



ORKUSTOFNUN
Jarðhitadeild

**Guðni Axelsson
Grímur Björnsson**

BOTN Í EYJAFJARÐARSVEIT
Líkanreikningar fyrir jarðhitakerfið

OS-92012/JHD-01
Reykjavík, mars 1992
ISBN 9979-827-05-X

**Unnið fyrir
Hitaveitu Akureyrar**



ORKUSTOFNUN
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verknr. 610601

Guðni Axelsson
Grímur Björnsson

BOTN Í EYJAFJARÐARSVEIT

Líkanreikningar fyrir jarðhitakerfið

OS-92012/JHD-01
Reykjavík, mars 1992
ISBN 9979-827-05-X

Unnið fyrir
Hitaveitu Akureyrar

ÁGRIP

Jarðhitasvæðið á Botni í Eyjafjarðarsveit er eitt af fjórum vinnslusvæðum Hitaveitu Akureyrar. Á svæðinu eru tvær vinnsluholur, HN-10 og BN-1, auk fjögurra rannsóknarholna. Byggt hefur verið ítarlegt þrívítt kubbalkan af jarðhitakerfinu á Botni. Það hermir tiltækar upplýsingar um gerð kerfisins, hita- og þrýstiástand þess ásamt því að herma tiltæk gögn um viðbrögð jarðhitakerfisins við vinnslu síðasta áratugs. Til grundvallar kubbalkaninu liggur hugmyndalkan, sem byggir á niðurstöðum rannsókna síðustu tveggja áratuga. Ástand kubbalkansins og viðbrögð þess við vinnslu voru reiknuð með forritinu PT.

Líkanid hermir eftirfarandi þætti: (i) Upphitun jarðhitakerfisins frá lokum ísaldar til áætlaðs ástands þess áður en boranir hófust á svæðinu. (ii) Vatnsborð og vinnsluhita holu HN-10 á 8 fyrstu árum vinnsluögu holunnar. (iii) Vatnsborðsbreytingar sem urðu í rannsóknarholum á svæðinu við stöðvun vinnslu úr holu HN-10 sumarið 1990 og til áramóta 1990/1991.

Kubbalkanið skiptist í þrennt: (1) Öflugt jarðhitakerfi neðan 1500 m dýpis, (2) jarðhitakerfi ofan 1000 m dýpis og (3) grunnvatnskerfið ofan jarðhitakerfisins. Milli 1000 og 1500 m dýpis í líkaninu er illa lekt berg. Öfluga kerfið er háþrýst og hefur mikla vatnsrýmd, sem veldur því að langtímaniðurdráttur er mjög hægur í vinnsluholunum.

Í efri hluta jarðhitakerfisins stjórnað vatnsstreymi aðallega af um 10 m breiðri rennu, eða sprungubelti, með norðaustlæga stefnu. Kólnun vatns úr holu HN-10 og vatnsborðsbreytingar í rannsóknarholunum eru mjög háðar breidd rennunnar. Utan hennar afmarkast efri hluti kerfisins af lágri lekt. Lága lektin varnar því að áhrifa verði vart milli Botnssvæðisins og jarðhitasvæðanna í kring. Þéttur N-S veggur, um 200 - 300 m frá vinnsluholunum, afmarkar efri hlutann til vesturs.

Jarðhitakerfið á Botni tengist grunnvatnskerfinu í dalbotninum um rásir sem áður hleyptu heitu vatni upp úr jarðhitakerfinu. Ein slík rás er þar sem Botnslaug var áður. Þá reyndist nauðsynlegt að hafa aðra slíka rás í kubbalkaninu um ½ km norðaustan Botnslaugar. Meðan svæðið var ótrufað af vinnslu streymdi heitt vatn úr öfluga kerfinu upp um rennuna og upp í grunnvatnskerfið um rásirnar. Eftir að vinnsla hófst á svæðinu streymir kalt grunnvatn niður um þessar rásir og veldur mikilli kólnun efst í jarðhitakerfinu og nokkurri kólnun vatns úr vinnsluholunum. Vinnsla undanfarinna ára (um 29,5 l/s að meðaltali) virðist sækja um 10 % vatnsins til grunnvatnskerfisins. Breytingar í efnainnihaldi vatns úr holu HN-10 eru í samræmi við þetta hlutfall innrennslis.

Vinnsluspár til ársins 2010, reiknaðar með kubbalkaninu, benda til þess að kólnun sú sem orðið hefur í vinnsluholunum eigi eftir að hægja á sér. Fer vinnsluhiti holu HN-10 tæplega niður fyrir 80 °C í þeim tilfellum sem skoðuð voru. Ekki er þörf breytinga á dælubúnaði holna ef meðalvinnsla úr svæðinu verður áfram um 29,5 l/s. Slíkkun dælna í allt að 400 m býður upp á um 25 % aukningu í vinnslu frá núverandi meðaldælingu. Slík aukning mun aðeins valda um 1 °C meiri kælingu en spáð er við áframhald óbreyttrar vinnslu. Niðurdæling í tiltækar rannsóknarholur hækkar vatnsborð á svæðinu. Virðist mega auka vinnslu úr holu HN-10 um allt að 10 % með hóflegri niðurdælingu í tvær þeirra án þess að dælum verði breytt.

EFNISYFIRLIT

ÁGRIP	2
EFNISYFIRLIT	3
MYNDASKRÁ	4
TÖFLUSKRÁ	6
1. INNGANGUR	7
2. YFIRLIT UM RANNSÓKNIR OG VINNSLUSÖGU	9
2.1 Forsaga	9
2.2 Vinnsluholur	9
2.3 Viðnámsmælingar	9
2.4 Rannsóknarboranir	12
2.5 Prófanir á borholum	14
2.6 Vinnslugögn frá Botnssvæðinu	16
2.7 Einfaldir hermireikningar fyrir Botnssvæðið	19
2.8 Efnainnihald í vinnsluholum	21
3. INNRI GERÐ OG UPPHAFSÁSTAND JARÐHITAKERFISINS	23
3.1 Lekt og rennslisleiðir vatns í jarðhitakerfinu	23
3.2 Takmörk jarðhitakerfisins og tengsl við önnur vatnskerfi	23
3.3 Ákvörðun berghita	24
3.4 Ákvörðun upphafsþrýstings	24
4. REIKNITÆKIÐ PT	28
5. HERMIREIKNINGAR	30
5.1 Kubbalkan af Botnssvæðinu	30
5.2 Hermun upphafsástands	38
5.3 Hermun vinnslusögu	44
5.4 Langtímaniðurdráttur kubbalkansins, rennslisjafnvægi og efnabreytingar	49
5.5 Hermun vinnslustöðvunar sumarið 1990	50
6. SPÁR UM FRAMTÍÐARÁSTAND JARÐHITAKERFISINS	54
7. HELSTU NIÐURSTÖÐUR	61
HEIMILDIR	63
ENGLISH SUMMARY	65
VIÐAUKI	67

MYNDASKRÁ

1. Laugar og borholur í Eyjafjarðarsveit	8
2. Staðsetning borholna á Botnssvæðinu	10
3. Kenning um norðaustlæga sprungu og samband hennar við jarðhitann á Botni og Laugalandi	11
4. Einfaldaðar niðurstöður viðnámssniðsmælinga á Botnssvæðinu	12
5. Hiti á 200 m dýpi við Botn og Hrafnagil	13
6. Dæling og sjálfrennsli úr holu HN-10 sumarið 1990	15
7. Vatnsborð í rannsóknarholum við Botn sumarið 1990	15
8. Vatnsborð (m u.s.) við Botn 8. júní 1990	16
9. Vinnsla og vatnsborð holu HN-10 frá 1982	17
10. Vinnsla úr holu BN-1 frá 1982	18
11. Mælingar á vinnsluhita holu HN-10	18
12. Mælingar á vinnsluhita holu BN-1	18
13. Dæmi um þriggja geyma þjappað líkan	19
14. Mælt og reiknað vatnsborð á Botni 1982-1988	20
15. Einingarniðurdráttur HN-10 samkvæmt þjöppuðu geymislíkani	20
16. Vatnsborðsspá fyrir HN-10 gerð með þjöppuðu líkani	21
17. Styrkur nokkurra efna í vatni úr HN-10	22
18. Styrkur nokkurra efna í vatni úr BN-1	22
19. Áætlaður berghiti holna BÝ-2, BÝ-3, BÝ-4 og HÝ-12	25
20. Áætlaður berghiti holna HN-10 og BN-1	25
21. Þrýstingur á Botnssvæðinu	27
22. Jaðrar kubballkans af Botnssvæðinu	33
23. Skipting lags 0 í kubba og berggerðir	34
24. Skipting lags 1 í kubba og berggerðir	34
25. Skipting laga 2-4 í kubba og berggerðir	35
26. Skipting lags 5 í kubba og berggerðir	35
27. Kubbaskipting lags 6	36
28. Kubbaskipting lags 7	36
29. Þrívíddarmynd af kubballkani Botnssvæðisins	37
30. Hitasaga kubbs 488 í lagi 4 í hermun upphafsástands	39

31. Þrýstisaga kubbs 488 í lagi 4 í hermun upphafsástands	39
32. Jafngildislínur hita eftir 10 þúsund ára upphitnun	40
33. Jafngildislínur þrýstings eftir 10 þúsund ára upphitnun	41
34. Hitapversnið eftir rennu. Horft er til norðvesturs	42
35. Samanburður líknanhita og -þrýsings við mælingar í borholum	43
36. Vinnslusaga HN-10 frá 1. nóvember 1981 eins og hún er skilgreind í hermi-reikningunum	45
37. Vinnslusaga BN-1 frá 1. nóvember 1981 eins og hún er skilgreind í hermi-reikningunum	45
38. Mældur og reiknaður þrýstingur á 400 m dýpi í HN-10 frá 1. nóvember 1981	46
39. Mældur og reiknaður vinnsluhiti HN-10 frá 1. nóvember 1981	47
40. Mældur og reiknaður vinnsluhiti BN-10 frá 1. nóvember 1981	47
41. Reiknuð kólnun kubba 183, 288, 388 og 488 frá 1. nóvember 1981	47
42. Reiknuð kólnun (°C) efri hluta hitapversniðs rennu	48
43. Reiknaður kólnunarhraði æðar á 400 m dýpi í HN-10 fyrir misbreiða rennu	48
44. Reiknaður þrýstingur á 400 m dýpi í holu HN-10 við fasta 29,6 l/s vinnslu	49
45. Einfölduð mynd af rennsli vatns milli laga kubballkansins eftir 10 ára samfellda 29,6 l/s vinnslu	51
46. Vinnslusaga holu HN-10 frá 1. janúar 1990	52
47. Reiknað og mælt vatnsborð holna á Botnssvæðinu frá 1. janúar 1990	53
48. Spár um vatnsborð holu HN-10 fyrir vinnslutilvik A	55
49. Spár um vinnsluhita holu HN-10 fyrir vinnslutilvik A	55
50. Spár um vinnsluhita holu HN-10 fyrir vinnslutilvik A og 6 m breiða rennu	55
51. Spár um varmafl Botnssvæðisins fyrir vinnslutilvik A	56
52. Spár um vatnsborð holu HN-10 fyrir vinnslutilvik B	57
53. Spár um vinnsluhita holu HN-10 fyrir vinnslutilvik B	57
54. Spár um vatnsborð holu HN-10 fyrir vinnslutilvik D	58
55. Spár um vinnsluhita holu HN-10 fyrir vinnslutilvik D	58
56. Spár um vatnsborð holu HN-10 fyrir vinnslutilvik E	59
57. Spár um vinnsluhita holu HN-10 fyrir vinnslutilvik E	59
58. Samanburður varmafls holu HN-10 fyrir tilvik D og E	60
59. Vatnsborð holu HN-10 í vinnslutilfelli F-1	60

TÖFLUSKRÁ

1. Yfirlit um borholur á Botnssvæðinu	10
2. Árleg meðalvinnsla (l/s) úr holum HN-10 og BN-1 til og með 1990	17
3. Hornpunktar og mældagar berghita í holum á Botnssvæðinu	24
4. Yfirlit um gang hermireikninga fyrir Botnssvæðinu	30
5. Yfirlit um bergeiginleika í kubballfani	31
6. Upphaflegur hiti og þrýstingur í kubballfani	38
7. Yfirlit um vinnslutilfelli sem spár voru reiknaðar fyrir	54

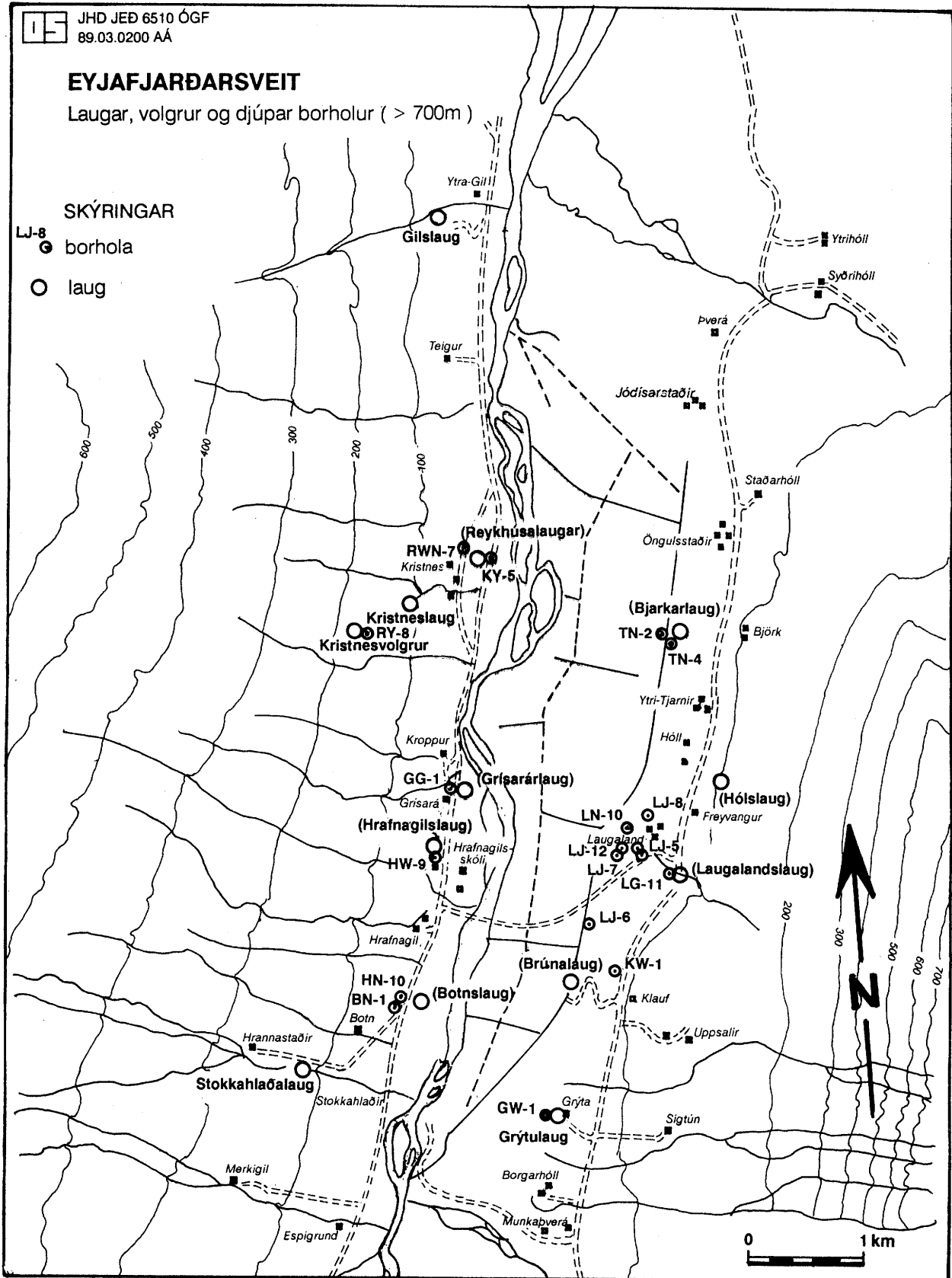
1. INNGANGUR

Hitaveita Akureyrar hefur um 10 ára skeið unnið vatn úr tveimur borholum á jarðhitasvæðinu sem kennt er við Botn í Eyjafjarðarsveit (mynd 1). Hefur vinnslan numið 28-33 l/s að jafnaði og aflar hitaveitan um 25 % af orkuþörf sinni þar (Ólafur G. Flóvenz o.fl. 1991b). Afköst vinnsluholna hafa haldist nær óbreytt þessi ár. Því veldur tiltölulega hægfara þrýstilækkun á svæðinu frá upphafi borana, ef undan eru skildir fyrstu mánuðirnir í nýtingu svæðisins. Virðist sem vatnsæðar vinnsluholnanna séu einungis angar öflugs vatnskerfis sem lítið hefur látið á sjá undan dælingu á Botni (Ólafur G. Flóvenz o.fl. 1989). Talsverðar yfirborðsrannsóknir og boranir hafa farið fram á Botnssvæðinu í þeim tilgangi að ákvarða legu öfluga vatnskerfisins. Einnig hefur vinnsla úr svæðinu og vatnsborð holna verið skráð reglulega. Hefur þannig safnast mikið magn upplýsinga um innri gerð svæðisins og viðbrögð þess við vinnslu.

Í þessari skýrslu er fjallað um hermireikninga sem gerðir voru fyrir jarðhitasvæðið á Botni. Í fyrsta hluta hennar eru dregnar saman helstu niðurstöður rannsókna síðustu tveggja áratuga og fjallað um hugmyndalíkan það sem er grundvöllur hermireikninganna. Að því búnu er lýst þrívíðu kubbalkani, sem notað var til að herma gögn frá Botnssvæðinu. Kubbalkanið er samsett af þremur vatnskerfum: (1) Kalda grunnvatnskerfi dalbotnsins, (2) jarðhitakerfi á 100 - 1000 m dýpi og (3) öflugu jarðhitakerfi neðan 1500 m dýpis. Líkanið samanstendur af 429 misstórum kubbum í 8 lögum. Telst það með flóknari líkönum sem gerð hafa verið af íslensku jarðhitakerfi. Við gerð kubbalkansins voru notaðar allar tiltækar upplýsingar um jarðhitakerfið og vinnsluviðbrögð þess. Mikil vinna fór í að stilla lektardreifingu, vatnsrýmd, stærð, innrennsli og útrennsli líkansins áður en það hermdi upphafsástand ásamt vatnsborðs- og vinnslusögu holna á Botnssvæðinu. Að lokum lýsir skýrslan því hvernig reiknilíkanið var notað til að spá fyrir um ástand jarðhitakerfisins í framtíðinni og viðbrögð þess við hugsanlegri niðurdælingu.

Einfaldir hermireikningar, þar sem miðað er við einn þátt í viðbrögðum jarðhitakerfis, hafa verið gerðir fyrir fjölda íslenskra lágghitasvæða, m.a. með þjöppuðum líkönum (Guðni Axelsson, 1989b). Flókin kubbalkön hafa hins vegar aðeins verið gerð fyrir örfá lágghitasvæði, enda er slík vinna margfalt tímafrekari (sjá t.d. Hitaveitu Reykjavíkur o.fl., 1986; Helgu Tulinius o.fl., 1987; Guðna Axelsson og Helgu Tulinius, 1988). Þau eru einungis byggð á hermun vinnsluviðbragða, en ekki náttúrulegs ástands jarðhitakerfanna og eru tvívíð en ekki þrívíð. Það takmarkar trúverðugleika þeirra. Reiknilíkanið fyrir Botnssvæðið hefur því verulega sérstöðu í nákvæmni og áreiðanleika, bæði vegna þess að það er þrívítt og hermir náttúrulegt ástand kerfisins.

Hermun á hita og þrýstingi í jarðhitakerfi með nákvæmu líkani, þar sem tekið er tillit til vinnslu úr hverri holu, má skoða sem einskonar lokastig rannsóknáttaks á viðkomandi svæði. Þá hafa niðurstöður jarðfræði-, jarðeðlisfræði-, efnafræði- og vinnsluathugana á svæðinu verið felldar saman í eitt líkan. Telja skýrsluhöfundar að sú mikla yfirlega og vinna við rannsóknar- og vinnslugögn frá Botnssvæðinu, sem lagt hefur verið í, hafi skilað hugmyndalíkani af jarðhitakerfinu sem fer nærri raunverulegri gerð þess. Slíkt samræmi líkans og náttúru treystir útreikninga um framtíðarhita og þrýsting í jarðhitakerfinu. Líkanið er þó hvorki einhlítt né traustara en þau gögn sem lögð eru til grundvallar.



Mynd 1. Laugar og borholur í Eyjafjarðarsveit. Nöfn þeirra lauga sem horfið hafa eru í sviga.

2. YFIRLIT UM RANNSÓKNIR OG VINNSLUSÖGU

2.1 Forsaga

Áður en vinnsla hófst á jarðhitasvæðinu við Botn voru yfirborðsummerki jarðhitans um 200 m löng laugalína með norðnorðaustlæga stefnu, sem lá meðfram þjóðveginum gegnt afleggjaranum að Botni (mynd 2). Rennsli og hiti stærstu laugarinnar, sem ýmist var nefnd Botnslaug eða Hrafnagilslaug syðri, voru mæld öðru hvoru frá því 1920. Var rennslið talið um 0,8 l/s og hitinn um 55 °C (Þorkell Þorkelsson, 1920). Laugarnar hurfu strax og vinnsla hófst á svæðinu. Við segulmælingar árið 1971 fannst berggangur skammt frá laugalfnunni, sem talinn var stjórna uppstreymi heita vatnsins (Guðmundur Guðmundsson og Kristján Sæmundsson, 1971).

Árið 1975 var hafist handa við umfangsmiklar jarðhitarannsóknir í nágrenni Akureyrar (Axel Björnsson og Kristján Sæmundsson, 1975). Í fyrstu fólust þær í jarðfræðikortlagningu, viðnámsmælingum og segulmælingum, en síðar í borunum (Axel Björnsson o.fl., 1978). Framkvæmdir við dreifikerfi Hitaveitu Akureyrar hófust af fullum krafti árið 1977, en þá virtist árangur fyrstu borana á Syðra-Laugalandi lofa mjög góðu (Gunnar A. Sverrisson, 1979). Fljótlega kom þó í ljós að afköst jarðhitasvæðanna á Syðra-Laugalandi og Ytri-Tjörnum voru mun minni en talið var í fyrstu. Því var jarðhitaleit haldið áfram af miklu kappi á þeim svæðum í nágrenni Akureyrar þar sem viðnámsmælingar og efnainnihald laugavatns bentu til nýtanlegs jarðhita. Eitt þessara svæða var Botnssvæðið.

2.2 Vinnsluholur

Árið 1980 var fyrsta holan á Botnssvæðinu boruð. Var það hola HN-10, sem er syðst í landi Hrafnagils (mynd 2). Holunni var valinn staður að undangengnum segulmælingum og hitamælingum í jarðvegi. Henni var ætlað að skera ganginn, sem talið var að stjórnaði uppstreymi heita vatnsins, á 600-700 m dýpi (Ásgrímur Guðmundsson, 1980). Holan varð 1050 m djúp. Nánari upplýsingar um hana eru birtar í töflu 1. Hola HN-10 er afkastadrjúg. Hefur hún gefið um 25 l/s að jafnaði síðustu ár, en þó með allt að 230 m niðurdrætti. Aðalæðar holunnar eru við hraunlagamót á 489 og 530 m dýpi og við gang á 750-876 m dýpi. Þrýstingur á holutoppi var mikill í upphafi, sennilega á bilinu 18-20 bör (Þorsteinn Thorsteinsson, 1981).

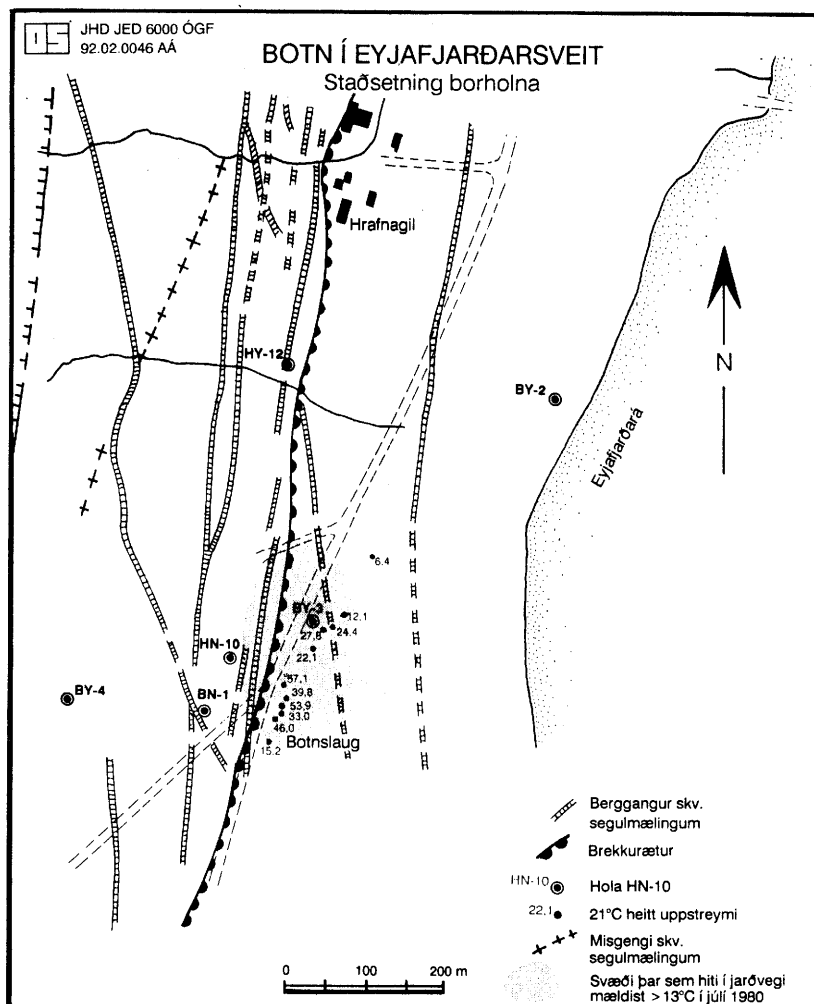
Ári síðar var hola BN-1 boruð, um 70 m sunnan holu HN-10 (mynd 2 og tafla 1). Henni var ætlað að skera sama gang og hola HN-10, en á um 1000 m dýpi (Ólafur G. Flóvenz o.fl., 1989). Hola BN-1 varð 1830 m djúp. Hún er mun afkastaminni en hola HN-10. Engar vatnsæðar fundust við ganginn sem talinn var stjórna uppstreymi í jarðhitakerfinu. Hins vegar var skorin háþrýst vatnsæð á 1756 m dýpi, sem gaf nokkra l/s í sjálfrennsli. Virtist hún óháð grynri æðum í holunni og eins æðum í holu HN-10. Til dæmis kemst hola BN-1 fljótt í sjálfrennsli eftir stöðvun dælu þrátt fyrir mikinn niðurdrátt í holu HN-10. Er talið að djúpa æðin í BN-1 tengist öðru heitavatnskerfi. Þrýstingur æðarinnar hefur ekki verið mældur nákvæmlega, en hún var talinn skila 19-23 börum á holutoppi við lok borunar.

2.3 Viðnámsmælingar

Fljótlega sást af vinnslugögnum frá Botnssvæðinu að óverulegur langtímaniðurdráttur varð í vinnsluholum, öfugt við önnur vinnslusvæði Hitaveitu Akureyrar (Guðni Axelsson o.fl., 1988). Það er túlkað þannig að í nágrenni Botns leynist mun öflugra jarðhitakerfi. Þessi tilgáta er studd af djúpu, háþrýstu æðinni í holu BN-1. Laugar, sem enn eru uppi við Grýtu og Stokkahlaðir,

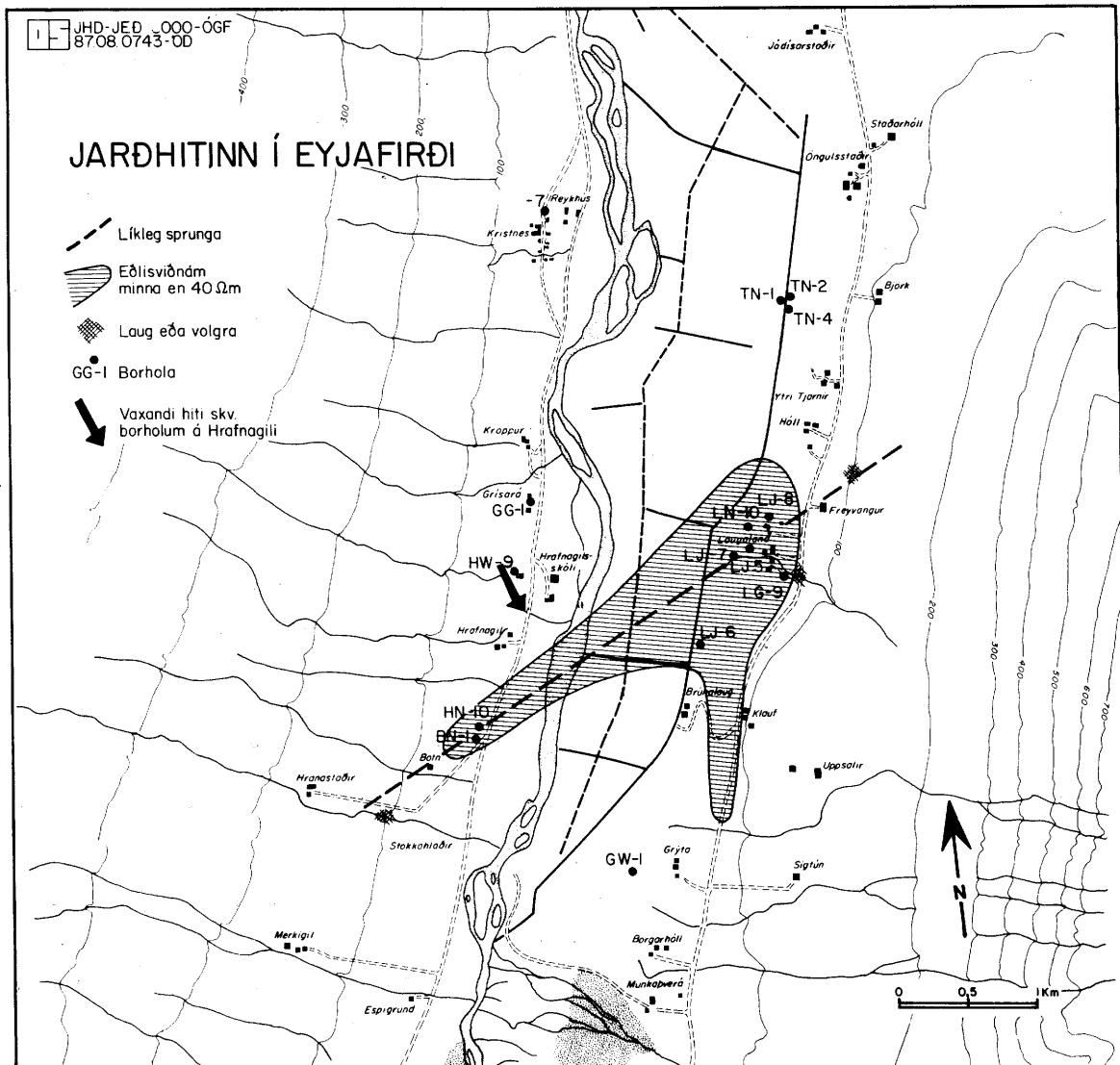
TAFLA 1. Yfirlit um borholur á Botnssvæðinu.

Hola	Borun lauk	Hæð (m y.s)	Dýpi (m)	Fóðring (lengd/vídd) (m)/(m)	Vídd vinnslu-hluta (m)	Nýting holu	Helstu æðar (m)
BN-1	des. '81	23,2	1830	28/0,25	0,22	Vinnsla	144,1756
BÝ-2	des. '89	5,6	446	103/0,19	0,16	Ranns.	124
BÝ-3	okt. '89	6,6	300	41/0,22	0,16	Ranns.	(260)
BÝ-4	des. '89	66,1	403	8/0,22	0,16	Ranns.	(318)
HN-10	nóv. '80	22,4	1050	456/0,30	0,22	Vinnsla	489,530, 750-876,998
HÝ-12	des. '89	28,6	318	5/0,22	0,16	Ranns.	(94-96)



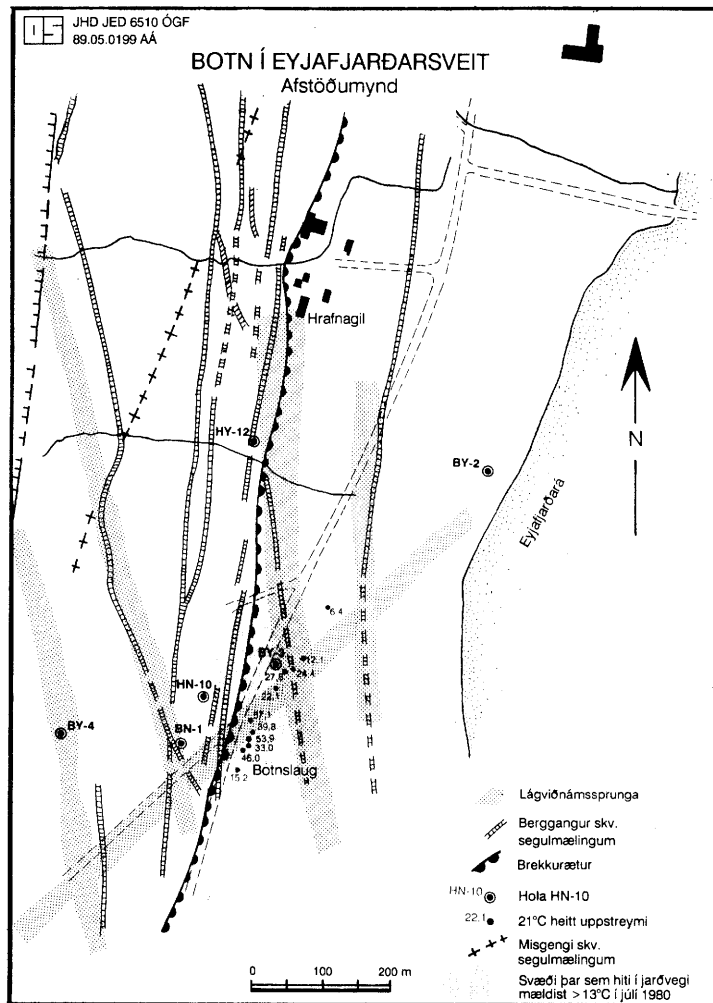
Mynd 2. Staðsetning borholna á Botnssvæðinu.

styðja einnig tilgátuna. Í ágúst 1987 var sett fram kenning um að jarðhitakerfin í miðjum Eyjafirði, og þar með öfluga kerfið við Botn, stjórnist af einu sprungubelti með stefnu nálægt norðaustri (Ólafur G. Flóvenz o.fl., 1987). Hugsanleg staðsetning sprungubeltisins er sýnd á mynd 3. Á grundvelli kenningarinnar var jarðhitarannsóknnum við Botn haldið áfram.



Mynd 3. Kenning um norðaustlæga sprungu og samband hennar við jarðhitann á Botni og Laugalandi (Ólafur G. Flóvenz o.fl., 1987).

Í fyrstu var NA-lægu sprungunnar leitað með viðnámssniðsmælingum (Ólafur G. Flóvenz o.fl., 1989). Eru helstu niðurstöður mælinganna sýndar á mynd 4. Þær benda til þess að nokkur vatnsleiðni kunnri að vera með fjórum af þeim N-S berggöngum sem liggja um svæðið. Þó reyndist lágviðnám ekki fylgja ganginum rétt vestan Botnslaugar, en vinnsluholunum tveimur var á sínu tíma ætlað að fá vatn við hann. Það styður enn frekar að gangurinn sé ekki uppstreymisrás í jarðhitakerfinu.



Mynd 4. Einfaldaðar niðurstöður viðnámsniðsmælinga á Botnssvæðinu (Ólafur G. Flóvenz o.fl., 1989).

Viðnámsniðsmælingarnar benda einnig til þess að um svæðið liggi norðaustlæg sprunga sem sker norður-suður gangana inni á jarðhitasvæðinu (mynd 4). Hugsanlegt er að jarðhitinn við Botn sé þess eðlis að NA-sprungan, eða einhver ganganna, sé megin vatnsleiðarinn, sem síðan veiti vatni inn í hina vatnsleiðarana.

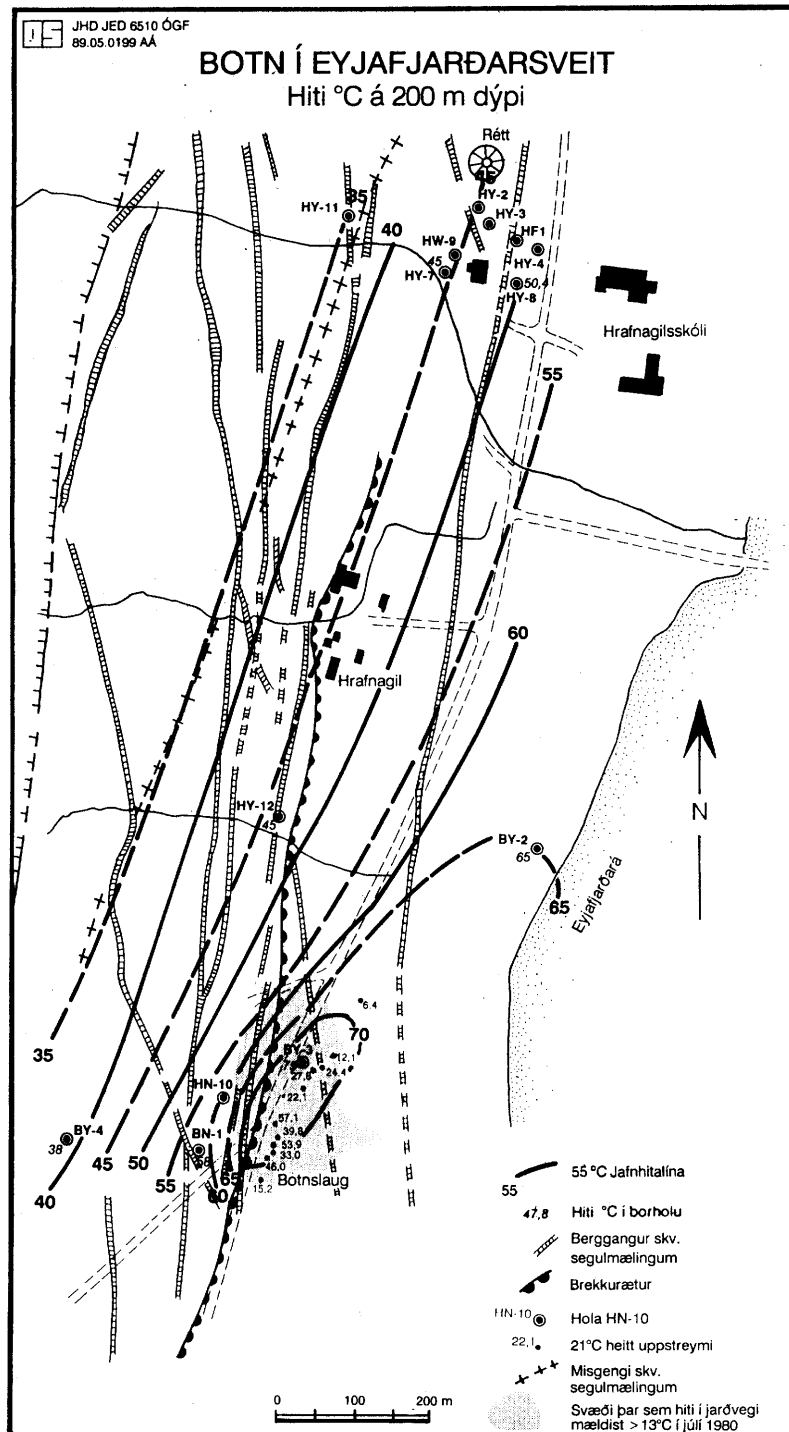
2.4 Rannsóknarboranir

Í framhaldi af viðnámsmælingunum voru boraðar fjórar rannsóknarholur á jarðhitasvæðinu á Botni. Þetta eru holur BÝ-2, BÝ-3, BÝ-4 og HÝ-12. Staðsetning holnanna er sýnd á mynd 2. Upplýsingar um dýpi þeirra, vatnsæðar og fleira eru birtar í töflu 1 hér að framan. Tilgangur borananna var að kanna hita og þrýsting í jörðu á Botnssvæðinu og hugsanleg tengsl þessara eðlisstærða við hina meintu norðaustlægu sprungu gegnum jarðhitakerfið og öfluga vatnskerfið (Ólafur G. Flóvenz o.fl., 1991a).

Skemmt er frá því að segja að rannsóknarholurnar nægðu ekki til þess að staðsetja öfluga vatnskerfið. Hiti í borholunum bendir samt til þess að meginæðar jarðhitakerfisins við Botn, a.m.k. ofan 500 m, stefni fremur NA-SV en N-S (mynd 5). Jafnframt er ólíklegt að vatnskerfið, sem leit-

að er að, sé norðan borsvæðisins. Því er talið líklegast að öflugra vatnskerfið sé annað hvort að finna neðan 1000-1500 m dýpis eða sunnan borsvæðisins.

Sumarið 1990 voru gerðar umfangsmiklar vatnsborðsmælingar í rannsóknarholunum í tengslum við stöðvun dælu í HN-10. Niðurstöðum þeirra rannsókna er lýst hér á eftir.



Mynd 5. Hiti á 200 m dýpi við Botn og Hrafnagil (Ólafur G. Flóvenz o.fl., 1991a).

2.5 Prófanir á borholum

Nokkrar prófanir hafa verið gerðar á holu HN-10 og lítillega á holu BN-1 frá því borun þeirra lauk. Má þar í fyrsta lagi nefna mælingar á sjálfrennsli úr holunum og í öðru lagi lokunarprófanir. Í þeim var fylgst með hækkun þrýstings í annarri hvorri vinnsluholunni eftir að þeim hafði verið lokað eða hætt að dæla úr þeim (Þorsteinn Thorsteinsson, 1981; Ólafur G. Flóvenz o.fl., 1989). Helsta niðurstaða prófananna er að leiðnistuðull jarðhitakerfisins í nágrenni holu HN-10 er lágur. Leiðnistuðullinn er mælikvarði á hversu greiðlega vatn streymir um vatnskerfi. Er hann skilgreindur sem $T = k \cdot h \cdot g/v$ þar sem k er lekt bergsins, h þykkt kerfisins, g þyngdarhröðun jarðar og v eðlisseigja vatns. Meðaltal nokkurra mismunandi mælinga á leiðnistuðli holu HN-10 er um 6×10^{-5} m²/s. Einnig var tregðustuðull (s) holu HN-10 áætlaður -6,5. Það er óvenju lágt og er túlkað þannig að næst holunni sé aðstreymi vatns um tiltölulega víðar sprungur.

Frumtúlkun gagna sem söfnuðust í fyrstu prófunum á HN-10, benti til mun meiri langtímaniðurdráttar í holunni en raun hefur orðið á (Þorsteinn Thorsteinsson, 1981). Er það vegna þess að spárnar gerðu ráð fyrir sömu vatnsleiðni í öllum hlutum jarðhitakerfisins og mældist í næsta umhverfi holu HN-10. Vinnslusagan hefur sýnt að sú forsenda er röng sökum áhrifa öfluga jarðhitakerfisins sem gætir við langtíma vinnslu.

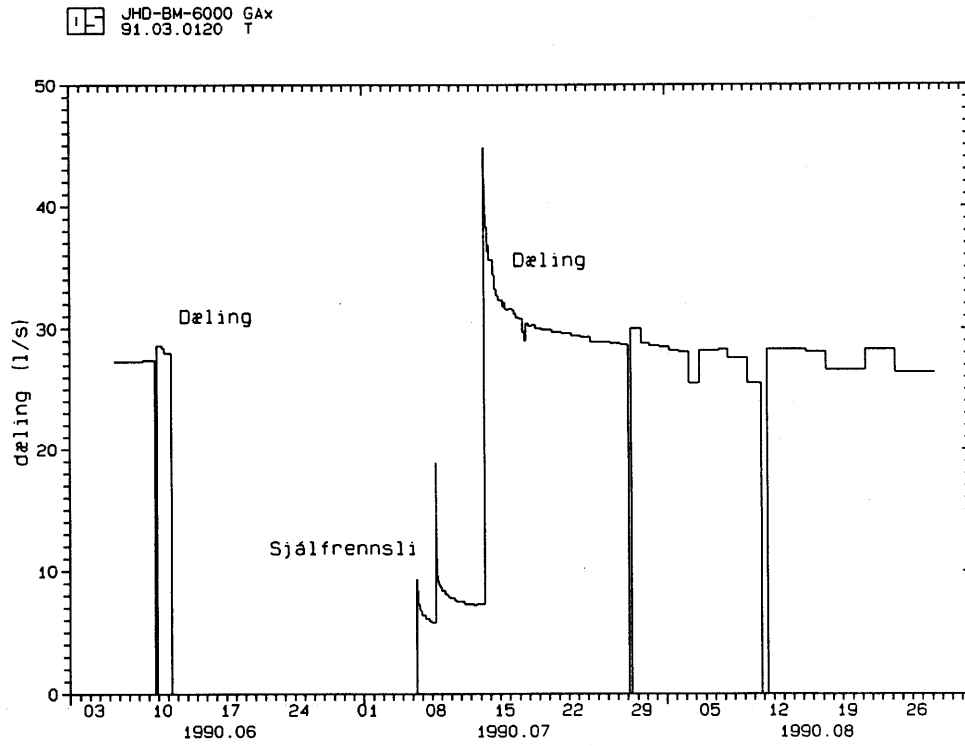
Umfangsmestu mælingarnar á vinnsluviðbrögðum Botnssvæðissins voru gerðar sumarið 1990, hálfu ári eftir að rannsóknarholurnar fjórar voru boraðar (Ólafur G. Flóvenz o.fl., 1991a). Tilgangur mælinganna var annars vegar að afla frekari upplýsinga um eiginleika jarðhitakerfisins á Botni og hins vegar að kanna, með vatnafræðilegum athugunum, hvort fá mætti starlegri upplýsingar um öfluga vatnskerfið. Prófunin fór þannig fram að dælingu úr holu HN-10 var hætt í rúmán mánuð. Á meðan var fylgst með vatnsborðsbreytingum í rannsóknarholunum og nokkrum eldri holum í Eyjafjarðarsveit, og eins eftir að dæling hófst á ný úr HN-10. Mynd 6 sýnir hvernig vinnslu var háttað úr HN-10 á athugunartímanum og mynd 7 sýnir vatnsborðsgögnin sem söfnuðust í holum á Botnssvæði.

Helstu niðurstöður prófunarinnar sumarið 1990, og er þá einnig stuðst við fyrirliggjandi þekkingu á viðbrögðum kerfisins við langtímvinnslu, eru eftirfarandi:

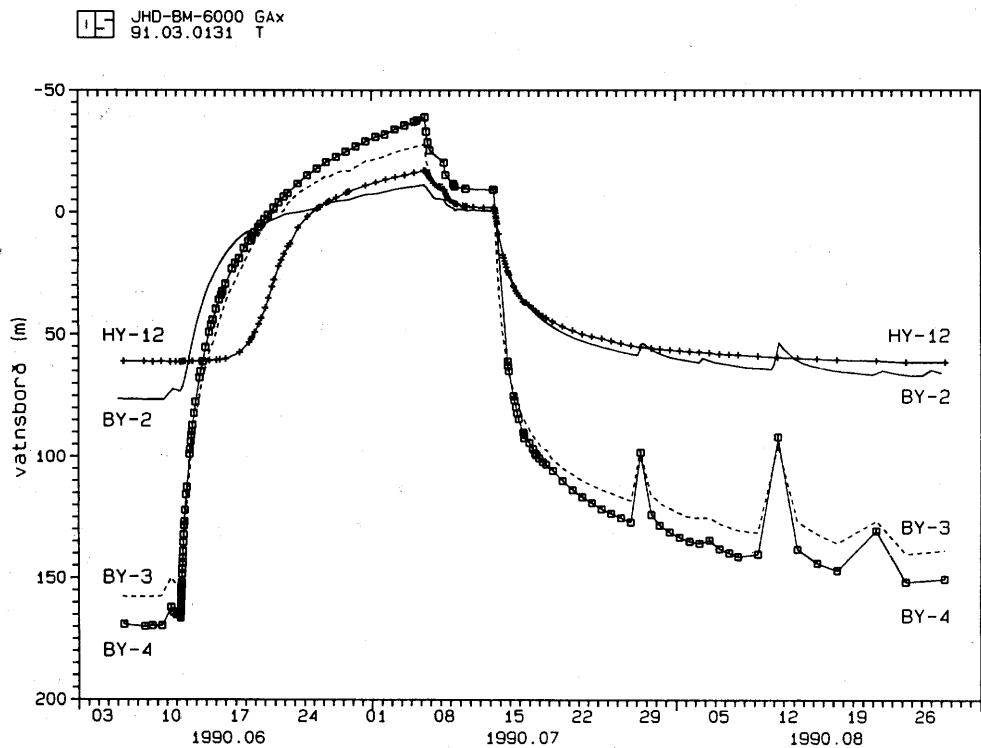
- Miklar vatnsborðsbreytingar verða í jarðhitakerfinu við Botn fyrstu vikunnar eftir að dæling úr HN-10 er stöðvuð, eða hún er hafin á ný.
- Vatnsborðsbreytinga gætir þó stutt frá holunni og áhrifa dælustöðvunarinnar varð ekki vart á öðrum vinnslusvæðum í Eyjafirði.
- Vatnsborðsbreytingarnar benda til þess að í efstu 500 m jarðhitakerfisins sé mest lekt í rennu eða sprungu sem stefnir milli NA-SV og ANA-VSV.

Á mynd 8 er sýnt dæmi um hvernig vatnsborð holna fylgir rennunni. Það teygir sig í NA-SV stefnu vegna góðrar lektar rennunnar. Allar holur Botnssvæðissins eru í tengslum við rennuna nema hola HÝ-12. Lega rennunnar samkvæmt vatnsborðsmælingunum er jafnframt í góðu samræmi við hitaástand í jörðu á svæðinu og niðurstöður viðnámssniðsmælinga.

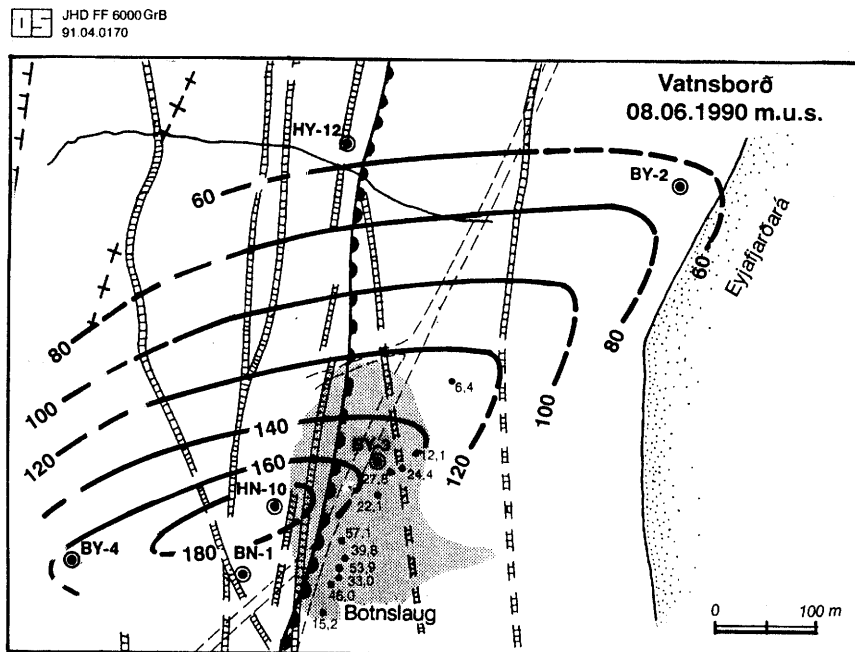
Það vakti athygli við skoðun mælinganna á mynd 7 að vatnsborðsbreytingar eru meiri í holu BÝ-4 en í BÝ-3. Þó er hola BÝ-4 nær tvöfalt fjær holu HN-10 en hola BÝ-3. Þétt skil í jarðhitakerfinu, nærri holu BÝ-4, gætu valdið þessu (Ólafur G. Flóvenz o.fl., 1991b).



Mynd 6. Dæling og sjálfrænnisli úr holu HN-10 sumarið 1990 (Ólafur G. Flóvenz o.fl., 1991a).



Mynd 7. Vatnsborð í rannsóknarholum við Botn sumarið 1990 (Ólafur G. Flóvenz o.fl., 1991a).



Mynd 8. Vatnsborð (m.u.s.) við Botn 8. júní 1990 (Ólafur G. Flóvenz o.fl., 1991a).

Leka rennan í efri hluta jarðhitakerfisins er í sambandi við áður nefnt öflugt jarðhitakerfi. Tengingin veldur því að niðurdráttur í rennunni, við langtíma vinnslu, kemst í jafnvægi og nær lítilli útbreiðslu. Töluvert innstreymi kemur úr öfluga kerfinu inn til rennunar. Viðbrögð holu HÝ-12 benda til þess að sprungur sem liggja til norðurs frá Botni, t.d. meðfram göngum, séu að öllu jöfnu lokaðar vegna mikils niðurdráttar, en opnast á ný er vatnsborð hækkar á svæðinu. Vatnsborðsgögnin á mynd 7 voru notuð til að áætla leiðnistuðul (T) efri hluta jarðhitakerfisins næst HN-10. Hann reyndist nálægt $5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, sem er svipað því sem áður hafði verið áætlað.

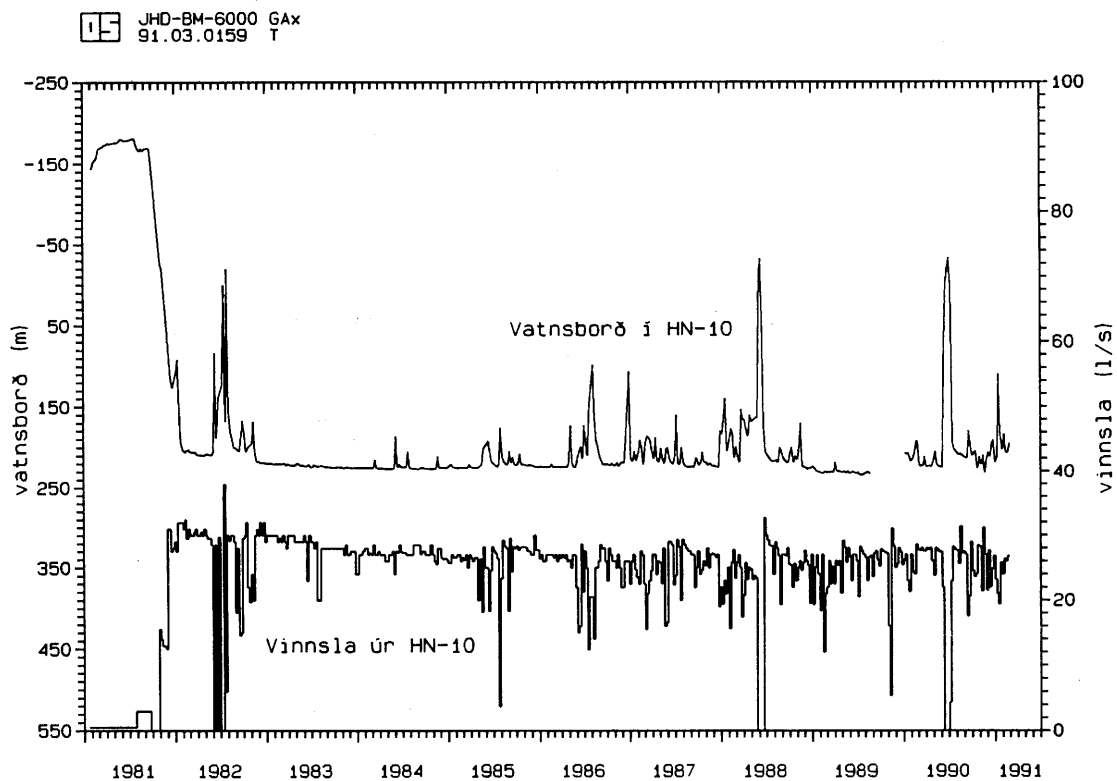
2.6 Vinnslugögn frá Botnssvæðinu

Ágætar mælingar eru til um langtíma vinnslu úr holunum á Botni (Ólafur G. Flóvenz o.fl., 1991b). Vikuleg meðalvinnsla hefur verið mæld með aflesturum af rennslismælum holna HN-10 og BN-1. Vatnsborð hefur verið mælt vikulega í HN-10, en vantar úr BN-1 frá því í maí 1984. Eru vatnsborðsmælingarnar sýndar á myndum 9 og 10. Tafla 2 gefur yfirlit um árlega meðalvinnslu á Botnssvæði.

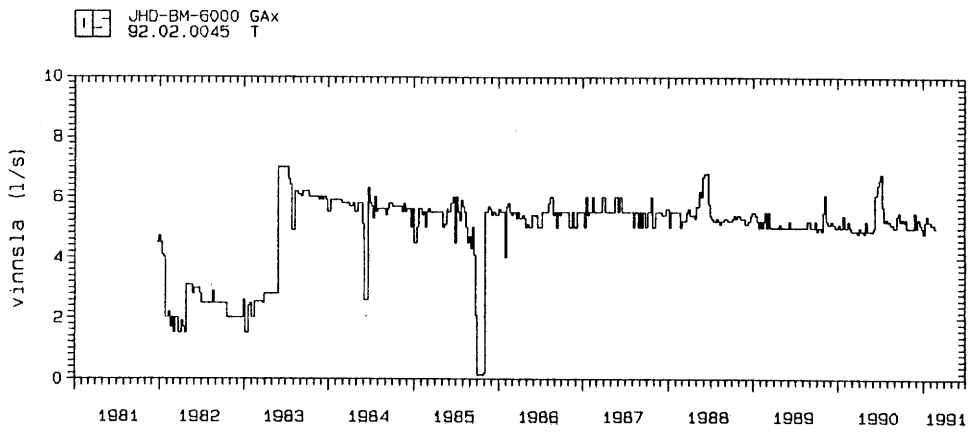
Mynd 11 sýnir vinnsluhita holu HN-10. Annars vegar eru sýndar mælingar starfsmanna Hita veitu Akureyrar og hins vegar mælingar sem starfsmenn Orkustofnunar hafa gert í tengslum við sýnatökur. Nokkur hliðrun er á milli þessara mælisyrpna, en báðar sýna sömu hegðun, þ.e. að vinnsluhiti holu HN-10 hefur lækkað um 3-4 °C frá því borun lauk. Sama er uppi á teningnum ef mynd 12 er skoðuð, en hún sýnir vinnsluhita holu BN-1. Hiti hennar hefur lækkað um 1-2 °C frá borlokum. Þessi kólnun beggja holna er talin tengjast innstreymi kalds vatns niður í jarðhitakerfið um rásir þær sem áður veittu heitu vatni í Botnslaug og nágrenni (Ólafur G. Flóvenz o.fl., 1991b). Þess ber að geta að hitamælar við báðar holurnar voru einangraðir í september 1988 og olli það stökki í mældum hita. Voru mæligildi fyrir þann tíma hækkuð um 1 °C í holu HN-10 og um 3 °C í holu BN-1 til að mæta stökkinu.

TAFLA 2. Árleg meðalvinnsla (l/s) úr holum HN-10 og BN-1 til og með 1990.

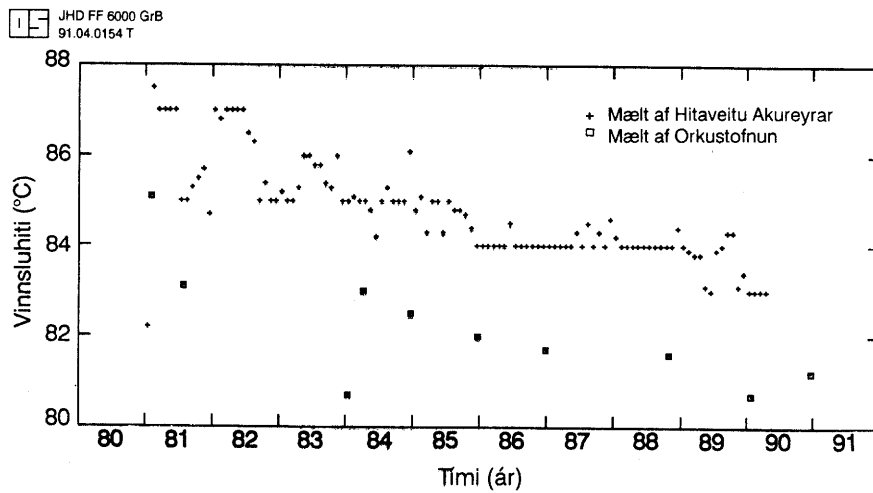
Ár	HN-10	BN-1	Samtals
1981	3,6	0,2	3,8
1982	26,0	2,5	28,5
1983	28,3	4,7	33,0
1984	27,1	5,6	32,7
1985	25,9	4,9	30,8
1986	24,9	5,4	30,3
1987	25,1	5,5	30,6
1988	23,0	5,4	28,4
1989	24,8	5,1	29,9
1990	23,7	5,2	28,9



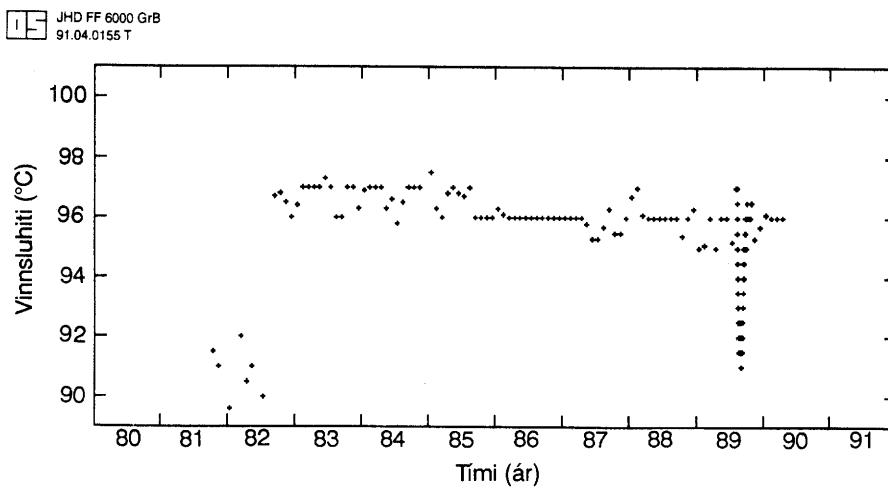
Mynd 9. Vinnsla og vatnsborð holu HN-10 frá 1982.



Mynd 10. Vinnsla úr holu BN-1 frá 1982.



Mynd 11. Mælingar á vinnsluhita holu HN-10.

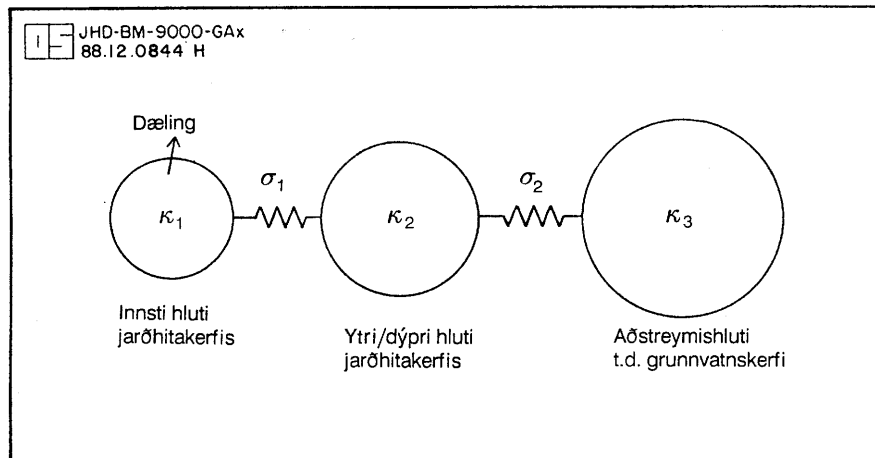


Mynd 12. Mælingar á vinnsluhita holu BN-1.

2.7 Einfaldir hermireikningar fyrir Botnssvæðið

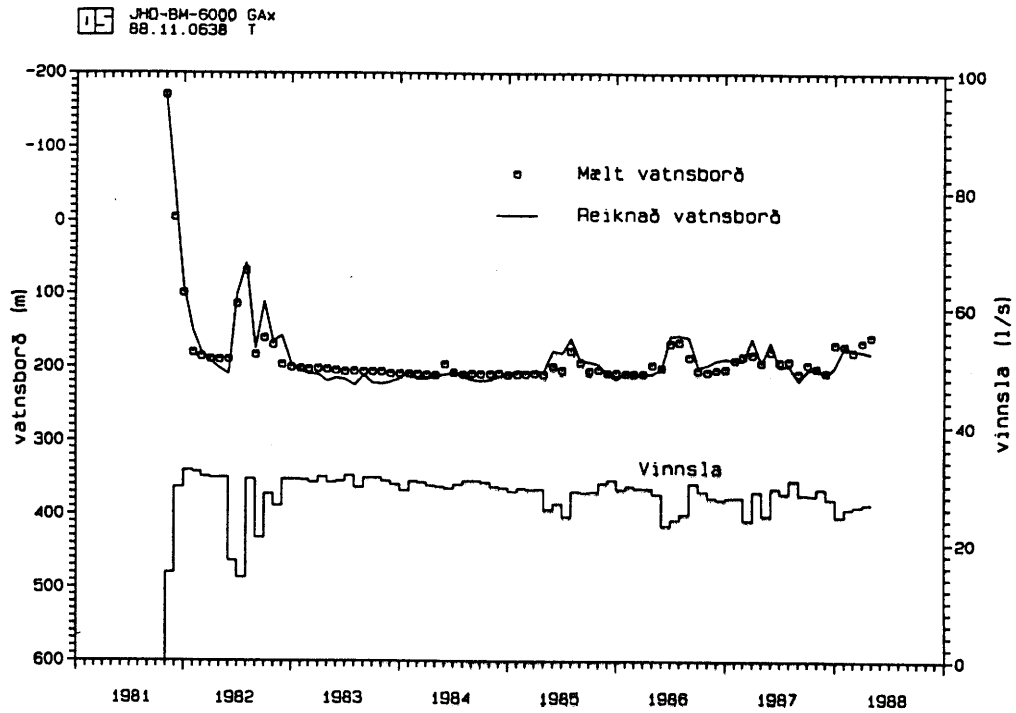
Árið 1988 voru gerðir einfaldir hermireikningar fyrir jarðhitasvæðin fjögur sem Hitaveita Akureyrar nýtir, þ.á.m. fyrir Botnssvæðið (Guðni Axelsson o.fl., 1988). Notuð voru þriggja geyma þjöppuð lfkön til að herma vatnsborðsbreytingar á svæðunum. Ekki var gert ráð fyrir innbyrðis tengslum á milli þeirra, því eftirlit með vatnsborði holna hafði þegar sýnt að ekki voru þrýstítengsl milli svæðanna. Markmið hermireikninganna var að meta afköst þessara jarðhitasvæða á sem einfaldastan og ódýrastan máta og spá fyrir um vinnslugetu þeirra til nokkurra ára.

Á mynd 13 er sýnt dæmi um þriggja geyma þjappað lfkön. Það samanstendur af þremur vatnsgeymum og tveimur viðnámmum. Vatnsborð eða þrýstingur í geymunum hermíur vatnsborð í mismunandi hlutum jarðhitakerfisins. Viðnámin lfkja hins vegar eftir rennslisviðnámi í jarðhitakerfinu, sem stjórnast af lekt bergsins innan þess. Þjöppuð lfkön hafa verið notuð með góðum árangri við hermun vatnsborðsbreytinga í mörgum jarðhitakerfum á Íslandi (Guðni Axelsson, 1989). Á mynd 14 eru sýndar niðurstöður hermireikninganna með þjöppuðu lfkani fyrir Botnssvæðið. Þar er borið saman mælt og reiknað vatnsborð í HN-10 fram á mitt ár 1988. Eiginleikar þjappaða lfkansins benda til þess að lekt sé mjög lág í þeim hluta jarðhitakerfisins á Botni sem holur HN-10 og BN-1 vinna úr (Guðni Axelsson o.fl., 1988). Einnig benda eiginleikar lfkansins til þess að sá hluti sé líftill, e.t.v. 1-2 km² að yfirborðsflatarmáli. Þessi hluti jarðhitakerfisins er síðan í tengslum við tvö mun stærri og gjöfulli vatnskerfi, sem eru öfluga jarðhitakerfið og kalda grunnvatnskerfið við yfirborð.

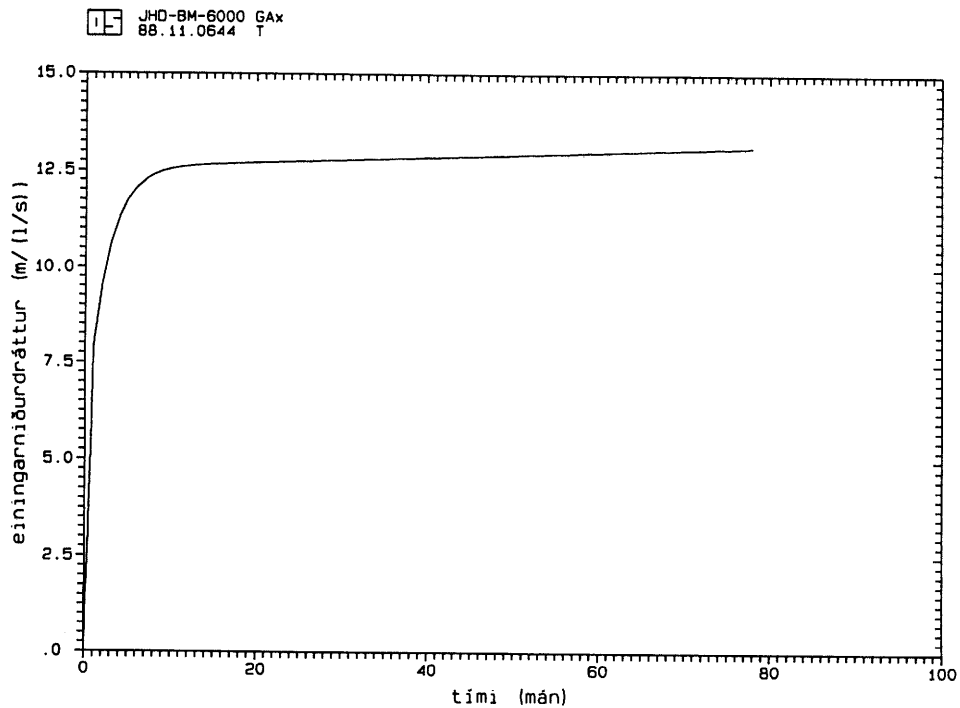


Mynd 13. Dæmi um þriggja geyma þjappað lfkön (Guðni Axelsson o.fl., 1988).

Þjappaða lfkanið var notað til að reikna einingarniðurdrátt kerfisins (Guðni Axelsson o.fl., 1988). Einingarniðurdráttur sýnir viðbrögð jarðhitakerfis við stöðugri vinnslu á einum lítra á sekúndu. Mynd 15 sýnir niðurstöður reikninganna. Þar sést að einingarniðurdrátturinn vex hratt fyrstu vikurnar, en nær síðan allt að því jafnvægi. Lág leiðni og lítil rýmd jarðhitakerfisins næst vinnsluholunum veldur snöggum viðbrögðum í upphafi. Jafnvægi næst síðan í vatnsborði sökum tengsla efri hluta jarðhitakerfisins á Botni við öfluga jarðhitakerfið og grunnvatnskerfið. Þrýstingur í öfluga kerfinu lækkar óverulega meðan þrýstingur fellur verulega í vinnsluholunum á Botni. Eftir tæplega eins árs vinnslu næst svo jafnvægi á milli dælingar og vatnsstreymis úr öfluga kerfinu.

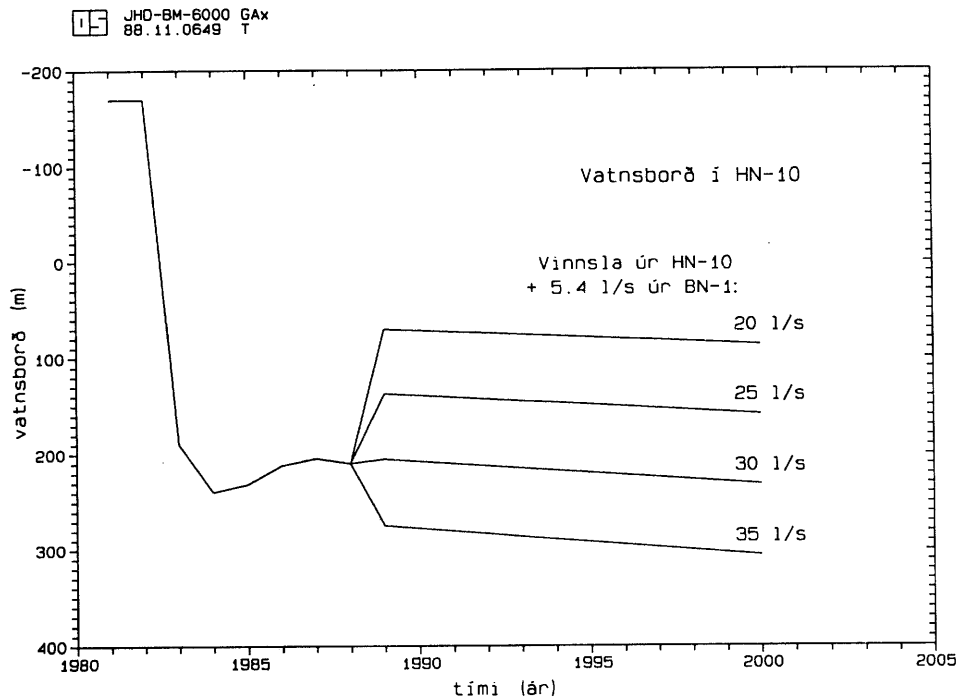


Mynd 14. Mælt og reiknað vatnsborð á Botni 1982-1988 (Guðni Axelsson o.fl, 1988). Reiknaða vatnsborðið fékkst með notkun þjappaðs geymislíkans.



Mynd 15. Einingarniðurdráttur HN-10 samkvæmt þjöppuðu geymislíkani (Guðni Axelsson o.fl., 1988).

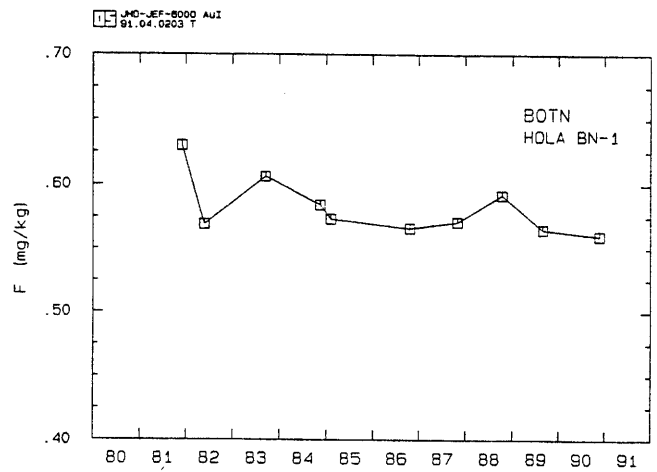
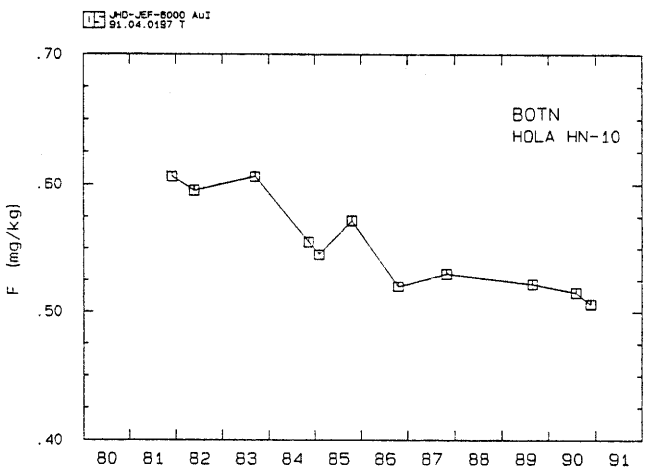
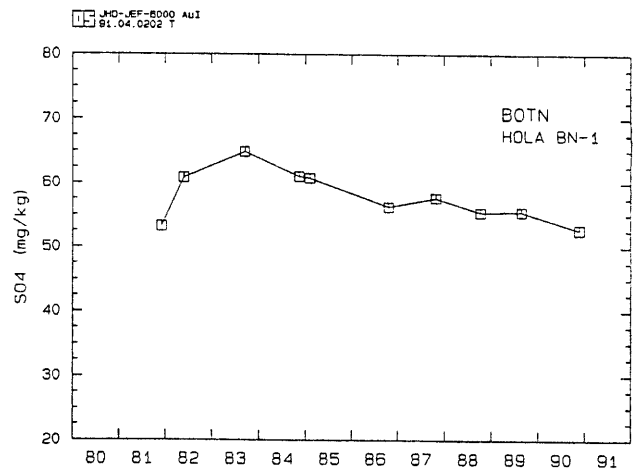
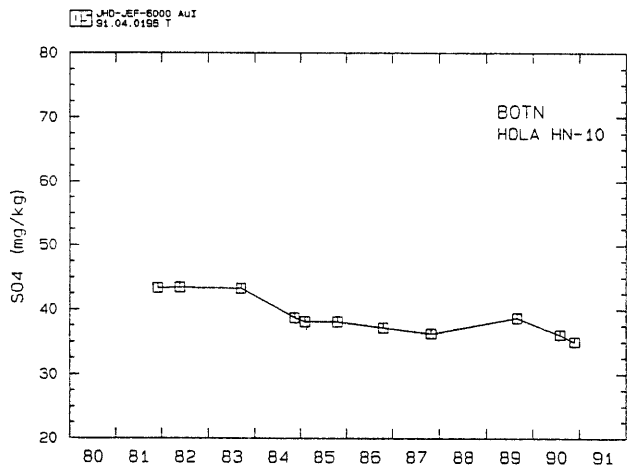
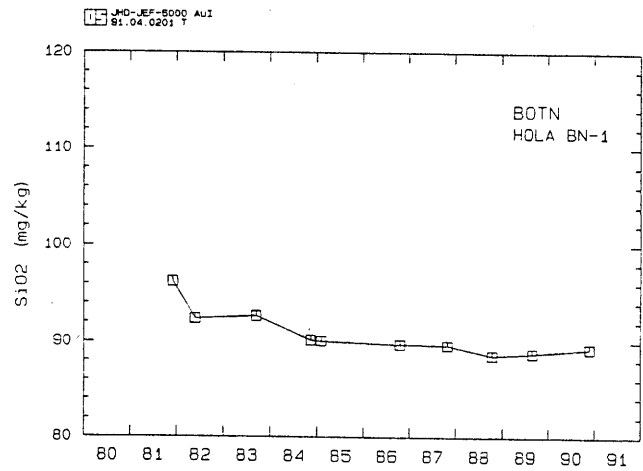
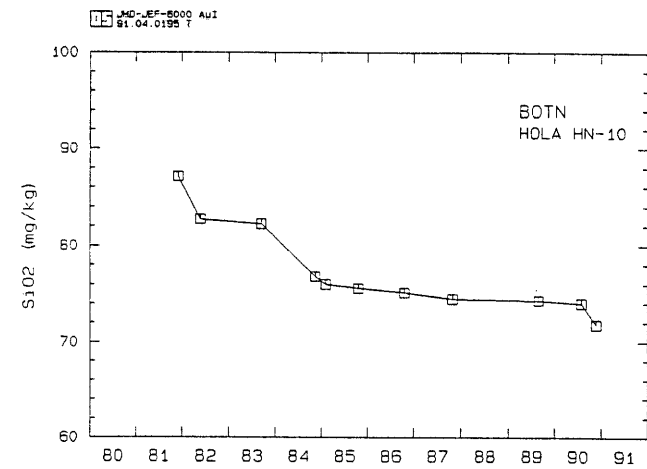
Þjappaða líkanið fyrir Botn var að lokum notað til að spá fyrir um vatnsborð á Botnssvæðinu fram til aldamóta við mismikla vinnslu (Guðni Axelsson o.fl., 1988). Niðurstöðurnar eru birtar á mynd 16. Samkvæmt spánum virðist virðist ekki hægt að dæla að jafnaði meiru en 29 l/s miðað við núverandi borholur og dælubúnað.



Mynd 16. Vatnsborðsspá fyrir HN-10 gerð með þjöppuðu líkani (Guðni Axelsson o.fl., 1988).

2.8 Efnainnihald í vinnsluholum

Mælingar á magni uppleystra efna í vatni úr holum BN-1 og HN-10 hafa verið gerðar árlega síðan 1981 (Hrefna Kristmannsdóttir, 1985; Ólafur G. Flóvenz o.fl., 1991b). Á myndum 17 og 18 eru sýndar breytingar í styrk kísils, sulfats og flúoríðs í vatni úr holunum tveimur. Þar sést hægfara lækkun í styrk efnanna, sérstaklega þó í holu HN-10. Breytingarnar benda til innrennslis á kaldara vatni í jarðhitakerfið og gæti hlutur kaldara vatns verið á bilinu 5 -10 % (Ólafur G. Flóvenz o.fl., 1990). Þetta innrennsli skýrir lækkaðan vinnsluhita holnanna (myndir 11 og 12).



Mynd 17. Styrkur nokkurra efna í vatni úr HN-10 (Ólafur G. Flóvenz o.fl., 1991b).

Mynd 18. Styrkur nokkurra efna í vatni úr BN-1 (Ólafur G. Flóvenz o.fl., 1991b).

3. INNRI GERÐ OG UPPHAFSÁSTAND JARÐHITAKERFISINS

Þegar gera skal hermireikninga fyrir jarðhitakerfi, þarf að vera til staðar einhvers konar *hugmyndalíkan* af kerfinu sem lýsir ástandi þess og innri gerð. Niðurstöður rannsókna síðustu tveggja áratuga, sem lýst er í kafla 2, eru grundvöllur slíks hugmyndalíkans fyrir jarðhitakerfið á Botni. Hér verður gerð grein fyrir nánari útfærslu hugmyndalíkansins. Fjallað verður um núverandi hugmyndir um lektardreifingu í kerfinu og rennslisleiðir vatns í því. Fjallað verður um útmörk jarðhitakerfisins ofan 1000 m dýpis og tengsl þess við grunnvatnskerfið ofan þess og öfluga jarðhitakerfið. Einnig er lýst mati á upphafshita bergsins við borholur eins og hann er áætlaður út frá hitamælingum. Þá er lýst mati á þrýstingi á Botnssvæðinu eins og hann var áður en boranir hófust.

3.1 Lekt og rennslisleiðir vatns í jarðhitakerfinu

Rannsóknir á Botnssvæðinu hafa smátt og smátt veitt skýrari mynd af legu mögulegra vatnsleiðara í jarðhitakerfinu og eiginleikum þeirra (kafla 2). Þær hafa leitt til þess að sett hefur verið fram kenning um lekt í jarðhitakerfinu í efstu 500-1000 m jarðlagastaflans. Kenningin gerir ráð fyrir góðri lekt í þröngri lóðréttu rennu með norðaustlæga stefnu. Vatnsæðar holna HN-10 og BN-1 tengjast þessari rennu. Holur BÝ-3 og BÝ-4 eru einnig innan rennunnar, hola BÝ-2 virðist vera í jaðri hennar, en hola HÝ-12 er örugglega nokkuð langt utan hennar (Ólafur G. Flóvenz o.fl., 1991a). Vegna lítils rúmmáls rennunnar hefur ekki verið hægt að meta lekt hennar. Utan við hana er lektin lág, um eða undir $2 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ (2 millidarcy).

Vatnsborðsbreytingar í holu HÝ-12 benda til þess að sprungur sem liggja til norðurs frá Botni séu að öllu jöfnu lokaðar vegna mikils niðurdráttar, en opnast er vatnsborð hækkar á svæðinu (Ólafur G. Flóvenz o.fl., 1991a). Erfitt er að gera ráð fyrir slíkri ólínulegri hegðan í hermireikningunum. Verður því gert ráð fyrir mun lægri lekt í N-S stefnu þvert á rennuna (misleitni í lekt) auk lágrar lektar norðan hennar.

3.2 Takmörk jarðhitakerfisins og tengsl við önnur vatnskerfi

Lárétt áhrif vinnslu á Botni ná stutt frá vinnslusvæðinu og hefur hvorki orðið vart í borholum við Hrafnagilsskóla né á Syðra-Laugalandi. Auk þess hafa hvorki Stokkahláðalaug né Grýtulaug breyst merkjanlega (Ólafur G. Flóvenz o.fl., 1989). Einnig sýna niðurstöður hermireikninga með þjöppuðu líkani, að efri hluti jarðhitakerfisins á Botni er lítill (Guðni Axelsson o.fl. 1988). Því er talið að ofan 1000-1500 m dýpis afmarkist jarðhitakerfið á Botni til allra átta. Vætanlega er þar um að kenna lágri lekt er fjær dregur NA-lægu rennuni. Að vestan er jarðhitakerfið hins vegar talið afmarkast af misgengi eða þéttum skilum nærri holu BÝ-4 (Ólafur G. Flóvenz o.fl., 1989, 1991a).

Þrátt fyrir ofangreind takmörk í láréttu útbreiðslu jarðhitakerfisins er Botnssvæðið ágætis vatnsvinnslusvæði sökum góðra tengsla þess við tvö vatnsgæf kerfi (kaflar 2.5 og 2.7). Annað þeirra er háþrýst og öflugt jarðhitakerfi, en hitt er kalda grunnvatnskerfið í dalbotninum. Hér verður gengið út frá því að öflugra jarðhitakerfið sé að finna neðan 1500 m dýpis. Þó er enn ekki hægt að útiloka að það finnist á minna dýpi. Gengið verður út frá því að tengsl við kalda grunnvatnskerfið séu um þær rásir sem heitt vatn streymdi eftir upp til yfirborðs áður en vinnsla hófst (t.d. um Botnslaug). Í því sambandi má nefna að vatnsborðsbreytingar í holu BÝ-2 benda til nálægðar við einhverja slíka rás upp í grunnvatnskerfið (Ólafur G. Flóvenz o.fl., 1991a).

3.3 Ákvörðun berghita

Einn af þeim þáttum sem liggja til grundvallar hugmyndalífkani að jarðhitakerfi er vitneskja um hitadreifingu í því. Hún er fengin með borun holna og hitamælingum í þeim. Sá háttur var hafður á við mat á berghita í holum á Botnssvæðinu að fyrst voru allar hitamælingar í sömu holunni teiknaðar upp. Gætt var að hvort truflanir af völdum borunar eða millirennslis væru í mælingunum. Ef svo reyndist ekki mátti nota nýjustu hitamælinguna í holunni sem berghita. Holur BÝ-2, BÝ-3, BÝ-4 og HÝ-12 uppfylla allar þetta skilyrði. Ef bortruflanir og millirennslis voru hins vegar áberandi í hitamælingum var reynt að meta berghita á nokkrum stöðum í holunni. Slík dýpi þekkt hita verða kölluð hér hornpunktar berghita. Slíkir hornpunktar finnast oft við holubotn og eins við æðar. Þessi aðferð var viðhöfð í holum BN-1 og HN-10. Þegar nokkrir hornpunktar berghita voru þekktir var mjúkur ferill brúaður gegnum þá með tölvuforriti. Tafla 3 gefur yfirlit um hvernig berghiti holna á Botnssvæðinu var metinn. Myndir 19 og 20 sýna berghitann í holunum sex.

Lítið er vitað um hitaástand jarðhitakerfisins neðan 1000 m dýpis. Til dæmis er engin ótrufluð hitamæling tiltæk úr holu BN-1 neðan þess dýpis. Þó hefur verið áætlað að æðin á 1756 m sé um 100 °C heit og skorðast berghitaferillinn af því hitastigi á 1500 m dýpi (tafla 3). Þar sem hugmyndalífkanið um jarðhitakerfið byggir á því að öfluga vatnskerfið sé staðsett undir núverandi borsvæði, verður hiti um og yfir 100 °C einkennandi fyrir það kerfi í líkanreikningunum.

Í hugmyndalífkaninu er gengið út frá því að hiti jarðhitakerfisins lækki er frá dregur NV-SA rennuni og nálgist smátt og smátt þann hitastigul sem talinn er ríkja á Eyjafjarðarsvæðinu, 60°C/km. Þó er ekki vitað hversu hratt það gerist og einnig trufla önnur jarðhitasvæði í nágrenninu þessa mynd. Því verður í hermireikningunum gert ráð fyrir nokkru lægri hita í ytri hlutum líkansins.

TAFLA 3. Hornpunktar og mældagar berghita í holum á Botnssvæðinu.

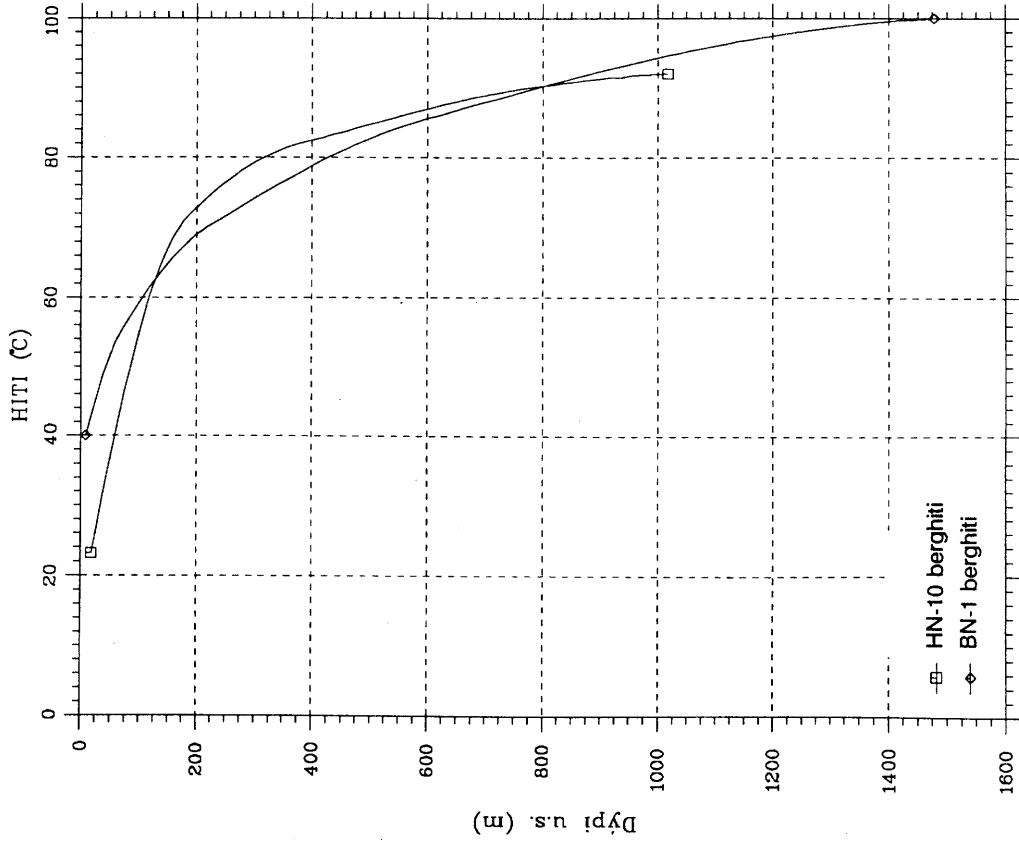
Hola	Hornpunktar (dýpi,hiti) og mældagar berghita Dýpi í metrum og hiti í °C.
BN-1	(0,5),(30,40),(90,55),(240,70),(600,85),(1500,100)
BÝ-2	(0,5) og hitamæling frá 9. janúar 1990
BÝ-3	(0,5) og hitamæling frá 15. júní 1990
BÝ-4	(0,5) og hitamæling frá 16. júní 1990
HN-10	(0,5),(200,71),(400,82),(800,90),(1000,92)
HÝ-12	(0,5) og hitamæling frá 9. janúar 1990 neðan 120 m

3.4 Ákvörðun upphafsþrýstings

Mjög litlar upplýsingar eru til um þrýsting í jarðhitakerfinu við Botn áður en vinnsla tók að raska þrýstiaástandi svæðisins. Er aðallega hægt að byggja á þrýstimælingum sem gerðar voru meðan holur BN-1 og HN-10 voru í borun.

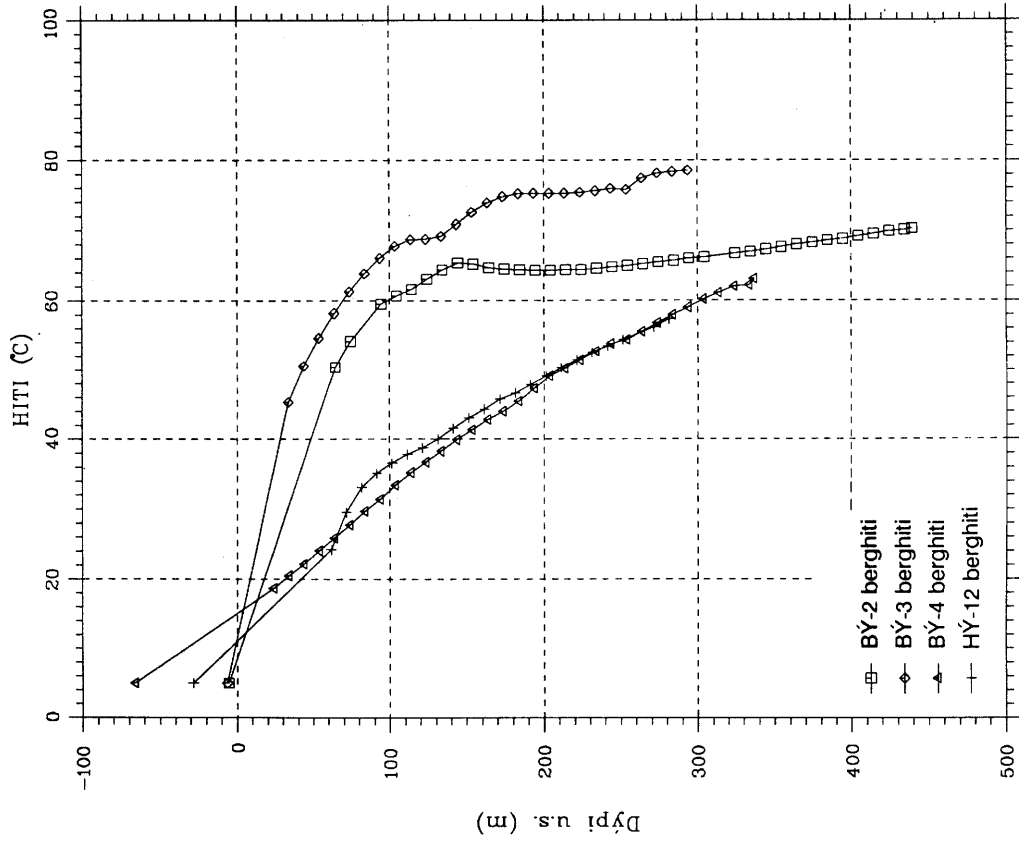
Hola HN-10 er fódruð í 456 m dýpi. Holunni var lokað þann 27. janúar 1981 og stóð hún að mestu lokuð þar til rennslis var hleypt á safnæð að Laugalandi hinn 24. október 1981. Holutoppsþrýstingur fór hæst í 18,1 bar-y. Út frá þrýstigögnunum mátti áætla að lokunarþrýstingur holunnar væri þá 20,9 bör-y (Þorsteinn Thorsteinsson, 1981).

JHD FF 6000 GrB
91.04.0145 T



Mynd 20. Áætlaður bergthiti holna HN-10 og BN-1.

JHD FF 6000 GrB
91.04.0144 T



Mynd 19. Áætlaður bergthiti holna BÝ-2, BÝ-3, BÝ-4 og HÝ-12.

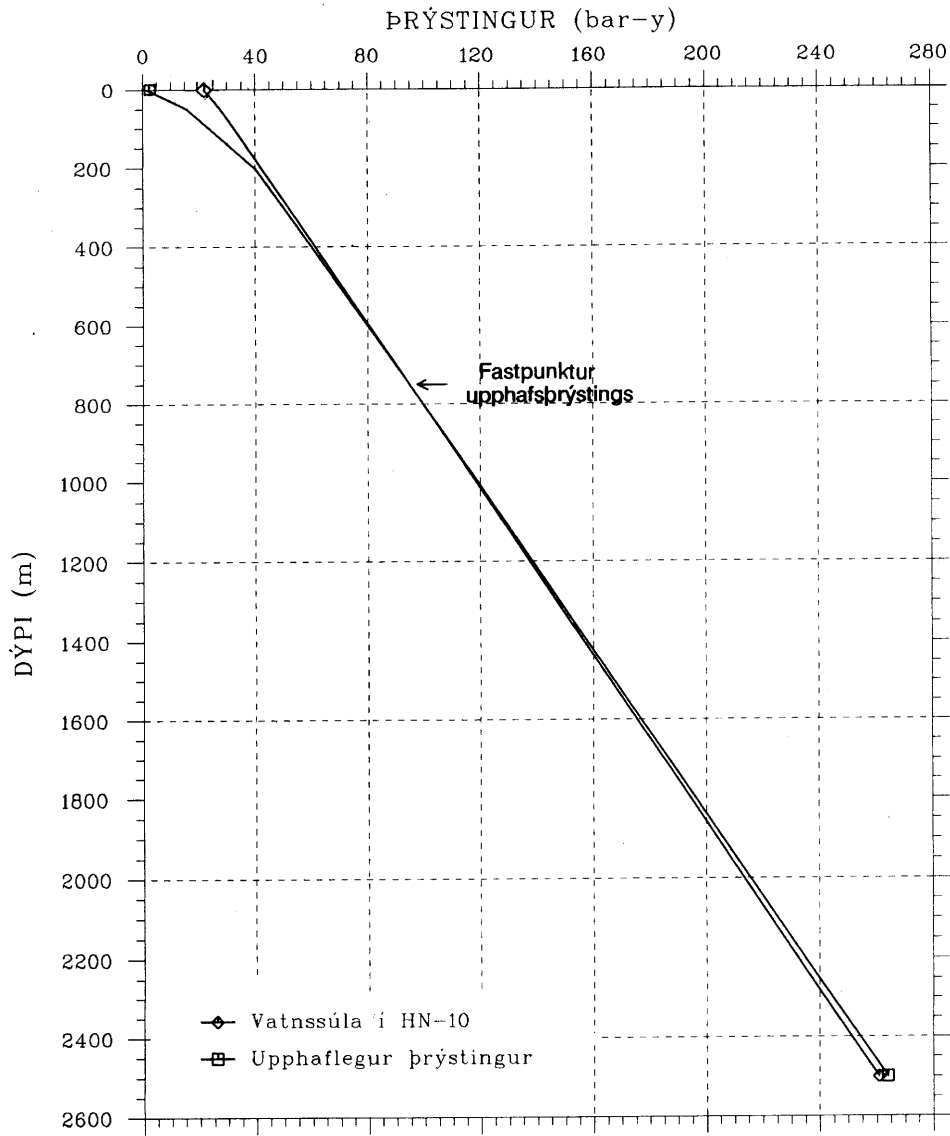
Hola BN-1 er aðeins fódruð í 28 m dýpi. Ekki var talið þorandi að loka holunni og áætla lokunarþrýsting hennar með sömu aðferð og í holu HN-10. Því var brugðið á það ráð að loka holunni með pakkara á 684 m dýpi og mæla þrýstingshækkun holunnar við lokun á efri enda borstrengsins. Var ótruflaður þrýstingur neðri hluta holu BN-1 síðan metinn sem 22,1 bar (Ólafur G. Flóvenz o.fl. 1989). Það er um 1,2 börum hærri þrýstingur en áætlað var fyrir holu HN-10.

Vatnsmestu æðar holu HN-10 eru í kringum 500 m og á 750-870 m dýpi. Neðri æðarnar eru heldur vatnsmeiri. Þrýstingur borholu stjórnast af vatnsmestu æð hennar. Meðan á upphitnun holu stendur helst þrýstingur stöðugur við æðina, en breytist ofan og neðan við. Mælingar skortir til að hægt sé að meta dýpið á slíkan fastpunkt þrýstings í holu HN-10. Líklega er hann við æðina á 750-870 m dýpi en gæti þó verið hliðraður upp á við sökum æðanna á u.þ.b. 500 m dýpi. Dýpið 750 m u.s. er því valið hér sem fastpunktur upphafsþrýstings holu HN-10. Þrýstingur á því dýpi er metinn út frá áætluðum lokunarþrýstingi holunnar og þyngd vatnssúlu sem fylgir berghitagildunum sem sýnd eru á mynd 20. Fæst þá þrýstigildið 94,9 bör-y á 750 m. Meginæð holu BN-1 er á um 1750 m dýpi og er hún með a.m.k. 1,5 bara hærri lokunarþrýsting en æðar holu HN-10. Þessi yfirþrýstingur jafngildir því að þrýstingur á 1750 m dýpi sé a.m.k. 1,5 bari hærri en þrýstingur vatnssúlu sem væri framlengd frá 750 m dýpi í holu HN-10 niður á 1750 m. Auðvelt er að reikna þyngd slíkrar súlu út frá berghitaferlunum á mynd 20 og fæst þá að ótruflaður þrýstingur á 1750 m hafi verið um eða yfir 191,3 bör.

Þrýstingur við yfirborð er enginn og því augljóst að jarðlögin næst yfirborði fella þrýsting verulega frá því sem var á 500 m dýpi í holu HN-10. Holur BÝ-2, BÝ-3 og BÝ-4 eru með vatnsæðar á 100-260 m dýpi og eru æðar þessar mjög næmar fyrir þrýstisveiflum djúpt í jarðhitakerfinu (sjá kafla 2.5). Það þýðir að yfirþrýstingur jarðhitakerfisins hefur náð upp að þessum æðum. Í hugmyndalíkaninu verður því gert ráð fyrir torleku þakbergi yfir jarðhitakerfinu, sem er einungis 100 m þykkt.

Mynd 21 sýnir að lokum ótruflaðan þrýsting jarðhitakerfisins að Botni. Sýndir eru tveir þrýstiferlar. Annars vegar er ferill sem hefst í 21,9 bari við sjávarmál og fylgir síðan þunga vatnssúlu, með áætlaðan berghita holna BN-1 og HN-10, allt niður í 2500 m dýpi. Hins vegar er sýndur ferill sem er í 0 börum við yfirborð, rís hratt að 100 m dýpi og fylgir síðan fyrri ferlinum undir örllitlu horni þannig að skurðpunktur ferlanna verður í 750 m u.s. Þrýstingur á 1750 m u.s. er síðan 1,5 bari hærri en vatnssúlunnar. Þessi ferill er talinn sýna ótruflaðan þrýsting við Botn.

JHD FF 6000 GrB
91.04.0146 T



Mynd 21. Þrýstingur á Botnssvæði. Dýpi er í metrum undir sjávarmáli.

4. REIKNITÆKIÐ PT

Reiknitækið sem notað var við hermireikningana á Botnssvæðinu er forrit sem heitir PT. Það er skrifað af Guðmundi S. Böðvarssyni sem hluti af doktorsverkefni hans við Kaliforníuháskóla (Guðmundur S. Böðvarsson, 1982). Stafirnir P og T standa fyrir *Pressure* (þrýsting) og *Temperature* (hita) og lýsa því sem forritið gerir, þ.e. að herma þrýsting og hita. Forritið leysir jöfnur fyrir flæði orku og vatns um fjölda smákubba, sem notandi hagræðir og tengir saman að eigin vild. Forritið er í notkun víða um heim og þykir þrýðistæki til hermunar á jarðhitakerfum sem eru eingöngu í vatnsfasa. Forritið PT var fyrst notað héraendis árið 1987 til mats á jarðhitasvæðinu á Glerárdal (Guðni Axelsson og Helga Tulinius, 1988).

Forritið PT leysir grunnjöfnur orku- og vatnsflæðis í vatnsmettuðu og gropnu bergi. Grunnjöfnuna fyrir flæði vatns um einn kubb líkansins má rita sem:

$$\int_V \frac{\partial}{\partial t} \left[(\beta_t P - \alpha_t T) \rho_v \right] dV = - \int_A \rho_v \vec{v}_d \cdot \vec{n} dA + \int_V G_v dV \quad (1)$$

þar sem V táknar rúmmál kubbsins sem er í skoðun, A táknar yfirborð kubbsins, t er tími (sek), T er meðalhiti kubbsins ($^{\circ}\text{C}$), P er þrýstingur í kubbum (Pa), β_t er heildarþjappanleiki kubbsins (Pa^{-1}), α_t lýsir hitaþenslu í kubbum ($^{\circ}\text{C}^{-1}$), ρ_v er eðlisþyngd vatnsins í kubbum, ϕ er poruhluti kubbsins, \vec{n} er einingavektor sem er hornréttur á yfirborðið sem skoða á flæði um, \vec{v}_d er Darcy hraði vatnsins um yfirborðið (m/s) og G_v táknar styrk vatnsuppsprettu/niðurfalls í kubbum ($\text{kg/m}^3\text{s}$). Fyrsti liður jöfnunnar lýsir því hvernig massi vatns safnast/tapast úr kubbum og verður það að jafngilda heildarrennslinu um allar hliðar hans auk þess massa sem dælt er í/úr kubbum.

Samsvarandi jafna fyrir orkujafnvægi í einhverjum kubb líkansins er:

$$\int_V \frac{\partial}{\partial t} \left[(\rho c)_{\text{kubbur}} T \right] dV = \int_A \lambda \nabla T \cdot \vec{n} da - \int_A \rho_v c_v (T_y - T) \vec{v}_d \cdot \vec{n} dA + \int_V G_h dV \quad (2)$$

þar sem $(\rho c)_{\text{kubbur}}$ lýsir orkurýmd kubbsins ($\text{J/m}^3\text{C}$), λ er varmaleiðni kubbsins ($\text{J/ms}^{\circ}\text{C}$), c_v er varmarýmd vatnsins ($\text{J/kg}^{\circ}\text{C}$), T_y er hiti við yfirborð kubbsins ($^{\circ}\text{C}$) og G_h er styrkur varmauppsprettu/niðurfalls í kubbum ($\text{J/m}^3\text{s}$). Fyrsti liðurinn lýsir því hvernig orka safnast/tapast til vatnsins og bergsins í kubbum og verður það að jafngilda seinni þremur liðunum, orku sem berst með varmaleiðni til kubbsins, orku sem berst með vatnsflæði til kubbsins og orku sem myndast í kubbum t.d. vegna efnahvarfa.

Jöfnur 1 og 2 tengjast um hita og þrýsting kubbsins og stærðir sem eru háðar þessum tveimur eins og t.d. eðlisþyngd vatnsins. Forritið gerir ráð fyrir að rennsli vatnsins sé lýst með Darcy lögmáli, þ.e.

$$\rho_v \vec{v}_d = \frac{k}{v} (\nabla P - \rho \vec{g}) \quad (3)$$

þar sem k er raunlekt bergsins (m^2), v er eðlisþyngja vatnsins (m^2/s) og \vec{g} er þyngdarhröðun jarðar.

Liðirnir β_t og α_t lýsa heildarþjappanleika og varmaþenslu kubba í líkaninu, sem samanstanda af bergi og vatni. Í forritinu PT eru stærðirnar reiknaðar sem (Guðmundur S. Böðvarsson, 1982):

$$\beta_{PT} = (\beta_v + \beta_b) \phi \quad (4)$$

og

$$\alpha_{PT} = (\alpha_v + \alpha_b) \phi \quad (5)$$

þar sem undirtáknin v og b standa fyrir vatn og berg. Heildarþjappanleika kubbsins β_t er betur lýst sem:

$$\beta_t = \phi \beta_v + (1-\phi) \beta_b \quad (6)$$

Forritið PT les inn hvorutveggja, β_v og β_b . Til að þjappanleikinn samkvæmt jöfnu 4 verði í samræmi við jöfnu 6, er bergþjappanleikanum hagrætt í innlestri sem:

$$\hat{\beta}_b = \frac{(1-\phi)}{\phi} \beta_b \quad (7)$$

þar sem $\hat{\beta}_b$ er leiðréttur þjappanleiki bergsins. Tilsvarandi leiðrétting er ekki gerð fyrir α_{PT} , því áhrif hitpenslu eru oftast lítil í reikningunum.

Ofangreindar jöfnur gera ekki ráð fyrir lækkun frjáls vatnsborðs í viðkomandi kubbi. Í kubbum sem eru í efstu hlutum líkans af jarðhitakerfi þarf þó að gera ráð fyrir vatnsrýmd sem stjórnast af breytingum á frjálsu vatnsborði. Rýmd af völdum frjáls vatnsborðs er að öllu jöfnu um tveimur stærðargráðum hærrí en rýmd af völdum þjappanleika. Ekki er gert ráð fyrir rýmd af völdum frjáls vatnsborðs í PT, en fara má í kringum þetta með því að skilgreina

$$\hat{\beta}_b = \frac{1}{h \rho_v g} \quad (8)$$

þar sem $\hat{\beta}_b$ er leiðréttur þjappanleiki bergsins eins og áður og h er þykkt þess kubbs sem um er að ræða.

Orkurýmd sérhvers kubbs líkansins er lýst nánar sem:

$$(\rho c)_{\text{kubbur}} = \phi \rho_v c_v + (1-\phi) \rho_b c_b \quad (9)$$

þar sem c_v er varmarýmd vatnsins í kubbum ($J/kg^\circ C$), c_b er varmarýmd bergsins og ρ_b er eðlisþyngd bergsins í kubbum.

Jöfnur 1-9 lýsa í grófum dráttum þeim reikningum sem PT þarf að gera fyrir sérhvern kubb líkans, sem skoða á hita og þrýsting í. Inntaksskrá forritsins lýsir eiginleikum allra kubba líkansins, stærðum þeirra og yfirborðsflatarmáli, fjarlægðum milli kubba, upphafshita og þrýstingi hvers kubbs, bergeiginleikum o.s.frv. Keyrsla PT hefst með því að inntaksskráin er lesin, upphafsástand líkansins stillt í öllum kubbum þess og síðan reiknar forritið hvernig staða líkansins (þrýstingur og hiti) breytist eftir að örfáar sekúndur hafa liðið í tíma. Við reikningana þarf forritið að nota ítrekanir þar sem jöfnur 1 og 2 eru ólínulegar í hita og þrýstingi. Er það vegna þess að eiginleikar vatns eru mjög háðir hita og þrýstingi. Eftir að nýtt ástand líkansins er fundið stækkar forritið næsta tímaskref, finnur lausn fyrir það og þannig koll af kolli áfram í tíma. Hægt er að skilgreina breytilegt innrennsli og útrennsli úr kubbum líkansins meðan á keyrslunni stendur, t.d. vegna breytilegrar dælingar úr holu.

5. HERMIREIKNINGAR

Í þessum kafla er lýst þrívíðu kubbalkani sem hermir tiltæk gögn um þrýsting, hita, vinnslu og vatnsborð á Botnssvæðinu. Ástand líkansins og viðbrögð við vinnslu voru reiknuð með forritinu PT. Kubbalkanið byggir á þremur ólíkum þáttum reikninga. Í þeim fyrsta voru lekt og innrennsli í líkanið stillt af uns þökkalegt samræmi fékkst á milli hita og þrýstings í líkaninu annars vegar og hins vegar áætlana á hita og þrýstingi í jarðhitakerfinu áður en boranir hófust. Í öðrum þætti reikninganna var skoðað hvernig hiti og þrýstingur í holu HN-10 breyttist með því að gefa kubbalkaninu forskrift um fyrstu 8 ár vinnslusögu holunnar. Þegar samræmi var fengið milli mælds og reiknaðs vinnsluhita og vatnsborðs holu HN-10, hófst þriðji þáttur reikninganna. Hann fólst í hermun vatnsborðsbreytinga sem urðu í holum á svæðinu við stöðvun vinnslu úr HN-10 sumarið 1990 og fram til áramóta 1990/1991.

Skýrsluhöfundar settu sér það markmið í upphafi reikninganna að eitt og sama kubbalkanið skyldi notað í öllum þremur þáttum reikninganna. Slíkt samræmi gerir líkanið mun trúverðugra en ella auk þess að þannig má tryggja að líkanið sé í stöðugu ástandi er vinnsla hefst úr því. Jafnframt eykst spágildi reikninga sem líkanið skilar um framtíðarástand Botnssvæðisins. Þessi krafa um samræmi varð til þess að oftsinnis þurfti að endurskoða fyrri tvo þætti reikninganna eftir að sá þriðji fékkst góður. Reikningarnir urðu fyrir vikið tímafrekir. Í töflu 4 er gefið yfirlit um hversu oft þurfti að breyta líkanstuðlum í hverjum þætti reikninganna og hve langan tíma hver lík-ankeyrsla tók í CPU mínútum á nýjum HP-720 tölvum Orkustofnunar. Þurfti alls um 32 CPU klukkustundir til reikninganna.

TAFLA 4. Yfirlit um gang hermireikninga fyrir Botnssvæðinu.

Reikniþáttur	Fjöldi breytinga	Reiknitími á hverja keyrslu (CPU mínútur)	Reiknitími alls (CPU klukkustundir)
Hermun upphafsástands	130	5	11
Hermun vinnslusögu	90	12	18
Hermun vinnslustöðvunar	80	2½	3
Alls	300		32

5.1 Kubbalkani af Botnssvæðinu

Myndir 22-29 sýna byggingu kubbalkansins af Botnssvæðinu, jafnt staðsetningu í landi, einstök lög þess sem útlit í þrívídd. Ofan 2000 m dýpis er líkanið gert úr 10 km³ af poróttu bergi, sem síðan tengist víðáttumiklu grunnvatnskerfi og öfluga jarðhitakerfinu neðan 1500 - 2000 m. Kubbalkanið samanstendur af 8 láréttum lögum sem staflað er hverju ofan á annað. Í lögnum 8 eru 429 kubbar af mismunandi stærð og gerð. Í inntaksskrá PT-kubbalkansins er rúmmáli og berggerð hvers kubbs lýst, vegalengdum frá miðju kubbs til allra yfirborðsflata hans svo og flatarmáli hvers yfirborðsflatar. Þá er sérhverri tengingu milli kubba lýst. Samtals urðu þær 1361 að tölu. Kubbum líkansins voru tileinkaðir 10 bergeiginleikar. Er yfirlit gefið um þá í töflu 5. Auk bergeiginleikanna í töflu 5 var reiknað með að eðlismassi bergs (án pora) væri 2900 kg/m³, þjappanleiki bergs 2x10⁻¹¹Pa⁻¹ og þjappanleiki vatns 5x10⁻¹⁰Pa⁻¹. Í inntaksskrá forritsins PT var bergþjappanleikinn umreiknaður með jöfnu 7 og gert var ráð fyrir rýmd af völdum frjáls vatnsborðs í efstu tveimur lögum líkansins (jafna 8).

TAFLA 5. Yfirlit um bergeiginleika í kubballíkani.

Heiti	Varmarýmd bergs (J/kg°C)	Varmaleiðni (W/m°C)	Raunlekt ($10^{-15}m^2$)	Misleitni ¹⁾ varmaleiðni	Misleitni ¹⁾ lektar	Poruhluti (%)
Grunnvatn	∞	100	50000	1,0	1,0	20
Þak	850	2,1	0,01	1,0	1,0	5
Strompar	85	25	14	1,0	1,0	10
Veggur	850	2,1	0,01	1,0	1,0	5
Renna	850	21	180	0,1	0,0002	10
Hola 10	850	21	800	0,1	0,0002	10
Gat	850	2,5	40	1,0	0,1	1
Rönd	850	2,1	0,5	1,0	1,0	10
Kjarni	850	2,1	2	1,0	0,2	8
Stemmir	850	2,1	0,1	1,0	1,0	5
Djúp	850	2,1	5	1,0	1,0	20

¹⁾ Í reiknilíknaninu hafa tengingar milli kubba stefnurnar X og Y. Stefna X er eftir langhlið líkansins en Y eftir skammhlið (mynd 22). Varmaleiðni og lekt í töflu 5 gilda þá fyrir tengingar í stefnu X-áss meðan tilsvarandi gildi fyrir tengingar í stefnu Y-áss eru margfölduð með misleitnistuðlunum í töflunni.

Fyrsta skrefið í gerð kubballíkansins af Botnssvæðinu fólst í afmörkun á láréttri stærð þess. Mynd 22 sýnir hvernig útlínur líkansins voru skilgreindar í landinu. Flatarmál þess er 5 km². Myndin sýnir hvernig jaðrar líkansins snerta þau svæði þar sem vinnslan á Botni hefur ekki haft mælanleg áhrif, þ.e. á Hrafnagili, milli holu BÝ-2 og Syðra-Laugalands, milli Botnslaugar og Grýtulaugar og við Stokkahláðalaug (kafla 3.2). Lög 1 - 6 í líknaninu hafa þessa afmörkun í láréttri útbreiðslu og eru hliðar þeirra hafðar lokaðir í reikningunum (mynd 22). Það þýðir að um þær fer hvorki vatns- né varmastraumur. Hins vegar eru neðstu og efstu lögin mun stærri og verður gerð grein fyrir þeim hér á eftir.

Forritið PT reiknar hita og þrýsting í miðju hvers kubbs í lögunum 8 eins og lýst er í kafla 4. Lög- unum er nánar lýst sem:

Lag 0: hermir kalda grunnvatnskerfið á dalbotni Eyjafjarðar. Lagið er 10 m þykkt og er miðja þess 5 m yfir sjávarmáli. Því er skipt upp í 34 kubba. Kubbaskipting lagsins og númer hvers kubbs eru sýnd á mynd 23. Allir kubbar lagsins hafa bergeiginleika *grunnvatns* (tafla 5). Þeir hafa mikið rúmmál, háa lekt og mikla varmarýmd. Það er gert til að hiti og þrýstingur lagsins haldist stöðugur á öllum tímum, líkt og raunin er í köldu grunnvatnskerfi dalbotnsins.

Lag 1: hermir þetta þakbergið sem auðsýnt er að hvílir ofan á jarðhitakerfinu (kafla 3.4). Þykkt þess er 100 m og miðja lagsins er á 50 m dýpi undir sjávarmáli. Mynd 24 sýnir hvernig laginu er skipt upp í 88 kubba. Flestir kubbanna hafa bergeiginleika *þaks*. Einkenni þess er lág lekt. Undantekning eru kubbar númer 135, 183, 184 og 188. Í þeim er góð lekt og um þá rennur mestallur vökvi sem fer milli grunnvatnsins og jarðhitakerfisins. Þessum kubbum eru tileinkaðir bergeiginleikar *strompa* (tafla 5).

Lög 2-4: innihalda hvert um sig 88 kubba og eru, ásamt lagi 1, sá hluti líkansins þar sem mestar upplýsingar liggja fyrir um hita og vatnsborð í holum. Fyrir vikið er kubballíkanið flók-

ið í þessum lögum og eiginleikar jarðlaga einna nákvæmast skilgreindir á þessu dýptarbil. Lögunum er skipt þannig að lag 2 nær frá 100 í 300 m u.s., lag 3 frá 300 í 500 m u.s. og lag 4 frá 500 í 1000 m u.s. Þessi dýptarbil voru valin með það í huga að miðja laganna félli vel að vatnsæðum sem flestra holna. Mynd 25 sýnir hvernig lögunum þremur er skipt í kubba með ólíka bergeiginleika. Öll eru lögin eins að gerð, utan að í lögum 3 og 4, næst holu 10, hafa kubbarir eiginleika *holu 10*, en í lagi 2 eiginleika rennu. Ástæður þessa verða raktar síðar.

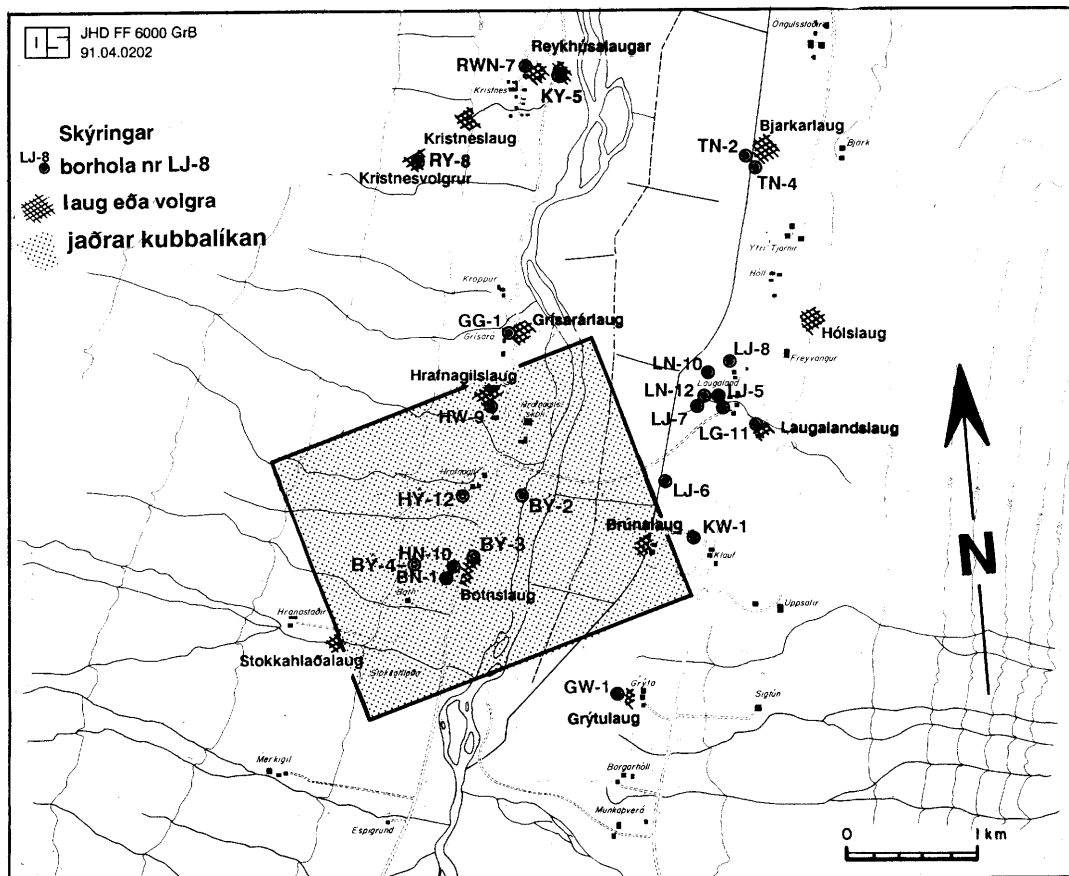
Dreifing bergeiginleika í lögum 2-4 byggir bæði á niðurstöðum fyrri athugana (kafli 3.1) og á reikniniðurstöðum sem fengust eftir því sem gerð kubballkansins miðaði áfram. Vestast í líkaninu fá kubbarir eiginleika *veggs*. Hann einkennist af lágri lekt og litlu umrennsli vatns (kafli 3.2). Í norðri, austri og suðri er líkanið girt af með bergeiginleikanum *rönd*. Röndin hefur lága lekt sem hindrar að þrýstibreytingar á Botnssvæðinu nái til vinnslusvæðanna í kring. Innan við röndina og vegginn kemur síðan nokkur fjöldi kubba sem fá bergeiginleika *kjarna*. Þetta svæði líkansins svarar til bergsins utan við NA-læga sprungubeltið, sem talið er stýra rennsli vatns ofan til í Botnskerfinu. Lekt kjarna er $2 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ í samræmi við niðurstöður prófana á HN-10 (kafli 3.1).

Sprungubeltinu er lýst með kubbum af berggerð *rennu* (tafla 5). Kubbum sem lenda í rennunni er ætlað að lýsa bergi með sprungueiginleika. Það er einkenni sprungna að þær hafa lítið rúmmál en háa lekt. Þar sem forritið PT er gert fyrir porótt berg en ekki sprungið reyndist snúið að lýsa slíkri sprungu í kubballkaninu (mynd 25). Einnig var óvíst um nákvæma legu sprungubeltisins áður en líkangerðin hófst. Var af ráðið að byggja innsta hluta kubballkansins úr ferningum sem allir eru 100 m á kant. Kubbar af þeirri stærð eru of breiðir til þess að herma sprungu. Voru bergeiginleikar rennu því skalaðir til þannig að hver kubbur hennar lýsi í raun bergkubbi sem er aðeins 10 m breiður þvert á rennuna en samt 100 m langur eftir henni. Í viðauka A er gerð grein fyrir því hvernig bergeiginleikar rennu voru skalaðir, svo þetta skilyrði um sprungueiginleika yrði uppfyllt.

- Lag 5:** hefur það hlutverk að torvelða rennsli vatns milli efri og neðri laga kubballkansins. Skipting lagsins í kubba er sýnd á mynd 26. Það hefst á 1000 m dýpi og nær niður á 1500 m með miðju í 1250 m. Lag 5 hefur einungis tvo bergeiginleika. Meginhluti þess er með eiginleika *stemmis*, en hann er samkvæmt orðanna hljóðan illa lekur og tekur líftinn þátt í vatnsflutningum líkansins (tafla 5). Í miðjum stemmi reyndist hins vegar nauðsynlegt að hafa *gat* með hárrí lekt. Um þetta gat streymir meginhluti vatnsins úr dýpri hlutum kubballkansins upp til efri hluta þess.
- Lag 6:** er allt gert úr kubbum með bergeiginleikann *djúp* (tafla 5). Lagið nær frá 1500 í 2000 m dýpi. Lekt þess er lág, en rennsli vatns er samt sem áður fremur greitt um lagið sökum víðáttu þess. Kubbaskipting lagsins er sýnd á mynd 27.
- Lag 7:** er langstærsti hluti líkansins að rúmmáli, 300 km^3 af þeim 310 km^3 bergs sem líkanið er byggt úr. Þessu lagi er ætlað að herma öfluga vatnskerfið, sem enn er ófundið við Botn. Lagið er 1000 m þykkt og hefst á 2000 m u.s. Mynd 28 sýnir kubbaskiptingu þess. Allir eru kubbarir af berggerð *djúps* (tafla 5). Rétt er að ítreka að hvorki ber að lífta á staðsetningu lags 7 í kubballkaninu sem hina raunverulegu staðsetningu öfluga vatnskerfisins né rúmmál þess sem raunverulegt rúmmál kerfisins. Fremur er hér um að

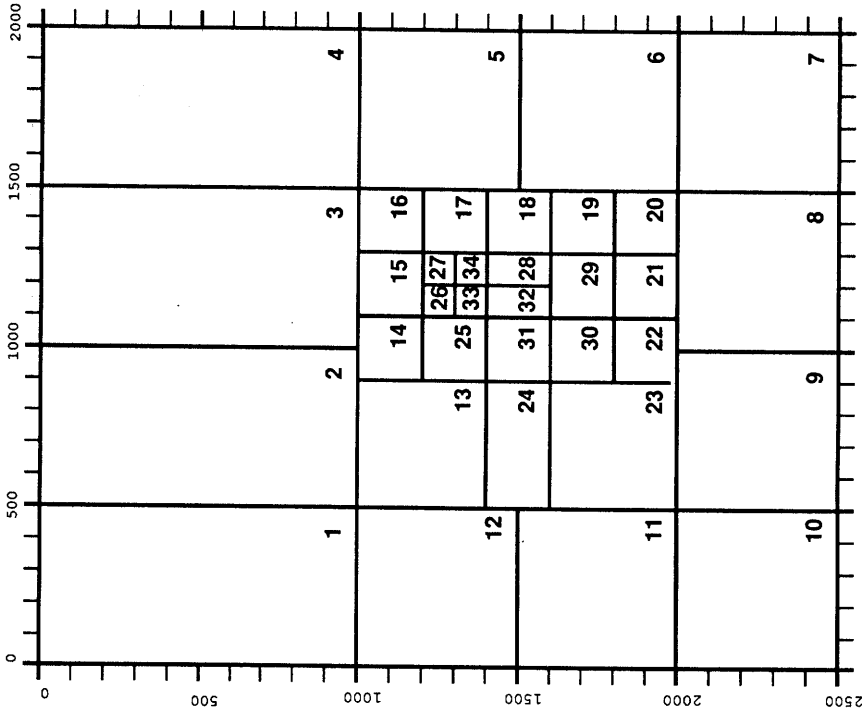
ræða safn bergkubba sem uppfylla eiginleika öfluga vatnskerfisins í líkanreikningum. Öfluga vatnskerfið er með mikla vatnsrýmd sem líklega stafar af tengslum þess við vatnskerfi með frjálst vatnsborð, e.t.v. í fjöllum vestan Botnssvæðisins, fremur en af miklu rúmmáli lagsins og háum poruhluta.

Mynd 29 auðveldar lesendanum að sjá fyrir sér samsetningu kubbalkansins af Botnssvæðinu eftir berggerðum og í þrívídd. Yfir öfluga vatnskerfinu hvílir stemmir, sem er illa lekur nema í gatínu, þar sem vatn sleppur upp í efri hluta jarðhitakerfisins. Við vatninu tekur rennan, og dreifir hún litlum hluta þess út í kjarnann sem umlykur rennuna. Mestur hluti vatnsins fer þó upp í gegnum strompana tvo, sem stingast gegnum torlekt þak jarðhitakerfisins eða upp um vinnsluholurnar eftir að vinnsla hefst. Yfir þeim vestari var áður Botnslaug. Efri hluti líkansins er umlukinn röndinni og veggnum. Varnar röndin þvfi að áhrifa verði vart milli Botnssvæðisins og jarðhitasvæðanna í kring.



Mynd 22. Jaðrar kubbalkans af Botnssvæðinu.

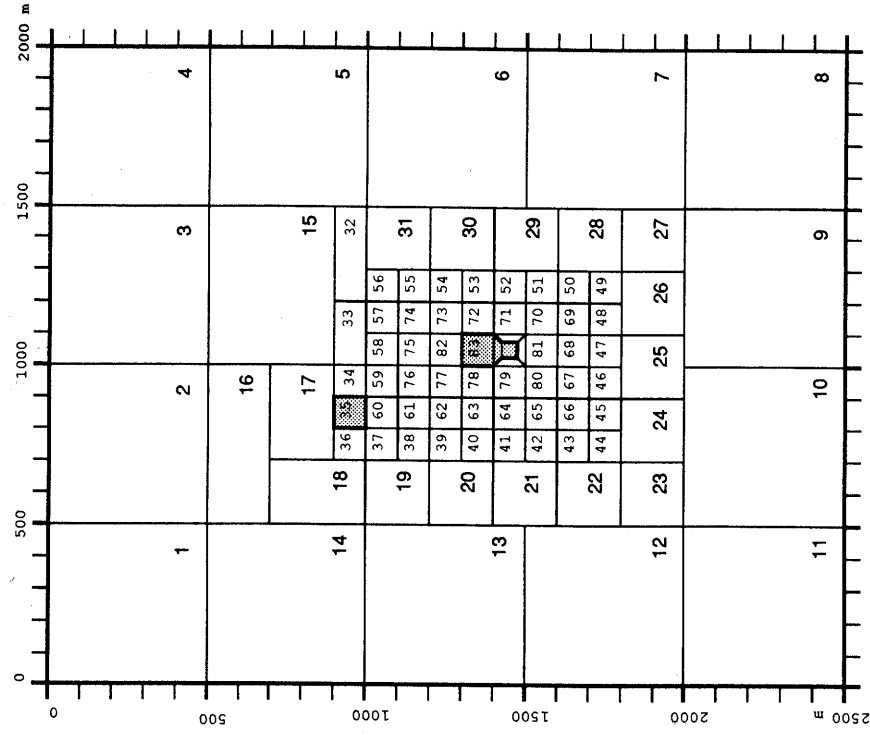
JHD FF 6000 GrB
91.04.0150 T



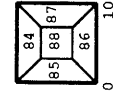
GRUNNVATN

Mynd 23. Skipting lags 0 í kubba og bergerðir.

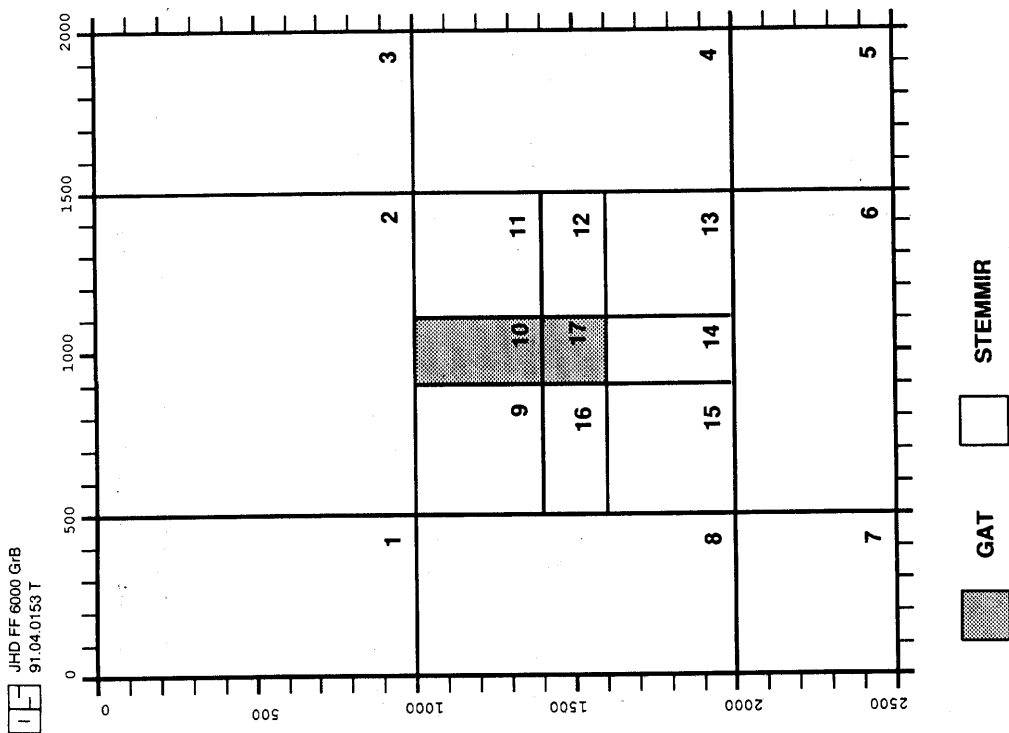
JHD FF 6000 GrB
91.04.0151 T



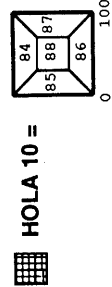
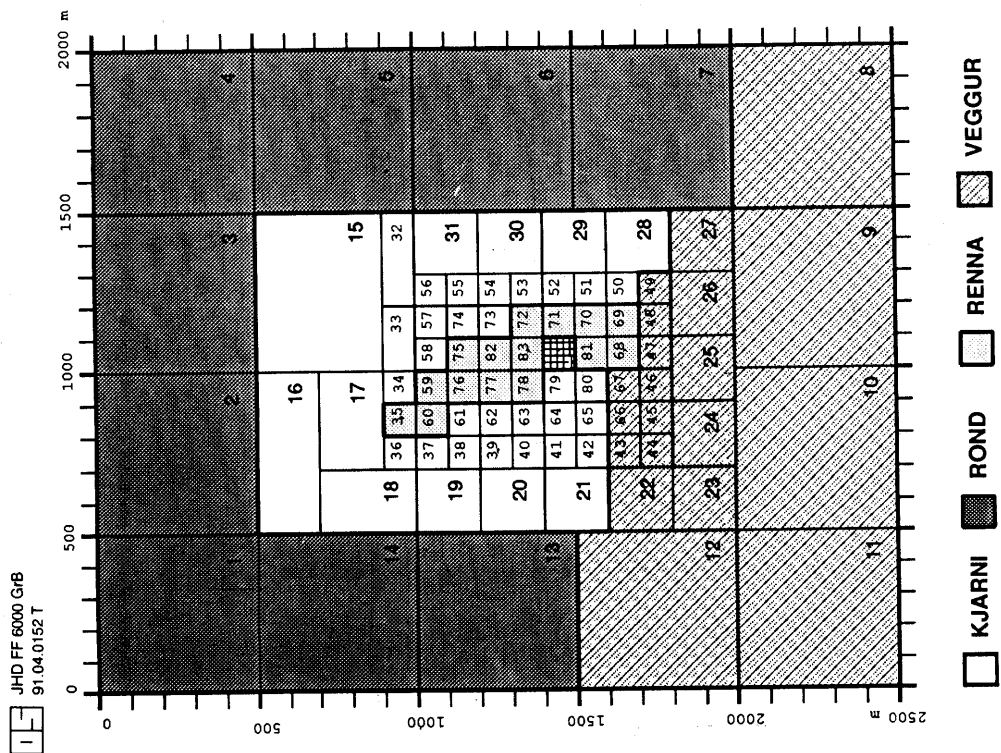
□ ÞAK □ HOLA 10 = □ STROMPUR



Mynd 24. Skipting lags 1 í kubba og bergerðir. Bæta þarf tölunni 100 við kubbanúmerin á myndinni til að fá númer kubbs í líflkaninu.

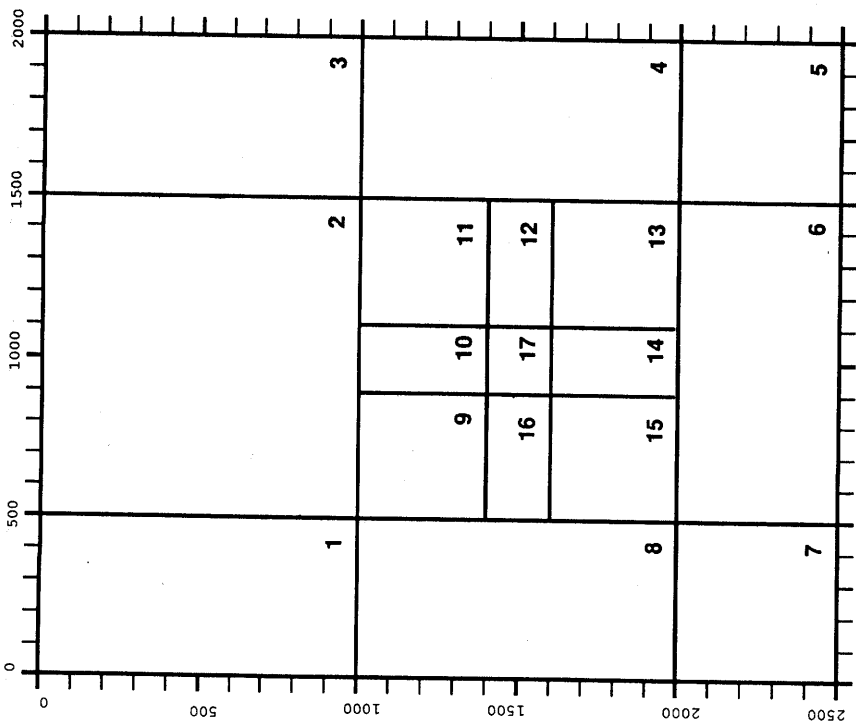


Mynd 26. Skipting lags 5 í kubba og berggerðir. Bæta þarf tölunni 500 við kubbanúmerin á myndinni til að fá númer kubbs í lífkaninu.



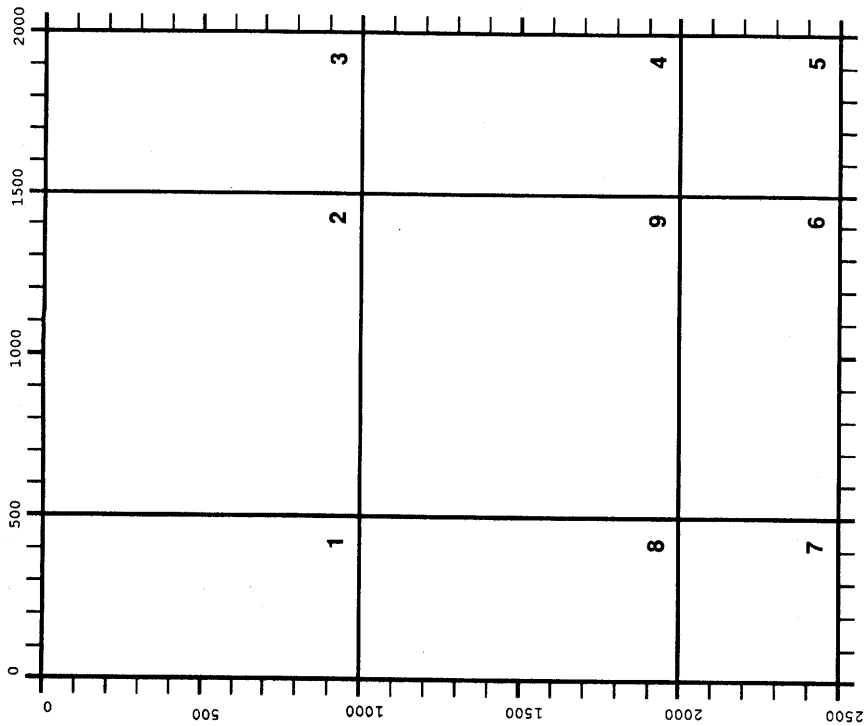
Mynd 25. Skipting laga 2-4 í kubba og berggerðir. Bæta þarf tölunni 200 í lagi 2, 300 í lagi 3 og 400 í lagi 4 við kubbanúmerin á myndinni til að fá númer kubbs í lífkaninu.

JHD FF 6000 GrB
91.04.0154 T



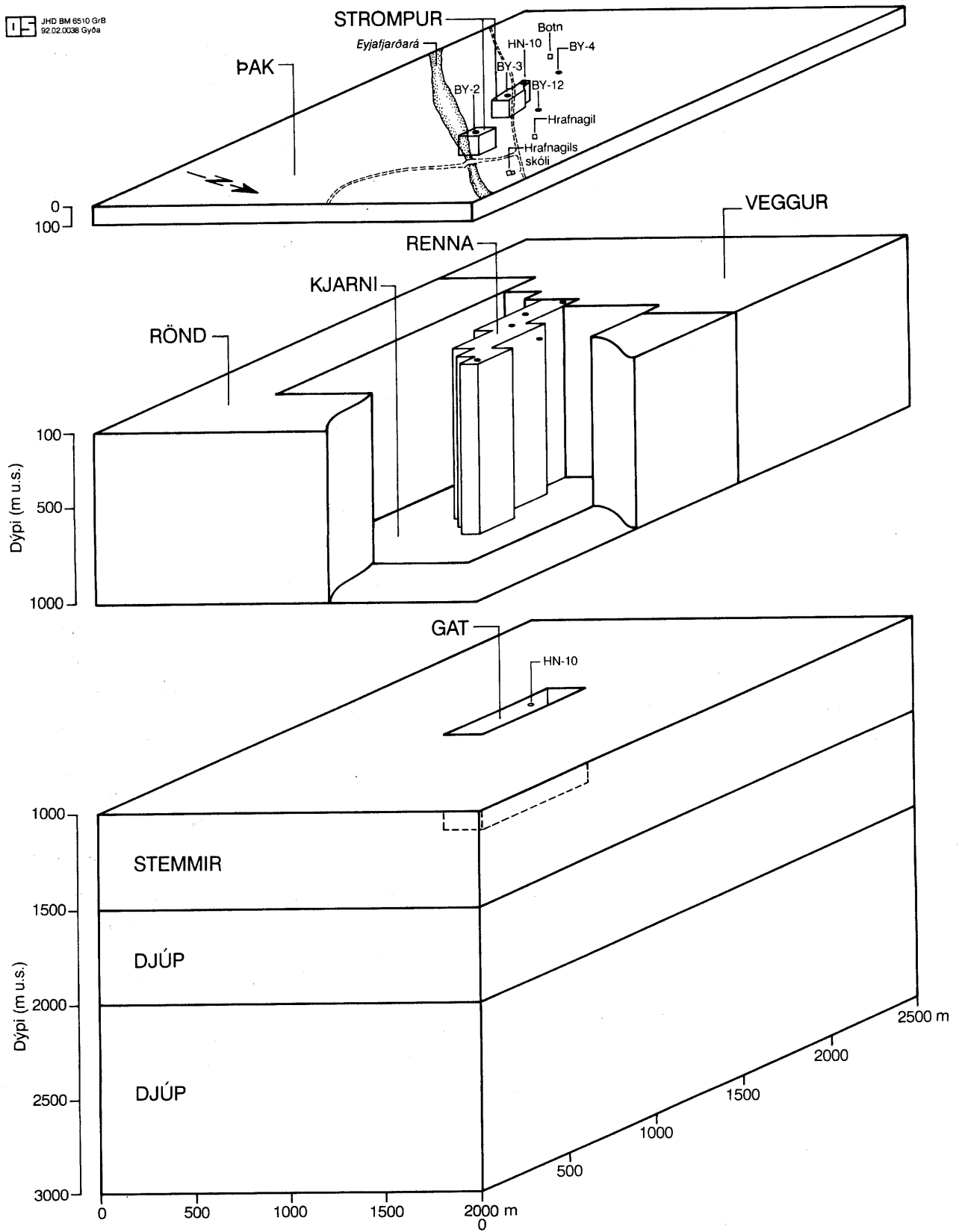
Mynd 27. Kubbaskipting lags 6. Bæta þarf tölunni 600 við kubbanúmer-
erin á myndinni til að fá númer kubbs í líkaninu.

JHD FF 6000 GrB
91.04.0155 T



Mynd 28. Kubbaskipting lags 7. Bæta þarf tölunni 700 við kubbanúmer-
erin á myndinni til að fá númer kubbs í líkaninu.

JHD BM 6510 GrB
92.02.0038 Gyða



Mynd 29. Þrívíddarmynd af kubbalkani Botnssvæðisins.

5.2 Hermun upphafsástands

Fyrsti þáttur líkanreikninga á Botnssvæðinu fólst í hermun á hita og þrýstingi svæðisins eins og hann er áætlaður fyrir vinnslu (kaflar 3.3 og 3.4). Reikningarnir snerust aðallega um stillingu á innrennsli í líkanið og grófkvörðun á lekt þess. Gert er ráð fyrir að núverandi jarðhitavirkni hefjist við lok síðustu ísaldar fyrir 10 þúsund árum (Gunnar Bððvarsson, 1982). Þá er skilgreindur tíminn núll í reikningunum. Eins er skilgreindur upphafshiti og þrýstingur í lögum líkansins. Byggja gildin á súluþrýstingi vatns sem fylgir u.þ.b. 60 °C/km hitastigli niður í 800 m dýpi en um 30 °C/km stigli þar fyrir neðan. Hita- og þrýstigildin eru sýnd í töflu 6. Við tímann núll hefst síðan 6 ½ kg/s innrennsli af 105 °C heitu vatni í kubb 709 í lagi 7. Þessu innrennsli var haldið stöðugu í 10 þúsund ár. Að þeim tíma liðnum var athugað hvernig hiti og þrýstingur í þeim kubb- um líkansins, sem borholur tengjast, samrýmdust mati á hita og þrýstingi í holunum árið 1981.

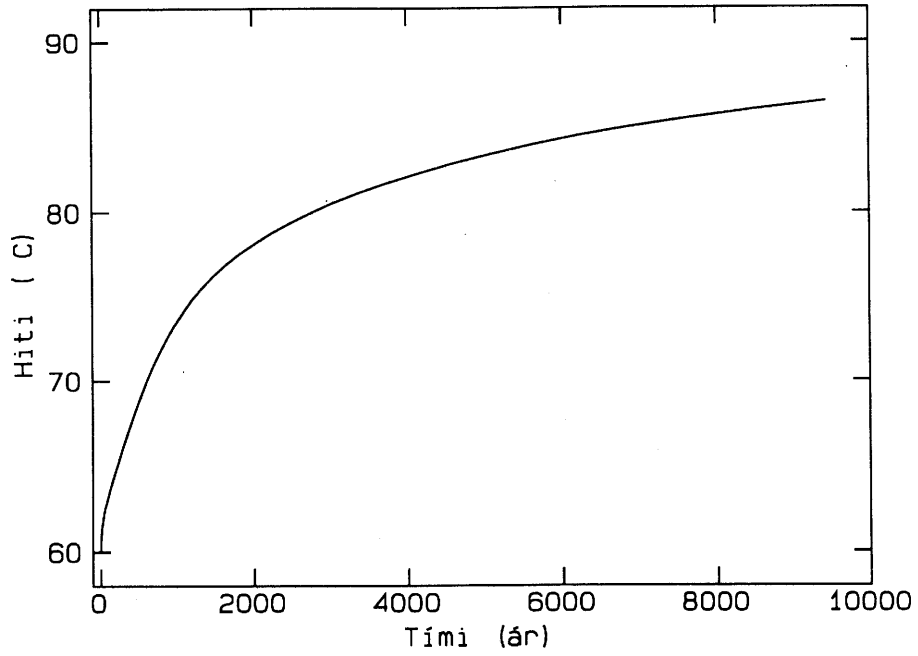
TAFLA 6. Upphaflegur hiti og þrýstingur í kubb líkani.

Lag	Dýpi (m)	Hiti (°C)	Þrýstingur (bör-a)	Lag	Dýpi (m)	Hiti (°C)	Þrýstingur (bör-a)
0	-5	10	1.5	4	750	60	76
1	50	15	9	5	1250	70	130
2	200	30	22	6	1750	80	185
3	400	45	41	7	2500	105	260

Myndir 30 og 31 sýna hvernig hiti og þrýstingur breytast með tíma í kubb 488 í lagi 4 í endanlegri gerð kubb líkansins. Kubburinn samsvarar neðri aðalæð holu HN-10. Sést að þrýstingur kubbsins vex hratt fyrstu 1000 árin, en tekur þá að síga rólega. Orsök sigsins er að hiti vatns í strompunum tveimur í lagi 1 hækkar með tímanum. Við það lækkar seigja vatnsins, það sleppur greiðlegar upp úr líkaninu og þrýstingur lækkar eilítið. Stígandi hitans á mynd 30 er hraður fyrstu 2 til 3 þúsund árin en síðan hægir á. Hraði hita- og þrýstibreytinga í lok reiknítímans er óverulegur, eða 0,01 bar og 0,05 °C á hverjum 100 árum. Líkanið telst því í góðu jafnvægi. Tryggir það að breytingar, sem reiknast eftir að vinnsla hefst úr líkaninu, stafa eingöngu af vinnslunni en ekki af áhrifum óstöðugrar hita- og þrýstidreifingar.

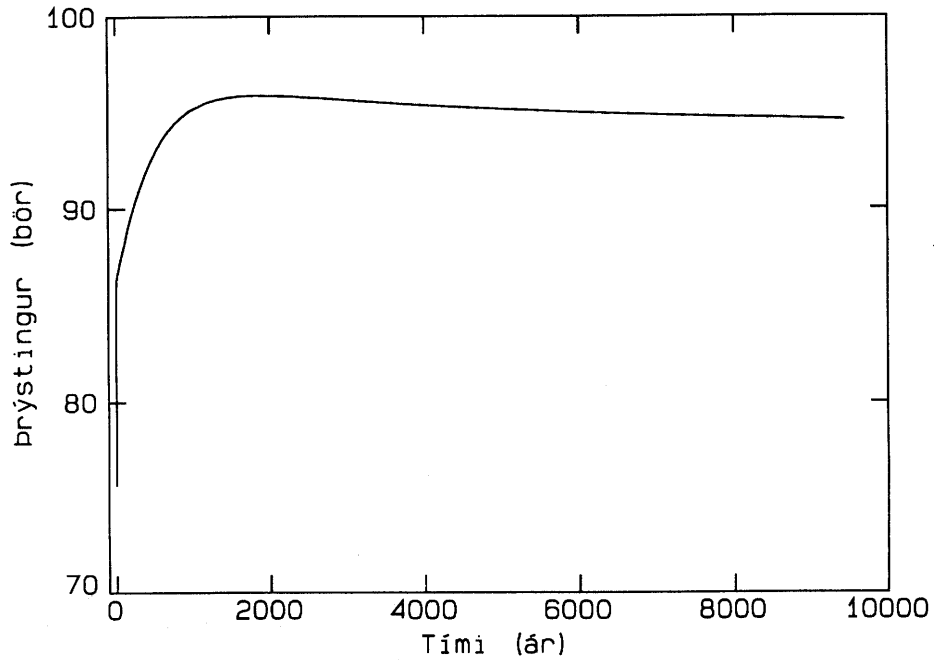
Mynd 32 sýnir jafnhitalínur í lögum 1 til 6 eftir 10 þúsund ára upphitun kubb líkansins. Þar sést hvernig heitt vatn fer upp í gegnum lag 6 og gatið í lagi 5. Ofan við gatið stjórnað hitadreifingin af góðri lekt eftir rennunni og er flöng í stefnu hennar. Greinileg hitahámörk sjást svo í strompunum við Botnslaug og holu BÝ-2. Um þá fer mest af útstreymi kubb líkansins. Fara tæp 2 kg/s af 31 °C heitu vatni upp um strompinn við holu BÝ-2 og 4 kg/s af 58 °C heitu vatni um strompinn við Botnslaug. Um afganginn af lagi 1 fer aðeins ½ kg/s. Til samanburðar má geta þess að rennsli Botnslaugar einnar, fyrir boranir, var talið a.m.k. 0,8 kg/s af 55 °C heitu vatni (kafla 2.1). Uppstreymið við holu BÝ-2 styðst ekki við jarðfræðilegar athuganir, heldur reyndist nauðsynlegt að hafa það á þessum slóðum svo samræmi fengist milli niðurstaðna reiknilíkansins og mælinga í holunni.

JHD FF 6000 GrB
91.04.0173 T



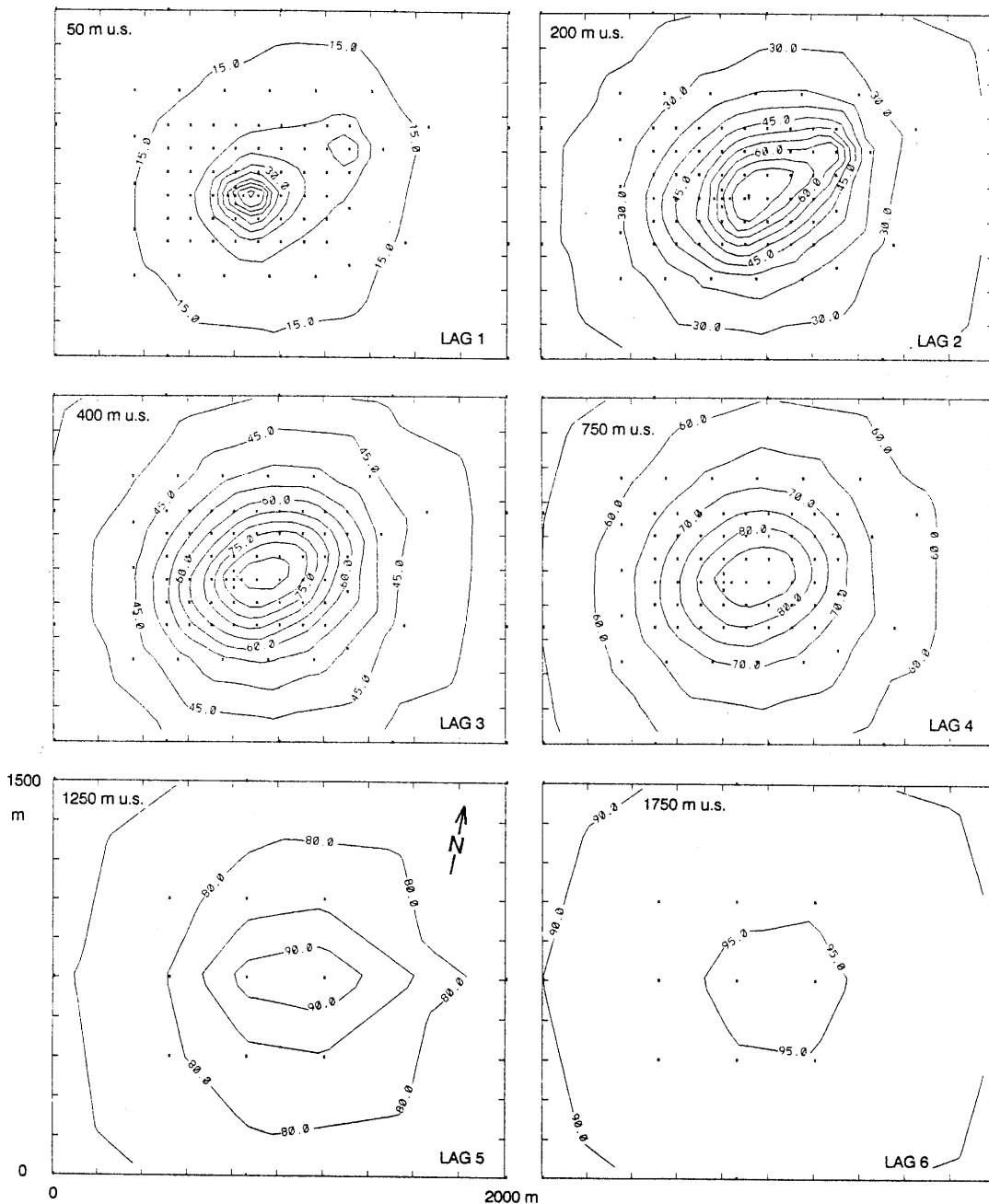
Mynd 30. Hítasaga kubbs 488 í lagi 4 í hermun upphafsástands.

JHD FF 6000 GrB
91.04.0174 T



Mynd 31. Þrýstisaga kubbs 488 í lagi 4 í hermun upphafsástands.

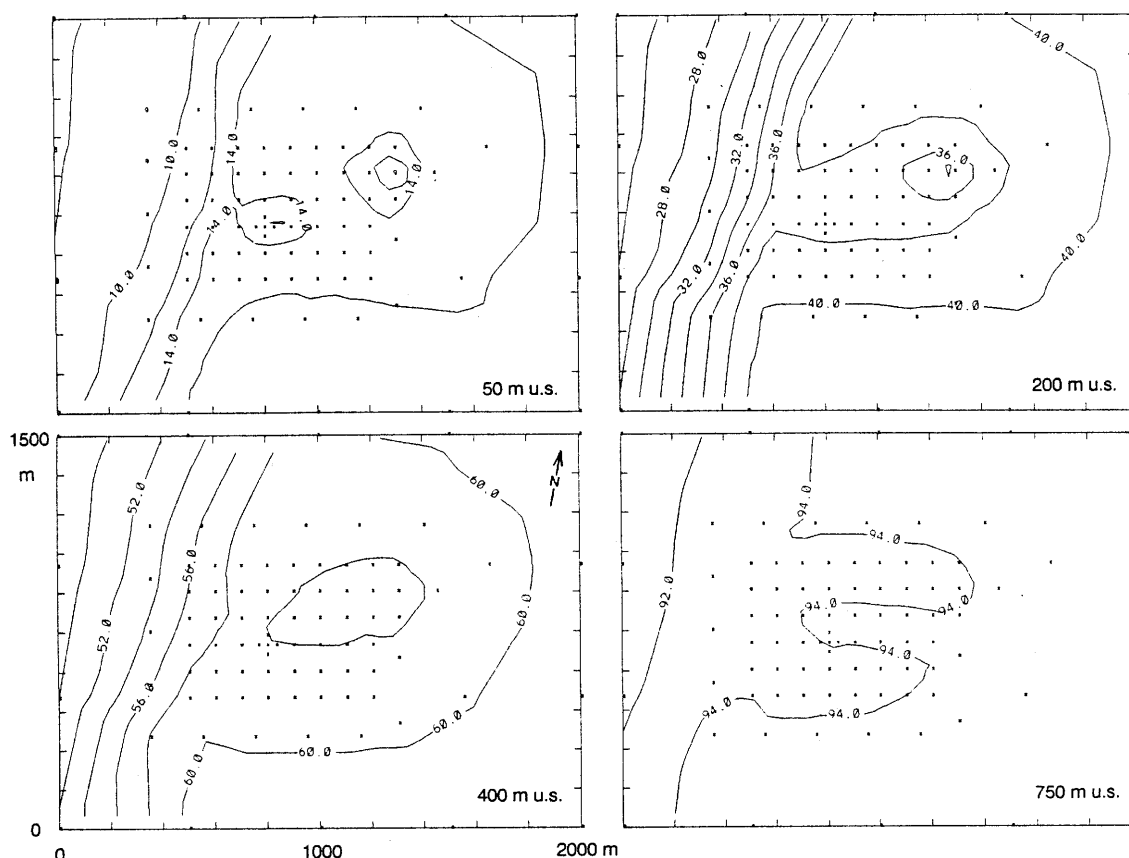
JHD FF 6000 GrB
91.04.0159 T



Mynd 32. Jafngildislínur hita eftir 10 þúsund ára upphitnun. Bil á milli lína er 5 °C. Miðja kubba er merkt með *.

Á mynd 33 er sýnd þrýstidreifing í lögum 1 til 4 eftir 10 þúsund ára upphitnun. Þar snýst hegðan eðlisstærða við frá því sem er í hitadreifingunni, þ.e. þrýstilágmörk koma fram í strompunum tveimur í 50 m u.s. Þrýstilágmarks gætur síðan áfram á 200 og 400 m dýpi en það er horfið á 750 m. Annar áberandi dráttur í þrýstidreifingunni fylgir hinum torleka vegg í vesturjaðri líkansins. Þar er þrýstingur lægri en í kjarna líkansins. Því veldur lág lekt veggins ásamt lágum upphafsþrýstingi.

JHD FF 6000 GrB
91.04.0158 T

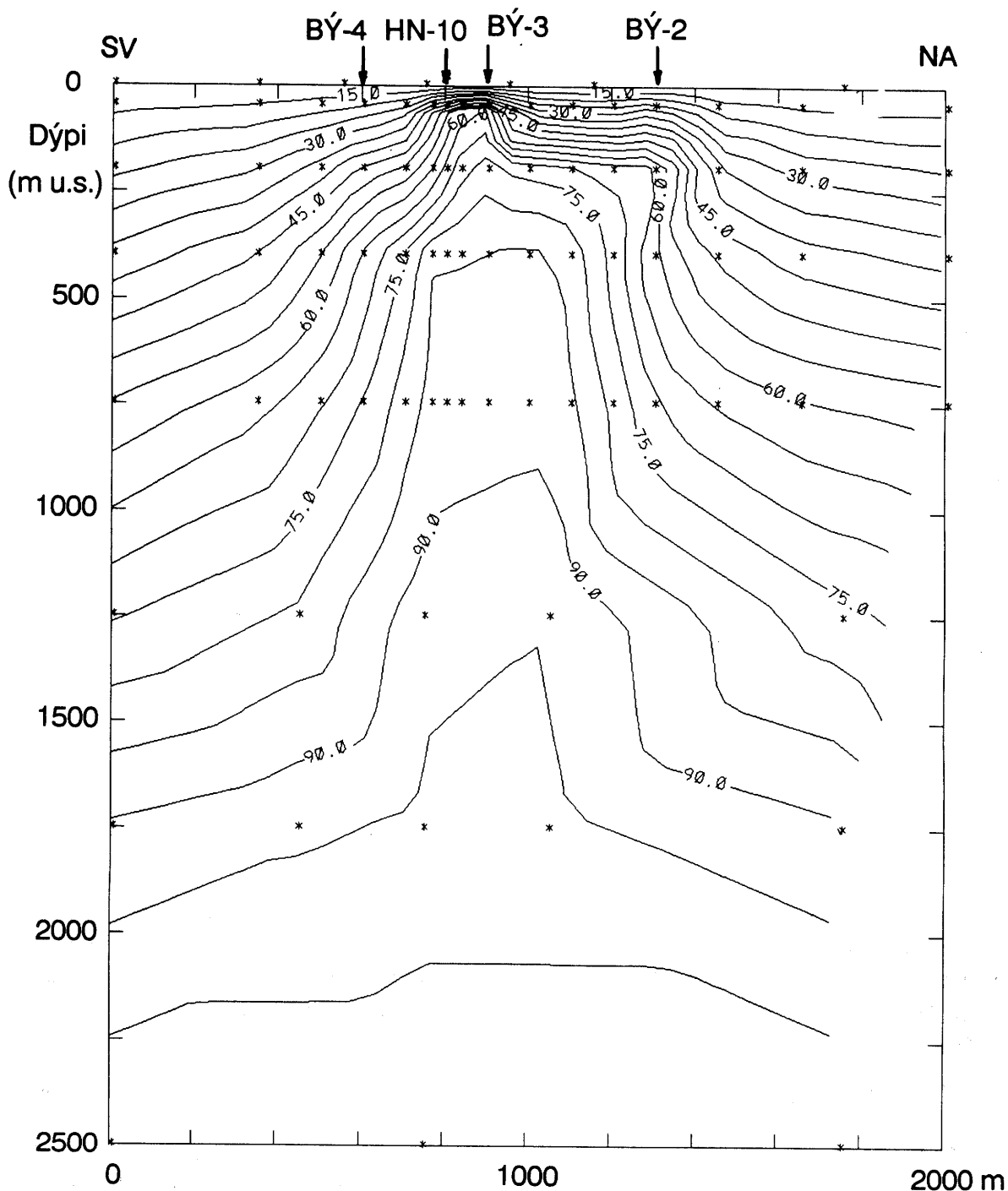


Mynd 33. Jafngildislínur þrýstings eftir 10 þúsund ára upphitnun. Bil á milli lína er 2 bór. Miðja kubba er merkt með *.

Hin vel leka renna ræður miklu um hitadreifingu í kubballkaninu. Á mynd 34 er sýnt hvernig hiti breytist langs eftir henni og með dýpi. Áberandi er hvernig miðhluti líkansins, þar sem rennan stjórnar rennslinu, hitnar langmest. Einnig eru áhrif strompanna vel sjáanleg og viðsnúningur í berghita nærri holu BÝ-2. Þennan viðsnúning var útilokað að fá fram nema með því að opna líkanið til yfirborðs við holuna.

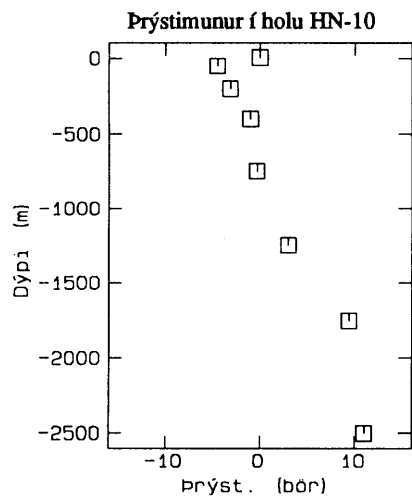
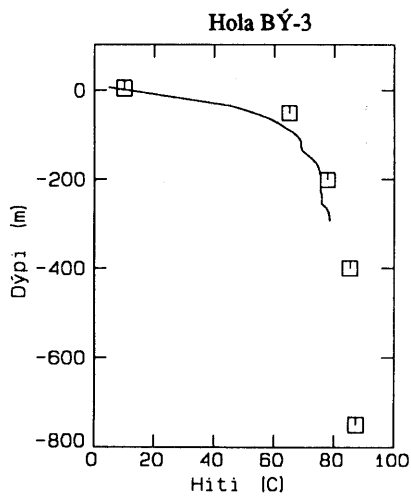
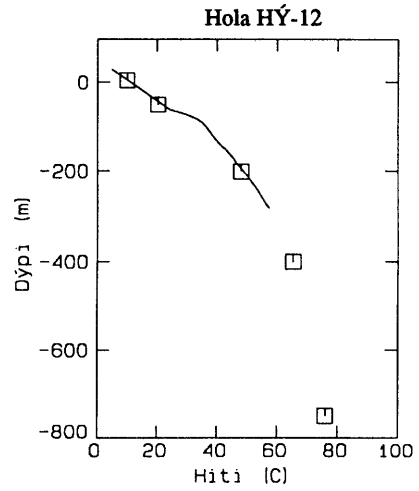
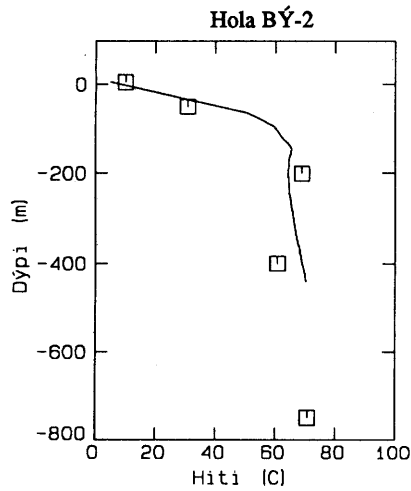
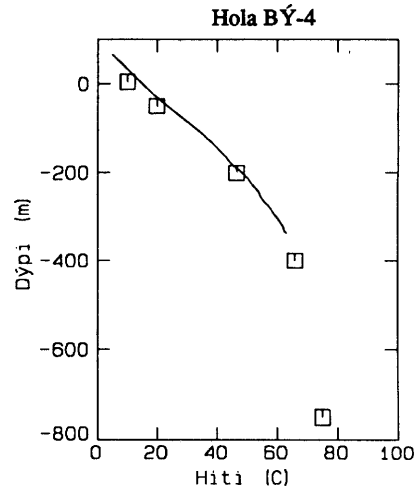
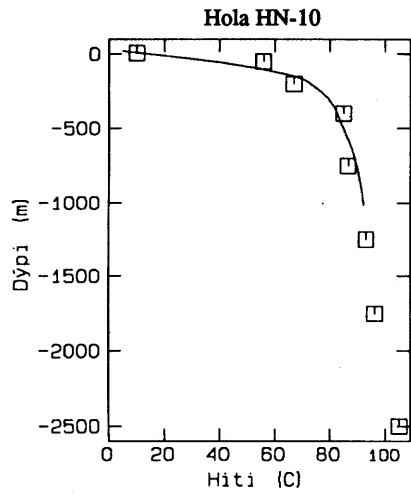
Mynd 35 sýnir svo að lokum hvernig hita líkansins ber saman við áætlaðan berghita í 5 borholum á Botnssvæðinu. Eins er sýnt hvernig þrýstingur við holur HN-10 og BN-1 vísar frá áætluðum þrýstingi á mynd 21. Af myndinni má ráða að tiltölulega gott samræmi er milli berghita holna og líkanihita eftir 10 þúsund ára upphitnun. Þrýstingur í neðri hluta líkansins er hins vegar um 10 börum yfir áætluðum upphafsþrýstingi holu BN-1. Þessi munur er ásættanlegur. Í fyrsta lagi er erfitt er að meta upphafsþrýsting djúpt í jarðhitakerfinu og gæti hann í raun hafa verið mun hærri en áætlað hefur verið. Í öðru lagi er neðri hluta líkansins aðeins ætlað að herma viðbrögð öflugra vatnskerfisins, en hvorki staðsetningu, stærð, innri gerð né ástand þess. Þessi yfirþrýstingur ætti því hvorki að hafa áhrif á hermun vinnslusögu svæðisins né á spádóma kubballkansins um langtíma viðbrögð þess.

JHD FF 6000 GrB
91.04.0177 T



Mynd 34. Hitapversnið eftir rennu. Horft er til norðvesturs. Bil á milli lína er 5 °C. Miðja kubba er merkt með *.

JHD FF 6000 GrB
91.04.0178 T



Mynd 35. Samanburður líkanhita og -þrýsings við mælingar í borholum. Berghitaferlar eru heildregnir og reiknuð gildi eru sýnd með kassa.

5.3 Hermun vinnslusögu

Annar þáttur líkanreikninga fyrir Botnssvæðið fólst í hermun á fyrstu 8 árum vinnslusögu holna BN-1 og HN-10. Í þessum hluta reikninganna fór mikill tími í að skilgreina lektar- og varmaeiginleika rennunnar, lektir í dýpri hluta líkansins, lekt í strompunum og rúmmál lags 7.

Upphaf vinnslu úr Botnssvæðinu er miðað við 1. nóvember 1981, en um það leyti var hola HN-10 tengd dreifikerfi Hitaveitu Akureyrar. Er þessi dagsætning skilgreind sem upphafstími vinnslureikninganna. Gildi hita og þrýstings í kubbum vinnslulíkansins á upphafstímanum eru lokagildi upphafsástandsins í kaflanum hér á undan. Þá er $6\frac{1}{2}$ kg/s innrennslinu í lag 7 haldið óbreyttu allan vinnslutímann.

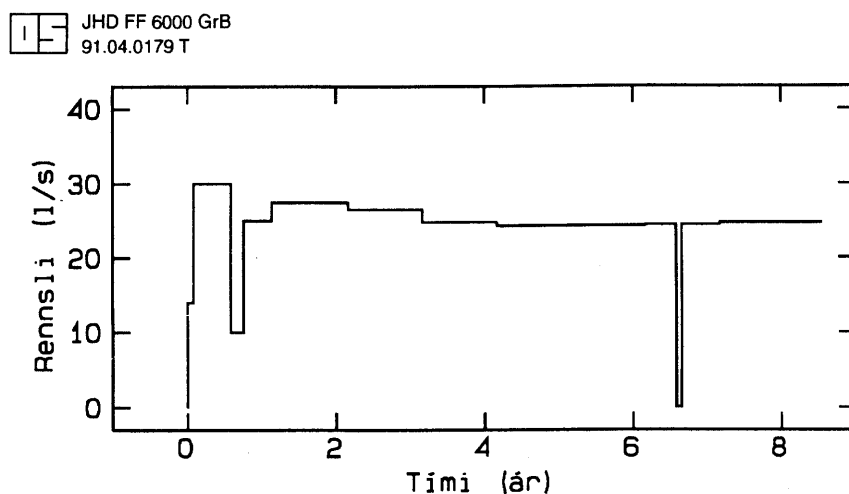
Áður en útreikningar á vinnsluviðbrögðum Botnssvæðisins með kubbaliðkaninu hófust, þurfti að skilgreina vinnslu úr æðum holna BN-1 og HN-10. Vatnið sem dælt er úr holunum kemur aðallega úr 4 æðasyrpum (tafla 1). Hola BN-1 er með smáæð á 144 m dýpi. Þessi æð er tengd kubbi 288 í lagi 2. Næstu æðar koma á 489-530 m dýpi í holu HN-10. Þær tengjast kubbi 388 í lagi 3. Þar á eftir eru æðar á 750-876 m dýpi í holu HN-10. Þær eru tengdar kubbi 488 í lagi 4. Dýpsta æðin er svo á 1756 m dýpi í holu BN-1. Hún er tengd kubbi 617 í lagi 6.

Nokkuð misræmi er á milli raunverulegs dýpis æða og æðadýpis í kubbaliðkaninu. Er það vegna þess að ekki þótti gerlegt að hafa fleiri lárétt lög í líkaninu. Einnig þótti mikilvægt að lagskipting kubbaliðkansins félli vel að dýptarbilinu þar sem mestar upplýsingar eru tiltækar um hita og þrýsting, fremur en að dýpi æða í vinnsluholum. Þetta misræmi getur komið að sök í útreikningum á vinnsluhita því áhrif kælingar að ofan dvína með dýpi. Það þýðir að kólnun æðarinnar á 144 m reiknast of hæg en of hröð fyrir æðarnar á 489-530 m. Þetta þarf að hafa í huga þegar útreikningar á kólnun eru skoðaðir.

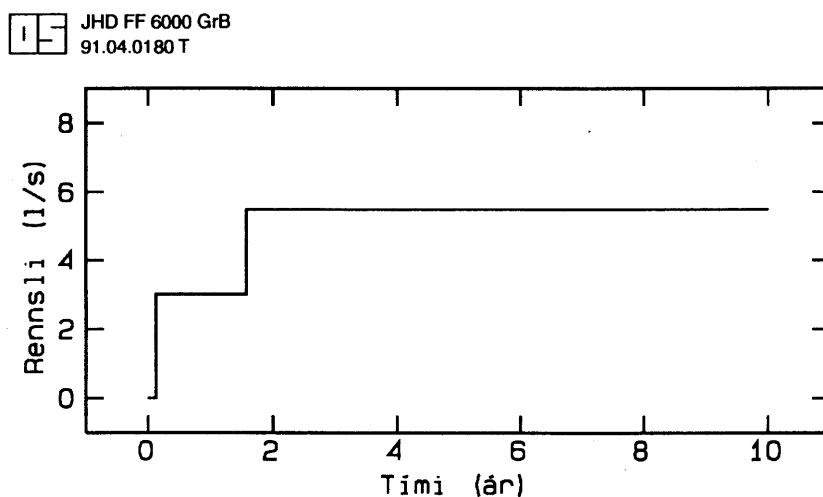
Rennsli efri æðarinnar í holu BN-1 er áætlað 0,5 kg/s allan tímann. Það er jafnt því rennsli sem kom úr efri hluta holunnar við pökkun neðri æða í borlok (Ólafur G. Flóvenz o.fl., 1989) og einnig er það í samræmi við kólnun vatns úr holu BN-1 sumarið 1990 (Ólafur G. Flóvenz o.fl., 1991a). Hlutfall rennslis úr efri og neðri æðum holu HN-10 er ekki heldur þekkt með vissu. Hlutfallið hefur áhrif á reiknaðan kólnunarhraða holunnar. Hér er áætlað að 40 % af rennsli holu HN-10 komi úr æðunum á 489-530 m (kubbur 388) en 60 % úr æðunum á 750-876 m (kubbur 488). Til þess liggja eftirtaldar forsendur:

1. Hola HN-10 gaf 16 l/s í sjálfrennsli þegar dýpi hennar var 636 m. Neðri æðar holunnar, á 750-813 m, juku síðan sjálfrennslið í 36 l/s (Ásgrímur Guðmundsson, 1980). Það jafngildir því að 44 % rennslisins hafi komið úr efri æðasyrpunni, en 56 % úr þeirri neðri. Enn komu æðar í holuna neðan 813 m dýpis. Því er ekki fjarri lagi að hlutfall rennslis úr neðri hluta holunnar sé 60 % af heildarrennslinu.
2. Hitamælingar, sem gerðar voru meðan sjálfrennsli var úr holu HN-10, sýna stall í hita um æðarnar á 489-530 m dýpi (Ólafur G. Flóvenz o.fl., 1991b). Kólnar holan úr 87,5 °C í 550 m niður í 86,2 °C á 480 m. Berghiti á 500 m dýpi er um 85 °C (tafla 3). Fæst þá með einföldum hlutfallsreikningi að tillag efri æðanna sé um 50 % af heildarrennslinu. Blandreikningarnir eru þó mjög næmir fyrir óvissu í hitastigi. Til dæmis fer tillag efri æðanna í 40 % ef reiknað er með 84,5 °C berghita á 500 m dýpi í stað 85 °C. Verður það hlutfall að teljast nær lagi þegar einnig er tekið mið af sjálfrennsli í borun.

Mynd 36 sýnir vinnslusögu holu HN-10, eins og hún er skilgreind í innskrá fyrir PT. Til einföldunar var vinnslan löguð eftir ársmeðaltölunum í töflu 2, utan að nokkru fleiri skrefum var bætt inn í vinnslusöguna kringum löng dælustopp. Mynd 37 sýnir vinnslusögu holu BN-1 og byggir hún einnig á ársmeðaltölunum í töflu 2.

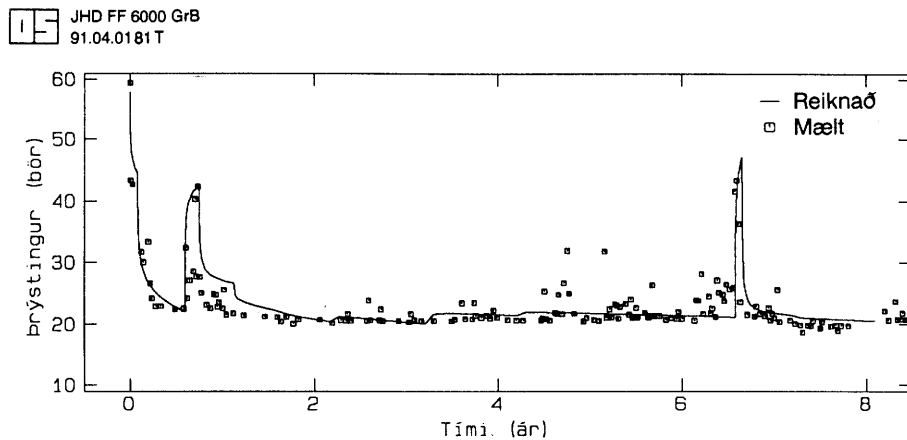


Mynd 36. Vinnslusaga HN-10 frá 1. nóvember 1981 eins og hún er skilgreind í hermireikningunum.



Mynd 37. Vinnslusaga BN-1 frá 1. nóvember 1981 eins og hún er skilgreind í hermireikningunum.

Hermun vinnslusögunnar skorðast einkum af mælingum á vatnsborði og vinnsluhita holu HN-10. Mynd 38 sýnir þrýsting á 400 m dýpi í holu HN-10. Annars vegar sýnir myndin þrýsting áætlaðan út frá mældu vatnsborði, að frádregnu iðustreymistapi ($0,025\text{m}/(\text{l/s})^2$), og hins vegar reiknaðan þrýsting skv. kubbalknaninu. Ef frá eru taldir stallar, sem koma um áramót þegar vinnslan breytist úr einu ársmeðaltali í næsta, telst samræmi ferlanna harla gott. Reiknaði þrýstingurinn fylgir bæði langtímaþrýstifalli holunnar og eins nær hann að sveiflast eðlilega kringum vinnslustöðvanir.



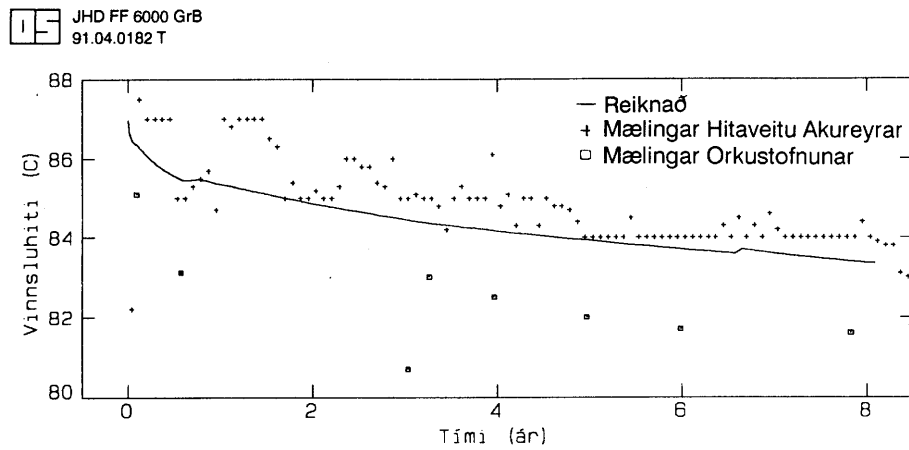
Mynd 38. Mældur og reiknaður þrýstingur á 400 m dýpi í HN-10 frá 1. nóvember 1981. Mældur þrýstingur byggir á vatnsborði að frádregnu iðustreymistapi.

Mynd 39 sýnir mældan og reiknaðan vinnsluhita holu HN-10. Gert er ráð fyrir að hiti æða neðan 530 m dýpis hafi haldist óbreyttur í 87,5 °C allt frá upphafi vinnslu og að tillag þeirra sé 60 %. Enn fæst gott samræmi milli mældrar og reiknaðrar kólnunar (miðað við mælingar Hitaveitu Akureyrar). Er reiknaði kólnunarhraðinn um 0,5 °C/ári við upphaf vinnslu en síðan hefur hægt á honum niður í um 0,3 °C/ári seinni hluta vinnslusögunnar. Á mynd 40 er sýndur samanburður mælds og reiknaðs vinnsluhita holu BN-1. Hér er erfiðara um vik að reikna vinnsluhitann. Bæði er hiti vatns sem kemur djúpt úr holunni óviss svo og hlutfall æðarinnar á 144 m í heildarrensliinu. Á myndinni er gert ráð fyrir að 10 % heildarvinnslunnar komi úr 144 m æðinni og að hiti vatnsins sem kemur af meira dýpi sé 100 °C. Sýnir reiknaði ferillinn þá um helmingi hraðari kólnun en mælist (0,4 °C á ári í stað 0,2 °C). Fyrir utan ónákvæmni í hitamælingunum gæti ósamræmið stafað af því að reiknað sé með of lágum hita vatnsins að neðan og/eða of miklu rennsli úr efri æðinni.

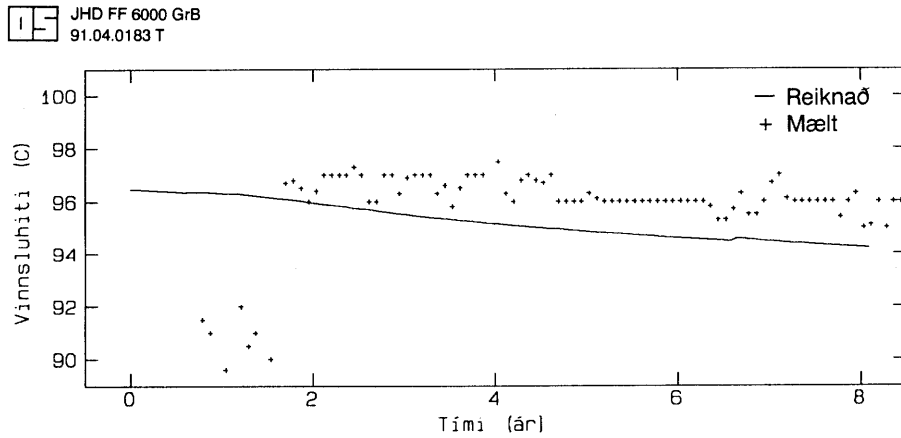
Fróðlegt er að skoða nánar hvernig kubbalkanið kólnar við 10 ára samfellda vinnslu. Mynd 41 sýnir reiknaða hitasögu kubba 183, 288, 388 og 488. Þessir kubbar svara til uppstreymisrásar Botnslaugar í lagi 1, 144 m æðarinnar í BN-1 og efri og neðri æðasyrpanna í holu HN-10. Myndin sýnir glögglega hvernig kalt vatn lekur inn um stompana í þaki og veldur þar mikilli kælingu. Sömuleiðis kólnar efri æðin í BN-1 töluvert (um 20 °C). Kólnun efri æða holu HN-10 nemur 8-9 °C. Neðri æðar holu HN-10 hitna aftur á móti um 1-2 °C. Þó er sú hitmun ekki talin marktæk þar sem hún stafar af ónákvæmni í ákvörðun upphafshita kubbanna á þessu dýpi. Verður hiti neðri æða HN-10 talinn óbreyttur alla vinnslusöguna.

Mynd 42 sýnir hvernig hitaþversniðið á mynd 34 hefur kólnað við 10 ára vinnslu. Áberandi er innrás kalds vatns um strompana við Botnslaug og holu BÝ-2. Þar hefur orðið allt að 60 °C kólnun. Eftir því sem neðar dregur minnkar kólnunin sökum varmaleiðni úr heitu berginu sitt hvoru megin rennunnar. Kólnunar hættir að gæta um 500 m dýpi sökum þess að efri æðar holna BN-1 og HN-10 taka allt vatnið sem kemur að ofan.

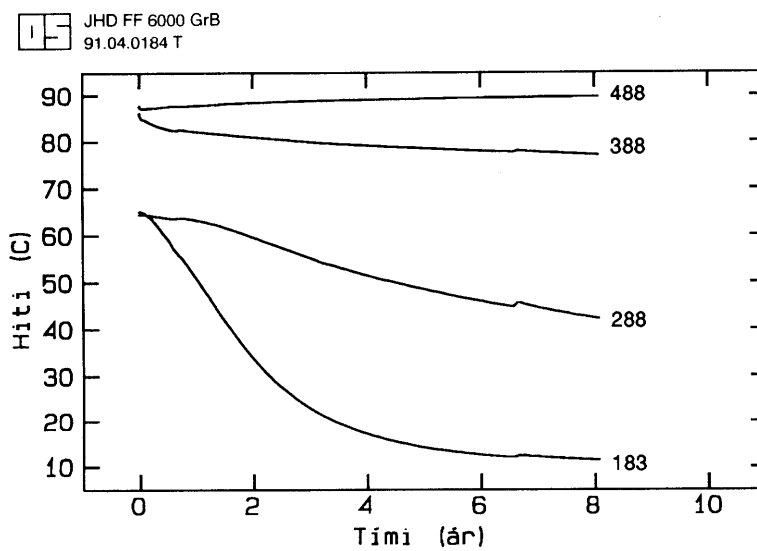
Kólnunarhraði kubbalkansins er mjög viðkvæmur fyrir breidd rennunnar (viðauki A). Mynd 43 sýnir hitasögu æðarinnar á 400 m í HN-10 fyrir 6, 10 og 100 m breiða rennu. Í upphafi vinnslu falla ferlarnir saman og kólnun sem verður stafar af vinnslu örlítið kaldara vatns úr lagi 2. Eftir tæplega tveggja ára vinnslu taka svo ferlarnir að greinast í sundur og falla þeir því hraðar sem rennan er mjórri. Hér er tekið að gæta áhrifa kalda vatnsins sem fer niður um strompana. Því mjórri sem rennan er þeim mun minni er varmaforði hennar og kólnunin hraðari.



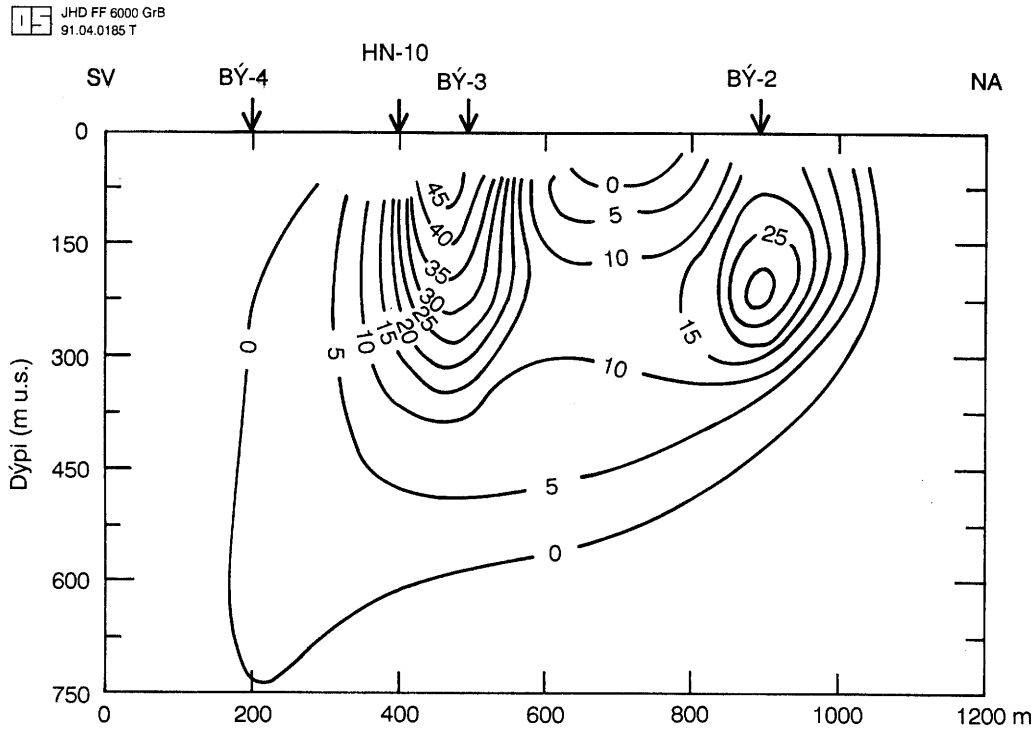
Mynd 39. Mældur og reiknaður vinnsluhiti HN-10 frá 1. nóvember 1981.



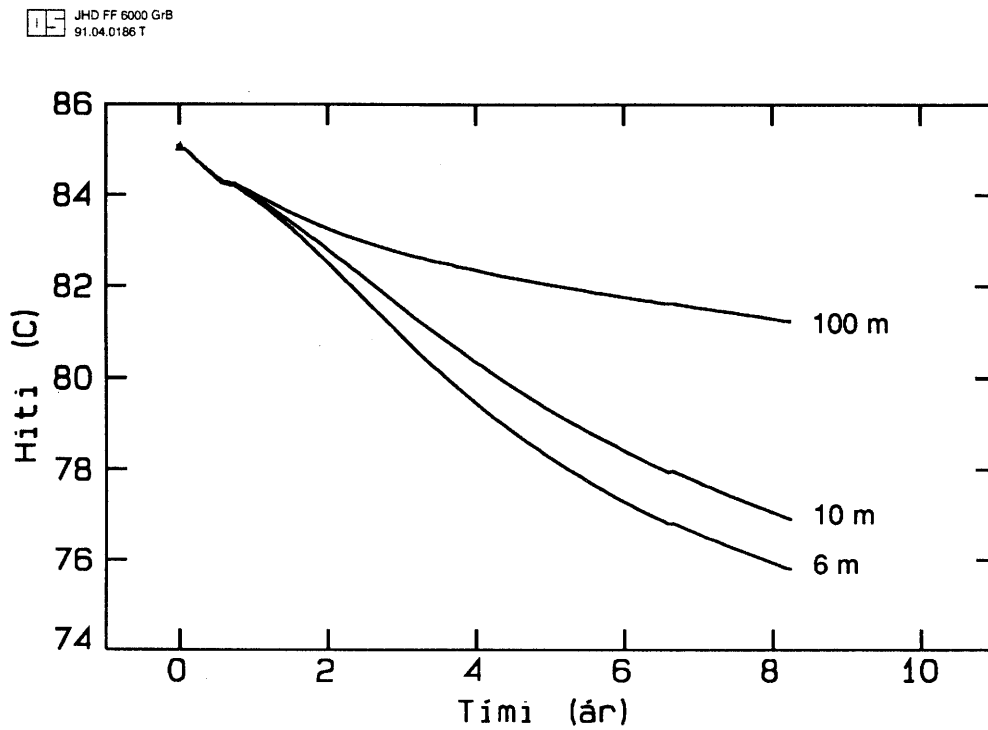
Mynd 40. Mældur og reiknaður vinnsluhiti BN-10 frá 1. nóvember 1981.



Mynd 41. Reiknuð kólnun kubba 183 (Botslaug), 288 (efri æð BN-1), 388 (efri æðar HN-10) og 488 (neðri æðar HN-10) frá 1. nóvember 1981.



Mynd 42. Reiknuð kólnun (°C) efri hluta hitaþversniðs rennu (borið saman við mynd 34).



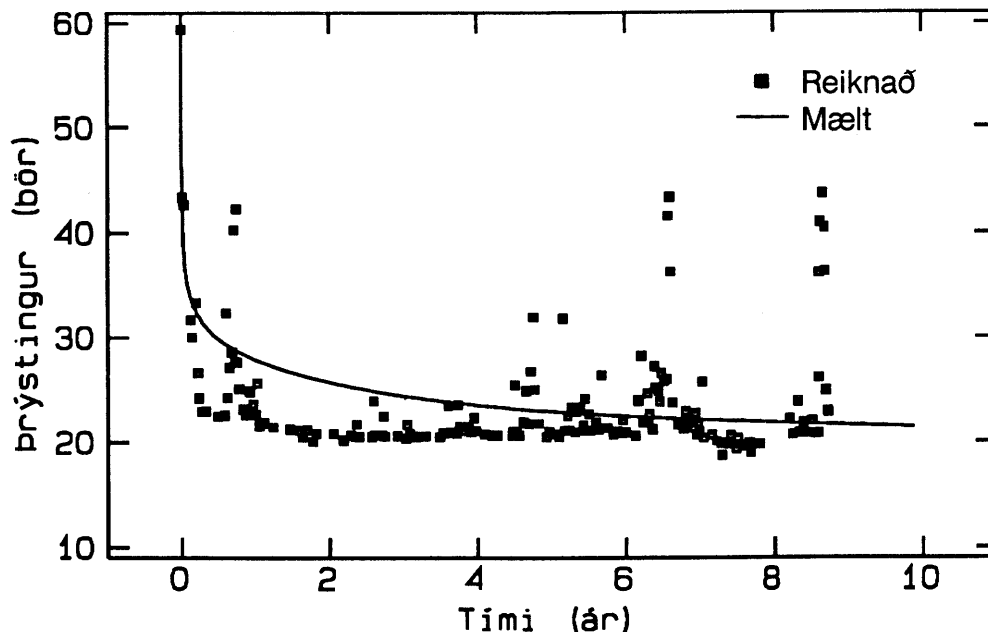
Mynd 43. Reiknaður kólnunarhraði æðar á 400 m dýpi í HN-10 fyrir misbreiða rennu. Upphafstími er 1. nóvember 1981.

5.4 Langtímaniðurdráttur kubbalkansins, rennslisjafnvægi og efnabreytingar

Einn af þeim þáttum sem kubbalkanið af Botnssvæðinu þarf að herma, er langtímaniðurdráttur í jarðhitakerfinu. Langtímaniðurdráttur verður fyrst og fremst sökum þrýstifalls í öfluga vatnskerfinu. Stilla varð rúmmál og poruhluta lags 7, sem ætlað er að herma vatnsrýmd öfluga vatnskerfisins, þannig að langtímaniðurdráttur kubbalkansins yrði í samræmi við mælingar. Mynd 15 sýndi reiknaðan eininganiðurdrátt holu HN-10 samkvæmt þjöppuðu líkani. Ef undan er skilin hröð þrýstibreyting við upphaf vinnslu, er eininganiðurdrátturinn 0,09 m/(l/s) á ári. Það samsvarar um 2,7 m árlegum niðurdrætti ef meðalvinnslan á Botni er 29,6 l/s eins og hún hefur verið síðustu 5 ár (tafla 2). Til að þessi hraði niðurdráttar fengist í hermireikningunum var rúmmál lags 7 haft 300 km³ og poruhluti 20 %. Sami hraði niðurdráttar hefði reiknast með meira rúmmáli og lægri poruhluta lagsins.

Nokkrar breytingar urðu á bergeiginleikum líkansins frá því rúmmál lags 7 var stillt og þar til líkanið komst í endanlega mynd. Fróðlegt þótti að kanna hvort 2,7 m árlegi niðurdrátturinn væri enn til staðar í endanlegri gerð líkansins. Mynd 44 sýnir hvernig vatnsborð lækkar í kubbalkaninu ef 29,6 l/s meðalvinnslu er haldið í 10 ár. Miðað er við að 0,5 kg/s séu tekin úr grunnu æðinni í BN-1, 4,8 kg/s úr djúpu æðinni í sömu holu, 9,7 kg/s úr efri æðum HN-10 og 14,6 kg/s úr dýpri æðum HN-10. Ef undan eru skilin fyrstu 2-3 ár vinnslunnar, er hraði langtímaniðurdráttar í holunni um 0,23 bör/ári. Það jafngildir um 2,5 m árlegum niðurdrætti vatnsborðs. Er það í góðu samræmi við langtímaniðurdrátt þjappaða líkansins (2,7 m/ári).

JHD FF 6000 GrB
91.04.0187 T



Mynd 44. Reiknaður þrýstingur á 400 m dýpi í holu HN-10 við fasta 29,6 l/s vinnslu. Auk þess er sýndur mældur þrýstingur frá 1. nóvember 1981.

Fróðlegt er að sjá hvernig rennsli vatns er háttað innan kubbalkansins eftir 10 ára samfellda 29,6 l/s vinnslu. Sýnir mynd 45 það á einfaldan máta. Þar sést að um 85 % vinnslunnar úr holum HN-10 og BN-1 koma að neðan úr öflugra kerfinu. Um 10 % koma að ofan úr grunnvatnskerfinu og þaki jarðhitakerfisins. Þau 5 % sem eftir eru koma síðan úr ytri hlutum lfkansins (rönd, kjarna, vegg og stemmi). Væntanlega hefur lfkanið náð nokkurn veginn jafnvægi eftir 10 ára stöðuga vinnslu, þó hlutföllin gætu breyst lítillega við áframhaldandi vinnslu.

Þessar niðurstöður benda til þess að ekki sé að vænta mikillar kólnunar vatns úr holum HN-10 og BN-1 í framtíðinni. Ef einungis 10 % vinnslunnar koma að ofan og hiti öflugra kerfisins helst óbreyttur má í mesta lagi vænta 10 % kólnunar vatns úr núverandi vinnsluholum (frá upphafshita). Enn hefur ekki orðið nema um 4 % kólnun vatns úr holu HN-10 (mynd 11). Er það vegna þess að kalda vatnið hefur náð að hitna á leið sinni niður í kerfið. Fjallað verður um spár um vinnsluhita fyrir nokkur mismunandi vinnslutilfelli í næsta kafla.

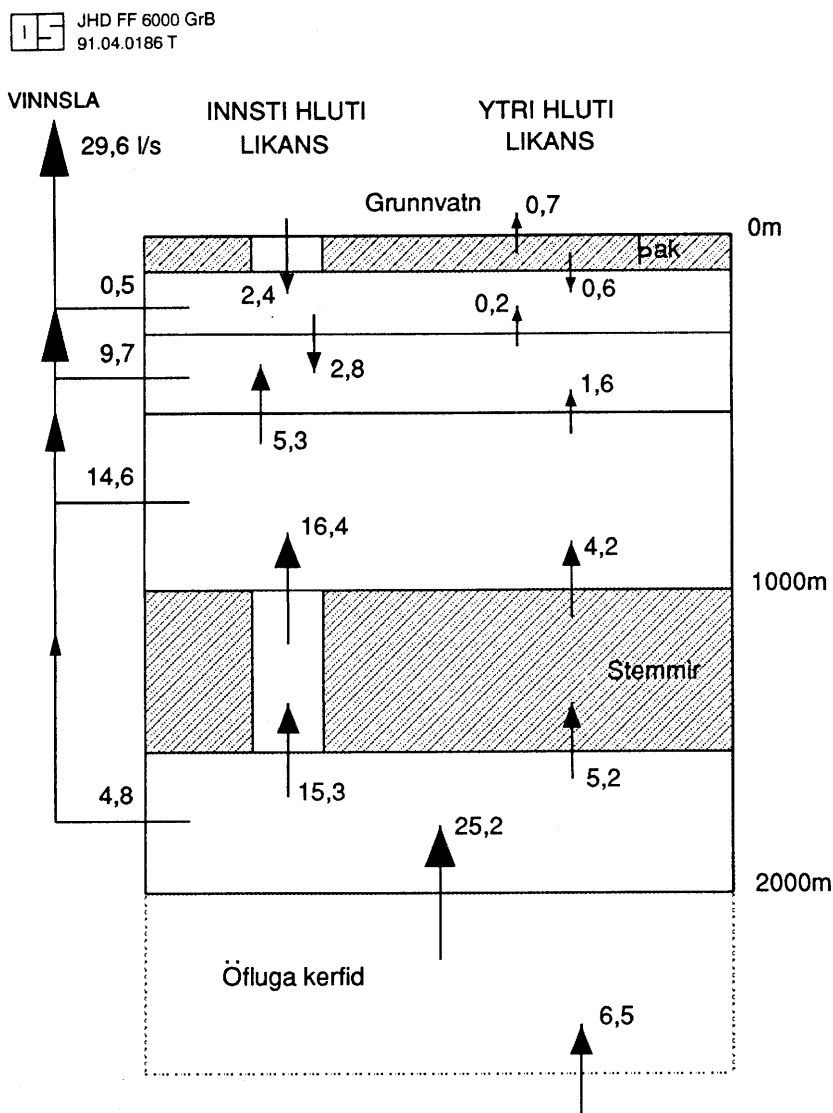
Merki um innstreymi kalds grunnvatns inn í jarðhitakefið hafa einnig sést í breytingum á efnainnihaldi vatnsins (sjá kafla 2.8 og myndir 17 og 18). M.a. hefur orðið um 10 % minnkun í styrk kfsils og flúoríðs í vatni úr holu HN-10. Þá sýnir reiknaður kalsedónhiti HN-10 greinileg merki innstreymis kaldara vatns (Magnús Ólafsson, munnlegar upplýsingar). Ekki er hægt að nota þessar breytingar til að áætla nákvæmlega hlutfall kaldara vatns í vinnslunni úr holum HN-10 og BN-1. Því veldur að efnainnihald grunnvatns á svæðinu er óvíst svo og áhrif efnahvarfa vatns og bergs í jarðhitakerfinu. Aðeins er hægt að segja að breytingarnar séu í samræmi við innstreymi að ofan.

Verulegur munur er á hlutfalli súrefnissamsæta ($\delta^{18}\text{O}$) og tvívetnishlutfalli (δD) í jarðhitavatni í Eyjafirði annars vegar og í grunnvatni á svæðinu hins vegar. Ættu þessi hlutföll því að vera tilvalin við mat á hlutfalli kalds grunnvatns í vinnslunni. Voru allar mælingar á súrefnissamsætum í vatni úr holum HN-10 og BN-1 dregnar út úr gagnagrunni Orkustofnunar og skoðað hvaða breytingar hafa orðið á styrk þeirra við langtíma vinnslu (Tómas Jóhannesson og Jón Ö. Bjarnarson, 1989). Ef miðað er við að hola BN-1 sýni efnastyrk öflugra vatnskerfisins, þá er hlutfall súrefnissamsæta þess um -13,85 (prómill). Núverandi hlutfall súrefnissamsæta í HN-10 er aftur á móti um -13,60. Ef gert er ráð fyrir að hlutfall súrefnissamsæta kalda vatnsins sé -11,45, en þá er miðað við kalda lind á Grísrará (Hrefna Kristmannsdóttir og Sigfús Johnsen, 1981), fæst að hlutfall grunnvatns í heildarrennsli holu HN-10 sé 10 %. Er þá búið að leiðrétta Grísarárgildið fyrir 0,2 prómilla tækjaskekkju (Hrefna Kristmannsdóttir, munnlegar upplýsingar).

Töluvert minni efnabreytingar hafa orðið í vatni úr holu BN-1 en úr HN-10. Er það reyndar í nokkru ósamræmi við það sem gera mætti ráð fyrir á grundvelli myndar 45. Þetta ósamræmi sést einnig í þeirri kólnun sem reiknast fyrir holu BN-1 (mynd 40). Líklegasta skýringin á þessu ósamræmi er að í reikningunum sé gert ráð fyrir að grunna æðin í holu BN-1 veiti meiru til hollunnar en hún gefi í raun.

5.5 Hermun vinnslustöðvunar sumarið 1990

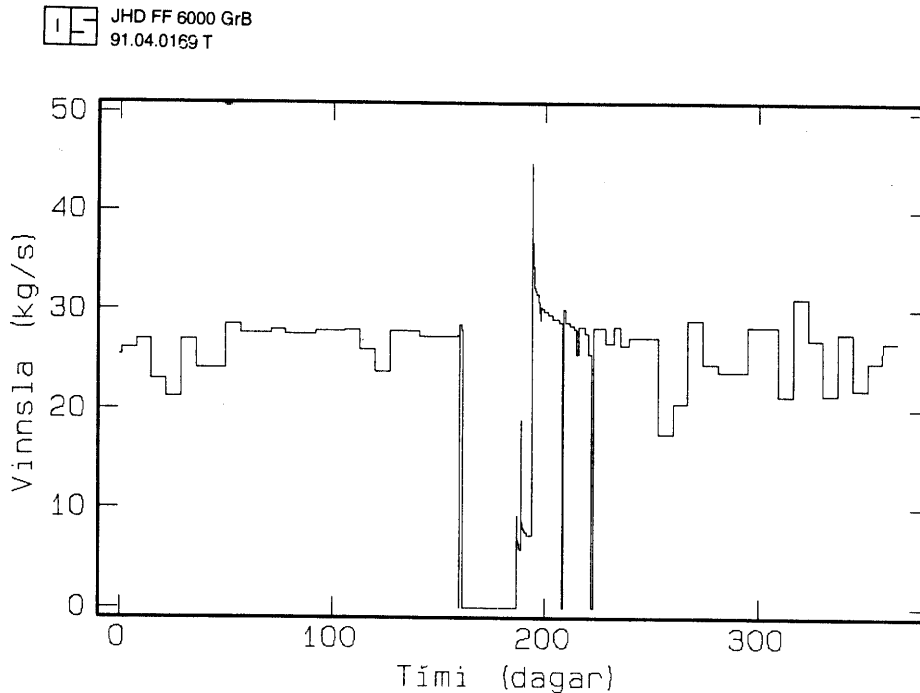
Síðasti þáttur lfkaneikninga fyrir Botnssvæðið fólst í hermun á vatnsborðsbreytingum sem urðu í holum á svæðinu við mánaðarstöðvun vinnslu úr HN-10 sumarið 1990 og ná reikningarnir allt til áramóta 1990/1991 (mynd 7). Í þessum hluta fékkst nákvæmari kvörðun á lekt í rennu og kjarna lfkansins, í strompunum og í gati. Eins þurfti að færa vegginn í vesturhluta lfkansins alveg að holu BÝ-4 svo samræmi fengist við vatnsborðsbreytingar í holunni. Þá var tenging holu BÝ-2 við rennuna óhjákvæmileg, svo og tenging rennunnar til yfirborðs um stromp nærri holunni. Með



Mynd 45. Einfölduð mynd af rennsli vatns milli laga kubbalkansins eftir 10 ára samfellda 29,6 l/s vinnslu. Rennsli er í l/s.

Því tókst að herma vatnsborðsbreytingar í holunni all þokkalega. Í heild má segja að mælingarnar, sem aflað var við vinnslustöðvunina, hafi orðið að miklu gagni við skilgreiningu á bergeiginleikum í efri hluta jarðhitakerfisins við Botn og bætt líkanið verulega frá því sem hefði orðið ef aðeins hefðu verið tiltæk gögn um upphafsástand svæðisins og viðbrögð HN-10 við 9 ára vinnslu.

Upphafstími í hermun vinnslustöðvunarinnar miðast við 1. janúar 1990. Gildi hita og þrýstings í kubbum líkansins við upphafstímann eru fengin úr vinnslufskani kafla 5.3. Mynd 46 sýnir hvernig vinnslan úr holu HN-10 er skilgreind í hermuninni. Dæling úr BN-1 er hins vegar föst allan tímann, 0,5 l/s úr 144 m æðinni og 5 l/s úr æðinni á 1750 m. Sú einföldun var gerð í reikningunum, að ekki var gert ráð fyrir hitabreytingum í líkaninu. Með því sparaðist töluverður tölvutími. Mynd 47 sýnir samræmið sem fékkst á milli reiknaðs og mælds þrýstings í holum HN-10, BÝ-2, BÝ-3, BÝ-4 og HÝ-12. Tókst að fá góða samsvörun nema fyrir holu HÝ-12. Því veldur ólínuleg hegðun lektar sem ekki er hægt að gera ráð fyrir í kubbalkaninu (kafla 2.5). Þá er þrýstisveifla

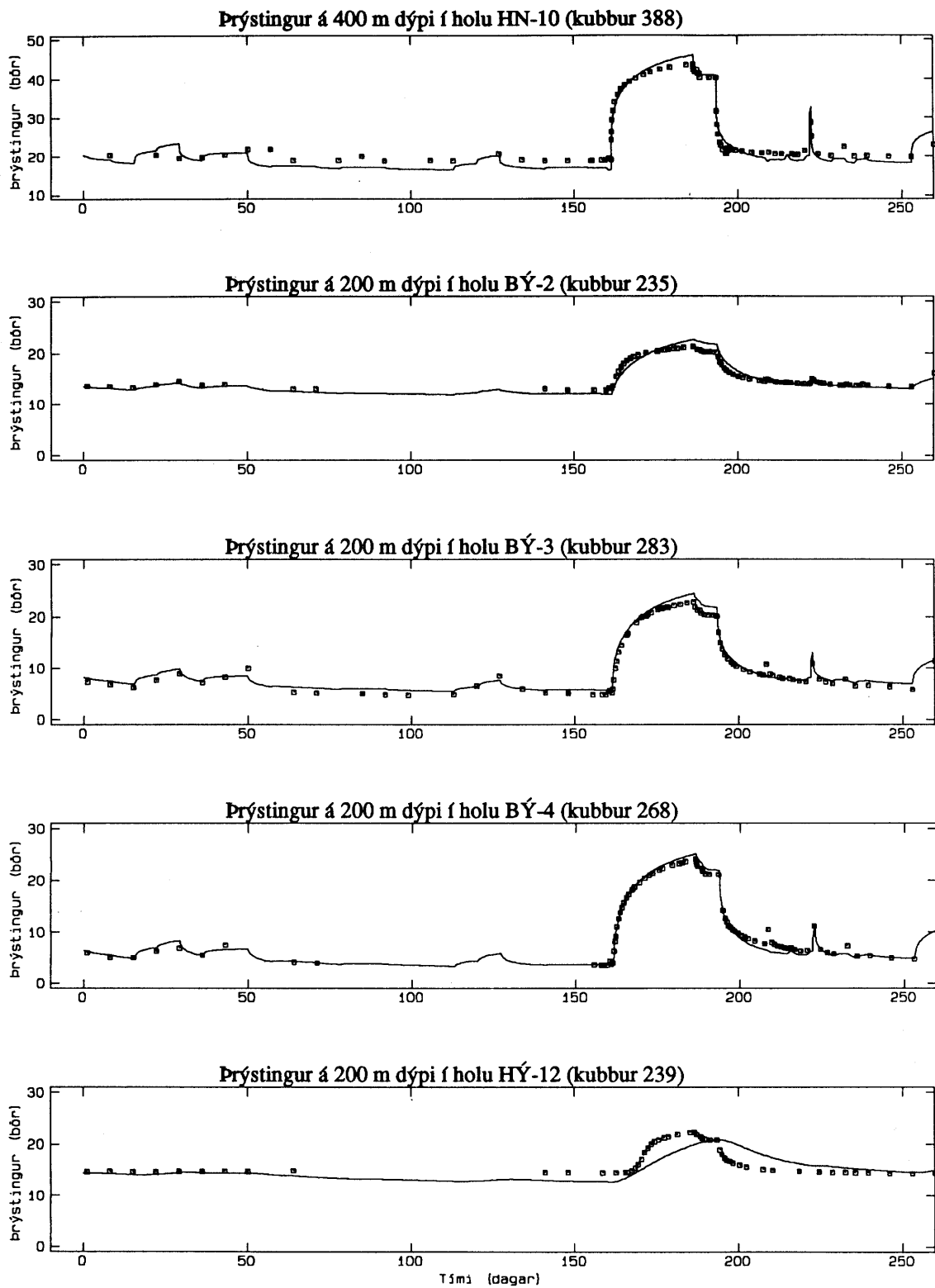


Mynd 46. Vinnslusaga holu HN-10 frá 1. janúar 1990.

holu HN-10 fullmikil og er þó búið að auka lekt í kubbunum næst holunni frá því sem almennt gildir í rennu. Til þess liggja þau rök að tregðustuðull holunnar er $-6,5$. Það er túlkað sem óvenju góð lekt næst holunni, væntanlega vegna sprunguáhrifa. Þá tókst ekki að herma nákvæmlega hægfara þrýstingshækkun sem varð í holu BÝ-2 eftir 10 daga dælustöðvun. Hallabreyting þrýstiferilsins er merki um að vatn sleppi upp úr jarðhitakerfinu um sama leyti og vatnsborð holunnar skriður upp fyrir dalbotn Eyjafjarðar. Þessi hegðan þrýstings er m.a. rök fyrir einhvers konar laug eða strompi nærri holunni.

Einn er sá eiginleiki rennu sem kom sterkt í ljós við hermun vinnslustöðvunar, en það er tenging rennunnar við kjarna lfkansins. Þurfti að skilgreina mun verri lekt þvert á hana en langs eftir henni til að þrýstingur hækkaði nægilega hratt við stöðvun og upphaf vinnslu. Af sömu ástæðu var lekt kjarna gerð verri í stefnu þvert á rennuna en langs (tafla 5). Einnig kom í ljós við stillingu eiginleika kubbalkansins að útslag þrýstisveiflunnar í holu HÝ-12 er næmt fyrir poruhluta kjarna. Þurfti poruhluta upp á 8 % til að sveiflan í þrýstingi yrði nægjanlega mikil. Má vera að lekt kjarna spili þarna einnig inn í, en henni var ekki breytt frá því sem áætlað var við prófanir á HN-10 (kafli 3.1).

JHD FF 6000 GrB
91.04.0190 T



Mynd 47. Reiknað og mælt vatnsborð holna á Botnssvæðinu frá 1. janúar 1990. Reiknaðir ferlar eru heildregnir

6. SPÁR UM FRAMTÍÐARÁSTAND JARÐHITAKERFISINS

Kubballskanið, sem fjallað var starlega um í kafla 5, er að síðustu notað til að spá fyrir um framtíðarástand jarðhitakerfisins á Botni. Skoðuð eru 12 ólfk vinnslutilfelli og er yfirlit um þau gefið í töflu 7. Í öllum tilfellunum er gert ráð fyrir að Hitaveita Akureyrar noti Botnssvæðið sem grunnafi og að vinnsla þar haldist nokkuð stöðug árið um kring. Í fyrstu fjórum tilfellunum eru skoðuð áhrif mismikillar en stöðugrar vinnslu út spátímabilið. Tilfelli A-2 gerir ráð fyrir svipaðri meðalvinnslu og verið hefur undanfarin ár, tilfelli A-1 gerir ráð fyrir nokkru minni vinnslu, en tilfelli A-3 og A-4 gera ráð fyrir meiri vinnslu. Í næstu þremur tilfellum er gert ráð fyrir árlegum vexti í vinnslu á Botnssvæðinu. Tilfelli B-1 gerir ráð fyrir 1 % árlegum vexti vinnslu úr holu HN-10, eða að meðalvinnslan vaxi úr 24 l/s árið 1991 í 29 l/s árið 2010. Tilfelli B-2 gerir ráð fyrir 2 % árlegum vexti vinnslu úr holu HN-10, eða aukningu í 35 l/s til ársins 2010. Að síðustu gerir tilfelli B-3 ráð fyrir 3 % árlegum vexti vinnslu úr holu HN-10, eða aukningu í 42 l/s til ársins 2010. Þess má geta að Orkuspárnefnd (1987) gerir ráð fyrir 1,3 % árlegum vexti í vinnslu jarðhita á Norðurlandi fram til ársins 2010.

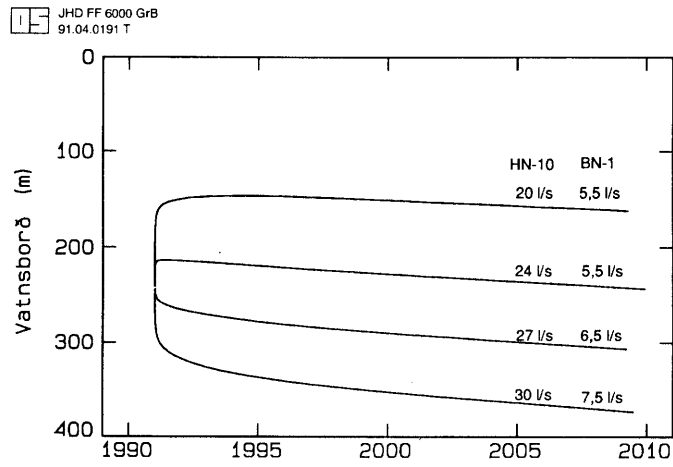
TAFLA 7. Yfirlit um vinnslutilfelli sem spár voru reiknaðar fyrir.

Tilfelli	Vinnsla HN-10 (l/s)	Vinnsla BN-1 (l/s)	Niðurdæling (l/s)	Athugasemdir
A-1	20,0	5,5		Meðaldæling 1986-1990
A-2	24,0	5,5		
A-3 ¹⁾	27,0	6,5		
A-4 ¹⁾	30,0	7,5		
B-1 ¹⁾	1% árl. vöxtur	6,0		1,3 % skv. Orkuspárnefnd
B-2 ¹⁾	2% árl. vöxtur	6,5		
B-3 ¹⁾	3% árl. vöxtur	7,0		
D-1	24,0	5,5	5,0	Niðurdæling í BÝ-2
D-2 ¹⁾	29,0	5,5	5,0	- " -
E-1	24,0	5,5	5,0	Niðurdæling í BÝ-4
E-2 ¹⁾	29,0	5,5	5,0	- " -
F-1	28,0 -> 27,0	5,5	6,0	4 l/s í BÝ-2 og 2 l/s í BÝ-4

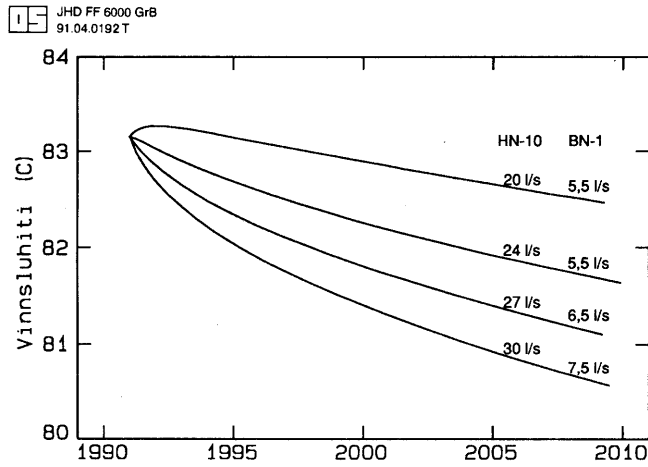
¹⁾ Krefst breytinga í dælubúnaði.

Fjögur næstu vinnslutilfellin í töflu 7 (D og E-tilfelli) gera ráð fyrir fastri 5 l/s niðurdælingu í tvær holur á Botnssvæðinu. Skoðuð eru viðbrögð holu HN-10, annars vegar við núverandi 29,5 l/s meðalvinnslu og hins vegar við 34,5 l/s meðalvinnslu. Tilgangur slíkrar niðurdælingar er að hækka þrýsting í jarðhitakerfinu og minnka þannig niðurdrátt í vinnsluholum. Stutt niðurdælingartilraun sem gerð var á Laugalandi í Eyjafjarðarsveit vorið 1991 bendir til að niðurdæling sé raunhæf aðferð til að auka afl lághitasvæða (Ólafur G. Flóvenz o.fl., 1991c). Að síðustu var skoðað hvernig haga mætti niðurdælingu í tvær holur þannig að vatnsborð holu HN-10 héldist ofan 240 m dýpis þrátt fyrir aukna vinnslu úr henni frá því sem nú er (tilvik F-1).

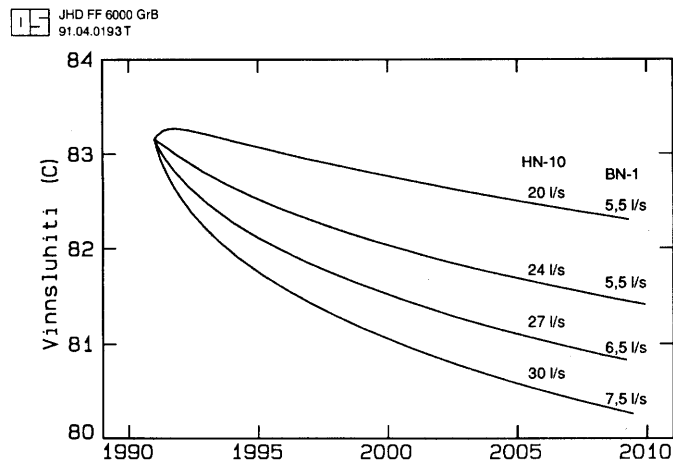
Myndir 48-51 sýna spár um vatnsborð, vinnsluhita og afl holna HN-10 og BN-1 fyrir A tilvikin í töflu 7. Alltaf er gert ráð fyrir iðustreymistapi í holu HN-10. Mynd 48 sýnir að 24 l/s meðalvinnsla úr holu HN-10 og 5,5 l/s úr BN-1 mun halda vatnsborði ofan við núverandi dælu HN-10. Hún er nú á 246 m dýpi. Aukin vinnsla er hins vegar ekki möguleg nema að dæla verði síkkuð



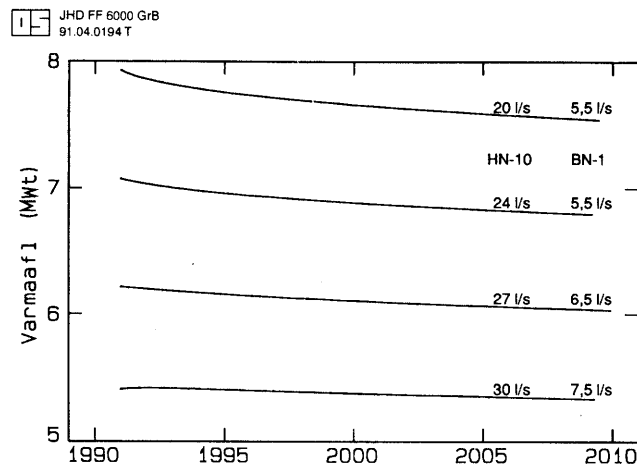
Mynd 48. Spár um vatnsborð holu HN-10 fyrir vinnslutilvik A.



Mynd 49. Spár um vinnsluhita holu HN-10 fyrir vinnslutilvik A.



Mynd 50. Spár um vinnsluhita holu HN-10 fyrir vinnslutilvik A og 6 m breiða rennu.



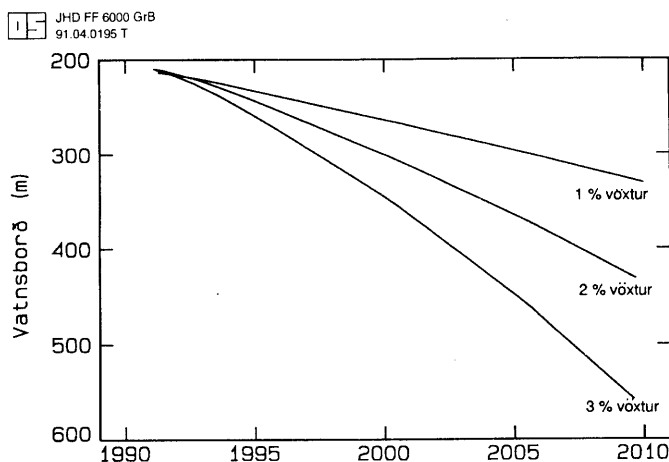
Mynd 51. Spár um varmaafli Botnssvæðisins fyrir vinnslutilvik A.

niður á mun meira dýpi. Þannig yrði dæluendi að fara niður fyrir 300 m dýpi ef halda ætti 27 l/s meðaldælingu úr HN-10 og niður undir 400 m ef dæla á 30 l/s allt spátímabilið. Mynd 49 sýnir hvernig vinnsluhiti holu HN-10 lækkar með tímanum. Verður mesta kólnun um 2 °C fyrir tilvik A-4. Áður hefur verið minnst á áhrif rennubreiddar á reiknaðan kólnunarhraða. Á mynd 50 er sýndur reiknaður vinnsluhiti holu HN-10 ef rennan er höfð 6 m breið í stað 10 m eins og á mynd 49. Samanburður myndanna sýnir að mjókkuð renna eykur kólnunina um einungis 0,5 °C frá því sem er á mynd 49. Það sýnir að bergrúmmál rennunnar er hætt að stjórna kælihraðanum. Nemur nú kalda grunnvatnið, sem kemur að ofan inn í líkanið, mest af varma sínum úr heitu berginu umhverfis rennuna. Mynd 51 sýnir reiknað afl vinnslunnar úr Botnssvæðinu fyrir A-tilvikin fjögur. Afreikningarnir gera ráð fyrir að hitaorka vatnsins sé nýtt niður í 35 °C. Myndin sýnir að auka má afl svæðisins um allt að 30 % með því að draga vatnsborð holu HN-10 niður undir 350 m og með aukinni vinnslu úr BN-1 (síkkun dælu). Kólnunar gætir allan spátímann en hún er lítil og veldur mest um 5 % afrýrnun í spátílfelli A-4.

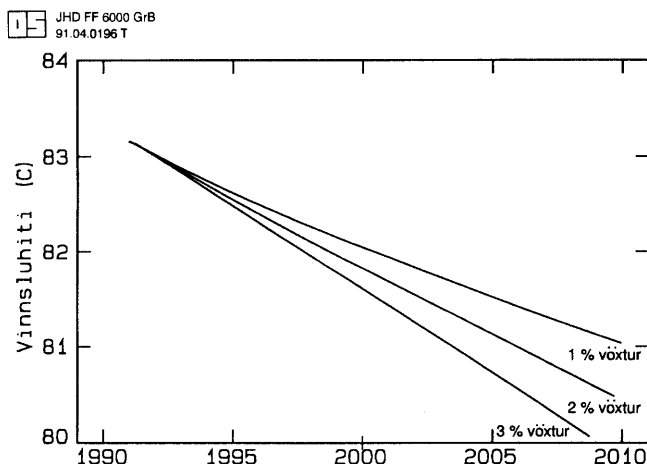
Mynd 52 sýnir reiknað vatnsborð holu HN-10 fyrir vinnslutilvikin B-1 og B-2 í töflu 7. Þar sést að ef holan á að mæta 1-2 % árlegum vexti í vinnslu, er nauðsynlegt að síkka dælu í holunni niður undir 400 m. Mynd 53 sýnir áætlaðan vinnsluhita holunnar á spátímanum. Þar sést að kólnunin verður einungis 2-3 °C til viðbótar frá því sem nú er.

Myndir 54 og 55 sýna reiknað vatnsborð og vinnsluhita holu HN-10 í vinnslutilvikum D-1 og D-2. Á mynd 54 sést að 5 l/s niðurdæling 5 °C vatns í holu BÝ-2 myndi aðeins lyfta vatnsborði holu HN-10 um 40 m frá því sem yrði ef engin niðurdæling kæmi til. Aukning vinnslu sem nemur niðurdælingarmagninu myndi draga vatnsborð niður undir 300 m. Kólnun holunnar yrði litlu meiri en sú sem reiknaðist án niðurdælingar (mynd 49, tilfelli A-4).

Myndir 56 og 57 sýna reiknað vatnsborð og vinnsluhita holu HN-10 ef 5 l/s af 5 °C heitu vatni yrði nú dælt niður í holu BÝ-4 í stað BÝ-2. Fæst nú 50-60 m vatnsborðshækkun í holu HN-10 frá því sem yrði án niðurdælingar. Kólnunarhraði reiknast tvöfalt meiri og verður vatnshitinn kominn niður í 76 °C í lok spátímans. Aukin kólnun skýrist af stuttri vegalengd milli holna HN-10 og BÝ-4. Kalda niðurdælingarvatnið nær ekki að draga til sín varma úr grannbergi rennu í sama mæli og yrði ef meiri vegalengd væri milli holnanna.



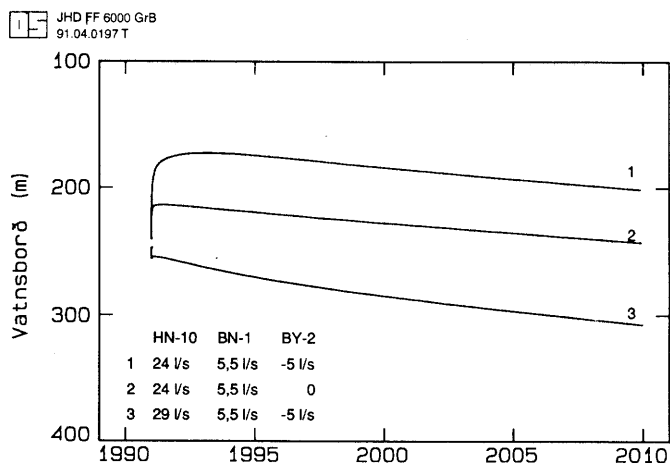
Mynd 52. Spár um vatnsborð holu HN-10 fyrir vinnslutilvik B.



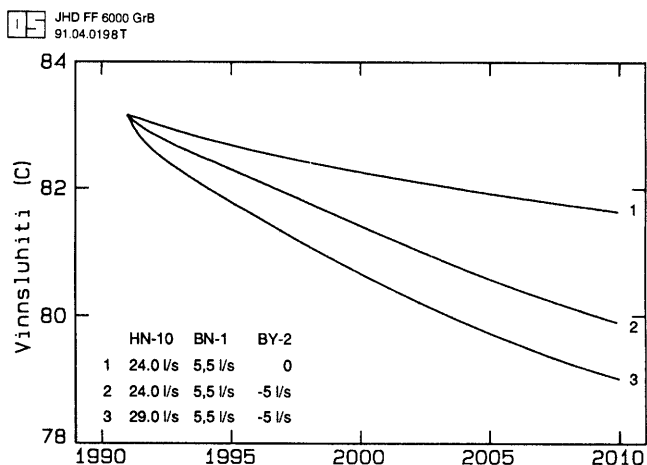
Mynd 53. Spár um vinnsluhita holu HN-10 fyrir vinnslutilvik B.

Mynd 58 var gerð til að bera saman hagkvæmni niðurdælingar í holur BÝ-2 og BÝ-4 frá sjónarhóli varmaafis úr holu HN-10. Gert er ráð fyrir að hiti neðri æðar HN-10 haldist óbreyttur allan spátímann og að vatnið úr holu HN-10 nýtist niður í 35 °C. Myndin sýnir að eftir 3-4 ára niðurdælingu er aflmunur tilvikanna orðinn um 0,3 MW hvort sem vinnsla úr HN-10 er aukin eður ei. Niðurdæling í holu BÝ-2 virðist því 6 - 7 % hagkvæmari vegna minni kólnunar vatns úr holu HN-10. Það sýnir jafnframt að niðurdæling í BÝ-4 kemur vart til greina án þess að vinnslan sé aukin jafnmikið í holu HN-10. Niðurdæling í BÝ-2 er því mun hagkvæmari sé litið til lengri tíma. Samt er óvíst að hún borgi sig þar sem hún skilar einungis um 40 m vatnsborðshækkun í HN-10.

Myndir 55-58 sýna að niðurdæling, sem nemur um 5 l/s, skilar 40-60 m vatnsborðshækkun í holu HN-10 og veldur ekki teljandi aflrýmum ef vatnið fer niður nógu fjarri holunni. Því þótti vert að skoða hvort hægt væri, með tiltölulega vægri ádælingu í holur BÝ-2 og BÝ-4, að framlengja "líf" núverandi dælu í holu HN-10 en auka samt vinnsluna. Dælan er á 246 m dýpi. Verður vatnsborð holunnar því að haldast ofan þess dýpis. Mynd 59 sýnir reiknað vatnsborð holu HN-10 ef 4 l/s yrði dælt niður um holu BÝ-2 og 2 l/s í holu BÝ-4. Vinnsla úr HN-10 yrði aukin úr 24 í 28 l/s við



Mynd 54. Spár um vatnsborð holu HN-10 fyrir vinnslutilvik D.

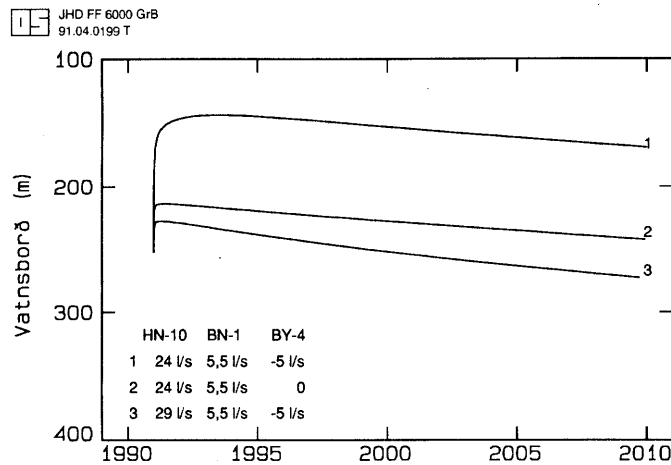


Mynd 55. Spár um vinnsluhita holu HN-10 fyrir vinnslutilvik D.

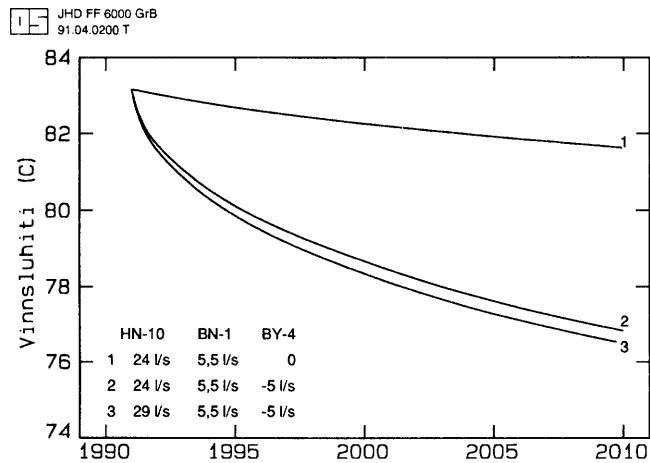
upphaf niðurdælingar, en í lok spátmans yrði vinnslan komin niður í 27 l/s. Þessi vinnslutilhögun heldur vatnsborði holu HN-10 ofan við núverandi dælu. Vinnsluaukningin er um 11 % og aflaukningin er svipuð. Ástæða þess að ekki næst sama magn upp úr holu HN-10 og fer í niðurdælingarholurnar liggur fyrst og fremst í því að þrýstingur öflugra vatnskerfisins fellur um 2,5-3 m á ári. Hluti niðurdælingarvökvans fer því í að hamla gegn þessu óhjákvæmilega þrýstifalli. Eins gæti hluti vatnsins sem fer í holu BÝ-2 komið upp til yfirborðs um strompinn við holuna í stað þess að skila sér til holu HN-10.

Þegar vinnsluspárnar á myndum 48-59 eru skoðaðar í samhengi má gera sér eftirfarandi mynd af framtíðarmöguleikum varmavinnslu á Botnssvæðinu.

- Botnssvæðið þolir 29,5 l/s meðalvinnslu næstu 20 árin án breytinga í dælubúnaði holna.
- Ekki er unnt að auka vinnslu að ráði úr holum HN-10 og BN-1 án síkkunar dælna í þeim. Ef farið yrði með dælu niður á 400 m dýpi í holu HN-10, og dæla í BN-1 yrði einnig síkkuð, virðist mega auka meðalvinnslu úr svæðinu um allt að 25 % (úr 29,5 í 38 l/s). Jafnframt verð-



Mynd 56. Spár um vatnsborð holu HN-10 fyrir vinnslutilvik E.



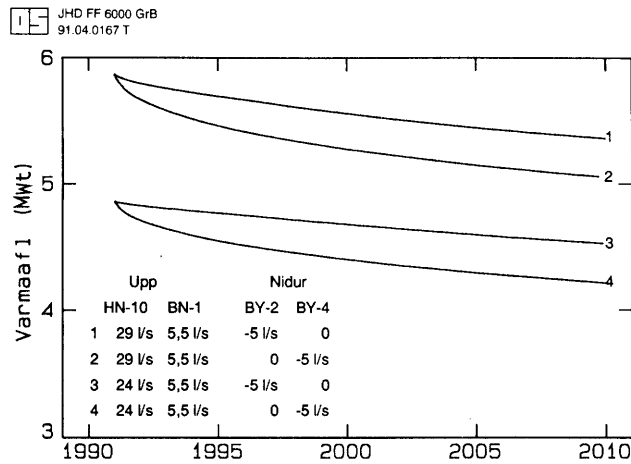
Mynd 57. Spár um vinnsluhita holu HN-10 fyrir vinnslutilvik E.

ur kólnun holna litlu meiri en við 20 ára framhald núverandi meðalvinnslu.

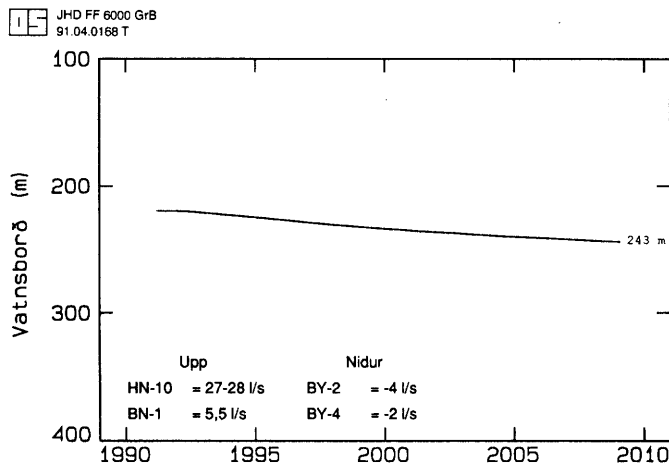
- Niðurdæling kalds vatns í tiltækar rannsóknarholur sópar varma úr efri jarðlögum Botnssvæðisins til vinnsluholna. Slík niðurdæling þarf að vera væg, ella er hætt á að ávinningur aukinnar dælingar úr vinnsluholum tapist í lækkuðu varmainsihaldi vatnsins úr þeim.
- Auka má afl Botnssvæðisins um rúm 10 % frá núverandi vinnslu, án breytinga í dælubúnaði, ef samtals 6 l/s af köldu vatni er jafnframt dælt niður í holur BÝ-2 og BÝ-4. Þess ber þó að geta að óvíst er hvort holurnar taka við þessu magni.

Rétt er að minna á að efri æð holu HN-10 er fulllofarlega í kubbalkaninu. Gætu spár um vinnsluhita raskast svolítið af þeim sökum. Eins má nefna að niðurdælingavatnið er einungis 5 °C heitt í reikningunum. Aukinn hiti þess mun hægja á kólnunarhraða frá því sem sýnt er í þessum kafla.

Annað atriði sem ekki hefur verið til sérstakrar skoðunar í spáreikningunum eru áhrif aukinnar vinnslu úr holu BN-1. Er óvíst að hennar sjái mikil merki í holu HN-10 sökum mikils dýpis á aðalæð holu BN-1. Gæti orðið fróðlegt að kanna betur tillag efri æða holu BN-1 til heildarvinnslu



Mynd 58. Samanburður varmaafis holu HN-10 fyrir tilvik D og E.



Mynd 59. Vatnsborð holu HN-10 í vinnslutílfelli F-1.

úr holunni ef til dæluupptektar kemur á næstunni. Þá gæfist jafnframt tækifæri til að ná vatnssýnum úr dýpri hluta holunnar. Efnasamsetning þeirra mun varpa ljósi á hve vatnsskipti eru ör í öflugra vatnskerfinu og þá jafnframt segja eitthvað til um stærð þess og tengsl við frjálst vatnsborð.

7. HELSTU NIÐURSTÖÐUR

Byggt hefur verið ítarlegt þrívítt kubbalkan fyrir jarðhitasvæðið á Botni í Eyjafjarðarsveit. Það hermírlítiltæk upplýsingar um gerð jarðhitakerfisins, hita- og þrýstiástand þess ásamt því að herma tiltæk gögn um viðbrögð jarðhitakerfisins við vinnslu síðasta áratugs. Niðurstöður hermíreikninganna má draga saman á eftirfarandi hátt:

- Til grundvallar kubbalkaninu liggur *hugmyndalíkan*, sem byggir á niðurstöðum rannsóknasíðustu tveggja áratuga. Samkvæmt hugmyndalíkaninu er mest lekt í jarðhitakerfinu ofan 1000 m eftir lóðréttri rennu, eða sprungubelti, með norðaustlæga stefnu. Allar holur á svæðinu tengjast rennunni, nema hola HÝ-12. Ofan 1000 m er jarðhitakerfið lítið. Það afmarkast til allra átta af lágri lekt, sem varnar því að áhrifa verði vart milli Botnssvæðisins og jarðhitasvæðanna í kring. Botnssvæðið er þó ágætis vatnsvinnslusvæði sökum góðra tengsla við tvö vatnsgæfkerfi: Annars vegar háþrýst og öflugt jarðhitakerfi, sem líklegast er neðan 1500 m, og hins vegar grunnvatnskerfið ofan jarðhitakerfisins. Meðan svæðið var ótruflað af vinnslu streymdi heitt vatn úr öfluga kerfinu upp um rennuna og upp í grunnvatnskerfið. Yfir jarðhitakerfinu er torlekt en þunnt þakberg sem hélt við a.m.k. 20 bara yfirþrýstingi í jarðhitakerfinu.
- Kubbalkanið er byggt úr 429 misstórum kubbum í 8 láréttum lögum, og er eitt flóknasta líkan sem gert hefur verið af íslensku jarðhitakerfi. Tengingar milli kubba líkansins reyndust 1361 að tölu. Að frátöldu grunnvatnskerfinu og öfluga jarðhitakerfinu, sem í líkaninu er staðsett neðan 1500 m, er kubbalkanið 10 km³. Ástand líkansins og viðbrögð þess við vinnslu voru reiknuð með forritinu *PT*. Þurfti að endurskoða líkanið og reikna viðbrögð þess um 300 sinnum áður en gott samræmi fékkst milli tiltækra gagna og líkansins.
- Eitt og sama líkanið var látið herma eftirfarandi þætti í sögu jarðhitakerfisins: (1) Upphitnun jarðhitakerfisins frá lokum Ísaldar til áætlaðs ástands þess áður en boranir hófust á svæðinu. (2) Vatnsborð og vinnsluhita holu HN-10 á fyrstu 8 árum vinnslusögu holunnar. (3) Vatnsborðsbreytingar sem urðu í rannsóknarholum svæðinu við stöðvun vinnslu úr holu HN-10 sumarið 1990 og til áramóta 1990/1991. Á þann hátt verður kubbalkanið mun trúverðugra en ella. Eftir tíu þúsund ára upphitnun er líkanið í góðu hita- og þrýstijafnvægi. Jafnframt er ástand þess í samræmi við áætlað ástand jarðhitakerfisins fyrir boranir.
- Nauðsynlegt reyndist að vel leka rennan ofan 1000 m hefði eiginleika 10 m breiðs sprungubeltis. Með því móti tókst að herma vatnsborðsbreytingar í rannsóknarholunum og kólnun vatns úr holu HN-10. Kólnunin er mjög háð breidd rennunnar. Einnig reyndist nauðsynlegt að þéttur N-S veggur, sem afmarkar svæðið að vestan, væri alveg við holu BÝ-4.
- Jarðhitakerfið á Botni tengist grunnvatnskerfinu í dalbotninum um rásir sem áður hleyptu heitu vatni upp úr jarðhitakerfinu. Ein slík rás er þar sem Botnslaug var áður. Þá reyndist nauðsynlegt að hafa aðra slíka rás við holu BÝ-2 í kubbalkaninu, bæði til að herma upphaflega hitadreifingu í kerfinu og eins til að herma vatnsborðsbreytingar í holunni. Eftir að vinnsla hófst á svæðinu streymir kalt grunnvatn niður um þessar rásir og veldur mikilli kólnun efst í jarðhitakerfinu og nokkurri kólnun vatns úr vinnsluholunum. Við vinnslu undanfarinna ára (29,6 l/s) virðast um 10 % vatnsins koma að ofan, en 85 % að neðan úr öfluga jarðhitakerfinu. Síðustu 5 % koma úr forða kubbalkansins milli 0 og 1500 m dýpis. Breytingar í efnainnihaldi vatns úr HN-10 benda einnig til sambærilegs innrennslis kalds grunnvatns.
- Líkt er eftir öfluga jarðhitakerfinu í kubbalkaninu með 300 km³ vatnskerfi neðan 1500 m. Í líkaninu er poruhluti þess 20 % og inn í það hófst stöðugt 6½ kg/s innstreymi 105 °C heits

vatns í lok ísaldar fyrir tíu þúsund árum. Ekki má líta á staðsetningu öfluga kerfisins, rúmmál þess eða poruhluta sem raunveruleikann, enda fátt vitað um öfluga kerfið. Gífurlegt rúmmál öfluga kerfisins hermir mikla vatnsrýmd þess. Vart er pláss fyrir svo stórt jarðhitakerfi undir Botni. Líklegra er að mikil vatnsrýmd kerfisins skýrist með tengslum þess við grunnvatnskerfi, e.t.v. í fjöllum vestan Botnssvæðisins. Vatnsrýmd öfluga kerfisins stjórnar langtíma-niðurdætti í vinnsluholum. Hann er um 2,5 m á ári við 29,6 l/s meðalvinnslu síðustu fimm ára.

- Vinnsluspár, sem reiknaðar eru með kubbalkaninu, benda til bjartrar framtíðar vatnsvinnslu á Botnssvæðinu. Kólnun sú sem orðið hefur í vinnsluholum á eftir að hægja á sér og fer vinnsluhiti holu HN-10 tæplega niður fyrir 80 °C í þeim spátílfellum sem skoðuð voru. Ekki er þörf breytinga í dælubúnaði holna ef áframhald verður á 29,5 l/s meðalvinnslunni úr svæðinu. Síkkun dælna í allt að 400 m býður upp á um 25 % aukningu í vinnslu frá núverandi meðaldælingu. Slík aukning veldur litlu meiri kælingu en spáð er við áframhald óbreyttrar vinnslu. Niðurdæling í tiltækar rannsóknarholur hækkar vatnsborð á svæðinu. Virðist mega auka vinnslu úr holu HN-10 um allt að 10 % með hóflegri niðurdælingu í tvær þeirra án þess að dælum verði breytt.

Rétt er að minna á að kubbalkan þáð sem hér er notað til að herma vinnsluviðbrögð jarðhitakerfisins á Botni er ekki endilega eina mögulega líkanið. Vera má að hægt sé að finna aðra uppröðun bergeiginleika í líkaninu sem veiti jafngóða samsvörun milli mældra og reiknaðra ferla í borholum. Þá eru nokkrir meinbugir í kubbalkaninu sem ekki var eytt tíma í að lagfæra. Ræður þar að höfundar telja að þeir hafi óveruleg áhrif á spár sem líkanið veitir um framtíðarástand svæðisins. Má nefna að dýpi á æðar mætti vera nákvæmara og eins er þrýstingur í öfluga vatnskerfinu fullhár miðað við hvað ráða má af takmörkuðum upplýsingum um upphafsþrýsting jarðhitakerfisins. Hvað sem því líður nær kubbalkanið að herma nær öll tiltæk gögn um 10 ára vinnslu á Botnssvæði. Er því nokkuð góð víska fyrir því að spár þess um framtíðarástand svæðisins eigi að duga vel a.m.k. næstu 10 árin.

Kubbalkanið opnar ýmsa athyglisverða möguleika til mats á áhrifum aukinnar vinnslu svo og áhrifum niðurdælingar í jarðhitakerfið. Má prófa í því alls kyns útfærslur vinnslu og niðurdælingar áður en til framkvæmda kemur á sjálfa svæðinu. Geta slíkir reikningar t.d. sagt til um hagkvæmni þess að breyta dælubúnaði í holum. Ástæða er svo til að endurskoða líkanið eftir nokkur ár í ljósi vinnslusögunnar sem safnast er tímar líða.

Glöggir lesendur hafa væntanlega tekið eftir því að umfjöllun skýrslunnar hefur að miklu leyti snúist um holu HN-10 og hefur hola BN-1 mjög staðið í skugganum. Fyllsta ástæða er til að auka vinnslu úr holu BN-1 frá því sem nú er. Til þess liggja þau einföldu rök að holan gefur heitara vatn en HN-10 og fæst þannig aukið afl út úr svæðinu þó svo sekúndulítrafjöldinn úr báðum holum verði sá sami. Til þess þarf að síkka dælu í holunni, sem nú er á 175 m dýpi. Gefst þá um leið tækifæri til að meta afköst holunnar og efnainnihald öfluga vatnskerfisins með nákvæmari hætti en nú er unnt.

Framundan eru sambærilegir líkanreikningar fyrir jarðhitakerfið á Laugalandi syðra í Eyjafjarðarsveit. Enginn vafi er að sú reynsla sem hefur safnast við reikningana á Botnssvæðinu mun nýtast við þá vinnu. Slík líkangerð mun vonandi segja til um hagkvæmni víðtækrar niðurdælingar á Laugalandi og í nágrenni, en niðurdæling er nú ofarlega á blaði hjá þeim aðilum sem vilja kanna möguleika á frekari varmavinnslu í víðáttumiklum og heitum bergrunni dalbotnsins.

HEIMILDIR

- 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 ágúst 1978*. Orkustofnun, OS JHD 7827, 136 s.
- Axel Björnsson og Kristján Sæmundsson, 1975: *Jarðhiti í nágrenni Akureyrar*. Orkustofnun, OS JHD 7557.
- Ásgrímur Guðmundsson, 1980: *Borun HN-10 við Hrafnagilslaug syðri fyrir Hitaveitu Akureyrar*. Orkustofnun, greinargerð ÁsG-80/03, 12 s.
- Guðmundur S. Böðvarsson, 1982: *Mathematical modeling of the behavior of geothermal systems under exploitation*. PhD-ritgerð, University of California, Berkeley, 348 s.
- Guðmundur Guðmundsson og Kristján Sæmundsson, 1971: *Jarðhitaathugun við Hrafnagilslaug syðri í Eyjafirði*. Skýrsla Orkustofnunar, 8 s.
- Guðni Axelsson, 1989a: Rannsóknaráætlun fyrir Hitaveitu Akureyrar. Hermireikningar 1989-1992. Orkustofnun, greinargerð GAx-89/01, 2 s.
- Guðni Axelsson, 1989b: *Forðafræði jarðhitans. Vinnslueftirlit, hermireikningar og vinnsluspár*. Erindi flutt á aðalfundi Sambands íslenskra hitaveitna, Egilsstöðum, júní 1989, 9 s.
- Guðni Axelsson og Helga Tulinius, 1988: *Jarðhitasvæðið á Glerárdal*. Hermireikningar og vinnsluspár. Orkustofnun, greinargerð GAx/HTul-88/01, 25 s.
- Guðni Axelsson, Helga Tulinius, Ólafur G. Flóvenz og Þorsteinn Thorsteinsson, 1988: *Vatnsöftun Hitaveitu Akureyrar. Staða og horfur 1988*. Orkustofnun, OS-88052/JHD-10, 33 s.
- Gunnar Böðvarsson, 1982: *Glaciation and geothermal processes in Iceland*. *Jökull*, 32, 21-28.
- Gunnar A. Sverrisson, 1979: *Sögulegt yfirlit um athuganir á varmaveitu fyrir Akureyrarbæ*. *Tímarit V.F.Í.*, 64, 5-10.
- Hitaveita Reykjavíkur, Orkustofnun og Verkfræðistofan Vatnaskil, 1986: *Laugarnessvæði. Vinnslusaga og framtíðarhorfur*. Hitaveita Reykjavíkur, skýrsla ágúst 1986, 129 s.
- Helga Tulinius, Amanda L. Spencer, Guðmundur S. Böðvarsson, Hrefna Kristmannsdóttir, Þorsteinn Thorsteinsson og Árný E. Sveinbjörnsdóttir, 1987: *Reservoir Studies of the Seltjarnarnes Geothermal field, Iceland*. Orkustofnun, OS-87932/JHD-07, 55 s.
- Hrefna Kristmannsdóttir, 1985: *Efnainnihald jarðhitavatns í vinnsluholum í Eyjafirði*. Orkustofnun, greinargerð HK-85/07, 8 s.
- Hrefna Kristmannsdóttir og Sigfús Johnsen, 1981: *Eyjafjörður. Efnainnihald og ísótópahlutföll jarðhitavatns*. Orkustofnun, OS-81023/JHD-14, 49 s.
- Orkusparnefnd, 1987: *Jarðvarmaspá 1987-2015. Spá um vinnslu og notkun jarðvarma*. Orkustofnun, OS-87045/OBD-01, 178 s.
- Ólafur G. Flóvenz, Þorsteinn Thorsteinsson, Guðni Axelsson og Hrefna Kristmannsdóttir, 1987: *Hitaveita Akureyrar. Drög að áætlun um rannsóknir og eftirlit með vinnslu*. Orkustofnun, greinargerð ÓGF/PTh/GAx/HK-87/10, 12 s.

- Ólafur G. Flóvenz, Ásgrímur Guðmundsson, Þorsteinn Thorsteinsson og Gylfi P. Hersir, 1989: *Botn í Hrafnagilshreppi. Niðurstöður jarðhitarannsóknna 1981-1989*. Orkustofnun, OS-89018/JHD-03, 92 s.
- Ólafur G. Flóvenz, Hrefna Kristmannsdóttir, Guðni Axelsson, Hilmar Sigvaldason og Auður Ingimarsdóttir, 1990: *Hitaveita Akureyrar. Vinnslueftirlit 1989*. Orkustofnun, OS-90019/JHD-08 B, 60 s.
- Ólafur G. Flóvenz, Guðni Axelsson og Ásgrímur Guðmundsson, 1991a: *Jarðhitarannsóknir við Botn og Hrafnagil 1989-1990. Rannsóknarboranir og vatnsborðsmælingar*. Orkustofnun, OS-91008/JHD-02, 89 s.
- Ólafur G. Flóvenz, Guðni Axelsson og Auður Ingimarsdóttir, 1991b: *Hitaveita Akureyrar. Vinnslueftirlit 1990*. Orkustofnun, OS-91009/JHD-02 B, 28 s.
- Ólafur G. Flóvenz, Guðni Axelsson og Hrefna Kristmannsdóttir, 1991c: *Niðurdæling vatns á lág-hitasvæðum*. Erindi flutt á Orkuþingi 91, Reykjavík, nóvember 1991, 5 s.
- Tómas Jóhannesson og Jön Ö. Bjarnarson, 1989: *Gagnasafn jarðefnafræðideildar. Kröfulýsing-Aðgerðalýsing*. Orkustofnun, greinargerð, TJ/JÖB-89/02.
- Þorkell Þorkelsson, 1920: *Undersøgelse af nogle varme kilder paa Nord-Island*. Det Kgl. Danske Vid. Selsk., Math-Fys. Medd. III, 1, 30 s.
- Þorsteinn Thorsteinsson, 1981: *Rennslisprófanir í holu HN-10*. Orkustofnun, greinargerð PTh-81/02, 6 s.

ENGLISH SUMMARY

The low-temperature geothermal field at Botn is one of four geothermal fields utilized for space-heating by the town of Akureyri (pop. 13000) in Central North Iceland. Two production wells, HN-10 and BN-1, have been drilled in the field in addition to a few exploration wells. A 20 bar well-head pressure was observed in the field prior to production. During the period 1986 - 1990 average production from wells HN-10 and BN-1 was 24,3 and 5,3 l/s, respectively. This production causes a water-level draw-down in well HN-10 to below 200 m depth. The draw-down in well BN-1 is somewhat less. However, due to recharge from the ground-water system in the area and from a powerful geothermal system of an unknown location, the draw-down in production wells remains relatively stable. In addition to this draw-down in pressures a 3 - 4 °C decline in the production temperature of well HN-10 has been observed.

A detailed three-dimensional numerical model has been developed for the geothermal system at Botn. The model simulates available information on the nature of the system, temperature- and pressure conditions in the system as well as data on the production response of the system during the last decade. The numerical model is based on a conceptual model which has evolved during two decades of geothermal research in the area. The physical conditions in the numerical model and the changes caused by production were calculated by the computer code PT.

The model simulates the following: (i) The natural state of the system. (ii) Observed water-level changes and decline in the temperature of water produced from well HN-10 during production. (iii) Water-level changes observed in the exploration wells in the area during a build-up and interference test in the summer of 1990.

The numerical model consists of three main units: (1) A powerful geothermal system below 1500 m depth, (2) the upper part of the geothermal system above 1000 m depth and (3) the ground-water system above the geothermal system. A low-permeability layer separates parts 1 and 2 in the model. The powerful geothermal system is over-pressurized and has a very large reservoir storage coefficient, probably because of its connection to a ground-water system in the mountains next to the Botn area. This results in a very slow long-term pressure decline in the production wells (0.23 bars/year).

Flow of water in the upper part of the system is controlled by a 10 m thick highly permeable fracture-zone with a northeasterly direction. Decline rates of production temperatures, as well as water-level changes in the exploration wells, are very sensitive to the properties of this fracture-zone. The upper part of the geothermal system, outside the fracture-zone, is confined by low-permeability rocks which ensure that no interference is seen between Botn and other production areas in the region.

The Botn geothermal system is linked with the ground-water system above through channels that prior to production allowed hot water to escape to the surface. One such channel is located below a now extinct warm spring, Botnslaug. A second channel, situated ½ km northeast of the production wells, was required in the numerical model. Prior to production hot water flowed from the powerful system below 1500 m up through the fracture-zone and into the ground-water system. During production, however, cold ground-water flows down through these channels causing some cooling of the upper feed-zones in the production wells. According to the numerical model, about 10 % of the water currently produced originates as cold ground-water. Changes in the chemical-content of the water produced support this result.

The numerical model predicts that the decline of production temperatures at Botn will slow down in the future and remain within economical limits for some decades. As an example the production temperature of well HN-10 will most likely stay above 80 °C for the next 20 years. If the average production from the field during 1986 - 1990 (appr. 29,5 l/s) is maintained, lowering of pumps in the production wells will not become necessary. A 25 % increase in production, on the other hand, requires pumps to be lowered down to 400 m from the present depths of 246 m and 175 m in wells HN-10 and BN-1, respectively. Such an increase in production will only cause an additional 1 °C drop in the production temperature of well HN-10. Injection of cold water into some of the exploration wells will reduce the pressure draw-down in the area. A moderate injection (6 l/s) into two of the exploration wells allows a 10 % increase in production from well HN-10, without any lowering of the pump in the well.

VIÐAUKI A

SKÖLUN Á BERGEIGINLEIKUM RENNUNNA

Innsti hluti kubballkansins af Botnssvæði er skilgreindur í inntaksskrá PT sem safn af ferningum, sem allir eru 100 m á kant. Rennunni í miðju líkansins er ætlað að hegða sér eins og sprungubelti sem einungis er 10 m breitt. Því ætti í raun að skilgreina rúmmál og vegalengdir í kubbum rennu upp á nýtt með 10 m breidd. Slíkt hefði orðið ærið tímafrekt þar sem inntaksskrá PT er flókin og auðvelt að gera villur við smíð hennar. Því þótti auðveldara að skala til bergeiginleika rennunnar til að viðbrögð hennar í kubballkaninu yrðu nærfellt þau sömu og fengjust með breyttum fjarlægðum og rúmmálum kubba. Nákvæmlega sama skölun er gerð fyrir bergeiginleikann *hola 10*. Skölunin var gerð á eftirfarandi hátt.

Lekt: Rennsli inn um hlið kubbs, sem hefur flatarmál A, er gróflega lýst með:

$$q = k_r A \frac{\Delta P}{\Delta L}$$

þar sem k_r er raunveruleg lekt kubbsins þvert á hliðina, ΔP er þrýstimunur milli hliðar kubbsins og miðju hans og þar á milli er fjarlægðin ΔL . Í inntaksskrá PT er flöturinn A ætíð $100 \times 100 \text{ m}^2$ og ΔL er ætíð 50 m. Nú er rennan einungis 10 m breið, og þá gildir um rennsli í x og z stefnur (mynd A-1):

$$q_{xz} = k_{x,z} \frac{A}{10} \frac{\Delta P}{\Delta L} = k_{PT} A \frac{\Delta P}{\Delta L}$$

þar sem deilt er með 10 til þess að taka tillit til flatarmála hliða þvert á x og z stefnur. Stærðin k_{PT} táknar lektina í inntaksskrá PT og tengist hún raunverulegri lekt bergsins í x og z stefnur með jöfnunni:

$$k_{xz} = 10 k_{PT}$$

Rennsli í y-stefnu er lýst á samsvarandi hátt með:

$$q_y = k_y A \frac{\Delta P}{\Delta L/10} = m_{PT} k_{PT} A \frac{\Delta P}{\Delta L}$$

þar sem k_y er raunveruleg lekt í y-stefnu og m_{PT} er skalaður margföldunarstuðull í inntaksskrá PT. Þessum stuðli var breytt í líkanreikningunum til að fá gott samræmi milli reiknaðra og mældra ferla, og endaði gildi m_{PT} í 0,02. Þá eru raunveruleg lekt, k_y , og raunverulegur margföldunarstuðull lektar, m, í y-stefnu fengnir með:

$$k_y = \frac{m_{PT}}{10} k_{PT} \quad \text{og} \quad m = \frac{k_y}{k_{x,z}} = \frac{m_{PT}}{100}$$

Poruhluti: Ef þrýstingur lækkar um ΔP í kubbi með rúmmál V_r , þá lætur hann frá sér massa M í samræmi við:

$$M \approx \phi_r V_r \rho_v \beta_v \Delta P$$

þar sem ϕ_r er poruhluti kubbsins, ρ_v er eðlisþyngd vatnsins í honum og β_v er þjappanleiki vatnsins. Nú er rúmmálið V í inntaksskrá PT skilgreint sem $100 \times 100 \times 100 \text{ m}^3$ en V_r er 1/10 þess. Þá gildir um M í kubbum rennu:

$$M \approx \phi_r V_r \rho_v \beta_v \Delta P = \phi_r \frac{V}{10} \rho_v \beta_v \Delta P = \phi_{PT} V \rho_v \beta_v \Delta P$$

þar sem ϕ_{PT} er skalaður poruhluti í inntaksskrá PT, sem tengist þá ϕ_r með:

$$\phi_r = 10 \phi_{PT}$$

Varmarýmd: Orkuinnihald kubbs í rennu með rúmmál V_r er (sjá jöfnu 9 í kafla 4):

$$E = \left[\rho_b c_b (1 - \phi_r) + \rho_v c_v \phi_r \right] T V_r$$

þar sem ρ_b er eðlisþyngd bergsins, c_b varmarýmd þess, c_v varmarýmd vatns og T hiti kubbsins. Samkvæmt inntaksskrá PT er orkuinnihaldið:

$$E = \left[\rho_b c_b^{PT} (1 - \phi_{PT}) + \rho_v c_v \phi_{PT} \right] TV$$

þar sem c_b^{PT} er sköluð varmarýmd í inntaksskrá PT. Þá gildir:

$$c_b(1 - \phi_r) V_r = c_b(1 - \phi_r) \frac{V}{10} = c_b^{PT}(1 - \phi_{PT}) V$$

Þessa jöfnu má nálgga (ϕ_r og ϕ_{PT} eru litlar stærðir):

$$c_b \frac{V}{10} \approx c_b^{PT} V$$

og því fæst að:

$$c_b = 10 c_b^{PT}$$

Varmaleiðni: Um hana gilda sömu skölunarreglur og um lektina, þ.e. að varmastraumur Q um hlið kubbs er nálguað með:

$$Q = \hat{k}_r A \frac{\Delta T}{\Delta L}$$

þar sem \hat{k}_r er raunveruleg varmaleiðni kubbsins. Ef varmaleiðni er skoðuð í x og z stefnur er flöturinn sem varmastraumurinn fer um $1/10$ af A , þ.e.:

$$Q_{xz} = \hat{k}_{x,z} \frac{A}{10} \frac{\Delta T}{\Delta L} = \hat{k}_{PT} A \frac{\Delta T}{\Delta L}$$

þar sem \hat{k}_{PT} er skalaða varmaleiðnin. Hún tengist $\hat{k}_{x,z}$ með jöfnunni:

$$\hat{k}_{x,z} = 10 \hat{k}_{PT}$$

Ef skoða á varmaleiðni í y -stefnu, þá er hin raunverulega fjarlægð milli hliðar kubbs og miðju hans einungis $1/10$ af fjarlægðinni sem skilgreind er í inntaksskránni. Þá gildir um varmastrauminn:

$$Q_y = \hat{k}_y A \frac{\Delta T}{\Delta L/10} = \hat{m}_{PT} \hat{k}_{PT} A \frac{\Delta T}{\Delta L}$$

þar sem \hat{m}_{PT} er skalaður margföldunarstuðull varmaleiðni. Raunveruleg varmaleiðni og margföldunarstuðull hennar, \hat{m} , í stefnu y eru þá:

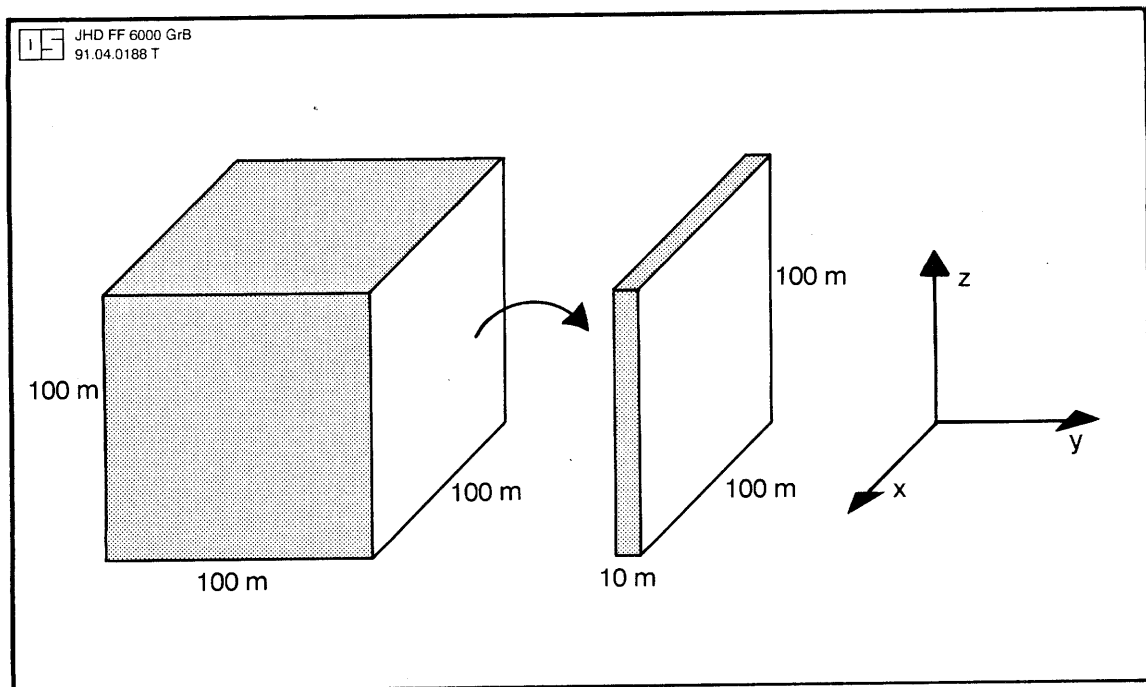
$$\hat{k}_y = \frac{\hat{m}_{PT}}{10} \hat{k}_{PT} \quad \text{og} \quad \hat{m} = \frac{\hat{k}_y}{\hat{k}_{x,z}} = \frac{\hat{m}_{PT}}{100}$$

Ofangreindar skalanir á bergeiginleikum rennu verða til þess að reiknilskanið reiknar hegðan 100 m breiðrar kubba rennu í inntaksskrá PT eins og þeir væru 10 m breiðir. Tafla A-1 sýnir svo að lokum raunveruleg gildi bergeiginleika rennu og eins sköluðu gildin sem höfð eru í inntaksskrá reiknilskansins.

Tafla A-1: Raunverulegir og skalaðir bergeiginleikar rennu.*

Eiginleiki	Raunverulegt gildi	Skalað gildi í PT
Lekt í x og z stefnu (mD)	180	18
Lekt í y stefnu (mD)	0,036	0,36
Misleitni x og y lektar	0,0002	0,02
Poruhluti (%)	10	1
Varmarýmd (J/kg°C)	850	85
Varmaleiðni í x og z stefnu (J/kg°C)	21	2,1
Varmaleiðni í y stefnu (J/kg°C)	2,1	21
Misleitni x og y varmaleiðni	0,1	10

*Bergeiginleikinn hola 10 fær sömu gildi nema að lekt hans er mun hærri, 800 mD á stað 180mD.



Mynd A-1: Skölun á breidd rennu. Stefnan x er eftir rennunni, stefnan y er þvert á hana og z stefnir lóðrétt.