyrir vinnslusvæðin, sem Norðurorka nýtir, verða endurskoðaðir árið 2003.



Mynd 16: Spár um vatnsborð í holu LPN-10 vegna 21 l/s dælingu úr holunni að viðbættri 15 l/s dælingu úr LPN-11. Sýndir eru nokkrir ferlar sem hafa mismunandi upphafsvatnsborð. Dæling úr LPN-11 hefst við tíma núll.

5.5 Samspil LPN-10 og LPN-11

Augljóst er að hola LPN-10 gefur meira vatn og heitara en hola LPN-11 og tekur því við af holu 11 sem aðal vinnsluhola jarðhitasvæðisins á Þelamörk. Hola 11 ætti því að þjóna hlutverki varaholu héðan af. Nú verður leitast við að svara því hvort sé betra að auka vinnsluna í holu 10 umfram langtíma vinnslugetu eða bæta við vinnslu úr holu 11 til að auka orkuvinnslu á svæðinu í skamman tíma í senn. Þjöppuðu geymslíkönin sem fjallað var um í kafla 5.2 voru notuð til að greina þessi tvö tilvik og meta.

Mynd 16 sýnir vatnsborðsbreytingar í holu LPN-10 vegna stöðugar 21 l/s dælingar í holu 10 að viðbættri 15 l/s dælingu úr LPN-11 sem hefst við tíma núll. Gert er ráð fyrir að kerfið sé í jafnvægi áður en dæling hefst úr holu 11. Líkt og á mynd 15 eru sýnd nokkur tilvik þar sem vatnsborðsstaðan er mismunandi við upphaf dælingar úr holu 11. Á myndinni má sjá að ef vatnsborðsstaðan í holu 10 er 175 m þegar dæling hefst úr holu 11 má dæla 15 l/s úr holu 11 í um 35 daga áður en vatnsborðið í holu 10 nær 250 m dýpi. Um vatnsborðið í holu 11 er það að segja að samkvæmt mynd 3 stendur vatnsborðið í holu 11 rúmum 30 metrum hærra en í holu 10 við jafna 20 l/s dælingu úr holu 10. Séu iðustreymið í holu 10 dregið frá er þessi munur um 25 m. Þrýstifall vegna iðustreymis í holu 11 er mjög lítið við 15 l/s dælingu (Ólafur G. Flóvenz *o.fl.*, 1994). Vatnsborðið í holu 11 ætti því að vera í svipaðri stöðu og í holu 10, eða ofar, þegar dælt er 15 l/s úr holu 11 og 21 l/s úr holu 10.

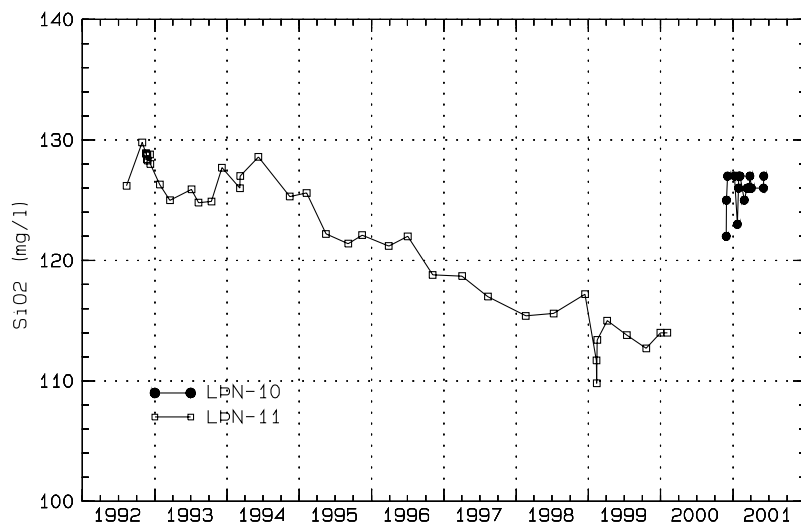
Með því að bera saman myndir 15 og 16 fæst að ef vatnsborðsstaðan er í báðum tilvikum 175 m, er hægt að dæla 30 l/s úr holu LPN-10 í um 65 daga eða 21 l/s úr holu 10 og 15 l/s úr holu LPN-11 í um 35 daga áður en vatnsborðið fer í 250 m. Í fyrra tilvikinu er aflið 9,1 MW_{th}, miðað við nýtingu úr 103 í 27 °C á vatninu í holu 10, en í seinna tilvikinu

10,8 MW_{th}, miðað við nýtingu úr 91 í 27 °C á vatninu úr holu 11 og sömu nýtingu og áður fyrir holu 10. Sé vinnslunni í fyrri tilvikinu haldið í 65 daga er orkuvinnslan á þeim tíma 14 GWh en ef vinnslunni í seinna tilvikinu er haldið í 35 daga er orkuvinnsla 9 GWh.

Af ofangreindum tölum má ráða að meiri orka fæst á skemmri tíma með því að vinna úr báðum holunum í einu en með því að dæla bara úr holu 10. Holu 11 má því skjóta inn til að fá aftoppa. Einnig sýna þær að meiri orka fæst á hvern metra í niðurdrætti með því að nota holu 10 eingöngu, einfaldlega vegna þess að í seinna tilvikinu er orka unnin yfir lengri tíma. Það fer eftir aðstæðum hverju sinni hvernig best er spilað með vinnsluna úr holunum.

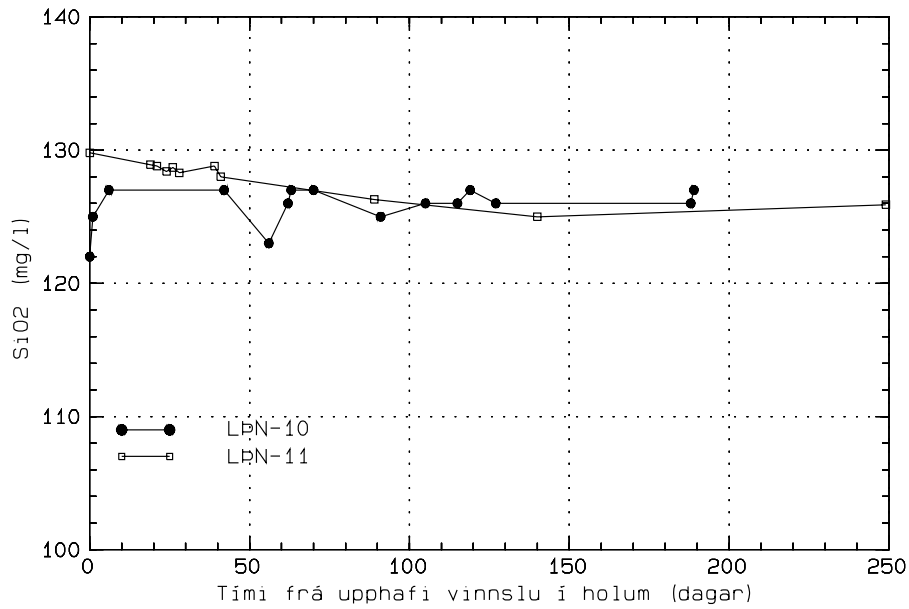
Bent skal á að þetta eru reikningar sem byggja á líkönum sem við trúum að gildi fyrir kerfið. Vatnsborð í holunum gæti hagað sér öðruvísi þegar á reynir en hér er sýnt. Besta vitneskjan fæst með því að prófa og mæla viðbrögðin. Því er hér lagt til að dælt verði úr holunum samtímis, þegar kerfið er í þokkalegu jafnvægi og vatnsborðsstaða vel ofan við dælundýpi, og viðbrögðin mæld nákvæmlega. Slíkt próf gæti sagt betur til um hvernig nýta ætti kerfið til orkuvinnslu á sem hagstæðastan hátt.

6 Kísill og magnesíum í LÞN-10



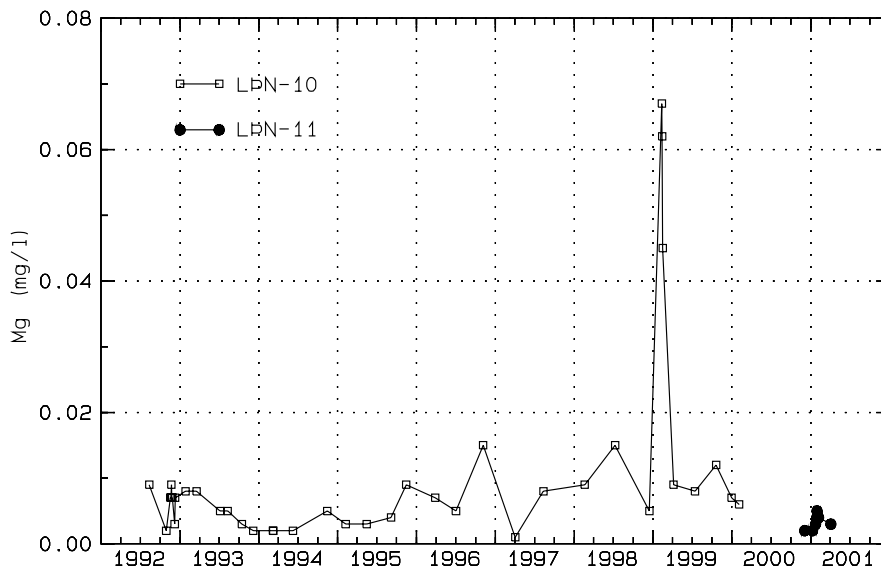
Mynd 17: Styrkur kísils í vatni úr holum LÞN-10 og LÞN-11.

Á myndum 17, 18 og 19 er borinn saman styrkur kísils og magnesíums í holum LÞN-10 og holu LÞN-11 frá upphafi vinnslu þeirra. Þar kemur glögglega fram að styrkur þessara efna í holu LÞN-10 er sambærilegur við það sem mældist í upphafi vinnslu í holu LÞN-11. Þessar niðurstöður eru skiljanlegar í ljósi þess að hola 10 sækir vatnið mun dýpra í jarðhitakerfið en hola 11. Það er því mun minni hætt á að vatnið í holu 10 kólni vegna innstreymi kaldara vatns ofarlega í jarðhitakerfinu eins og vart hefur verið við í holu 11 en myndirnar sýna merki um innstreymi kaldara vatns í holu 11 sem sést m.a. í lækkandi kísilstyrk og hækkandi magnesíumstyrk. Toppurinn sem fram kemur í



Mynd 18: Styrkur kísils í vatni úr holum LPN-10 og LPN-11 frá upphafi vinnslu úr þeim.

magnesiumstyrk er tilkominn vegna niðurrennsliis á köldu yfirborðsvatni um holu LP-12 þegar Hörgá braut stútinn af holunni í leysingum í febrúar 1999 (Guðni Axelsson *o.fl.*, 2000).



Mynd 19: Styrkur magnésíums í vatni úr holum LPN-10 og LPN-11 frá upphafi vinnslu úr þeim.

7 Árangur dýpkunar LÞN–10

Árangur framkvæmdanna á Laugalandi á Pelamörk sumarið 2000 er best metinn með því að bera saman vinnslugetu jarðhitakerfisins til lengri tíma fyrir og eftir dýpkun holu LÞN–10.

Síðast þegar hermireikningar fyrir jarðhitakerfin sem Norðurorka nýtir voru endurskoðaðir árið 1999 var vinnslugeta jarðhitakerfisins á Pelamörk metin 17,5 l/s þegar miðað var við fasta dælingu fram til ársins 2010 og vatnsborð héldist ofan við 240 m (Guðni Axelsson *o.fl.*, 1999). Ef miðað er við nýtingu úr 91 í 27 °C er árleg orkugeta jarðhitakerfisins fyrir dýpkun LÞN–10 metin 40 GWh á ári.

Ef gert er ráð fyrir að kerfið geti staðið undir 21 l/s vinnslu eftir dýpkun LÞN–10 og vatnið haldist 103 °C er árleg orkuvinnsla jarðhitakerfisins um 56 GWh á ári. Þetta er aukning upp á 40%. Ef gert er ráð fyrir að hægt verði að vinna 15 l/s úr holu LÞN–11 í 30 daga á ári, að viðbætti 21 l/s vinnslu úr LÞN–10 eykst orkuvinnslan um 3 GWh á ári og þá verður aukningin 48%.

7.1 Aukin orkuvinnsla með niðurdælingu

Í tengslum við vinnsluprófun holu LÞN–11 árið 1992 til '93 var framkvæmd niðurdælingartilraun á svæðinu en ávinningur af niðurdælingu felst í hækkun vatnsborðs og varmanámi úr berginu. Vatni var dælt niður í jarðhitakerfið niður um borholur LÞÝ–6 og LÞÝ–8 og grannt fylgst með breytingum á vatnshæð í kerfinu. Einnig voru framkvæmd ferilpróf til að sjá hversu mikið af niðurdælingarvatninu skilaði sér aftur í vinnsluholuna og hversu mikil kólnunaráhrifin væru af slíkri dælingu. Niðurstaða þeirrar tilraunar var sú að hægt er að dæla 1,5 l/s niður í sitt hvora holuna og auka vinnsluna úr holu 11 sem því nemur. Metið var að heildarkólnun vatns úr holunni yrði aðeins um 2 °C á 10 árum, miðað við 16 l/s árlega meðalvinnslu (Ólafur G. Flóvenz *o.fl.*, 1994).

Því er hér slegið fram að skilyrði til niðurdælingar hafa mikið batnað með þeim árangri sem náðist með dýpkun LÞN–10. Vatnsæðin í holu 10, sem unnið er úr, er tæpum kílómetra neðar í jarðlagastaflanum heldur en aðal vatnsæðin í holu 11. Kólnunaráhrif af völdum niðurdælingar eru því talin mun minni í holu 10 en holu 11. Einnig er líklegt að hægt sé að dæla niður töluvert meira magni (5–10 l/s) en gert var í tilrauninni frá '94 og auka vinnsluna sem því nemur líklega í mörg ár án þess að til komi merkjanleg kólnun á vinnsluvatninu.

8 Samanteknar niðurstöður

Árangur dýpkunar holu LPN-10 á Laugalandi á Pelamörk var góður og stóð undir væntingum. Helstu niðurstöður þessarar skýrslu eru eftirfarandi:

- Hóla LPN-10 var vinnsluprófuð í fimm mánuði veturinn 2000 til 2001. Fylgst var grannt með vinnslu, hita og vatnsborði í holunni og með vatnsborði í fimm öðrum holum á svæðinu. Gögnin sem söfnuðust voru notuð til forðafraeðilegra útreikninga á jarðhitakerfinu en á þeim byggist afkastamat jarðhitakerfisins.
- Hiti vatnsins úr holu LPN-10 mældist milli 103 og 104 ° við 201/s vinnslu eftir að hún var orðin fullheit.
- Hóla LPN-10 var þrepaprófuð í þeim tilgangi að kanna iðustreymistap vegna dælingarinnar úr holunni. Iðustreymistapinu er best lýst með iðustreymisstuðlinum 0,018 í jöfnunni: $\Delta h = 0,18q + 0,018q$ þar sem h er vatnsborð í metrum og q er dæling í lítrum á sekúndu.
- Vatnsborðsbreytingar sem fram komu í kerfinu vegna vinnslu í LPN-10 og mældar voru í borholum voru notaðar til að meta lektarþykkt og vatnsrýmd jarðhitakerfisins. Niðurstöður túlkana á breytingum í vatnsborði sýna að holur LPN-10, LPN-11 og LP-17 eru tengdar í gegnum sprunguna í jarðhitakerfinu. Holur H-2, LPÝ-5 og LPÝ-8 sýna ekki þrýstitengsl við holu LPN-10 í gegnum sprunguna. Sprungan, eða sprungubeltið, virðist vera 1 til 3 km að lengd og stjórnar hún að mestu vatnsborðsbreytingum jarðhitakerfisins í 5 til 6 daga eftir að dælingu hefur verið breytt. Eftir það eru vatnsborðsbreytingarnar háðar lekt bergsins í kring. Lektarþykktin í jarðhitakerfinu er í kringum 1 Dm en þar sem áhrifa sprungunnar gætir er hún um 3,6 Dm. Vatnsrýmd jarðhitakerfisins er metin hér um $6 \cdot 10^{-9}$ m/Pa.
- Þjöppuð geymslíkön voru notuð til að herma vinnslugögnin úr LPN-10 og meta afkastagetu jarðhitakerfisins. Til að skorða líkanreikningana var vinnslusaga LPN-11 yfirfærð á holu LPN-10. Bæði opið tveggja geyma líkan og lokað þriggja geyma líkan hermdu jafnvel vinnslusöguna. Lokaða líkanið sýnir að jarðhitakerfið er tengt mjög stóru grunnvatnskerfi sem bendir til þess að jarðhitakerfið sé opið sem er jákvætt. Líkanreikningar gefa að jarðhitakerfið geti staðið undir 211/s fastri vinnslu fram til ársins 2010, með vatnsborð ofan 250 m dýpis, en 24 til 261/s með vatnsborð ofan 300 m dýpis.
- Þjöppuðu líkönin voru notuð til að meta lektarþykkt jarðhitakerfisins og voru þær niðurstöður í góðu samræmi við niðurstöðurnar úr túlkunum á vatnsborðsbreytingum.
- Metin voru áhrif þess að dæla einnig úr holu LPN-11 meðan vinnsla væri í fullum gangi úr holu LPN-10. Svo virðist sem jarðhitakerfið standi undir því að einnig sé dælt úr holu 11 nokkra daga í senn ef vatnsborðstaða í holunum er ekki nálægt dæludýpi. Best er að prófa þetta í nokkra daga þegar kerfið er í jafnvægi og mæla vatnsborðið í holunum daglega.

- Styrkur kísils og magnesíums í vatni úr holu LÞN-10 er svipaður og hann var í holu LÞN-11 þegar fyrst var farið að vinna úr henni. Ástæðan er sú að hola 10 sækir vatnið mun dýpra í jarðhitakerfið og því er mun minni hættu á kólnun vinnsluvatnsins vegna innstreymi kaldara grunnvatns.
- Árangur dýpkunar holu LÞN-10 er metinn út frá orkuvinnslu jarðhitakerfisins miðað við fulla nýtingu kerfisins fyrir og eftir dýpkunina. Fyrir dýpkunina var árleg orkuvinnslugeta kerfisins um 40 GWh á ári en er metin 59 GWh á ári eftir dýpkun holu 10 og 15l/s dælingu til viðbótar úr holu LÞN-11 í 30 daga á ári. Þessi aukning í orkuvinnslugetu er um 48 %.
- Talið er að skilyrði til niðurdælingar í jarðhitakerfið hafi mikið batnað með dýpkun holu LÞN-10 sem gæti aukið afköst þess töluvert til viðbótar.

9 Heimildir

Axel Björnsson, Guðni Axelsson og Ólafur G. Flóvenz, 1990: *Uppruni hvera og lauga*. Náttúrufræðingurinn 60 (1), 15–38.

Bjarni Gautason og Steinunn Hauksdóttir: *Laugaland á Þelamörk. Borun holu LÞ-17 og aðgerðir vegna niðurrennsli í holum LÞ-17 og LÞÝ-7 á Hörgáreyrum*. Orkustofnun OS-2000/046. 42 s.

David K. Todd, 1959: *Groundwater Hydrology, 2.ed.* John Wiley & Sons, Inc. 535 s.

Guðni Axelsson, Helga Tulinius, Ólafur G. Flóvenz og Þorsteinn Thorsteinsson, 1988: *Vatnsöflun Hitaveitu Akureyrar. Staða og horfur 1988*. Orkustofnun OS-88052/JHD-10. 33 s.

Guðni Axelsson, 1989: *Simulation of pressure response data from geothermal reservoir by lumped parameter models*. Proceedings of the Fourteenth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California. Janúar 1989. s. 257–263.

Guðni Axelsson, 1993: *Forðafræði Jarðhitans*. Erindi flutt á ársfundi Orkustofnunar 1993. Orkustofnun OS-93013.

Guðni Axelsson, Steinunn Hauksdóttir, Ólafur G. Flóvenz og Guðrún Sverrisdóttir, 1999: *Hitaveita Akureyrar. Eftirlit með jarðhitasvæðum 1998 og horfur í orkubúskap veitunnar*. Orkustofnun OS-99087. 89 s.

Ólafur G. Flóvenz, Guðni Axelsson, Grímur Björnsson, Jens Tómasson, Guðrún Sverrisdóttir, Hilmar Sigvaldason og Sigurður Benediktsson, 1994: *Laugaland á Þelamörk. Boranir og vinnsluþrófun 1992–1993*. Orkustofnun OS-94032/JHD-07. 121 s.

Ólafur G. Flóvenz, 2000: *Djúpbörun á Laugalandi á Þelamörk. Forsendur borunnar og tillaga að staðsetningu*. Orkustofnun, greinargerð ÓGF-00/02.

10 English Summary

The Thelamörk low temperature geothermal system in N-Iceland has for the last nine years been a source of hot water for the Akureyri District Heating Service. The main production well in the Thelamörk field LPN-11 was drilled in 1992 intersecting a productive fracture at 451 m depth yielding 17 l/s of 91 °C water. It was believed that more and hotter water could be found deeper in the system and a new well was needed to sustain the energy production in the field due to expected infiltration of cold groundwater in course of time. Geochemical data indicated deep reservoir temperatures around 100 °C and drilling experience in the region shows that the best feedzones are usually at depths between 1000 to 1500 m. Instead of drilling a new well an old 900 m deep well, LPN-10, was deepened and deviated towards the dominating fracturezone with success. The well intersected a feedzone at 1700 m depth with reservoir temperature about 103 °C.

In order to reassess the energy production potential of the field a full scale production test for five months was performed with careful monitoring of production rates, water level and temperature for well LPN-10 and five other wells in the field. The production test started on the 28th of November 2000, after a one month pressure recovery, and ended on the 5th of Mai 2001.

A step rate test was performed in late Desember 2000 in order to estimate the coefficients for laminar and turbulent pressure drop in the well and in its vicinity. The result is best described with the equation: $\Delta h = 0,18 q + 0,018 q^2$.

At the end of the production test the pressure recover in the system was interpreted as a pressure recovery test in the production well, LPN-10, and interference tests between the production well and five other wells in the field. The pressure responses were analysed and interpreted with Theis models and single fracture models. Data analysis indicates that wells LPN-10, LPN-11 and LP-17 are connected through the main fracture in the system or dikes connected to it. Wells H-2, LPÝ-5 and LPÝ-8 show Theis response to well LPN-10. The results of the interference tests confirm the existence of a hydraulically conductive fracture in the system dominating the early pressure response data. The apparent fracture length is estimated 2–3 km. The average permeability-thickness in the system is 3,6 Dm where the fracture controls the fluid flow and 1 Dm for the overall system. The storativity of the system is estimated $6 \cdot 10^{-9}$ m/Pa.

The measured pressure response, resulting from the production test, was simulated with with lumped parameter models. Both a two-tank open model and a three-tank closed model could simulate the measured data by using also the production and pressure history in well LPN-11 since 1992. The models were used to predict the production potential of the field. They indicate that the Thelamörk geothermal system will sustain a production between 20 and 21 l/s of 103 °C water for the next 8 years with a drawdown of less then 250 m or 24 to 26 l/s with a drawdown of less than 300 m. The deepening of well LPN-10 has resulted in an increase in the energy production potential of the system from 4.4 MW_{th} to 6.4 MW_{th}.

Viðauki A: Vinnslugögn frá holu LPN-10

Dagana 14. til 20. nóvember 2000 var unnið að niðursetningu dælnnar í holu LPN-10. Þann 28. kl. 8:20 var hún ræst í fyrsta sinn og var rennslið mælt með Thomson yfirfalli. Þann 13. desember 2000 var slökkt á dælnni í 8 klukkustundir á meðan rennslisröri var komið fyrir. Þann 21. febrúar 2001 var dælan stöðvuð en kveikt var á henni daginn eftir kl. 17:00. Slökkt var á dælnni 3. maí 2001 og tekið til við upptekt á dælnni. Niðursetningu var svo lokið 14. maí. Þann 17. maí kl. 14:40 var dælan prófuð og látin ganga í klukkutíma. Vinnsla hófst aftur úr holunni 31. maí.

Tafla 7: Vinnsla, hita og vatnsborð miðað við holutopp í holu LPN-10 frá 30. október 2000 til 5. júní 2001. Hæð holu yfir sjó er 36,0 m.

Dags	Tími	Vatnsborð (m)	Hiti (°C)	Vinnsla (l/s)
2000.10.29	22:55	97.8	-	0
2000.10.30	08:15	97.9	-	0
2000.10.30	12:50	97.8	-	0
2000.10.30	15:55	97.65	-	0
2000.10.30	20:30	97.6	-	0
2000.10.31	08:54	97.2	-	0
2000.10.31	16:05	96.8	-	0
2000.11.01	17:00	95.7	-	0
2000.11.02	18:45	94.2	-	0
2000.11.03	14:50	92.7	-	0
2000.11.04	14:30	90.75	-	0
2000.11.05	15:25	88.5	-	0
2000.11.06	15:25	86.25	-	0
2000.11.07	09:10	84.7	-	0
2000.11.08	16:00	82.1	-	0
2000.11.09	16:00	80.2	-	0
2000.11.10	11:45	78.8	-	0
2000.11.11	19:00	76.7	-	0
2000.11.13	08:35	74.1	-	0
2000.11.21	11:00	67	-	0
2000.11.22	15:45	64	-	0
2000.11.23	16:50	63	-	0
2000.11.24	11:00	62	-	0
2000.11.25	17:20	60	-	0
2000.11.27	13:45	60	-	0
2000.11.28	08:15	60	-	0
2000.11.28	08:25	90	60.0	32.0
2000.11.28	08:50	70	74.0	23.4
2000.11.28	09:20	69	85.0	23.4
2000.11.28	10:20	69	91.0	23.4
2000.11.28	10:45	69	91.0	23.4
2000.11.28	11:20	70	91.0	23.4
2000.11.28	11:50	69	92.0	23.4
2000.11.28	12:15	69	93.0	23.4
2000.11.28	12:50	70	93.0	23.4
2000.11.28	13:15	70	93.0	23.4
2000.11.28	13:50	70	94.0	23.4
2000.11.28	14:20	70	94.0	23.4
2000.11.28	15:00	70	94.0	23.4
2000.11.28	15:30	71	94.0	23.4
2000.11.28	16:00	71	94.0	23.4

framhald á næstu síðu

framhald frá síðustu síðu

Dags	Tími	Vatnsborð (m)	Hiti (°C)	Vinnsla (l/s)
2000.11.28	16:30	71	94.0	23.4
2000.11.28	17:05	71	94.0	23.0
2000.11.28	17:40	71	95.0	23.0
2000.11.28	18:35	71	95.0	23.0
2000.11.28	21:15	72	95.0	22.5
2000.11.29	08:05	76	98.0	21.0
2000.11.29	09:10	-	-	22.0
2000.11.29	09:15	78	99.5	22.0
2000.11.29	10:15	80	100.2	22.0
2000.11.29	11:00	81	100.3	22.0
2000.11.29	11:20	-	-	22.0
2000.11.29	11:55	82	100.2	22.0
2000.11.29	15:15	83	100.4	22.0
2000.11.29	16:55	83	100.4	22.0
2000.11.30	08:35	87	101.2	21.5
2000.11.30	08:40	-	-	22.0
2000.11.30	11:30	89	101.3	22.0
2000.11.30	16:55	89	101.4	22.0
2000.12.01	08:15	92	101.4	21.5
2000.12.01	08:20	-	-	22.0
2000.12.01	09:53	93	101.6	22.0
2000.12.01	13:15	93	101.6	22.0
2000.12.01	15:20	84	100.9	19.3
2000.12.02	14:35	87	-	19.3
2000.12.03	14:55	87	101.2	19.3
2000.12.04	10:48	87	101.2	19.3
2000.12.05	11:30	88	101.2	19.3
2000.12.06	14:40	88	-	19.3
2000.12.07	14:00	89	101.5	19.3
2000.12.08	11:40	89	101.7	19.3
2000.12.09	11:08	90	-	19.3
2000.12.10	13:10	90.5	-	19.3
2000.12.11	13:35	91	101.7	19.3
2000.12.12	16:40	92	101.8	19.1
2000.12.13	10:40	98	-	19.3
2000.12.13	10:45	-	-	0
2000.12.13	17:50	88	-	0
2000.12.13	18:40	-	-	0
2000.12.13	19:30	92	98.7	21.0
2000.12.14	11:40	92	101.8	20.5
2000.12.15	14:17	98	-	-
2000.12.16	12:42	99.5	102.0	-
2000.12.17	12:25	100	102.0	-
2000.12.18	11:17	90	102.1	-
2000.12.19	14:00	-	-	20.5
2000.12.19	14:10	102	102.1	20.0
2000.12.20	17:35	103	102.2	19.5
2000.12.21	17:00	107	102.3	20.2
2000.12.22	08:43	108	102.3	20.2
2000.12.22	16:40	108.5	-	20.2
2000.12.23	12:15	109.5	102.4	20.2
2000.12.27	08:20	115	102.5	20.2
2000.12.29	10:37	116	102.5	20.2
2000.12.30	13:47	119	102.5	20.2
2000.12.31	12:25	120	102.5	20.2
2001.01.02	15:43	121	102.6	20.2
2001.01.03	15:47	121.5	102.6	20.2
2001.01.04	15:28	121.5	102.6	20.2
2001.01.05	15:05	122	102.7	20.2
2001.01.08	11:40	125	102.7	20.2
2001.01.09	10:30	128	102.7	20.2

framhald á næstu síðu

framhald frá síðustu síðu

Dags	Tími	Vatnsborð (m)	Hiti (°C)	Vinnsla (l/s)
2001.01.12	14:55	132	102.8	20.2
2001.01.16	09:50	135	102.8	20.2
2001.01.19	08:42	138	103.0	20.2
2001.01.23	10:50	141	103.0	20.2
2001.01.26	11:25	142	103.0	20.2
2001.01.29	14:00	145	103.0	20.2
2001.01.30	12:45	-	-	20.2
2001.01.30	12:50	145.5	103.0	23.0
2001.01.31	15:40	150	103.2	23.0
2001.02.02	11:22	153	103.2	23.0
2001.02.05	11:17	158	103.2	23.0
2001.02.09	10:50	162	103.2	23.0
2001.02.12	15:50	164	103.2	23.0
2001.02.15	10:35	165	103.3	23.0
2001.02.19	14:00	171	103.3	23.0
2001.02.21	07:50	-	-	23
2001.02.21	08:00	-	-	0
2001.02.22	13:33	149	-	0
2001.02.22	17:25	-	-	0
2001.02.22	17:30	-	-	23
2001.02.23	12:25	163	103.3	23.0
2001.02.23	13:00	-	-	19.6
2001.02.24	16:30	161	103.3	19.6
2001.02.24	16:35	-	-	23.0
2001.02.26	14:00	162	103.3	23.0
2001.02.27	11:10	169	103.3	23.0
2001.02.28	13:00	-	-	23.0
2001.02.28	14:15	169	103.2	20.0
2001.03.02	10:17	169	-	20.0
2001.03.05	10:25	-	-	20.0
2001.03.05	10:30	-	-	25.5
2001.03.05	13:45	-	-	20.0
2001.03.06	08:05	180	103.5	20.0
2001.03.07	22:40	-	-	20.0
2001.03.07	22:45	-	-	19.0
2001.03.08	07:40	-	-	19.0
2001.03.08	07:45	-	-	20.2
2001.03.09	11:16	171	103.2	20.2
2001.03.12	10:50	-	-	20.2
2001.03.12	11:00	-	-	24.0
2001.03.13	07:55	179	103.5	24.0
2001.03.16	13:50	183	103.5	24.0
2001.03.20	14:10	189	103.5	24.0
2001.03.22	12:00	189.5	-	24.0
2001.03.23	11:30	-	-	24.0
2001.03.23	11:35	190.5	103.5	20.0
2001.03.27	08:25	188	103.3	20.0
2001.03.29	14:00	187	-	20.0
2001.04.03	10:50	185	-	20.0
2001.04.10	11:00	191	103.4	20.0
2001.04.11	13:40	-	-	20.0
2001.04.11	13:45	-	-	18.4
2001.04.17	11:25	184	103.3	18.4
2001.04.23	08:50	-	-	18.4
2001.04.23	09:00	-	-	19.5
2001.04.23	11:00	-	-	19.5
2001.04.24	11:15	188	-	19.5
2001.05.01	09:07	190	-	19.5
2001.05.02	14:30	189	-	19.5
2001.05.03	08:18	189	103.4	19.5
2001.05.03	10:05	180	-	0.0

framhald á næstu síðu

framhald frá síðustu síðu

Dags	Tími	Vatnsborð (m)	Hiti (°C)	Vinnsla (l/s)
2001.05.03	12:20	179.5	-	0
2001.05.03	15:55	179	-	0
2001.05.03	20:42	178	-	0
2001.05.04	08:22	174	-	0
2001.05.04	13:00	172	-	0
2001.05.04	18:40	170.5	-	0
2001.05.05	09:00	170	-	0
2001.05.06	09:05	165	-	0
2001.05.07	08:10	162	-	0
2001.05.09	11:00	151	-	0
2001.05.14	17:10	144	-	0
2001.05.15	10:15	142	-	0
2001.05.15	16:30	141.5	-	0
2001.05.16	10:30	141	-	0
2001.05.17	14:40	139.5	-	0
2001.05.17	15:20	-	-	0
2001.05.17	15:40	-	-	20.0
2001.05.17	16:00	142	-	20.0
2001.05.17	16:07	148	90.5	26.5
2001.05.17	16:25	-	-	0
2001.05.18	13:30	138	-	0
2001.05.19	09:25	135	-	0
2001.05.21	10:22	131	-	0
2001.05.22	10:10	129	-	0
2001.05.23	13:35	128	-	0
2001.05.25	11:05	124	-	0
2001.05.26	18:40	121	-	0
2001.05.28	11:45	119	-	0
2001.05.29	14:00	118	-	0
2001.05.30	10:30	117	-	0
2001.05.31	09:35	115	-	0
2001.06.01	13:30	-	-	0
2001.06.01	13:35	112	99.8	12.0
2001.06.01	20:50	112	100.7	12.0
2001.06.02	10:50	114	101.0	12.0
2001.06.03	11:00	116	101.4	12.0
2001.06.04	11:00	117	101.6	12.0
2001.06.05	10:45	118	101.7	12.0

Viðauki B: Vatnsborðsmælingar í borholum

Tafla 8: Vatnsborð holu H-2 frá 29 október 2000 til 5. júní 2001. Vatnsborð er mælt miðað við holutopp. Hæð holutopps yfir sjó er 29,5 m.

Dags	Tími	Vatnsborð (m)	Dags	Tími	Vatnsborð (m)	Dags	Tími	Vatnsborð (m)
2000-10-29	23:05	157	2000-12-10	13:30	68	2001-03-20	13:45	131
2000-10-30	08:30	157	2000-12-11	13:30	70	2001-03-23	11:52	135
2000-10-30	13:02	145	2000-12-14	11:51	66	2001-03-27	08:45	138
2000-10-30	15:43	143	2000-12-15	14:42	65	2001-03-29	14:40	138
2000-10-30	20:14	139	2000-12-16	12:52	66	2001-04-17	11:38	141
2000-10-31	08:42	130	2000-12-17	12:37	67	2001-04-24	11:42	142
2000-10-31	16:15	125	2000-12-18	11:24	68	2001-05-01	09:17	144
2000-11-01	17:05	113	2000-12-19	14:28	69	2001-05-02	14:38	145
2000-11-02	18:55	102	2000-12-20	17:57	70	2001-05-03	08:25	145
2000-11-03	15:05	91	2000-12-21	17:05	71	2001-05-03	12:52	144
2000-11-04	14:38	85	2000-12-22	08:50	71.5	2001-05-03	16:30	143
2000-11-05	15:33	82	2000-12-22	16:32	73	2001-05-03	20:35	143
2000-11-06	15:33	79	2000-12-23	12:22	73.5	2001-05-04	08:12	142.5
2000-11-07	08:28	78	2000-12-27	08:35	77	2001-05-04	13:07	142
2000-11-08	14:50	76	2000-12-29	10:46	78	2001-05-04	18:12	141.5
2000-11-09	16:10	73	2000-12-30	13:55	79	2001-05-05	09:15	139
2000-11-10	11:55	71	2000-12-31	12:35	79.5	2001-05-06	09:13	138
2000-11-11	19:06	69	2001-01-02	15:37	81.5	2001-05-07	09:55	137
2000-11-13	08:42	67	2001-01-03	15:55	83.2	2001-05-08	10:22	135
2000-11-14	08:35	65	2001-01-04	15:36	83	2001-05-09	10:22	132
2000-11-15	09:55	64	2001-01-05	15:15	83.5	2001-05-10	10:40	131
2000-11-17	08:00	62	2001-01-08	11:47	88	2001-05-11	09:52	129
2000-11-18	17:50	61	2001-01-09	11:50	88	2001-05-12	13:15	126
2000-11-21	11:15	57	2001-01-12	15:08	91	2001-05-13	14:25	125
2000-11-22	16:25	56	2001-01-16	09:30	93	2001-05-14	15:10	123
2000-11-23	16:30	55	2001-01-23	11:03	98	2001-05-15	11:00	121
2000-11-24	11:13	53.5	2001-01-26	11:37	101	2001-05-16	10:42	120
2000-11-25	17:35	52	2001-01-29	13:40	103	2001-05-17	15:02	117
2000-11-27	13:33	50	2001-01-31	15:52	104	2001-05-18	14:15	115
2000-11-28	08:07	49	2001-02-02	11:32	105	2001-05-19	09:34	113
2000-11-28	10:15	50	2001-02-05	11:00	108	2001-05-21	10:32	110.5
2000-11-28	13:40	51.5	2001-02-09	10:58	112	2001-05-22	10:15	109
2000-11-28	16:50	52	2001-02-12	16:05	115	2001-05-23	13:42	107
2000-11-28	21:07	52	2001-02-15	10:47	116	2001-05-25	11:10	103
2000-11-29	08:22	53	2001-02-19	14:14	120	2001-05-26	18:45	101
2000-11-29	17:15	54	2001-02-22	13:20	120	2001-05-28	11:50	98
2000-11-30	08:44	56	2001-02-23	13:30	120	2001-05-29	14:04	96
2000-12-01	09:40	58	2001-02-24	16:40	119.5	2001-05-30	10:38	95
2000-12-02	14:45	61	2001-02-26	13:40	120	2001-05-31	09:38	94
2000-12-03	14:44	62	2001-02-27	11:25	120.5	2001-06-01	13:47	93
2000-12-04	10:39	62.5	2001-02-28	14:05	121	2001-06-01	20:57	93
2000-12-05	11:25	63	2001-03-02	10:30	121	2001-06-02	11:15	93
2000-12-06	13:51	63.5	2001-03-06	08:17	124	2001-06-03	11:07	94
2000-12-07	14:27	65	2001-03-09	11:37	125	2001-06-04	11:05	94.5
2000-12-08	11:47	66	2001-03-13	08:10	125	2001-06-05	14:57	95
2000-12-09	11:25	67	2001-03-16	13:57	130			

Tafla 9: Vatnsborð holu LPÝ-5 frá 29 október 2000 til 5. júní 2001. Vatnsborð er miðað við holutopp. Hæð holutopps yfir sjó er 33,4 m.

Dags	Tími	Vatnsborð (m)	Dags	Tími	Vatnsborð (m)	Dags	Tími	Vatnsborð (m)
2000-10-29	23:00	160	2000-12-10	13:25	64.1	2001-03-20	13:40	138.9
2000-10-30	08:20	160.1	2000-12-11	13:50	65	2001-03-27	08:40	143.9
2000-10-30	12:55	155.8	2000-12-12	16:30	66	2001-03-29	14:31	144.2
2000-10-30	15:50	152.7	2000-12-14	11:47	67.1	2001-04-03	11:15	145.9
2000-10-30	20:12	148.3	2000-12-15	14:40	67.8	2001-04-10	11:15	147.6
2000-10-31	08:50	139.5	2000-12-16	12:49	68.8	2001-04-17	11:36	148.6
2000-10-31	16:15	134	2000-12-17	12:35	69.9	2001-04-24	11:45	149.3
2000-11-01	17:05	117.5	2000-12-18	11:20	70.8	2001-05-01	09:15	151
2000-11-02	18:50	103.4	2000-12-19	14:30	71.9	2001-05-02	14:35	151.2
2000-11-03	15:00	94.1	2000-12-20	18:04	73	2001-05-03	08:28	151.5
2000-11-04	14:35	86.7	2000-12-21	17:05	74.2	2001-05-03	12:58	151.6
2000-11-05	15:30	82.5	2000-12-22	08:46	74.9	2001-05-03	16:25	151.4
2000-11-06	15:30	79.8	2000-12-22	16:35	75.3	2001-05-03	20:37	151.3
2000-11-07	08:25	77.7	2000-12-23	12:20	76.2	2001-05-04	08:10	150.7
2000-11-08	14:48	74.1	2000-12-27	08:32	79.9	2001-05-04	13:11	150.4
2000-11-09	16:05	71.4	2000-12-29	10:43	81.8	2001-05-04	18:08	150.1
2000-11-10	11:50	69.6	2000-12-30	13:52	82.9	2001-05-05	09:18	149
2000-11-11	19:02	66.9	2000-12-31	12:30	83.7	2001-05-06	09:10	147.1
2000-11-13	08:40	63.7	2001-01-02	15:40	85.6	2001-05-07	10:10	145.4
2000-11-14	08:30	61.7	2001-01-03	15:50	86.5	2001-05-08	10:20	143.3
2000-11-15	10:00	60	2001-01-04	15:34	87.4	2001-05-09	10:25	141.7
2000-11-16	16:20	58.1	2001-01-05	15:12	88.2	2001-05-10	10:45	139.7
2000-11-17	07:55	57.2	2001-01-08	11:45	90.7	2001-05-11	09:50	137.4
2000-11-18	17:47	55.2	2001-01-09	11:48	91.5	2001-05-12	13:20	134.8
2000-11-20	11:45	53	2001-01-12	15:00	93.9	2001-05-13	14:22	132.5
2000-11-21	11:05	51.8	2001-01-16	09:35	96.9	2001-05-14	15:12	130.2
2000-11-22	16:30	50.4	2001-01-23	11:00	102.1	2001-05-15	10:35	128.6
2000-11-23	16:30	49.3	2001-01-26	11:32	104.4	2001-05-16	10:45	126.5
2000-11-24	11:10	48.4	2001-01-29	13:35	106.6	2001-05-17	14:50	124.1
2000-11-25	17:30	47.1	2001-01-31	15:50	108.1	2001-05-18	14:15	122.3
2000-11-27	13:35	45.2	2001-02-02	11:30	109.6	2001-05-19	09:30	120.7
2000-11-28	08:10	44.5	2001-02-05	11:05	112.7	2001-05-21	10:34	116.7
2000-11-28	10:17	44.7	2001-02-09	10:54	116.2	2001-05-22	10:13	114.8
2000-11-28	13:37	45.1	2001-02-12	16:02	119	2001-05-23	13:40	112.6
2000-11-28	16:52	45.6	2001-02-15	10:42	121.9	2001-05-25	11:08	109
2000-11-28	21:10	46.2	2001-02-19	14:10	124.9	2001-05-26	18:42	106.8
2000-11-29	08:20	47.6	2001-02-22	13:16	125.4	2001-05-28	11:47	103.9
2000-11-30	08:40	50.7	2001-02-23	13:45	124.7	2001-05-29	14:02	102
2000-12-01	09:38	53.7	2001-02-24	16:37	124.8	2001-05-30	10:35	100.6
2000-12-02	14:42	55.8	2001-02-26	14:08	125.4	2001-05-31	09:35	99
2000-12-03	14:42	57.1	2001-02-27	11:22	125.8	2001-06-01	13:45	98
2000-12-04	10:40	58	2001-02-28	14:07	126.6	2001-06-01	20:55	98
2000-12-05	11:27	59	2001-03-02	10:25	127.1	2001-06-02	11:12	98.1
2000-12-06	13:50	60.2	2001-03-06	08:15	130	2001-06-03	11:04	98.2
2000-12-07	14:25	61.3	2001-03-09	11:30	131.3	2001-06-04	11:03	98.4
2000-12-08	11:45	62.2	2001-03-13	08:05	133	2001-06-05	10:55	98.6
2000-12-09	11:20	63.1	2001-03-16	13:55	135.6			

Tafla 10: Vatnsborð holu LPÝ-8 frá 29 október 2000 til 5. júní 2001. Vatnsborð er miðað við holutopp. Hæð holutopps yfir sjó er 42,8 m.

Dags	Tími	Vatnsborð (m)	Dags	Tími	Vatnsborð (m)	Dags	Tími	Vatnsborð (m)
2000-10-29	22:40	168.7	2000-12-10	13:05	72	2001-03-20	13:30	147.5
2000-10-30	08:10	168.8	2000-12-11	13:45	72.9	2001-03-27	09:18	152.4
2000-10-30	12:45	167.7	2000-12-12	17:20	73.8	2001-03-29	13:46	153.4
2000-10-30	16:03	165.8	2000-12-14	12:00	75.2	2001-04-03	10:45	154.7
2000-10-30	19:55	164.25	2000-12-15	14:10	75.2	2001-04-10	10:45	156.4
2000-10-31	09:00	159.4	2000-12-16	12:35	76.6	2001-04-17	11:20	157.7
2000-10-31	15:55	156.5	2000-12-17	12:20	77.5	2001-04-24	11:52	158.3
2000-11-01	16:55	142.4	2000-12-18	11:12	78.3	2001-05-01	09:00	159.4
2000-11-02	18:35	123.3	2000-12-19	14:35	79.4	2001-05-02	14:20	160.1
2000-11-03	14:40	110.75	2000-12-20	17:25	80.3	2001-05-03	08:10	160.3
2000-11-04	14:25	102.6	2000-12-21	16:55	81.6	2001-05-03	13:05	160.3
2000-11-05	15:20	97.2	2000-12-22	08:35	82.2	2001-05-03	16:45	160.3
2000-11-06	15:20	93.8	2000-12-22	16:25	82.6	2001-05-03	20:24	160.3
2000-11-07	08:18	91.7	2000-12-23	12:10	83.5	2001-05-04	08:00	160.1
2000-11-08	14:45	87.8	2000-12-27	08:15	87.4	2001-05-04	13:17	159.95
2000-11-09	14:30	85.2	2000-12-29	10:30	89.4	2001-05-04	18:00	159.75
2000-11-10	11:40	83.3	2000-12-30	13:40	90.5	2001-05-05	08:55	159
2000-11-11	18:50	80.7	2000-12-31	12:20	91.3	2001-05-06	09:00	157.5
2000-11-13	08:25	77.6	2001-01-02	15:50	93.3	2001-05-07	09:45	155.6
2000-11-14	08:20	75.8	2001-01-03	15:40	94.2	2001-05-08	10:12	153.85
2000-11-17	07:50	71.5	2001-01-04	15:25	95.1	2001-05-09	10:10	152.85
2000-11-18	17:40	69.5	2001-01-05	15:00	96.1	2001-05-10	10:05	150.9
2000-11-20	12:03	67.25	2001-01-08	11:35	98.6	2001-05-11	10:20	147.6
2000-11-21	10:25	66.1	2001-01-09	11:17	99.5	2001-05-12	12:55	144.9
2000-11-22	16:35	64.7	2001-01-12	14:50	102	2001-05-13	14:16	142.6
2000-11-23	16:35	63.6	2001-01-16	09:45	104.9	2001-05-14	15:00	140.3
2000-11-24	11:05	62.7	2001-01-23	10:42	110.1	2001-05-15	10:30	138.7
2000-11-25	17:25	61.3	2001-01-26	10:50	112.4	2001-05-16	10:50	136.5
2000-11-27	13:40	59.3	2001-01-29	13:30	114.7	2001-05-17	14:45	134.1
2000-11-28	08:00	57.8	2001-01-31	15:35	116.2	2001-05-18	14:35	132.3
2000-11-28	10:10	58.2	2001-02-02	11:15	117.8	2001-05-19	09:20	130.8
2000-11-28	13:35	58.3	2001-02-05	11:10	120.8	2001-05-21	10:40	126.8
2000-11-28	16:55	58.3	2001-02-09	10:45	124.4	2001-05-22	10:05	125
2000-11-28	20:52	58.4	2001-02-12	16:25	127.2	2001-05-23	14:20	122.8
2000-11-28	08:15	59	2001-02-15	10:25	129.7	2001-05-25	10:50	119.3
2000-11-29	17:25	60	2001-02-19	14:55	133.4	2001-05-26	18:30	117
2000-11-30	09:05	60.8	2001-02-22	13:10	134.7	2001-05-28	11:40	114.1
2000-12-01	09:35	62.5	2001-02-23	12:12	133.8	2001-05-29	13:52	112.3
2000-12-02	14:30	64.15	2001-02-24	16:20	133.7	2001-05-30	10:18	111.9
2000-12-03	14:37	65.3	2001-02-26	13:55	134.4	2001-05-31	09:30	109.4
2000-12-04	10:46	66.1	2001-02-27	11:00	134.6	2001-06-01	13:25	108.2
2000-12-05	11:08	67.1	2001-03-02	10:10	136.2	2001-06-01	20:45	108.2
2000-12-06	13:35	68.3	2001-03-06	08:00	138.6	2001-06-02	10:42	108.1
2000-12-07	14:25	69.4	2001-03-09	11:05	140.1	2001-06-03	10:55	108.1
2000-12-08	11:57	70.2	2001-03-13	07:45	141.7	2001-06-04	10:55	108.1
2000-12-09	11:00	71	2001-03-16	13:40	144.2	2001-06-05	10:35	108.2

Tafla 11: Vatnsborð holu LPN-11 frá 29 október 2000 til 5. júní 2001. Vatnsborð er miðað við holutopp. Hæð holutopps yfir sjó er 23,0 m.

Dags	Tími	Vatnsborð (m)	Dags	Tími	Vatnsborð (m)	Dags	Tími	Vatnsborð (m)
2000-10-29	23:18	151.5	2000-12-14	11:55	62.5	2001-03-27	08:58	136.5
2000-10-30	08:45	151.5	2000-12-15	14:48	62.5	2001-03-29	14:35	137.5
2000-10-30	15:32	137.5	2000-12-16	12:56	64.5	2001-04-03	11:35	138.5
2000-10-30	20:24	134.5	2000-12-17	12:43	65.5	2001-04-10	11:30	140.5
2000-10-31	08:20	124.5	2000-12-18	11:30	65.5	2001-04-17	11:50	140.5
2000-10-31	16:25	121.5	2000-12-19	14:15	67.5	2001-04-24	11:58	140.5
2000-11-01	17:15	108.5	2000-12-20	17:57	68.5	2001-05-01	09:25	144.5
2000-11-02	19:05	95.5	2000-12-21	17:14	69.5	2001-05-02	14:45	142.5
2000-11-03	15:15	89	2000-12-22	08:55	70	2001-05-03	08:35	143.5
2000-11-04	14:45	81	2000-12-22	16:39	70.5	2001-05-03	12:50	142.5
2000-11-05	15:40	76.5	2000-12-23	12:30	71.5	2001-05-03	16:35	142.5
2000-11-06	15:40	74.5	2000-12-27	08:22	75.5	2001-05-03	20:30	142.5
2000-11-07	08:40	72.5	2000-12-29	10:57	77.5	2001-05-04	08:18	141.5
2000-11-08	15:10	68.5	2000-12-30	14:00	78.5	2001-05-04	13:06	141.2
2000-11-09	15:10	65.5	2000-12-31	12:42	78.5	2001-05-04	18:20	140.5
2000-11-10	12:00	63.5	2001-01-02	15:30	81	2001-05-05	09:10	140.5
2000-11-11	19:13	61.5	2001-01-03	16:05	81	2001-05-06	09:17	140
2000-11-13	08:40	59.5	2001-01-04	15:45	82	2001-05-07	09:51	136.5
2000-11-14	08:40	57.5	2001-01-05	15:25	83.5	2001-05-08	10:32	134
2000-11-15	10:12	55.5	2001-01-08	11:58	84.5	2001-05-09	10:20	132
2000-11-16	16:30	53.5	2001-01-09	12:05	85.5	2001-05-10	10:20	129.5
2000-11-17	08:05	53	2001-01-12	15:15	88.5	2001-05-11	10:00	128.5
2000-11-18	17:57	51.5	2001-01-16	09:10	90.5	2001-05-12	13:10	125.5
2000-11-20	11:58	49.5	2001-01-23	11:11	94.5	2001-05-13	14:35	123.5
2000-11-23	15:40	46.5	2001-01-26	11:45	97.5	2001-05-14	15:08	121.5
2000-11-24	11:25	44.5	2001-01-29	13:50	99.5	2001-05-15	10:50	120
2000-11-25	17:40	43.5	2001-01-30	08:20	100	2001-05-16	10:40	118.5
2000-11-27	13:30	42	2001-01-31	16:00	101.5	2001-05-17	15:00	116
2000-11-28	08:05	41.5	2001-02-02	11:40	103.5	2001-05-18	13:45	114.5
2000-11-28	21:00	43.5	2001-02-05	11:55	106.5	2001-05-19	09:40	113.5
2000-11-29	08:28	44.5	2001-02-09	11:05	109.5	2001-05-21	10:30	109.5
2000-11-29	17:10	45.5	2001-02-12	16:12	112.5	2001-05-22	10:23	108.5
2000-11-30	08:50	47.5	2001-02-15	10:56	115.5	2001-05-23	13:48	105.5
2000-12-01	09:45	49.5	2001-02-19	14:25	118.5	2001-05-25	11:15	102.5
2000-12-02	14:52	52.5	2001-02-23	12:50	117.5	2001-05-26	18:55	99.5
2000-12-03	14:50	53.5	2001-02-24	16:50	117	2001-05-28	11:55	96.5
2000-12-04	10:37	53.5	2001-02-26	11:45	118.5	2001-05-29	14:12	94.5
2000-12-05	11:20	54.5	2001-02-27	11:33	118.5	2001-05-30	10:44	93.5
2000-12-06	14:10	55.5	2001-02-28	13:50	119.5	2001-05-31	09:43	92.5
2000-12-07	14:33	57.5	2001-03-02	10:38	120.5	2001-06-01	13:50	91.5
2000-12-08	11:52	58.5	2001-03-06	08:25	124.5	2001-06-01	21:05	91.5
2000-12-09	11:30	59	2001-03-09	11:45	123.5	2001-06-02	11:25	91.5
2000-12-10	13:35	60	2001-03-13	08:20	125.5	2001-06-03	11:15	92
2000-12-11	13:20	60.5	2001-03-16	14:05	127.5	2001-06-04	11:12	92
2000-12-12	17:10	61.5	2001-03-20	13:55	131.5	2001-06-05	11:00	92.5
2000-12-13	10:31	62.5	2001-03-23	11:45	133.5			

Tafla 12: Vatnsborð holu LP-17 frá 29 október 2000 til 5. júní 2001. Vatnsborð er miðað við holutopp. Hæð holutopps yfir sjó er 14,0 m.

Dags	Tími	Vatnsborð (m)	Dags	Tími	Vatnsborð (m)	Dags	Tími	Vatnsborð (m)
2000-10-29	23:10	139.2	2000-12-18	11:26	52.4	2001-04-03	11:30	126.2
2000-10-30	08:40	139.3	2000-12-19	14:25	53.5	2001-04-10	11:25	127.9
2000-10-30	13:04	137.3	2000-12-20	17:55	54.6	2001-04-17	11:42	129
2000-10-30	15:30	135.4	2000-12-21	17:10	55.8	2001-04-24	12:00	129.6
2000-10-30	20:19	131.3	2000-12-22	08:52	56.4	2001-05-01	09:20	131
2000-10-31	08:15	122.7	2000-12-22	16:38	56.8	2001-05-02	14:40	131.4
2000-10-31	16:20	116.85	2000-12-23	12:25	57.6	2001-05-03	08:30	131.6
2000-11-01	17:10	99.6	2000-12-27	08:38	61.3	2001-05-03	12:45	131.6
2000-11-02	19:00	89.6	2000-12-29	10:49	63.1	2001-05-03	16:32	131.6
2000-11-03	15:10	77.65	2000-12-30	14:00	64	2001-05-03	20:28	131.5
2000-11-04	14:42	69.5	2000-12-31	12:38	64.8	2001-05-04	08:15	131
2000-11-05	15:35	64.7	2001-01-02	15:35	66.7	2001-05-04	13:03	130.8
2000-11-06	15:35	61.5	2001-01-03	16:00	67.6	2001-05-04	18:15	130.5
2000-11-07	08:33	59.4	2001-01-04	15:40	68.4	2001-05-05	09:05	129.5
2000-11-08	15:00	55.8	2001-01-05	15:20	69.3	2001-05-06	09:15	127.9
2000-11-09	16:12	53.2	2001-01-08	11:52	71.6	2001-05-07	09:47	126
2000-11-10	12:05	51.5	2001-01-09	11:57	72.5	2001-05-08	10:28	124.1
2000-11-11	19:15	48.8	2001-01-12	15:12	74.7	2001-05-09	10:15	122.2
2000-11-13	08:45	45.7	2001-01-16	09:25	77.5	2001-05-10	10:16	120.2
2000-11-14	08:45	43.8	2001-01-23	11:08	82.6	2001-05-11	09:55	117.8
2000-11-15	10:10	42.1	2001-01-26	11:40	84.7	2001-05-12	13:05	115.3
2000-11-16	16:25	40.3	2001-01-29	13:43	87	2001-05-13	14:30	112.9
2000-11-17	08:00	39.4	2001-01-31	15:55	88.4	2001-05-14	15:05	110.8
2000-11-18	17:53	37.5	2001-02-02	11:35	90	2001-05-15	10:43	109.1
2000-11-20	11:53	35.4	2001-02-05	10:52	93	2001-05-16	10:32	106.9
2000-11-21	11:20	34.2	2001-02-09	11:00	96.6	2001-05-17	14:55	104.5
2000-11-22	16:20	32.8	2001-02-12	16:08	99.4	2001-05-18	13:40	102.6
2000-11-23	16:25	31.7	2001-02-15	10:50	101.8	2001-05-19	09:38	101
2000-11-24	11:18	30.9	2001-02-19	14:18	105.3	2001-05-21	10:25	97.1
2000-11-25	08:52	29.6	2001-02-22	13:25	105.8	2001-05-22	10:20	95.2
2000-11-27	06:14	27.8	2001-02-23	13:35	105.1	2001-05-23	13:45	93.5
2000-11-28	08:00	27.1	2001-02-24	16:44	105.3	2001-05-25	11:12	89.4
2000-11-28	10:00	27.2	2001-02-26	11:40	105.8	2001-05-26	18:48	87.1
2000-11-28	13:43	27.6	2001-02-27	11:30	106.2	2001-05-28	11:52	84.1
2000-11-28	16:45	28	2001-02-28	14:00	107.1	2001-05-29	14:06	82.3
2000-11-28	20:58	28.6	2001-03-02	10:35	107.7	2001-05-30	10:40	80.9
2000-12-10	13:32	46	2001-03-06	08:12	110.5	2001-05-31	09:40	79.4
2000-12-11	13:15	47	2001-03-09	11:39	111.7	2001-06-01	13:50	78.6
2000-12-12	17:05	47.9	2001-03-13	08:15	113.3	2001-06-01	21:00	78.6
2000-12-14	11:55	48.9	2001-03-16	14:02	116	2001-06-02	11:20	78.7
2000-12-15	14:45	49.5	2001-03-20	13:50	117.2	2001-06-03	11:10	78.8
2000-12-16	12:54	51	2001-03-27	08:50	124.2	2001-06-04	11:08	78.9
2000-12-17	12:40	51.7	2001-03-29	14:30	125.1	2001-06-05	10:59	79.1

Viðauki C: Mæld gögn í þrepaprófi í LFN-10.

Tafla 13: Mæld gögn í þrepaprófi í LFN-10. Vatnsborð er jákvætt niður frá holutoppi.

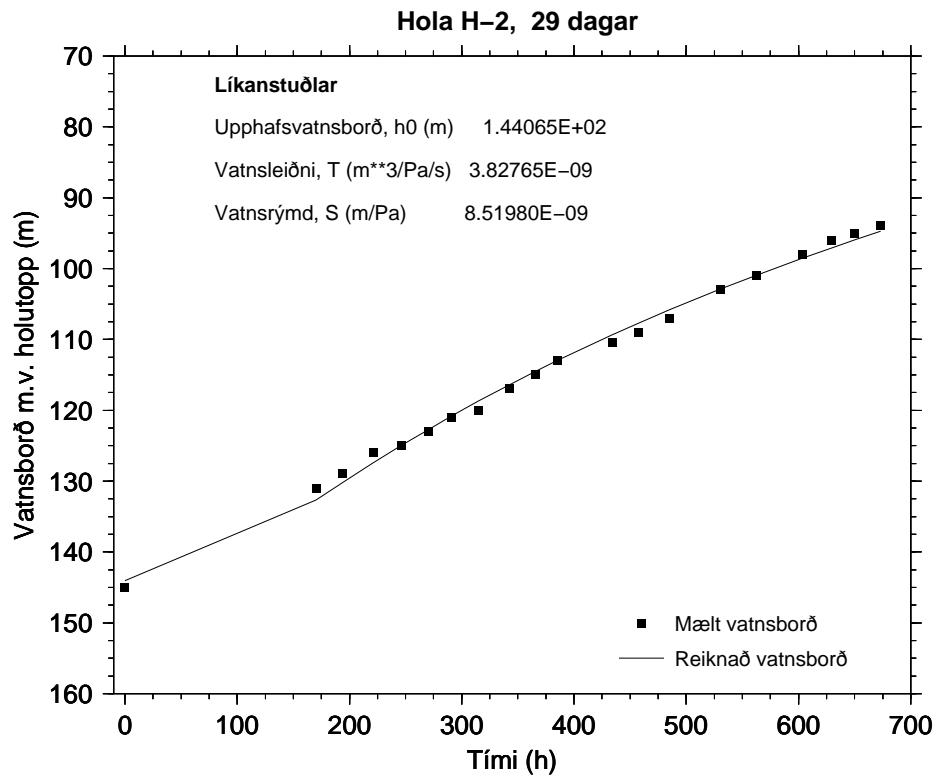
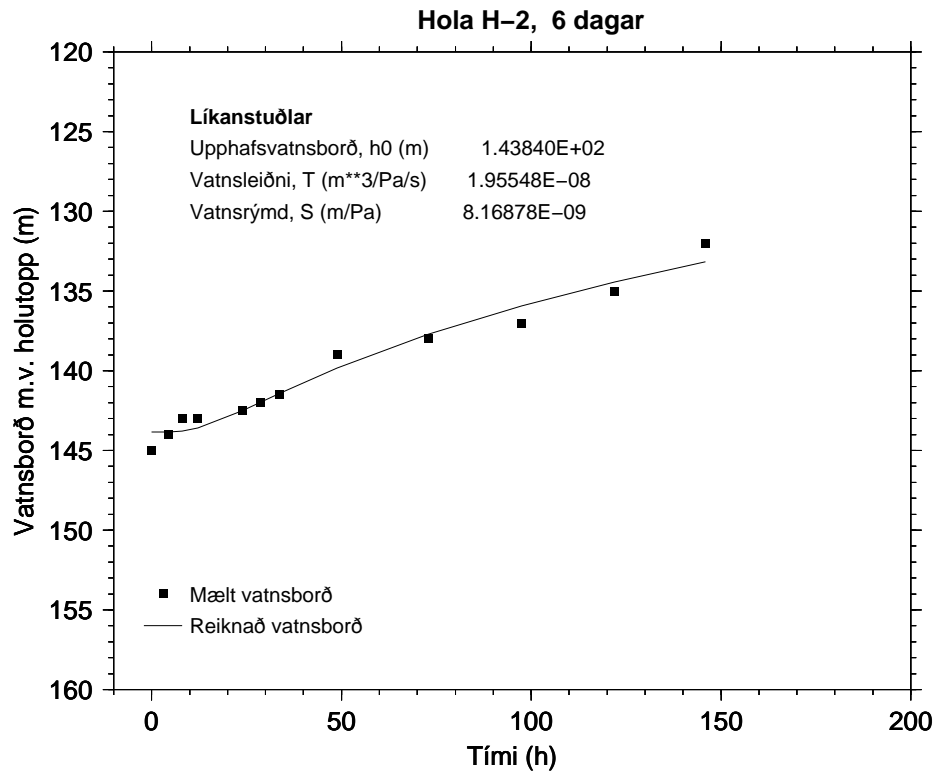
Dags	Tími	Vatnsborð (m)	Hiti (°C)	Dæling (l/s)
2000-12-22	8:43	108	102.3	20.2
2000-12-22	9:00	-	-	24.9
2000-12-22	9:10	111	102.4	24.9
2000-12-22	9:20	112	102.5	24.9
2000-12-22	9:30	112	102.6	24.9
2000-12-22	9:40	112	102.6	24.9
2000-12-22	9:50	112	102.6	24.9
2000-12-22	9:55	112	102.6	24.9
2000-12-22	10:00	-	-	29.9
2000-12-22	10:05	118	102.6	29.9
2000-12-22	10:10	119	102.6	29.9
2000-12-22	10:20	119.5	102.8	29.9
2000-12-22	10:30	119.5	102.8	29.9
2000-12-22	10:40	119.5	102.8	29.9
2000-12-22	10:50	119.5	102.9	29.9
2000-12-22	10:55	119.5	102.8	29.9
2000-12-22	11:00	-	-	24.9
2000-12-22	11:05	113	102.8	24.9
2000-12-22	11:10	112	102.7	24.9
2000-12-22	11:20	112	102.8	24.9
2000-12-22	11:30	112	102.8	24.9
2000-12-22	11:40	112	102.8	24.9
2000-12-22	11:50	112	102.8	24.9
2000-12-22	11:55	112	102.8	24.9
2000-12-22	12:00	-	-	20.0
2000-12-22	12:05	110	102.6	20.0
2000-12-22	12:10	110	102.6	20.0
2000-12-22	12:20	110	102.6	20.0
2000-12-22	12:30	110	102.6	20.0
2000-12-22	12:40	110	102.6	20.0
2000-12-22	12:50	110	102.6	20.0
2000-12-22	12:55	110	102.6	20.0
2000-12-22	13:00	-	-	14.8
2000-12-22	13:05	108	102.3	14.8
2000-12-22	13:10	108	102.3	14.8
2000-12-22	13:20	108	102.3	14.8
2000-12-22	13:30	108	102.1	14.8
2000-12-22	13:40	108	102.1	14.8
2000-12-22	13:50	108	102.0	14.8
2000-12-22	13:55	108	102.1	14.8
2000-12-22	14:00	-	-	9.8
2000-12-22	14:10	101	101.2	-
2000-12-22	14:20	101	101.4	9.8
2000-12-22	14:30	101	101.6	9.8
2000-12-22	14:40	101	101.4	9.8
2000-12-22	14:50	101	101.4	9.8
2000-12-22	14:55	101	101.5	9.8
2000-12-22	15:00	-	-	14.8
2000-12-22	15:05	104	101.6	14.8
2000-12-22	15:10	104	101.6	14.8
2000-12-22	15:20	104	101.6	14.8
2000-12-22	15:30	104	101.7	14.8
2000-12-22	15:40	104	101.6	14.8

framhald á næstu síðu

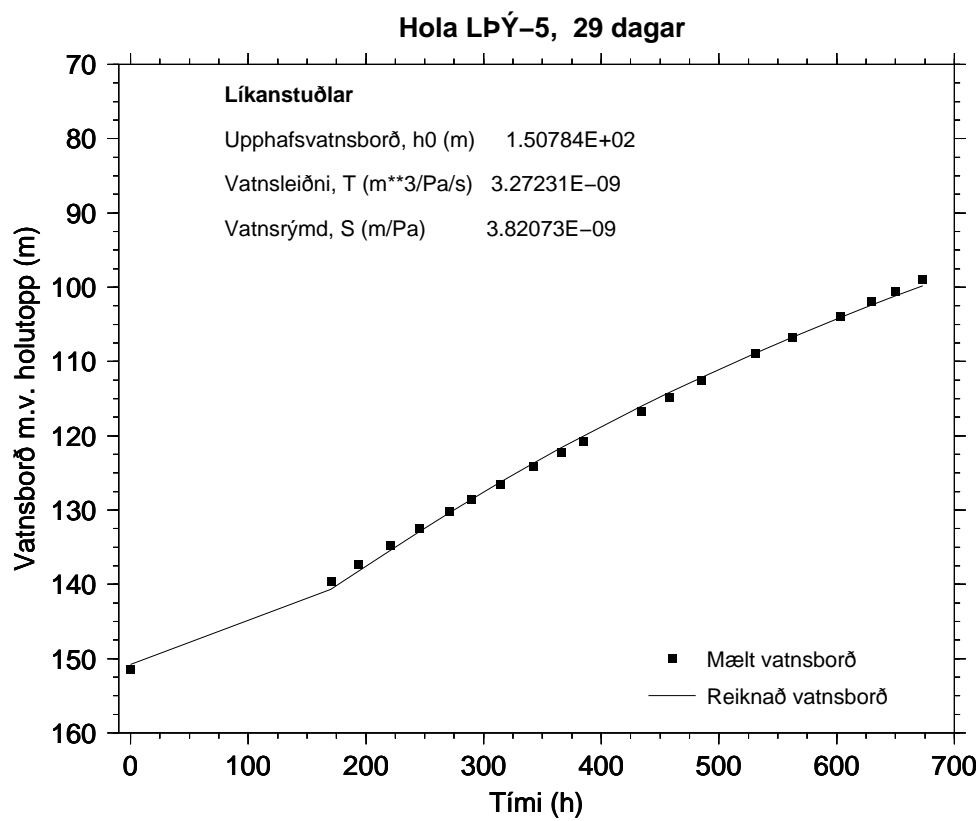
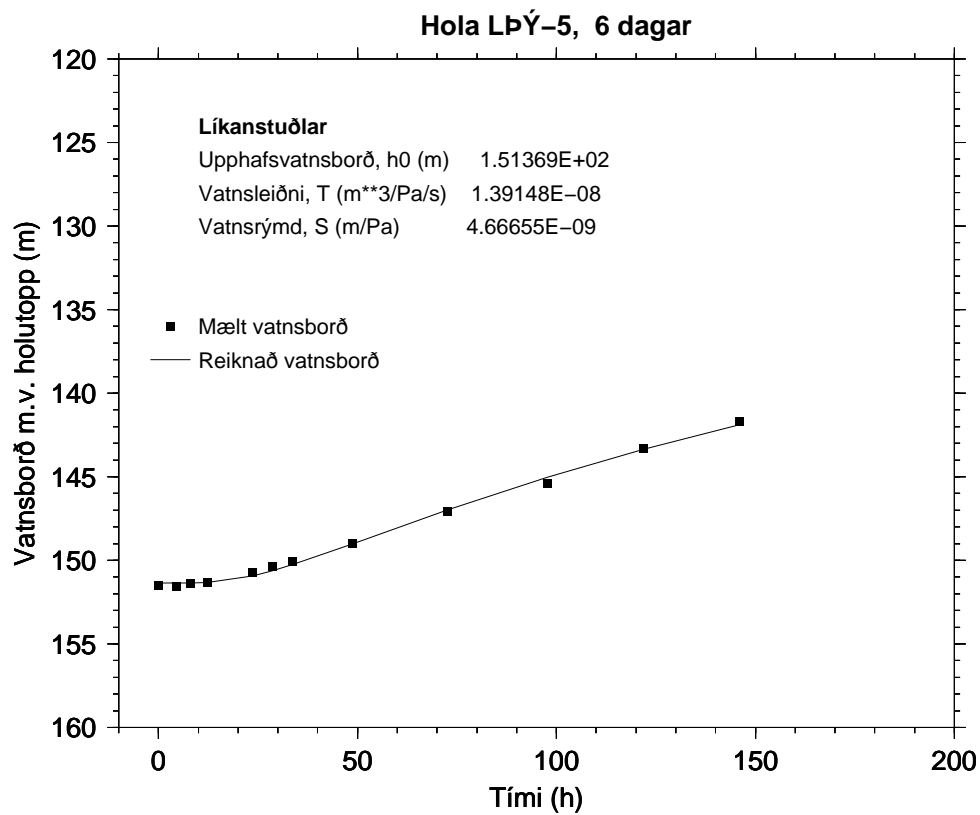
framhald frá síðustu síðu

Dags	Tími	Vatnsborð (m)	Hiti (°C)	Vinnsla (l/s)
2000-12-22	15:50	104	101.6	14.8
2000-12-22	15:55	104	101.6	14.8
2000-12-22	15:58	-	-	20.2
2000-12-22	16:04	108	101.8	20.2
2000-12-22	16:10	108	101.8	20.2
2000-12-22	16:20	108.5	102.0	20.2
2000-12-22	16:30	108.5	102.1	20.2
2000-12-22	16:40	108.5	102.1	20.2

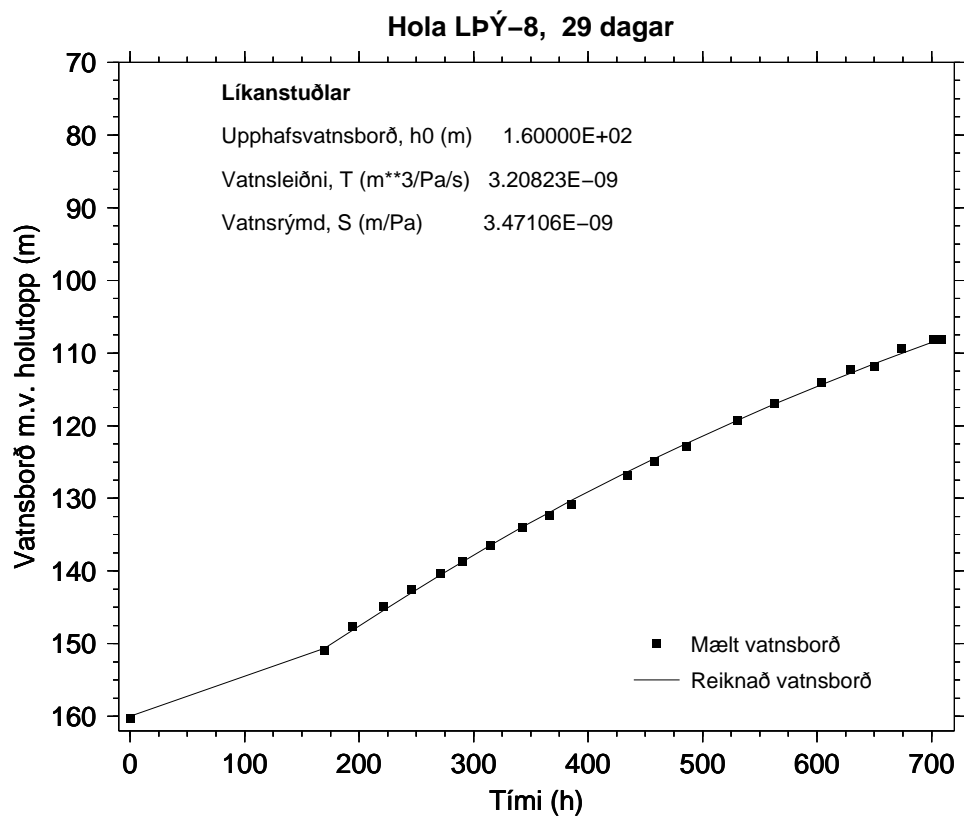
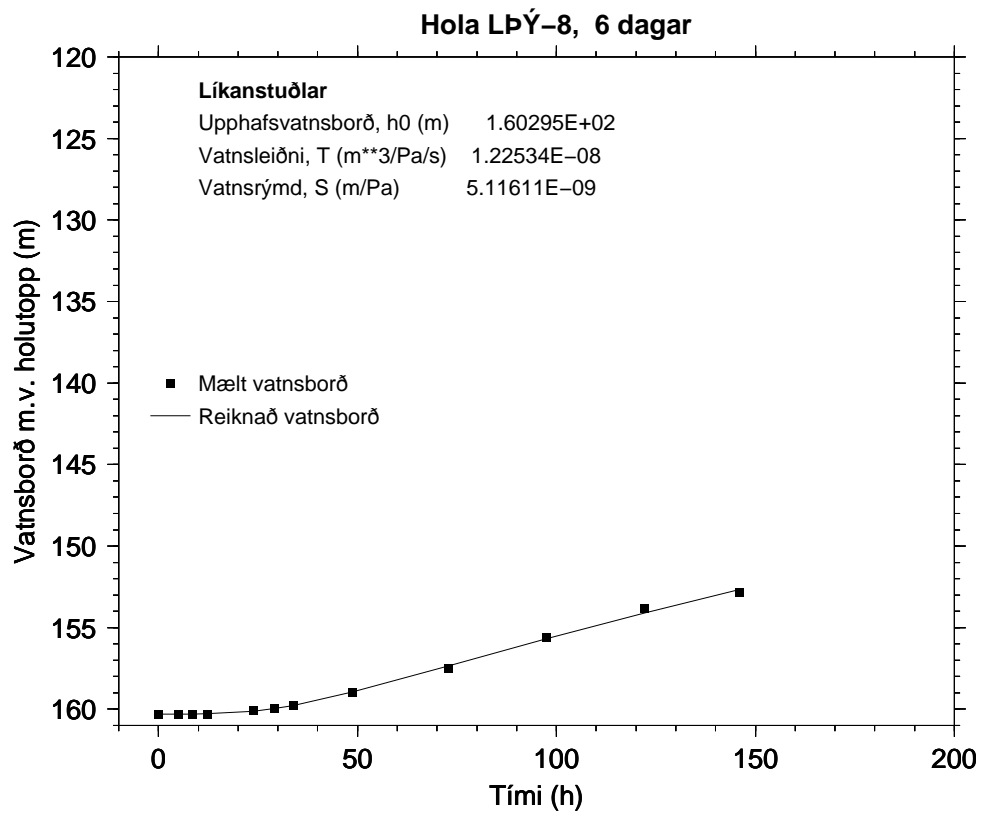
Viðauki D: Mælt og reiknað vatnsborð í borholum



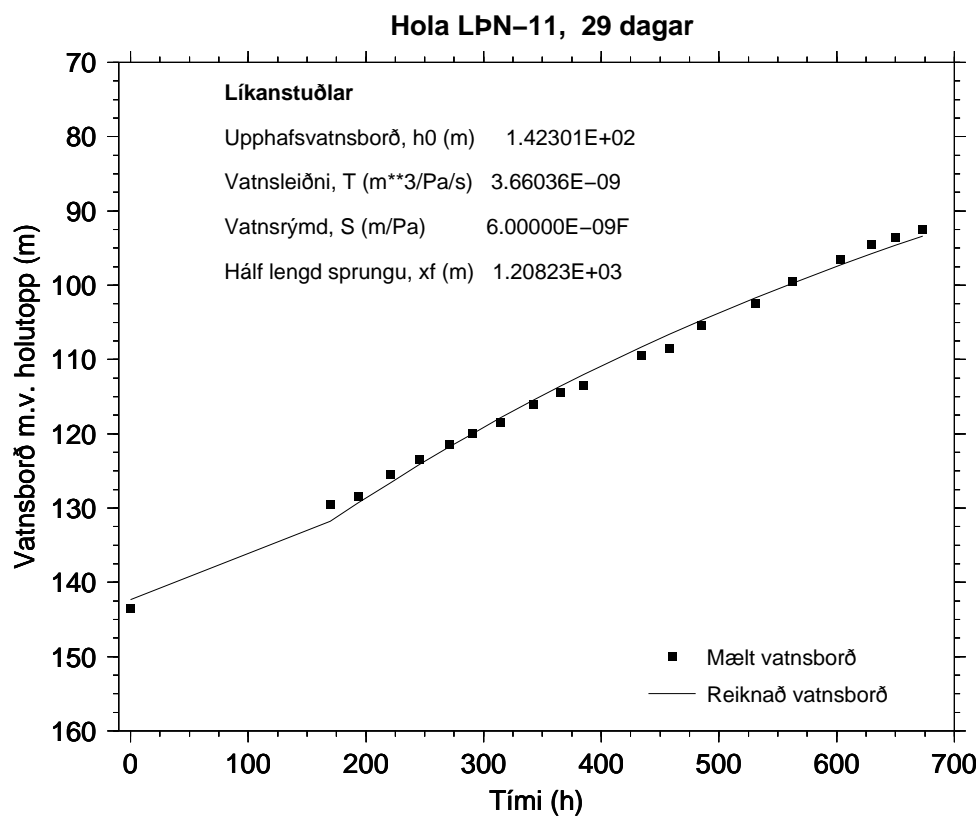
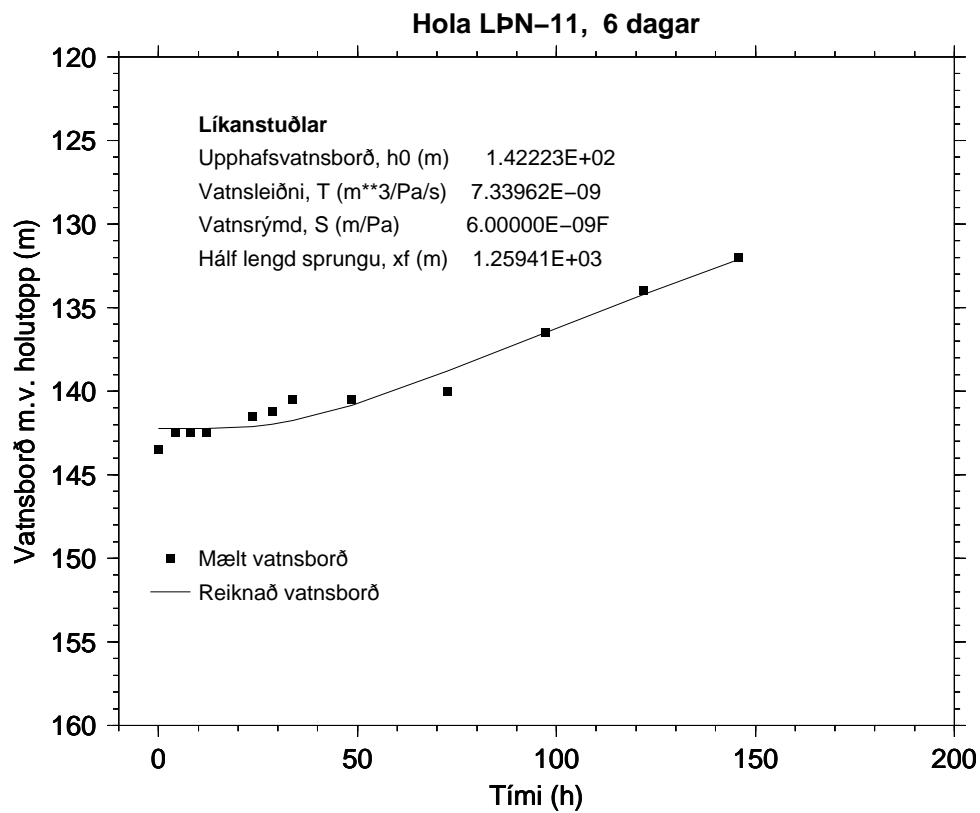
Mynd 20: Niðurstöður vaxlprófs í holu H-2.



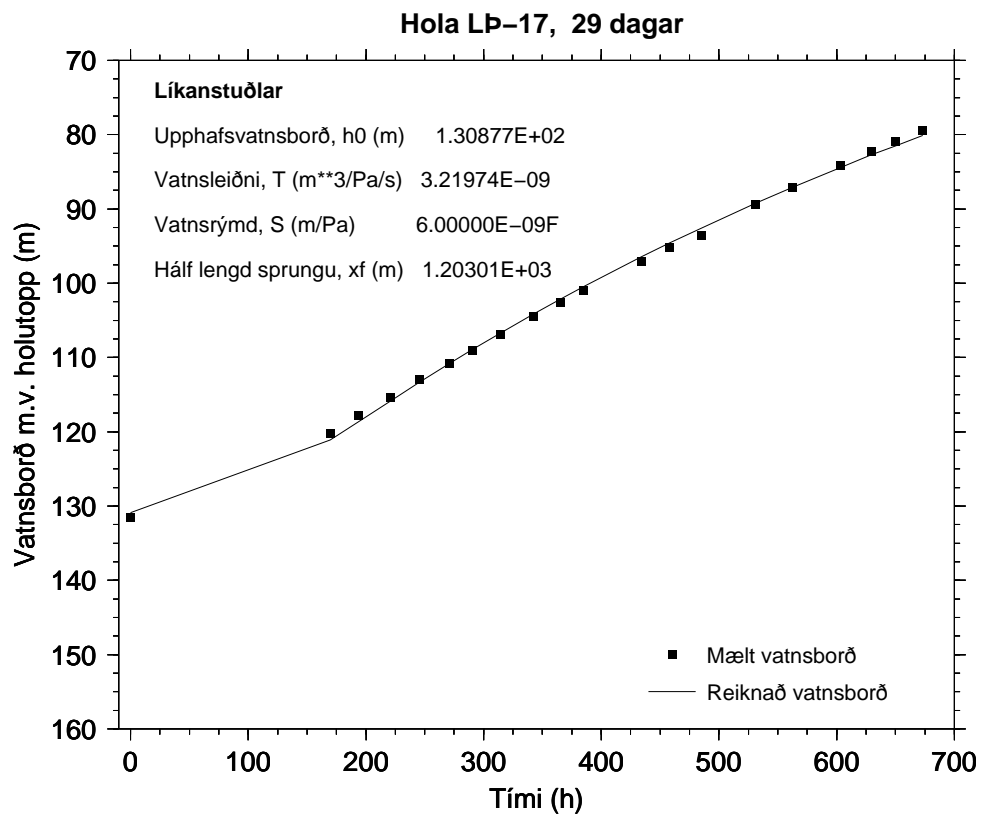
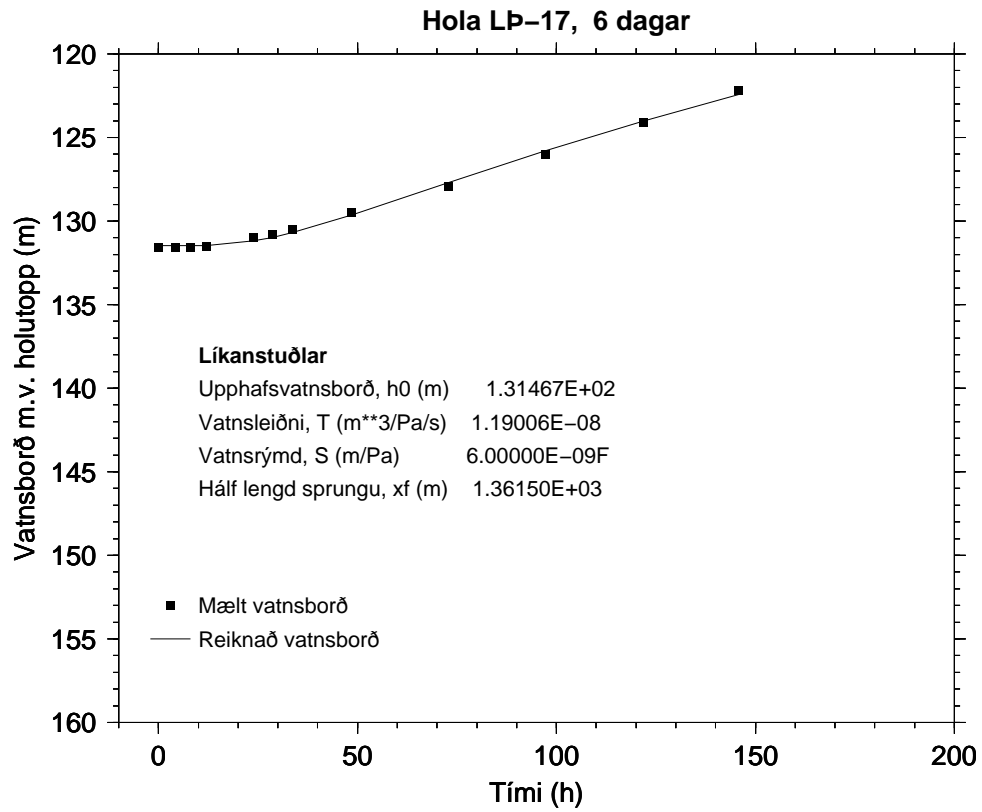
Mynd 21: Niðurstöður víxlprófs í holu LPÝ-5.



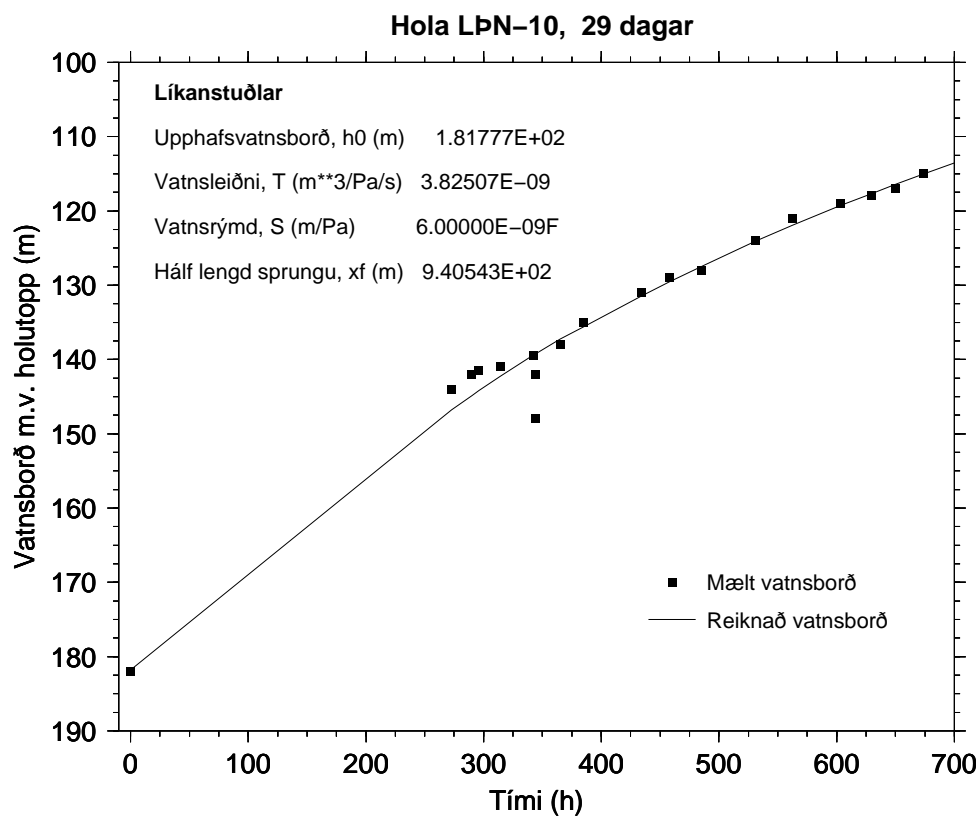
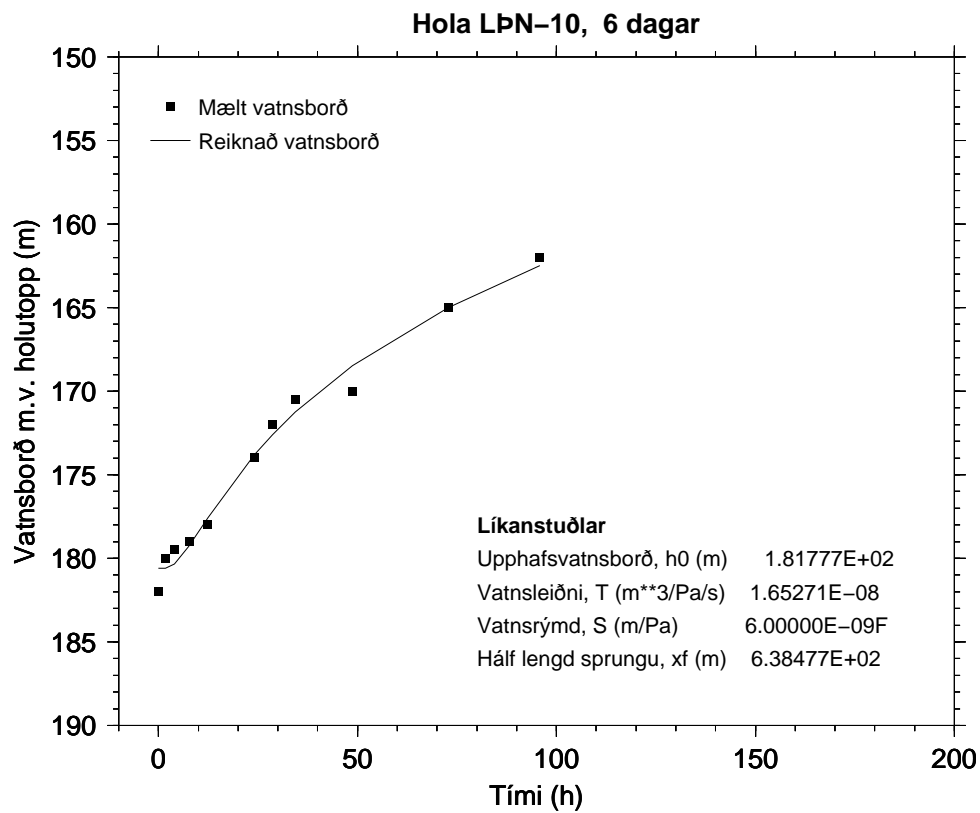
Mynd 22: Niðurstöður víxlprófs í holu LPÝ-8.



Mynd 23: Niðurstöður vísulprófs í holu LPN-11.



Mynd 24: Niðurstöður vaxlprófs í holu LP-17.



Mynd 25: Niðurstöður dæluþrófs í holu LpN-10.

Viðauki E: Líkanstuðlar í opnu tveggja geyma þjöppuðu líkani og lokuðu tveggja geyma líkani

Tafla 14: *Stuðlar í opnu tveggja geyma þjöppuðu líkani.*

$A_1 = 1,57 \cdot 10^{-6}$ $L_1 = 1,14 \cdot 10^{-7}$ $A_2 = 7,49 \cdot 10^{-6}$ $L_2 = 1,04 \cdot 10^{-5}$ <p>Upphafsvatnsborð $h_0 = -35$ m Iðustreymisstuðull $c = 0,018$ Fyrri vinnsla $q = 3,01/s$</p>
--

Tafla 15: *Stuðlar í lokuðu þriggja geyma þjöppuðu líkani.*

$A_1 = 1,58 \cdot 10^{-6}$ $L_1 = 1,23 \cdot 10^{-7}$ $A_2 = 6,93 \cdot 10^{-6}$ $L_2 = 1,07 \cdot 10^{-5}$ $B = 4,70 \cdot 10^{-9}$ <p>Upphafsvatnsborð $h_0 = -35$ m Iðustreymisstuðull $c = 0,018$ Fyrri vinnsla $q = 3,01/s$</p>
