



**ORKUSTOFNUN**

**RANNSÓKNASVIÐ - Reykjavík, Akureyri**

## **Nesjavellir**

**Endurkvarðað reiknilíkan og  
spár um ástand jarðhitakerfis  
við aukna vinnslu**

**Grímur Björnsson  
Ómar Sigurðsson  
Guðmundur S. Böðvarsson  
Benedikt Steingrímsson**

**Unnið fyrir Orkuveitu Reykjavíkur**

**2000**

**OS-2000/019**





**ORKUSTOFNUN**  
Rannsóknasvið

Verknr. 8-630004

**Grímur Björnsson**  
**Ómar Sigurðsson**  
**Guðmundur S. Böðvarsson**  
**Benedikt Steingrímsson**

## **Nesjavellir**

**Endurkvarðað reiknilíkan og spár um  
ástand jarðhitakerfis við aukna vinnslu**

**Unnið fyrir Orkuveitu Reykjavíkur**

**OS-2000/019**

**Mars 2000**

ISBN 9979-68-050-4

ORKUSTOFNUN - RANNSÓKNASVIÐ

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

Akureyri: Glerárgötu 36, 600 Ak. - Sími 463 0957 - Fax 463 0998

Netfang: [os@os.is](mailto:os@os.is) - Veffang: <http://www.os.is>



<b>Skýrsla nr:</b> OS-2000/017	<b>Dags:</b> Mars 2000	<b>Dreifing:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Opin <input type="checkbox"/> Lokuð til
<b>Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill:</b> NESJAVELLIR Endurkvarðað reiknilíkan og spár um ástand jarðhitakerfisins við aukna vinnslu	<b>Upplag:</b> 50	
	<b>Fjöldi síðna:</b> 40	
<b>Höfundar:</b> Grímur Björnsson Ómar Sigurðsson Guðmundur S. Böðvarsson Benedikt Steingrímsson	<b>Verkefnisstjóri:</b> Benedikt Steingrímsson	
<b>Gerð skýrslu / Verkstig:</b> Líkangerð af jarðhitakerfi, spár	<b>Verknúmer:</b> 8-630004	
<b>Unnið fyrir:</b> Orkuveitu Reykjavíkur		
<b>Samvinnuaðilar:</b>		
<b>Útdráttur:</b> Fjallað er um reiknilíkan af jarðhitakerfinu á Nesjavöllum, kvörðun þess og hvernig því er beitt til að spá fyrir um afköst svæðisins og ástand við mismikla heildarvinnslu. Líkanið var þróað og því haldið við af Guðmundi S. Böðvarssyni í Kaliforníu allt til 1998. Á síðari hluta árs 1999 var líkanið sett upp á Orkustofnun og í framhaldi af því endurhannað að hluta og nýr hugbúnaður þróaður því samfara, en í höfuðatriðum er líkanið það sama og fyrri reiknilíkon af Nesjavallasvæðinu. Greint er frá gangi verkefnisins og m.a. lýst aðlögun líkansins að nýjum borholum og prentun þess á landakort með nákvæmum hætti. Einnig er greint frá nýrri yfirbyggingu á TOUGH2 reikniforritið, iTOUCH2, sem leitar sjálfvirkt að bestu líkaneiginleikum. Ljóst er að líkanið er komið að þanmörkum hvað varðar holufjölda. Lagðar eru fram spár um afköst svæðisins fram til ársins 2030 miðað við þrjú tilvik. Skilar hver spá tiltölulega jöfnum orkustraumi út spátímann, en meðalvermi vinnsluholna mun síga niður á við. Jarðhitageymir Nesjavalla virðist þola vel að rafmagnsframleiðsla þar verði aukin í 90 MW auk þeirra 200 MW sem framleiða má í varmaorkuverinu. Í lokin eru reifaðir nokkrir fyrirvarar við spárnar. Verkið er unnið samkvæmt samningi við Orkuveitu Reykjavíkur.		
<b>Lykilorð:</b> Nesjavellir, jarðhitakerfi, reiknilíkan, borholur, afköst, spár, hermun	<b>ISBN-númer:</b> 9979-68-050-4	
	<b>Undirskrift verkefnisstjóra:</b> 	
	<b>Yfirfarið af:</b> GAx, PI	

## EFNISYFIRLIT

1. Inngangur	3
2. Framgangur verksins	3
3. Lýsing reiknilíkans	4
4. Sjálfvirk kvörðun líkanstuðla með iTOUGH2	7
5. Endurkvarðað Nesjavallalíkan	7
6. Spár um afköst í framtíðinni	9
7. Fyrirvarar	13
8. Niðurstöður og umræða	14
9. Heimildir	15
Viðauki A: Eiginleikar jarðlaga í Nesjavallalíkani	17
Viðauki B: Hermun upphafshita og þrýstings í Nesjavallalíkani	25
Viðauki C: Hermun vinnslu í Nesjavallaholum árabilið 1975-2000	29
Viðauki D: Hermun þrýstisögu í Nesjavallaholum árabilið 1975-2000	33
Viðauki E: Hermun og spár um vinnslu úr Nesjavallaholum árabilið 1975-2030	35
Viðauki F: Hermun og spád þrýstisaga Nesjavallaholna árabilið 1975-2030	39

## MYNDIR

1. Grunnkort Nesjavallalíkans og skipting þess í kubba. Svartar tölur innan kubba	5
2. Reiknað heildarrennsli úr Nesjavallalíkani árabilið 1975-2030	10
3. Reiknað meðalvermi úr Nesjavallalíkani árabilið 1975-2030	11
4. Reiknaður orkustraumur upp úr Nesjavallalíkani árabilið 1975-2030	11
5. Reiknað rennsli 190° heits skiljuvatns upp úr Nesjavallalíkani árabilið 1975-2030	12
6. Reiknað rennsli háþrýstigufu upp úr Nesjavallalíkani árabilið 1975-2030	13

## TÖFLUR

1. Lokagildi þeirra líkaneiginleika sem leitað var að með sjálfvirkum hætti	8
2. Endurmetnir vinnslustuðlar holna í Nesjavallalíkani	10

## 1. Inngangur

Eftirfarandi skýrsla er unnin að beiðni Orkuveitu Reykjavíkur. Hún fjallar um reiknilíkan af jarðhitakerfinu á Nesjavöllum, kvörðun þess og hvernig því er beitt til að spá fyrir um afköst svæðisins og ástand við mismikla heildarvinnslu. Forsaga málsins er sú að reiknilíkan af jarðhitakerfinu á Nesjavöllum var þróað og því haldið við af Guðmundi S. Böðvarssyni vestur í Kaliforníu á árabílinu 1984 til 1998 (B. Steingrímsson o.fl. 2000; G. S. Bodvarsson o.fl. 1990, 1991; Guðmundur S. Bodvarsson 1993). Á síðasta ári þótti rétt að líkanið yrði flutt inn á tölvur Orkustofnunar og viðhaldið þar. Samdist svo um við Guðmund að það yrði gert síðari hluta ársins.

Gekk það og eftir og hófst vinna við líkansmíðina af Nesjavöllum af fullum krafti um mánaðamótin október-nóvember 1999. Óskaði Orkuveitan eftir því að spár yrðu gerðar um framtíðarástand svæðisins svo fljótt sem auðið yrði vegna stækkunaráforma Nesjavallavirkjunar. Spárnar lágu svo fyrir síðla vetrar 2000 og voru kynntar undirbúningsnefnd að stækkun virkjunarinnar þann 17. mars, 2000. Hér eru þær síðan birtar á prenti.

Skýrslan er þannig byggð upp að fyrst er greint frá gangi verkefnisins. Það reyndist nokkuð snúið sökum þess að hér er um margt verið að vinna líkansmíðina með öðrum hætti en í fyrri útgáfum. Þurfti því að þróa ýmis hugbúnaðartól samhliða. Sagt er frá aðlögun líkannetsins að nýjum borholum og það síðan prentað á landakort með nákvæmum hætti. Greint er frá nýrri yfirbyggingu á TOUGH2 reikniforritið, iTOUGH2, sem leitar sjálfvirkt að bestu líkaneiginleikum. Að því búnu er núverandi líkani lýst stuttlega og sýnt hvernig samræmi er milli mældra og reiknaðra gilda. Þá eru lagðar fram spár um afköst svæðisins fram í tímann. Í lokin eru reifaðir nokkrir fyrirvarar við spárnar, einkum hvað lýtur að þeim holufjölda sem nauðsynlegur er til að halda uppi fullum afköstum virkjunar.

## 2. Framgangur verksins

Vinna við uppfærslu reiknilíkans Guðmundar Böðvarssonar hófst sem fyrr segir um mánaðamótin október-nóvember 1999. Líkanið var sett upp á tölvum Orkustofnunar og gerðar á því smávægilegar breytingar, einkum hvað laut að útreikningi varmataps til yfirborðs. Í Kaliforníu-útgáfunni var stuðst við svonefnda "semi-analytical" aðferð, en Íslandsútgáfan af líkaninu gerir einfaldlega ráð fyrir að varmi tapist upp úr jarðhitakerfinu til jarðlaga sem haldast föst í hita á öllum tímum.

Guðmundur kom svo til Íslands í nóvember 1999. Var þá unnið í fínri atriðum, einkum hvernig þetta mætti líkannetið svo nýjar holur gætu unnið úr því. Var netið hnitað inn og lagt yfir landakort til að halda mætti sem bestu samræmi við holudreifinguna. Varð þá strax ljóst að þéttleiki líkanbútanna var kominn að þanmörkum og að fljótlega verði að þetta kubbaskiptingu í innri hluta líkansins.

Á sama tíma var fengin að láni frá Lawrence Berkeley Laboratory yfirbygging á TOUGH2 herminn sem nefnist iTOUGH2 (Finsterle, 1999). Hún leitar sjálfvirkt að líkanstærðum með það að markmiði að samræmi mældra og reiknaðra ferla verði sem best. Mikil akkur er að fá slíkt í notkun og til almennra framfara í því flókna verki sem hermun sjóðandi háhitasvæða er. Tókst að setja forritið upp og láta það herma vinnslusögu flestra holna á Nesjavöllum á rúmlega vikutíma.

Í desember og janúar var unnið í því að kvarða betur upphafsástand líkansins, þ.e. svæðisástandið áður en vinnsla hefst. Var bergeiginleikum fjölgað nokkuð og þeim gefin ný nöfn.

Í febrúar hófst svo samhæfing allra mældra gagna (upphafsástand og vinnslusaga) inn í eitt og sama líkanið. Byrjað var á að fella vinnslusöguna að reiknaða upphafsástandinu frá í janúar 2000. Tókst að herma hana með ágætum. Hins vegar kom þá í ljós að samræmi hafði glatast milli upphafsástandsins og vinnslusögunnar. Upphófust nú mikil heilabrot og nokkur slagur milli iTOUGH2 forritsins og tölvukosts Orkustofnunar um að fá þetta tvennt til að falla saman með sjálfvirkum hætti. Fannst tímafrek en ábyggileg leið til þess.

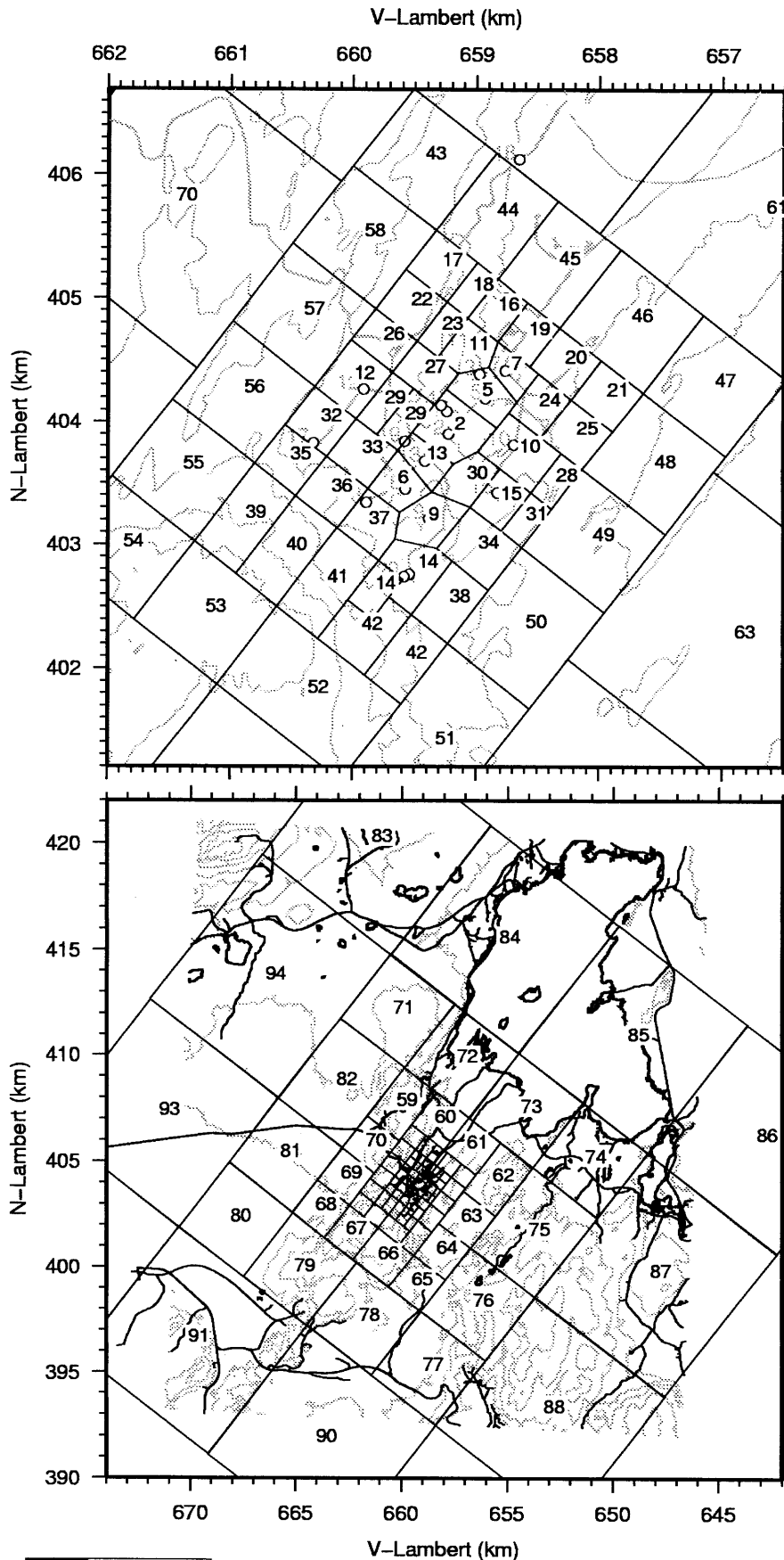
Jöpluðu nú tölvur Orkustofnunar á öllum gagnahaugnum góða hríð við lítinn árangur. Þar kom einkum til að holur hafa blásið óreglulega. Kostaði það breytingar á iTOUGH2 forritinu. Eins þurfti mikla varkárni í smíði inntaksskráa, því stundum blés hola samkvæmt mældum skráum en ekki í reiknaða hlutanum. Risu af því miklar truflanir í reiknirími iTOUGH2 sem yfirgnæfðu kvörðun þeirra líkaneiginleika sem leita átti að. Þá urðu úttaksskrár ógnarstórar, t.d. yfir 4500 stafir í línu. Væntanlega hefur höfundur iTOUGH2 ekki átt von á að svo mikið framboð væri af mældum gögnum og raunin er á Nesjavöllum. Sprungu meira að segja afkastamikil UNIX verkfæri við að vinna úr slíkum spám. Þessi vandi var leystur með breytingu á sjálfum grunnkóða iTOUGH2.

Svo fór þó að lokum að inntaksskrár, iTOUGH2 kóðinn, upphafsástand og vinnslusaga Nesjavalla féllust í faðma í byrjun mars 2000. Telst þar með komin í gagnið uppfærð útgáfa af reiknilíkani Nesjavalla, sem hermir flestallar þær upplýsingar sem safnast hafa um hita og þrýsting í svæðinu auk flæðis og vermis borholna fram til síðustu áramóta. Að sjálfsögðu eru enn nokkur smærri atriði í líkaninu sem mætti vinna betur í. Það ætti samt ekki að hafa veruleg áhrif á meginniðurstöður, sem eru spár um hita, þrýsting og vinnsluhæfni svæðisins.

### 3. Lýsing reiknilíkans

Sökum þess að nýuppfært reiknilíkan Nesjavalla er í öllum aðalatriðum hið sama og áður, verður hér aðeins gefin stutt lýsing. Um finni drætti má lesa í áður útgefnum skýrslum (G. S. Bodvarsson o.fl 1990, 1991; Gudmundur S. Bodvarsson 1993). Nú eru 292 kubbar í líkaninu sem tengjast innbyrðis með 789 tengingum. Massa- og varmauppsprettur/niðurföll eru 44, þar af um helmingur borholur.

Mynd 1 sýnir hvernig innri hluti reiknilíkansins liggur í landinu og númer hvers líkankubbs. Líkanið er gert af 5 lárétt liggjandi lögum, misstórum. Eiginleikar hvers lags eru sýndir nánar í viðauka A. Nefnist efsta lagið U-lag og liggur ofan 200 m u.s. Síðan kemur M-lag á 200-600 m u.s. Þessi lög herma efsta og innsta hluta jarðhitakerfisins. Eru eingöngu 26 líkankubbar í U-laginu og 30 í M laginu. Síðan tekur við efra lag meginjarðhitageymisins, einkennt með bókstafnum L. Það er á milli 600 og 1000 m u.s. og samanstendur af 76 líkankubbum. Milli L og M lagsins er reyndar smeygt 100 m þykku lagi sem er einkennt með stafnum S. Í því eru 19 kubbar, staðsettir undir sjálfum Henglinum. Sérstætt er að S lagið tengist einungis niður í L lagið, en ekki til M lagsins ofan þess. Því veldur að hér er verið að herma gufupúða sem talinn er vera til staðar á þessum slóðum.



**Mynd 1:** Grunnkort Nesjavallalíkans og skipting þess í kubba. Svartar tölur innan kubba merkja númer kubbs í lagi. Borholur eru sýndar með hringjum og má greina nafn þeirra óljóst í gráum stöfum. Hæðarlínur, vötn og vegir eru fengin úr ArcInfo safni Orkustofnunar.



Neðsta og meginlag líkansins er kallað R-lag. Í því eru 102 kubbar, og er það auk þess kragað með 36 kubbum sem einkennast með stafnum O. Kraginn reyndist nauðsynlegur við endurkvörðun líkansins 1992. Botnlagið nær því tugi kílómetra út frá Nesjavöllum og tekur yfir meginhlutann af rúmmáli líkansins. Hiti ystu líkankubba er 150°C allan tíman og þrýstingur u.þ.b. 128 bör.

Inn í kubb R-53, sem er nánast beint undir Hengli, streyma stöðugt 71 kg/s af vatni með vermi upp á rúm 1700 kJ/kg. Svipað innstreymi hitaði Kaliforníuútgáfu líkansins að upphafsástandi eins og það mælist í borholum árabilið 1972-1986. Núverandi líkan byggir á upphafsástandi Kaliforníulíkansins frá 1998, en lætur síðan líða 500 ár þar til vinnsla hefst árið 1975. Með þessu er tryggt að þrýstidreifing vegna nýrra gilda á lekt í líkaninu skili sér að fullu í upphafsþrýstinginn, sem líkanið á að herma, en hitabreytingar verða einungis smávægilegar á sama tímabili.

Tíminn núll í Nesjavallareikningum er 1. janúar 1975. Þá er samfelld vinnsla talin hefjast og miðast allir tímar líkansins við þessa dagsetningu. Holur blása gegnum svonefnda vinnslustuðla (productivity indices). Það þýðir í stuttu máli að gefinn er upp sá þrýstingur sem talinn er ríkja í blásandi holu við aðalæð. Síðan reiknar iTOUGH2 forritið þrýsting í líkankubbum sem holan vinnur úr. Rennsli til holunnar er þá í hlutfalli við margfeldið af mun líkans- og holuþrýstings og vinnslustuðlinum. Breyta þurfti undirforritinu *t2f.f* sérstaklega til að unnt væri að kveikja og slökkva á holum, líkt og reyndin hefur verið í vinnslusögu Nesjavalla.

Þá eru settir vinnslustuðlar á nokkra kubba í U og M lögunum til að stilla þrýsting innan borsvæðis Nesjavalla. Þeir virka sem einskonar öryggisventlar, og sjá til þess að þrýstingur kubbanna sem þeir tengjast fari aldrei verulega yfir ákveðin gildi. Þeir eru í 1) kubbum U60 og M60 og stilla líkanið að lágri þrýstistöðu Nesjavalladals, 2) kubbum U64 og M64 og laga líkanið að miðþrýstingi Nesjavallaholna og 3) kubb 67 og laga þrýsting að hæstu þrýstistöðu holna uppi á stallinum nærri holu 8.

Á mynd 1 er búið er að skipta upp tveimur líkankubbum (númer 14 og 29) svo holur 19 og 20, sem boraðar voru 1999, tengist líkaninu eðlilega. Til samræmis hafa inntaksskrár reiknilíkansins verið lagaðar að þessari breytingu. Þá er gert ráð fyrir að holur 21 og 22, sem boraðar verða um mitt ár 2000, komi í kubba 36 og 37.

Viðamikil gögn liggja að baki reiknilíkaninu. Elst í tíma eru ferlar upphafshita og þrýstings í borholum. Þeir hafa birst í lokaskýrslum um borholur og nýta fjölmargar mælingar og athuganir gerðar á bortíma og í upphitnun fram að blæstri. Þá koma næstar sögur þrýstings með tímanum í mörgum holum. Hér er á ferð afrakstur árlegra eftirlitsmælinga. Þessar mælingar svo og upphafsástandið byggja að mestu á vinnu Orkustofnunar. Mælingar á rennsli og vermi borholna eru ekki síður veigamiklar við líkangerðina. Þessar mælingar eru gerðar af starfsmönnum Orkuveitunnar og áður Hitaveitu Reykjavíkur. Nokkuð er búið að banka þessi gögn til vegna meðburðar á vatni upp úr hljóðdeyfum, sem skekkir mælingar. Leiðréttingin verður almennt til þess að vermi lækkar en rennsli eykst.

Geta má þess að slóðin að holu 15 á Nesjavöllum var opnuð sérstaklega í mars 2000 og holan þrýstimæld í kjölfarið. Var það gert til að tryggja að sem allra nýjust gögn væru til staðar í reiknilíkaninu áður en spár voru gerðar.

## 4. Sjálfvirk kvörðun líkanstuðla með iTOUGH2

Nú eru liðnir u.þ.b. 6 mánuðir síðan reiknitækið iTOUGH2 kom á almennan markað (Finsterle, 1999). Forritið er eins konar yfirbygging á TOUGH2 forritið, sem fyrri líkön Nesjavalla eru unnin með. Hér hefur orðið sú framför að iTOUGH2 leitar sjálfvirkt (inversion) að nýjum líkaneiginleikum uns þar kemur að mældir og reiknaðir ferlar falla sem best saman. Auk þessa eru innbyrðis tengsl breytistærða metin svo og áreiðanleiki. Þá er og mun auðveldara að uppfæra reiknilíkanið eftir því sem tímanum vindur fram. Eingöngu þarf að lengja skrár með mældum gögnum, sem síðan endurkvarða líkanið.

Grunnur reikninga hvílir á að lágmarka svonefnt "objectivity" fall, sem hefur formið:

$$S = \sum_{i=1}^m \frac{r_i^2}{\sigma^2}$$

þar sem  $m$  er fjöldi mælipunkta,  $r$  er leifarfall mælds og reiknaðs gildis í mælipunkti (oftast mismunur þessa) og  $\sigma$  er skekkjumat á mælistærð (oftast staðalfrávik). Á það er spilað til að auka/minnka vægi ákveðinna mæliflokka. Leitaraðferðin sækir verulega í smiðju línulegrar algebru og fylkjareikninga. Auk þess eru í henni aðferðir sem taka á því hvað sjóðandi vatnskerfi eru ólínuleg í hegðun, og passa upp á að nýir líkanstuðlar hlaupi ekki langar leiðir frá skynsamlegum gildum.

Þó svo að nokkurn slag þyrfti til að fá full afköst á iTOUGH2 aðferðina, má ekki gleyma að líkansmiðin verður nú vonandi vandaðri og hnitmiðaðri en áður. Þannig líða oft ekki nema nokkrir dagar og upp í e.t.v. viku að fullt samræmi næst milli mældra og reiknaðra ferla í líkani. Þá skilar sjálfvirka leitinn mun betri tilfinningu fyrir líkaninu sem unnið er við og vonandi enn betri spám en áður. Að lokum má nefna að stundum reynist hreinlega ómögulegt að herma sum gögn í líkani. Er það oftast en ekki ábending um að villa sé í því hugmyndalíkani sem liggur til grundvallar reiknilíkaninu.

## 5. Endurkvarða Nesjavallalíkan

Viðaukar B, C og D sýna hvernig samræmi fékkst milli reiknaðra og mældra gagna í endurkvörðuðu reiknilíkani Nesjavalla. Leitað var sjálfvirkt að 58 stærðum með iTOUGH2. Flestar voru lektir í lárétta og lóðrétta stefnu. Þar næst koma vinnslustuðlar borholna. Lestina reka svo innrennsli og vermi uppstreymis og þrýstingur yst í líkaninu. Tafla 1 sýnir hvaða gildi ofangreindar stærðir tóku þegar kvörðun var lokið.

Hver óþekktur líkanstuðull krefst einnar framkeyrslu (forward) á líkaninu í hverri ítrun. Yfirleitt var ítrað 10-15 sinnum uns "objectivity" fallið stöðvaðist í ákveðnu gildi og sjálfleitinn hóf að spóla í sama farinu. Reiknilíkanið er því framkeyrt alls kringum 1000 sinnum áður en besta líkan er fundið. Notaðar voru afkastamiklar HP-UNIX vinnustöðvar í þetta og tók hver heildarkeyrsla að jafnaði 6-12 klukkustundir.

Til viðbótar stærðunum í töflu 1, má nefna að eðlisþyngd bergs er ætíð  $2650 \text{ kg/m}^3$ . Poruhluti er á bilinu 1-10 %, varmaleiðni bergsins er oftast  $2,1 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  og varmarým  $1000 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ . Nákvæm útlistun þessa er fremst í viðauka A. Hlutlekt vatns og gufu er reiknuð samvæmt X-ferlum. Er gufan þá föst upp að 5% gufuhluta og hirðir síðan allt

lektarflatarmálið við 65% gufuhluta. Vatnið er fast við u.þ.b. 40% vatnshluta og fær síðan ekki allt lektarflatarmálið fyrir en bergið er að fullu vatnsmettað.

**Tafla 1:** Lokagildi þeirra líkaneiginleika sem leitað var að með sjálfvirkum hætti. Flest-ir eiginleikarnir eru lektir í mD, síðan vinnslustuðlar holna (PI) í einingu  $10^{-12} m^3$ . Vermí innstreymis er táknað með sou\_enth (kJ/kg) og kraftur innrennslis með inflow (kg/s). Þrýstingur á ysta jaðri nefnist bo-pres og res\_liq sýnir við hvaða vatnsmettun vatnsfasinn hættir að hreyfast. Næmni stærða (sensitivity) er gefinn í %. Lektir eru yfir-leitt í lárétta (-x) eða lóðrétta stefnu (-y). Sjá nánar fremst í viðauka A.

Eiginleiki	Gildi	Næmni	Eiginleiki	Gildi	Næmni
P5K8Y-x	45	1.9	R1O_8-x	399	0.1
P5K8Y-y	0.50	0.0	R1O_8-y	0.197	1.9
P5K20-x	183	4.2	LEAKY-x	371	1.0
P5K20-y	0.50	1.2	LEAKY-y	1.76	5.5
P9K20-x	16.2	0.0	ROC53-x	299	0.0
P9K20-y	0.50	0.3	ROC53-y	5.4	10.9
P520I-x	26	5.7	UE_40-x	8.0	0.4
P520I-y	50	0.3	LOW_1-x	1.00	0.7
LLOPO-x	5.3	7.0	LOW_1-y	0.010	0.1
LLOPO-y	0.55	1.3	STEAM-x	8.0	0.0
WELL5-x	8.1	2.2	LHI11-x	0.050	0.0
WELL5-y	11.8	2.1	UE_40-y	29	0.0
LHI11-x	337	0.3	PI_5	2.6	3.6
RRO_2-x	39	1.6	PI_6	2.1	3.9
RRO_2-y	0.196	0.7	PI_7	0.95	1.2
P520N-x	409	0.6	PI_9	0.95	3.1
P520N-y	0.50	0.0	PI_10	0.74	1.1
P5K4Y-x	13.1	0.6	PI_11	2.9	4.5
P5K4Y-y	0.50	0.0	PI_12	0.86	0.6
P5K8N-x	248	1.0	PI_13	0.79	5.3
P5K8N-y	0.50	0.0	PI_14	1.48	0.4
P4K1Y-x	1.14	0.3	PI_15	0.67	0.8
P4K1Y-y	0.005	0.0	PI_16	0.42	3.3
RLOPO-x	5.0	2.9	PI_19	1.00	0.1
RLOPO-y	0.37	2.7	PI_20	1.00	0.0
RRO_8-x	399	0.4	res_liq	0.37	0.4
RRO_8-y	0.42	2.0	inflow	71	0.5
RXO_8-x	399	0.8	sou_enth	1719	1.8
RXO_8-y	0.156	1.0	bo-pres	126.99	7.8

Skoðun myndanna í viðauka C sýnir að kerfisbundin skekkja er í rennsli holna og er það að jafnaði vanmetið fremur en hitt. Hér kennir þess að í sjálfleitinni var krafist meiri nákvæmni á reiknað vermi en rennslið. Á þessu verður tekið í áframhaldandi þróun líkans-ins. Annars eru myndirnar í viðaukum B og C efni í heilan skýrslukafla, sem lesendum verður þó hlíft við að þessu sinni. Er fróðleiksfúsum vísað í eldri skýrslur um sama efni

(B. Steingrímsson o.fl. 2000; G. S. Bodvarsson o.fl. 1990, 1991; Guðmundur S. Bodvarsson 1993).

## 6. Spár um afköst í framtíðinni

Takmark smíði reiknilíkana af jarðhitakerfum, líkum því sem hér er kynnt, er annars vegar að skilja innri gerð þeirra sem best (hugmyndalíkan) og hins vegar að eiga tæki til að spá fyrir um ástand þess og afköst í framtíðinni. Sú samsvörun milli mældra og reiknaðra gilda, sem kynnt var hér að framan og sést í viðaukum B-D, er talin sýna að fyrra takmarkið hafi náðst. Þar með telst líkanið hæft í að spá fram í tímann.

Orkuveitan lagði það verkefni fyrir skýrsluhöfunda að skoða sérstaklega hvaða áhrif rekstur 90 MW raforkuvers í 30 ár hefði á svæðið og rennsli úr holum. Til að mæta þessari kröfu var hér valin sú leið að:

1. Gera ráð fyrir að til framleiðslu hvers MW þyrfti 2 kg/s af háþrýstigufu sem er skilin við 12 bör-y við stöðvarhússvegg. Þetta er ofmat á þörfum orkuversins og því svartsýnismat í þeim skilningi að vinnslan verður ekki svo mikil sem spáin gerir ráð fyrir.
2. Spáð er fyrir um svæðisafköst ef eingöngu yrði unnið úr þeim holum sem nú eru tengdar orkuveri (holur 5, 6, 7, 9, 10, 11, 13, 14 og 16). Nefnt hér: Tilvik 1, núverandi holur.
3. Spáð er fyrir um svæðisafköst ef holur 19 og 20, sem boraðar voru á síðasta ári, blási einnig samfelld allan spátímann. Nefnt hér: Tilvik 2, holur 19 og 20 með.
4. Spáð er fyrir um svæðisafköst ef holur 21 og 22, sem til stendur að bora á þessu ári, fari í blástur um mitt ár 2000 og blási út spátímann. Nefnt hér: Tilvik 3, holur 19 - 22 með.
5. Holuafköst stjórnist allan tímann af reiknaðferð vinnslustuðla sem áður er getið. Vinnslustuðlar holna 21 og 22, sem enn á eftir að bora, eru settir sem  $1 \times 10^{-12} \text{ m}^3$ . Sú tala er einfaldlega meðalgildi vinnslustuðla á Nesjavöllum (sjá töflu 1).

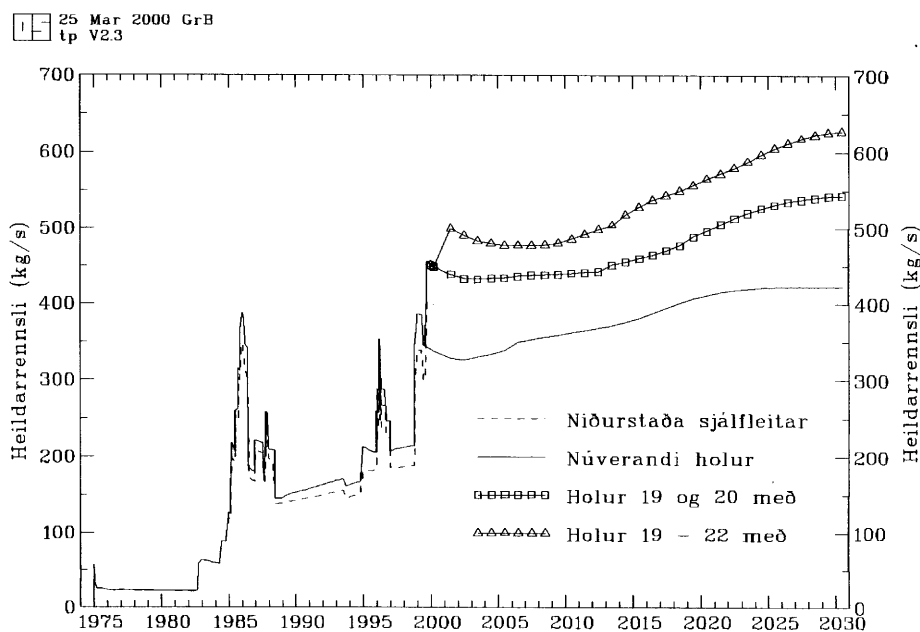
Að gefnum þessum forsendum og líkanstuðlunum í töflu 1 var svo gerð spá um heildarafköst, heildarvarmastraum, streymi háþrýstigufu, streymi skiljuvatns og meðalvermi upp úr öllum holum sem gert er ráð fyrir að blási. Strax kom í ljós að heildarrennslið náði ekki þeim gildum sem raunverulega fóru gegnum orkuverið. Hér réði að sjálfleitinn elti ekki nægjanlega mælt rennsli vegna of rúmrar óvissu sem sett var á það. Vinnslustuðlar holna 9, 11, 14 og 16 voru því hækkaðir nokkuð uns þar kom að reiknilíkanið skilaði u.þ.b. 120 kg/s af háþrýstigufu í október 1998, þegar 60 MW rafmagnsframleiðsla hófst á Nesjavöllum. Tafla 2 sýnir þessa breytingu.

Að fenginni þessari leiðréttingu voru reiknaðar spárnar þrjár samkvæmt fyrirsögninni hér að ofan. Niðurstöður eru sýndar á myndum 2-6 í formi samanlagðrar orku, rennslis og meðalvermis úr öllum vinnsluholum. Spár um rennsli, vermi og þrýsting í flestum holum eru svo sýndar í viðaukum E og F.

**Tafla 2: Endurmetnir vinnslustuðlar holna í Nesjavallalíkani frá því sem sýnt er í töflu 1. Allir taka þeir veldið  $10^{-12} \text{ m}^3$ .**

Hola	Stuðull úr sjálfleit	Nýr vinnslustuðull
5	2.471	2.471
6	2.185	2.185
7	0.711	0.711
<b>9</b>	<b>1.648</b>	<b>2.173</b>
10	0.739	0.739
<b>11</b>	<b>2.893</b>	<b>3.993</b>
12	0.861	0.861
13	0.794	0.794
<b>14</b>	<b>1.478</b>	<b>2.882</b>
15	0.666	0.666
<b>16</b>	<b>0.416</b>	<b>0.500</b>
19		1.000
20		1.000
21		1.000
22		1.000

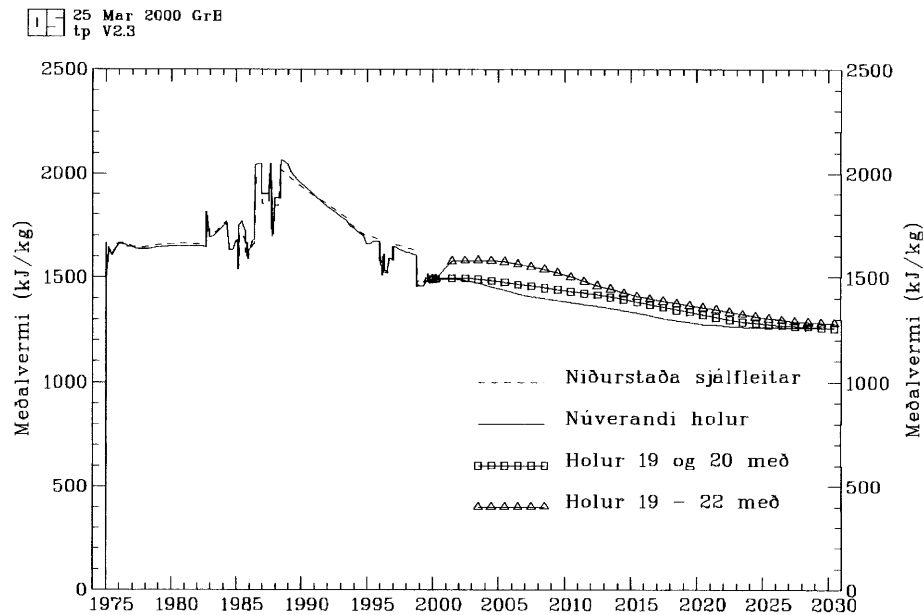
Mynd 2 sýnir reiknað heildarrensli í kg/s upp úr öllum holum, bæði reiknaða fortíð og eins spár fram í tímann. Eins hvaða áhrif leiðréttu vinnslustuðlarnir í töflu 2 hafa á líkan-ið. Framan af vinnslusöggunni eru áberandi toppar kringum árabilið 1985-1987 og síðan 1996 og veldur báðum prófun á borholum og upplýsingasöfnun um afkastagetu svæðis-ins. Vinnslan stekkur síðan upp haustið 1998 þegar nýja orkuverið fer í gang. Síðan sést í framtíðarspám að heildarrensli helst stöðugt eða hægvoxandi út spátímann.



**Mynd 2: Reiknað heildarrensli úr Nesjavallalíkani árabilið 1975-2030.**

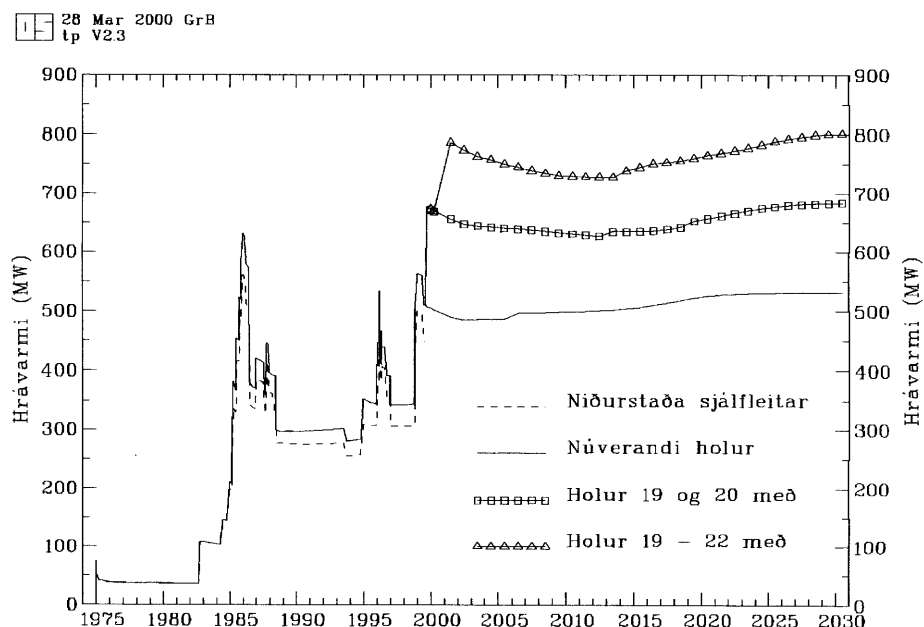
Mynd 3 sýnir meðalvermi reiknaða massaflaumsins á mynd 2. Áberandi er stökk í vermi upp úr 1985-6 þegar hinar þurru holur 11, 13 og 16 fara að blása. Meðalvermið sígur svo niður á við í samræmi við blotnun þessara holna. Meðalvermið lækkar síðan seint á árinu

1998 þegar blautar holur númer 7 og 14 hefja blástur. Smáhækkun verður síðan haustið 1999 að hola 19 fer í gang en á móti hamlar svo tiltölulega lágt vermi hola 20. Vermið er síðan furðu líkt milli spátílvikanna þriggja, þó almenna reglan sé sú að svæðið hneigist til hærri vermis með aukinni vinnslu. Reiknast meðalvermið í lok spátímans á bilinu 1250-1300 kJ/kg. Það er ígildi 280-300 °C vatnshita.



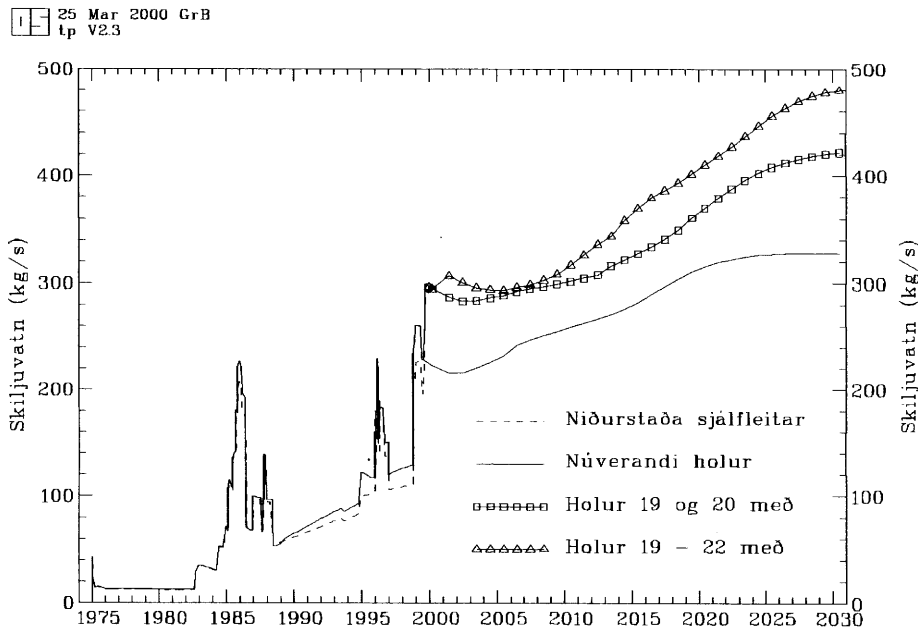
**Mynd 3:** Reiknað meðalvermi úr Nesjavallalíkani árabilið 1975-2030.

Á mynd 4 hafa svo gögnin á myndum 2 og 3 verið margfölduð saman og þannig reiknuð vinnsla hrávarma. Hér sýnist almenna reglan að hvert tilvik skilar tiltölulega stöðugum varmastraum upp úr svæðinu. Nota má myndina til að slá á nýtni orkuversins. Er þá gert ráð fyrir að það skili 150-200 MW varma í húshitun og annað hvort 60 eða 90 MW rafmagns. Nýting upptekins varma verður þá á bilinu 30-50%. Telst það í fremstu röð meðal háhitavirkjana og ætti að verða öðrum til eftirbreytni.



**Mynd 4:** Reiknaður hrávarmi úr Nesjavallalíkani árabilið 1975-2030.

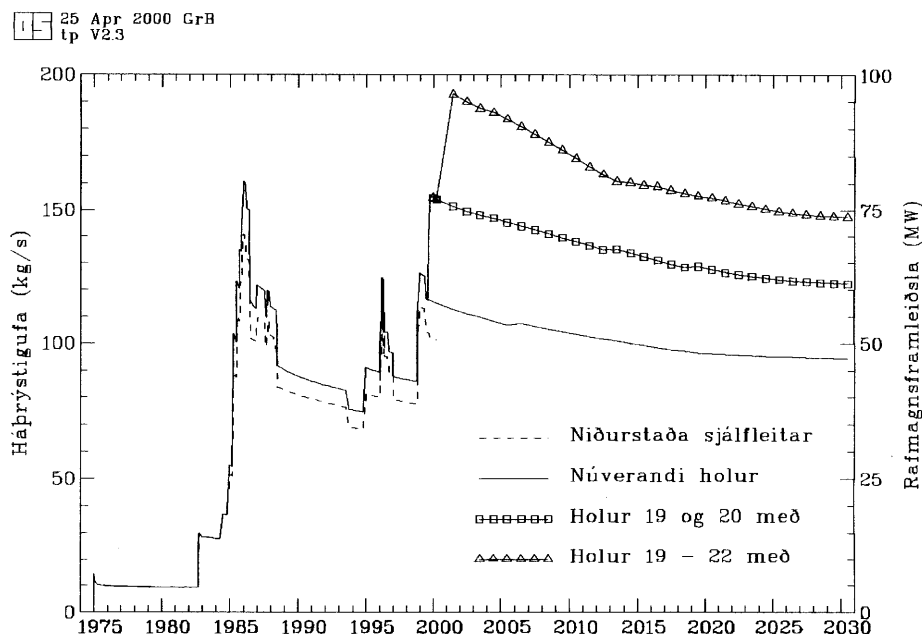
Mynd 5 sýnir reiknað magn skiljuvatns til Nesjavallavirkjunar, miðað við að skilið sé við 12 bör-y. Nú reiknast stígandi vöxtur í magni þess til samræmis við sígandi meðalvermið á mynd 3. Þessi vökví er 190°C heitur. Vel sýnist því séð fyrir þörfum hitaveituhluta orkuversins allan spátímann. Mun afkastageta hans fremur aukast en hitt. Hér verður þó að gera fyrirvara um þann holufjölda sem þarf til að skila svo miklu streymi og verður vikið að því í næsta kafla.



Mynd 5: Reiknað rennsli 190° heits skiljuvatns upp úr Nesjavallalíkani árabilið 1975-2030.

Mynd 6 sýnir svo reiknað gufustreymi úr Nesjavallaholum fram til ársins 2030. Nú bregður svo við að spáð rennsli minnkar í öllum tilvikum. Því veldur að rúmmál sjóðandi hluta svæðisins minnkar eftir því sem tíminn líður svo og gufuhluti þess. Áfram er miðað við að skiljuþrýstingur sé 12 bör-y. Á hægri ás myndarinnar er svo sýnd áætluð rafmagnsframleiðsla miðað við að 2 kg/s háþrýstigufu þurfi til framleiðslu hvers MW. Samkvæmt spánni nægir að tengja hólur 19 og 20 við orkuverið svo núverandi 60 MW orkuframleiðsla haldist allan spátímann. Eins að ef hólnar sem bora á í ár, hólur 21 og 22, hitta í meðallekar æðar, duga þær með fyrri holum til að standa undir 90 MW raforkuframleiðslu í upphafi. Síðar á spátímanum verði hins vegar að bæta við 2-3 meðalholum. Hér er enn í gangi ákveðin bjartsýni um holufjölda eins og síðar verður vikið að.

Viðaukar D og F sýna vermi og rennsli úr öllum vinnsluholum annars vegar og þrýsting í nokkrum eftirlitsholum hins vegar, árabilið 1975-2030. Sökum umfangs mældra sem reiknaðra gagna og þrengsla á blaðsíðum eru einungis skoðuð tilvik 1 og 3, þ.e. að núverandi hólur (upp að hól 16) blási einar áfram, og hins vegar að hólur 19-22 bætist allar við á þessu ári. Almenna reglan hér virðist að hólur haldast þurrari og lægri í heildarrennsli ef vinnsla er aukin, miðað við óbreytta núverandi vinnslu. Skýring á þessari hegðun sést í spám um svæðisþrýstinginn. Hann verður að jafnaði 2-5 börum lægri í tilviki 3 en í tilviki 1. Suða eykst því tímabundið í jarðhitakerfinu. Eins má sjá að spáð er kælingu nyrst og austast í borsvæðinu. Þannig gæti vermi hól 10 farið undir 1000 kJ/kg. Er alls óvíst að hún geti blásið við rúm 12 bör á toppi með svo lágan innstreymishita.



**Mynd 6:** Reiknað rennsli háprýstingufu upp úr Nesjavallalíkani árabilið 1975-2030.

Svo sérkennilegt sem það kann að hljóma virðist því sem laga megi tímabundið innra ástand jarðhitakerfisins á Nesjavöllum að þörfum stækkaðs rafmagnshluta orkuversins, einvörðungu með því að auka vinnsluna. Það lækkar nefnilega svæðisprýstinginn, hleypir stærri hluta jarðhitageymisins í suðu sem skilar tímabundinni vermishækkun. Hún kemur fram sem hlutfallslega aukið magn af háprýstingufu. Þannig á sér stað ákveðið varmanám (kæling) í heitasta hluta svæðisins. Auk þess skila svo heitir jaðrar jarðhitakerfisins inn vatnsmagni sem er nánast það sama og upp er tekið. Þessi straumur er mjög orkurík og stendur að stórum hluta undir þörfum hitaveituhluta orkuversins. Sem áður segir er ekki annað séð en að innstreymið sé enn öflugt og heitt árið 2030 þegar spám lýkur.

## 7. Fyrirvarar

Þann fyrirvara verður að gera við núverandi spár, svo og spár með eldri útgáfum líkansins, að frumstæð aðferð er notuð til að meta innrennsli í borholur, þ.e.a.s. skilgreindur er fastur holubotnsprýstingur í blæstri. Í þurrum holum er hann t.d. 20 bör, og helst svo þrátt fyrir að holan blotni. Þar með eru afköstin ofmetin, því við blotnunina hækkar þessi prýstingur töluvert (innrennslið er í hlutfalli við prýstimun holu og bergs). Í raun dregur úr holuafköstunum við þetta. Því er sá hölufjöldi sem stendur undir spánum á myndum 2-6 vanmetinn.

Undir þennan leka hefur nú verið sett í nýrri útgáfu af TOUGH2, sem kom á markað í nóvember 1999 (Pruess o.fl., 2000). Orkustofnun hefur aflað sér þessarar nýju útgáfu. Sýnist ekkert því til fyrirstöðu að keyra spár um afköst Nesjavalla með þessu forriti. Ætti þá að fást betri tilfinning fyrir áhrifum spáðrar vermislækkunar á fjölda vinnsluholna.

Þá væri æskilegt að fá tíma til að herma betur einstaka þætti líkansins og sérlega að nýta til fullnustu ýmsa möguleika iTOUGH2. Þar kemur einkum til álita að skoða frekar hvernig ítra má fyrir einstökum líkanstærðum, t.d. með því að ítra á víxl eingöngu fyrir vinnslustuðlunum, síðan lektum o.s.frv. Þá hefur enn ekki verið skoðað hvaða áhrif það



hefur að gera poruhluta líkansins að óþekktri stærð til ákvörðunar. Eins má gera enn betur í útreikningi þrýstilækkunar, tímastillingum o.fl. Svo og að skilgreina hitasögu í einstöku holum og gera að líkanskorðu. Allt teljast þetta fínstillingarmál.

Þá má nefna að til eru gögn um efnabreytingar á Nesjavöllum sem nota má til að skilgreina framlag einstakra vatnskerfa til heildarvinnslunnar. Telst ákveðin gæðastjórnun að spinna þau inn í núverandi líkan og krefjast þess síðan að efnabreytingarnar verði hermdar. Hugsanlega má hér gera enn betur, t.d. með niðursetningu ferilefna og gera líkanið að tvíporulíkani. Með því fæst enn betri tilfinning fyrir hraða kælingar í líkaninu, en hún skiptir höfuðmáli um holuafköstin og holufjöldann.

## 8. Niðurstöður og umræða

Helstu niðurstöður af endurkvörðun reiknilíkans Nesjavalla og spám sem það skilar um ástand svæðisins fram í tímann, eru eftirfarandi:

1. Líkanið er nú upp sett, endurkvarðað og í góðu ástandi í tölvukerfi Orkustofnunar. Þetta líkan er í höfuðatriðum það sama og fyrri reiknilíkön af Nesjavallasvæðinu. Þau hafa að flestra mati staðið sig vel í spám um framtíðarástand Nesjavalla.
2. Beitt er nýjustu og fullkomnustu útgáfum af hermiforritum jarðhitakerfa sem þróuð hafa verið á Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL). Telst til mikilla framfara að nú er leitað að líkaneiginleikum með sjálfvirkum hætti, og að sjálfleit-in tekur tillit til nánast allra tiltækra vinnslugagna í einni og sömu keyrslunni.
3. Sjálfleitartæknin kostaði nokkra þróunarvinnu á Orkustofnun og æfingu. Í og með kom þessi aukna vinna til sökum þess að gagnamagnið, sem liggur að baki líkaninu, er mun meira en höfundar reikniforritana á LBNL gerðu ráð fyrir. Í heild tók verkið því um 5 mánuði.
4. Núverandi líkan hefur verið fellt inn á nákvæmt landakort og nýjar holur númer 19 og 20 lagaðar að því. Ljóst er að líkanið er komið að þanmörkum hvað varðar holufjölda. Er framtíðarverkefni að endurgera og þetta innri hluta þess.
5. Núverandi líkan hermir að jafnaði vel upphafshita- og þrýsting Nesjavalla, mælt rennsli og vermi holna og auk þess mældan niðurdrátt fram til janúar 2000. Frá þessu eru að sjálfsögðu undantekningar, sem oftast má rekja til þess að ekki hefur tekist að fylgja nákvæmlega skammtímasveiflum í rennsli og vermi. Þessi frávik eru talin hafa óveruleg áhrif á langtímaspár.
6. Gerðar eru spár um áhrif vinnslu á svæðið fram til ársins 2030. Er þá miðað við þrjú tilvik: 1) að þær holur sem nú eru tengdar orkuverinu blási einar út spátímann, 2) að holur 19 og 20 bætist við, og loks 3) að holur 21 og 22, sem bora á nú í sumar, blási jafnframt allan tímann.
7. Almennt skilar hvert spátílvik tiltölulega jöfnum orkustraum fram til 2030, en meðalvermi vinnsluholna mun hins vegar síga niður á við. Fellur það úr núverandi u.þ.b. 1500 kJ/kg í 1250-1300 kJ/kg árið 2030. Þessi dölun mun koma fram í minnkandi magni háþrýstigufu með tímanum, en hægvoxandi magni 190°C heits

skiljuvatns. Áframhaldandi keyrsla núverandi 200 MW varmaorkuvers samhliða 60-90 MW raforkuframleiðslu, skilar því gnægri orku til upphitunar á köldu vatni til hitaveitu, meðan lækkandi vermi er rafmagnsframleiðslunni í óhag, einkum seint á spátímanum.

8. Af þessum sökum getur orkuverið hitað áfram vatn til húshitunar langt fram yfir árið 2030, þó svo að rafmagnshlutinn dali.
9. Þá sýnist sem tenging holna 19 og 20 við núverandi orkuver nægi til áframhaldandi reksturs þess fram til ársin 2030. Stækkun í 90 MW rafmagnsframleiðslu útheimtir borun holna 21 og 22 árið 2000, og síðan 2-3 viðbótarholur fram til ársins 2030. Þetta er bjartsýnismat sökum ákveðinnar einföldunar í líkanforsendum. Unnt er að gera nákvæmari spár um holufjöldann með nýrri útgáfu af TOUGH2 herminum.

Í heild sýnist því sem jarðhitageymir Nesjavalla þoli vel að rafmagnsframleiðsla þar verði aukin í 90 MW auk þeirra a.m.k. 200 MW sem framleiða má í varmaorkuverinu. Eins að svæðið dugi áfram vel til heitavatsframleiðslu eftir árið 2030, en meiri óvissa ríkir um rafmagnshlutann þá vegna minnkandi hlutfalls háþrýstigufu með tímanum. Þá getur lækkað meðalvermi holna leitt til þess að lækka verði skiljuþrýsting á spátímanum. Í ljósi þessa sýnist því skynsamlegt að gera ráð fyrir borun fleiri viðbótarholna en þeirra 4-5 sem ofan er getið.

Það er skýrsluhöfundum ánægjuefni að hafa fengið tækifæri til að vinna að reiknilíkani Nesjavalla, og sér í lagi að hafa fengið nauðsynlegan tíma til að færa það til þess forms sem nýjast þykir og nákvæmast í heimi hermireikninga af sjóðandi jarðhitakerfum. Telja má að áframhaldandi samkeyrsla þess með virkjuninni á Nesjavöllum, skili sér í farsælum rekstri orkuversins, vaxandi skilningi á innri gerð jarðhitakerfisins og aukinni færni í smíði slíkra reiknilíkana. Ætti það að samræmast vel hugtakinu um sjálfbæra nýtingu. Því þrátt fyrir að orkuvinnslan skerði nokkuð þann varmaforða sem nú er bundinn í berggrunni Nesjavalla, mun hún færa komandi kynslóðum ríkulegan skerf í þann þekkingargrunn sem sífellt vex um skynsamlega nýtingu jarðhitaauðlindarinnar.

## 9. Heimildir

- B. Steingrímsson, G. S. Bodvarsson, E. Gunnlaugsson, G. Gíslason og O. Sigurðsson 2000. Modeling Studies of the Nesjavellir Geothermal Field, Iceland. Grein til birtingar á ráðstefnu World Geothermal Congress í Japan, 2000, 6 s.
- G. S. Bodvarsson, S. Björnsson, A. Gunnarsson, E. Gunnlaugsson, O. Sigurðsson, V. Stefansson og B. Steingrímsson 1990. The Nesjavellir Geothermal Field, Iceland. Part 1. Field Characteristics and Development of a Three-dimensional Numerical Model. Geoterm. Sci. & Tech. Vol. 2(3): 189-228.
- G. S. Bodvarsson, S. Björnsson, A. Gunnarsson, E. Gunnlaugsson, O. Sigurðsson, V. Stefansson og B. Steingrímsson 1991. The Nesjavellir Geothermal Field, Iceland. Part 2. Evaluation of the Generating Capacity of the System. Geoterm. Sci. & Tech. Vol. 2(4): 229-261.
- Gudmundur S. Bodvarsson 1993. Recalibration of the three-dimensional model of the Nesjavellir geothermal field. Report prepared for the Reykjavík District Heating. 111 s.
- Karsten Pruess, Curt Oldenburg og George Moridis 1999. TOUGH2 User's Guide, Version 2.0. Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL-4313, 198 s.
- S. Finsterle 1999. ITOUGH2 - User's Guide. Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL-40040, UC-400, 130 s.

## **Viðauki A: Eiginleikar jarðlaga í Nesjavallalíkani**

Lektir eru gefnar í mD (milli-Darcy), þ.a. 1 mD jafngildir  $10^{-15} \text{ m}^2$ . Lárétt lekt er oftast táknuð með  $k_x$ , lóðrétt með  $k_y$  og mjög léleg lárétt lekt með  $k_z$ . Taknið  $\phi$  stendur fyrir poruhluta í %,  $k$  er varmaleiðni í  $\text{W/m}^\circ\text{C}$ , og  $C_R$  er varmarýmd bergs í  $\text{J/kg}^\circ\text{C}$ .

Auk þess sem bergeiginleikar hafa nafn, skrifað með hástöfum ofan hvers litakassa, er sett á hvern lit hlaupandi númer frá 1 upp í 27. Þetta númer er einnig sýnt í hvítu á myndum sem sýna dreifingu bergeiginleika í hverju lagi. Svartlitaðar tölur eiga hins vegar við númer kubbs. Athugið að litavalið er eftir  $k_x$  lektinni, þ.a. kaldfjólublátt er þétt berg og eldrautt er mjög vel lekt berg. Að sama skapi hækkar lektin með hækkaði litnúmeri.

Ekki er hirt um að teikna líkanblokkir með auðkennisstafinn O. Þessar blokkir eru yst í R-laginu og taka allar lekt númer 15 í bergi P52\_I.



## Litur og eiginleikar kubba í TOUGH-líkani

**QLOSS**  $\phi = 2.0$   
 $K_x = 1e-20$   
 $K_y = 1e-20$   
 $K_z = 1e-23$   
 $K = 2.1$   
 $c_R = 1000.$

**1**

**MRO\_8**  $\phi = 5.0$   
 $K_x = 15$   
 $K_y = 30$   
 $K_z = 0.001$   
 $K = 2.1$   
 $c_R = 1000.$

**13**

**RXO\_8**  $\phi = 2.0$   
 $K_x = 398.8$   
 $K_y = 0.1486$   
 $K_z = 0.001$   
 $K = 2.1$   
 $c_R = 1000.$

**25**

**LOW\_1**  $\phi = 5.0$   
 $K_x = 1.049$   
 $K_y = 0.009175$   
 $K_z = 0.001$   
 $K = 2.1$   
 $c_R = 1000.$

**2**

**P9K20**  $\phi = 10.0$   
 $K_x = 16.25$   
 $K_y = 0.5$   
 $K_z = 0.001$   
 $K = 2.1$   
 $c_R = 1000.$

**14**

**R10\_8**  $\phi = 1.0$   
 $K_x = 400$   
 $K_y = 0.2112$   
 $K_z = 0.001$   
 $K = 2.1$   
 $c_R = 1000.$

**26**

**P4K1Y**  $\phi = 10.0$   
 $K_x = 1.143$   
 $K_y = 0.005$   
 $K_z = 0.001$   
 $K = 0.1$   
 $c_R = 1000.$

**3**

**P52\_I**  $\phi = 10.0$   
 $K_x = 25.82$   
 $K_y = 49$   
 $K_z = 0.001$   
 $K = 2.1$   
 $c_R = 1000.$

**15**

**RRO\_8**  $\phi = 3.5$   
 $K_x = 415.8$   
 $K_y = 0.4146$   
 $K_z = 0.001$   
 $K = 2.1$   
 $c_R = 1000.$

**27**

**URO35**  $\phi = 5.0$   
 $K_x = 3.5$   
 $K_y = 15$   
 $K_z = 0.001$   
 $K = 2.1$   
 $c_R = 1000.$

**4**

**RRO\_2**  $\phi = 3.5$   
 $K_x = 36.41$   
 $K_y = 0.1992$   
 $K_z = 0.001$   
 $K = 2.1$   
 $c_R = 1000.$

**16**

**RLOPO**  $\phi = 2.0$   
 $K_x = 5.032$   
 $K_y = 0.3673$   
 $K_z = 0.001$   
 $K = 2.1$   
 $c_R = 1000.$

**5**

**P5K8Y**  $\phi = 3.0$   
 $K_x = 45.48$   
 $K_y = 0.5$   
 $K_z = 0.001$   
 $K = 2.1$   
 $c_R = 1000.$

**17**

**LLOPO**  $\phi = 2.0$   
 $K_x = 5.262$   
 $K_y = 0.5539$   
 $K_z = 0.001$   
 $K = 2.1$   
 $c_R = 1000.$

**6**

**P5K20**  $\phi = 5.0$   
 $K_x = 183.1$   
 $K_y = 0.5$   
 $K_z = 0.001$   
 $K = 2.1$   
 $c_R = 1000.$

**18**

**MRO35**  $\phi = 5.0$   
 $K_x = 7$   
 $K_y = 15$   
 $K_z = 0.001$   
 $K = 2.1$   
 $c_R = 1000.$

**7**

**P5KBO**  $\phi = 10.0$   
 $K_x = 200$   
 $K_y = 0.5$   
 $K_z = 0.001$   
 $K = 2.1$   
 $c_R = 1.000$

**19**

**STEAM**  $\phi = 5.0$   
 $K_x = 8$   
 $K_y = 0.5$   
 $K_z = 0.001$   
 $K = 2.1$   
 $c_R = 1000.$

**8**

**P5K8N**  $\phi = 10.0$   
 $K_x = 248.9$   
 $K_y = 0.5$   
 $K_z = 0.001$   
 $K = 2.1$   
 $c_R = 1.000$

**20**

**TRO53**  $\phi = 5.0$   
 $K_x = 8$   
 $K_y = 3$   
 $K_z = 0.001$   
 $K = 2.1$   
 $c_R = 1000.$

**9**

**ROC53**  $\phi = 5.0$   
 $K_x = 299.2$   
 $K_y = 5.414$   
 $K_z = 0.001$   
 $K = 2.1$   
 $c_R = 1000.$

**21**

**WELL5**  $\phi = 2.0$   
 $K_x = 8.115$   
 $K_y = 11.77$   
 $K_z = 0.001$   
 $K = 2.1$   
 $c_R = 1000.$

**10**

**LHI11**  $\phi = 2.0$   
 $K_x = 337.1$   
 $K_y = 0.05$   
 $K_z = 0.001$   
 $K = 2.1$   
 $c_R = 1000.$

**22**

**UE\_40**  $\phi = 5.0$   
 $K_x = 8.394$   
 $K_y = 30$   
 $K_z = 0.001$   
 $K = 2.1$   
 $c_R = 1000.$

**11**

**LEAKY**  $\phi = 2.0$   
 $K_x = 371.2$   
 $K_y = 1.762$   
 $K_z = 25$   
 $K = 2.1$   
 $c_R = 1000.$

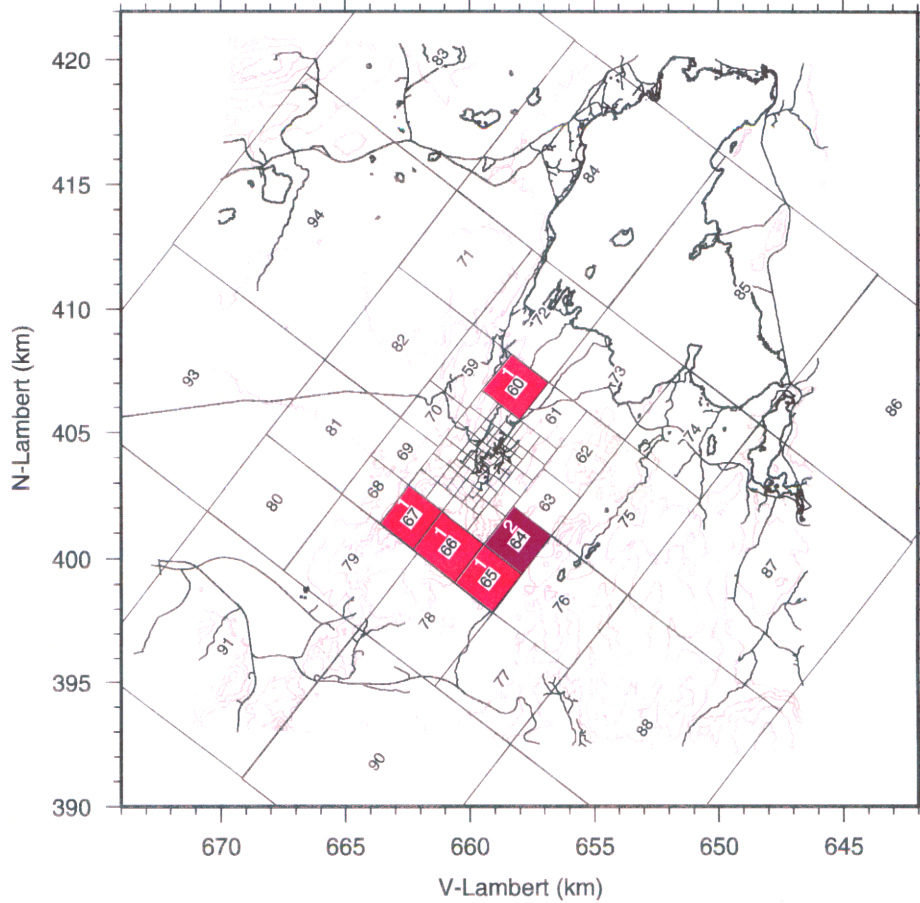
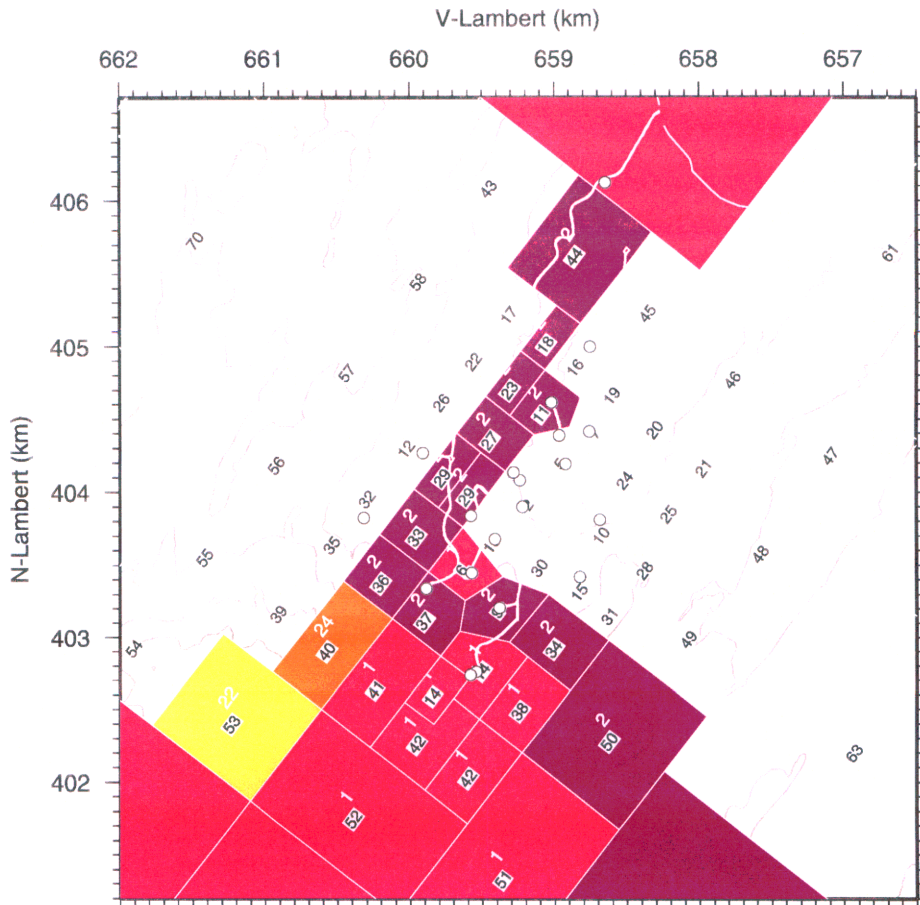
**23**

**P5K4Y**  $\phi = 5.0$   
 $K_x = 13.15$   
 $K_y = 0.5$   
 $K_z = 0.001$   
 $K = 2.1$   
 $c_R = 1000.$

**12**

**P52\_N**  $\phi = 10.0$   
 $K_x = 386.1$   
 $K_y = 0.5$   
 $K_z = 0.001$   
 $K = 2.1$   
 $c_R = .1000E+31$

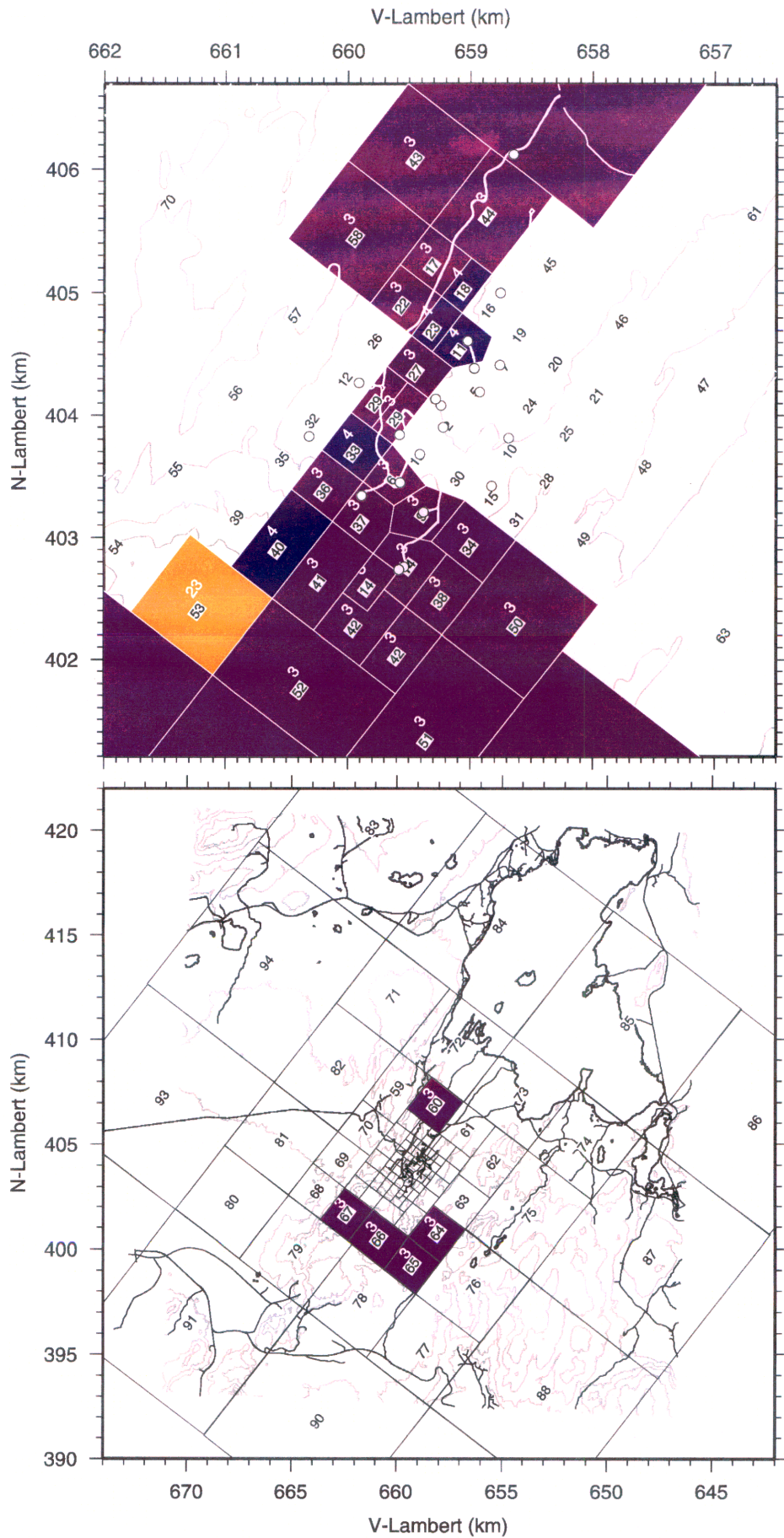
**24**



**GMT** Mar 22 14:53 Keyrt á //fr/tough/nesjav/dyrmaett/rocklitir með skipuninni: lita.gridd input.mes U

Skipting bergeiginleika í lagi U (-200 til 200 m u.s.).

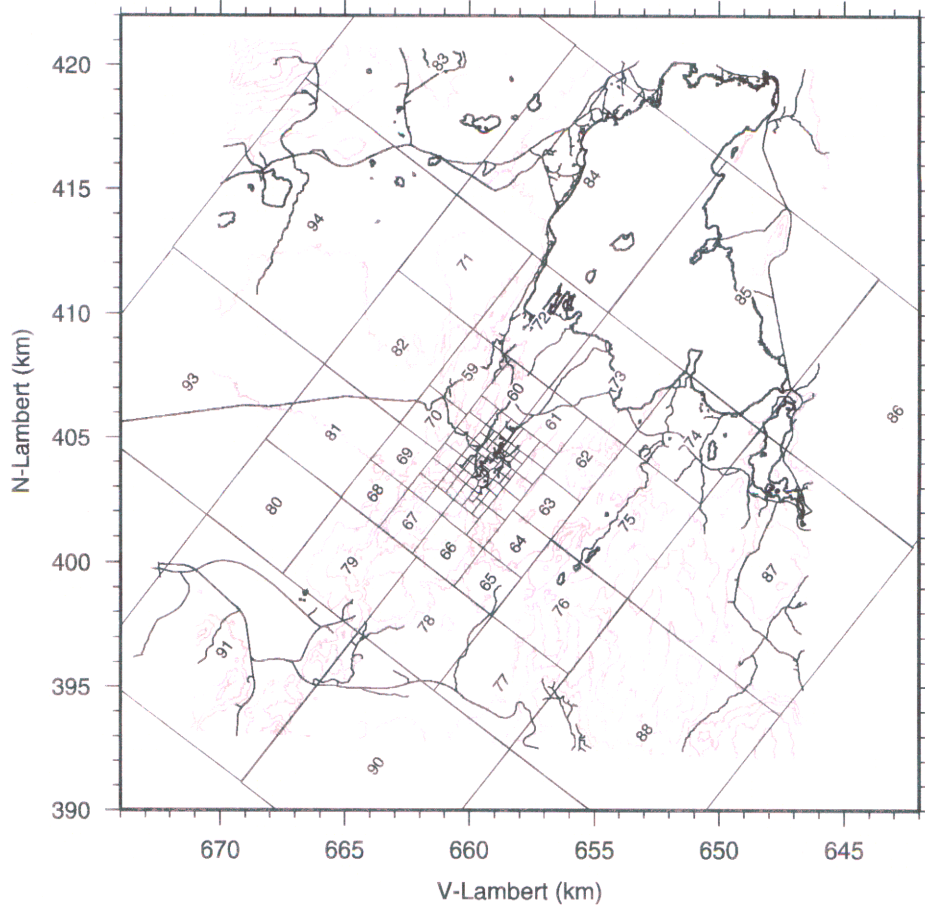
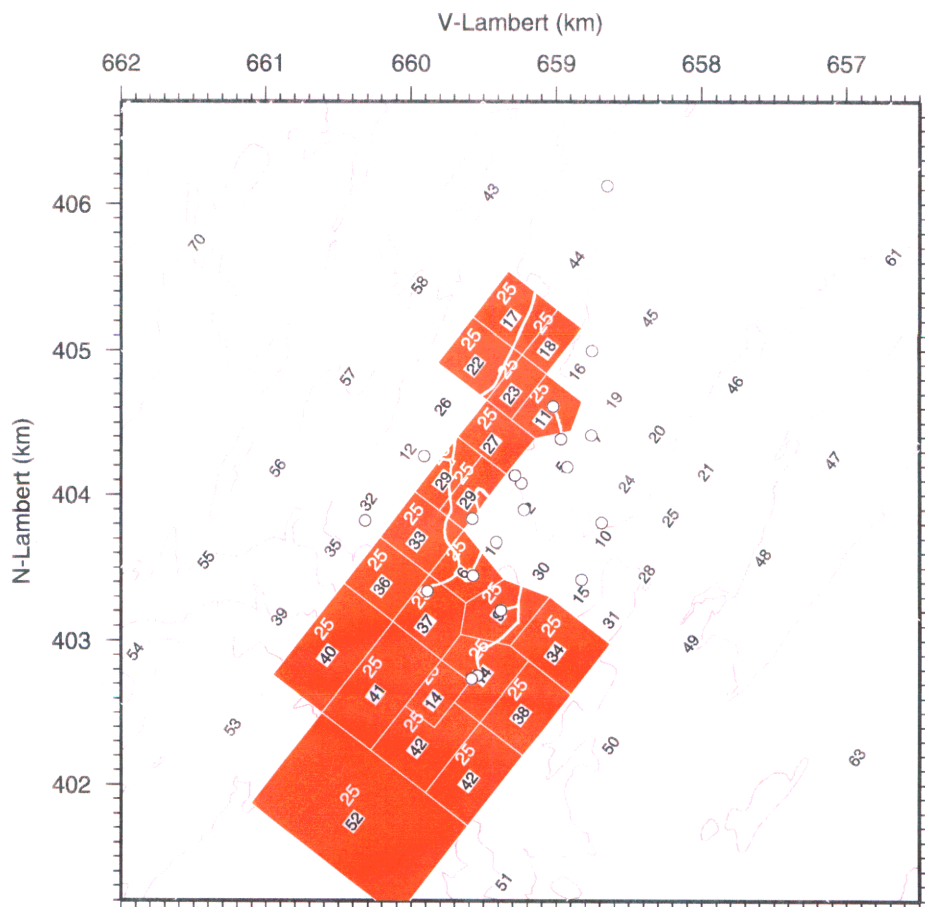




GMT Mar 22 14:54 Keyrt á /fr/tough/nesjav/dyrmaett/rocklitir með skipuninni: lfta.gridd input.mes M

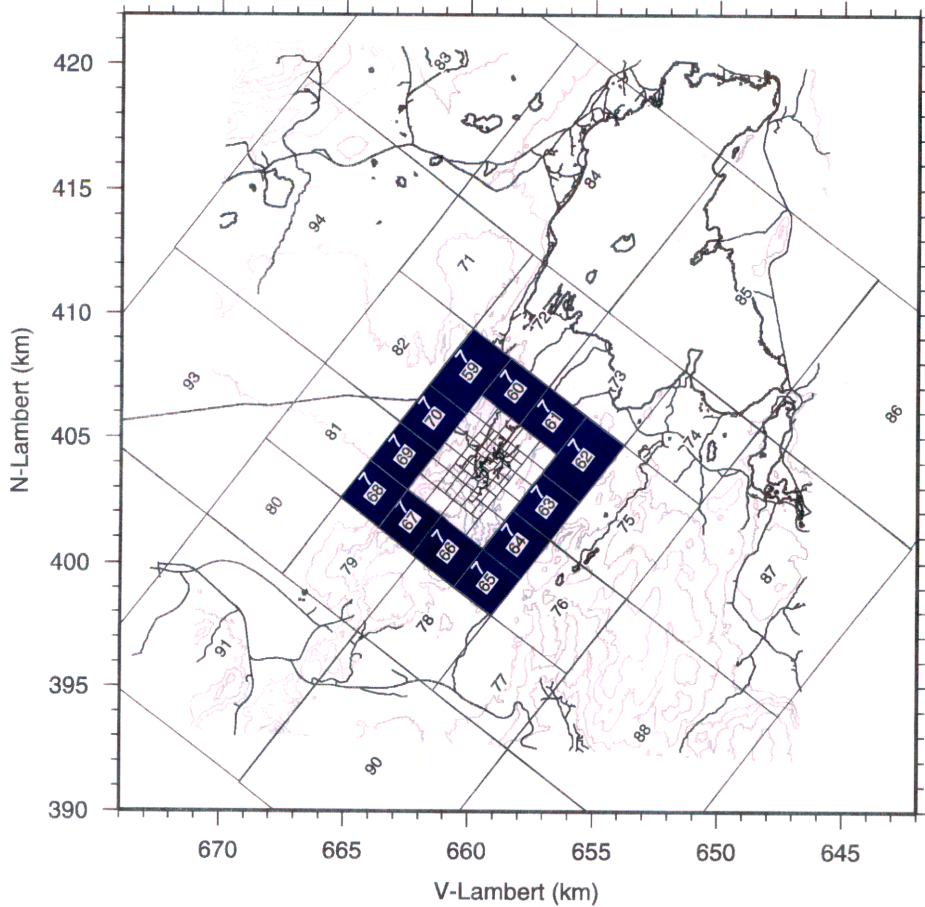
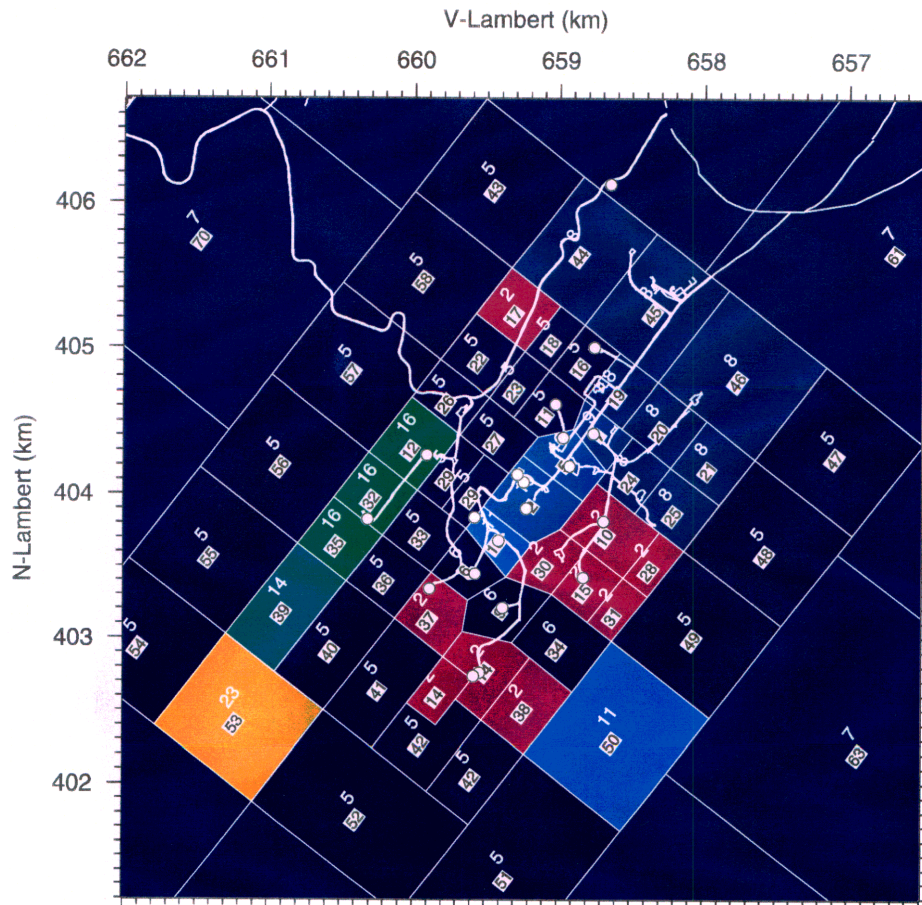
Skipting bergeiginleika í lagi M (200 til 600 m u.s.).





GMT Mar 22 15:41 Keyrt á /frr/tough/nesjav/dyrmaett/rocklitir með skipuninni: lta.gridd input.mes S

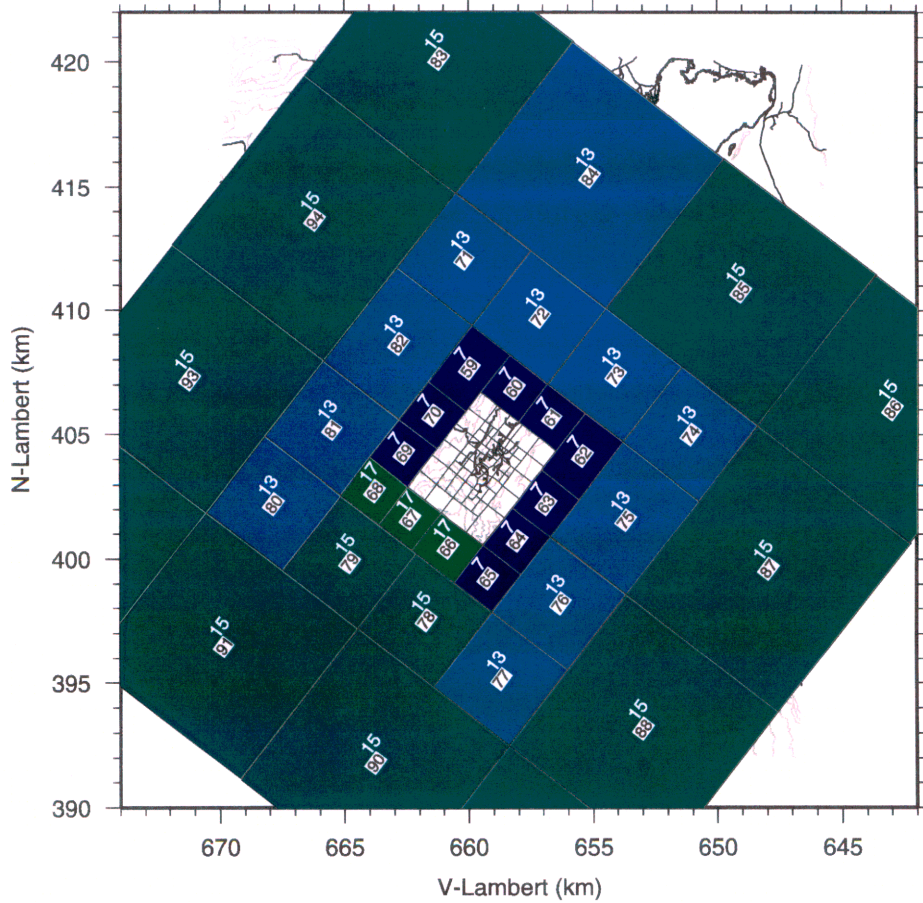
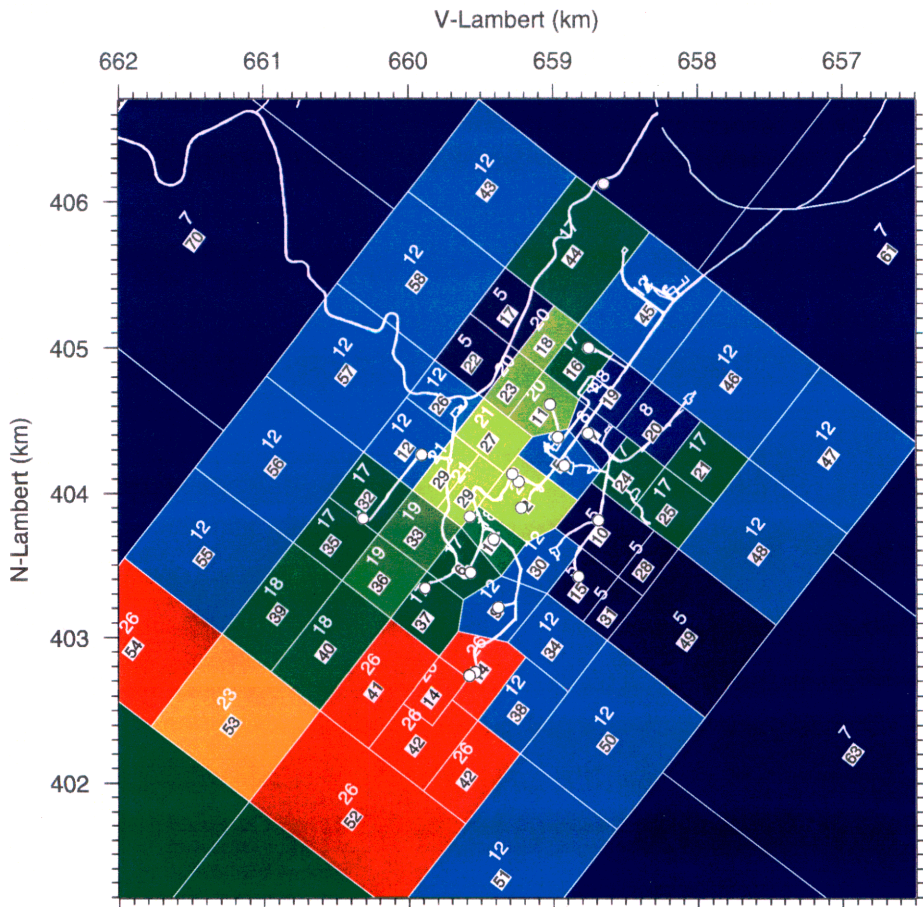
Skipting bergeiginleika í lagi S (500 til 600 m u.s.).



**GMT** Mar 22 14:54 Keyrt á /frr/tough/nesjav/dyrmaett/rocklitir með skipuninni: lita.gridd input.mes L

Skipting bergeiginleika í lagi L (600 til 1000 m u.s.).





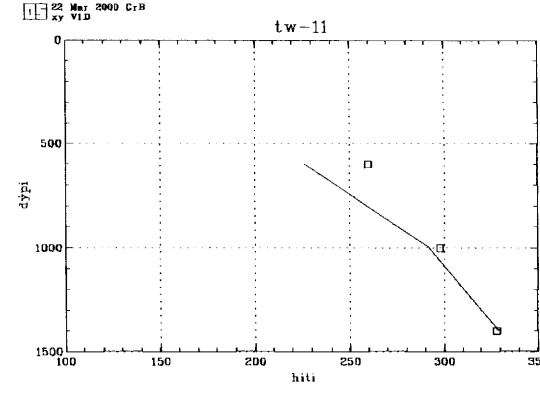
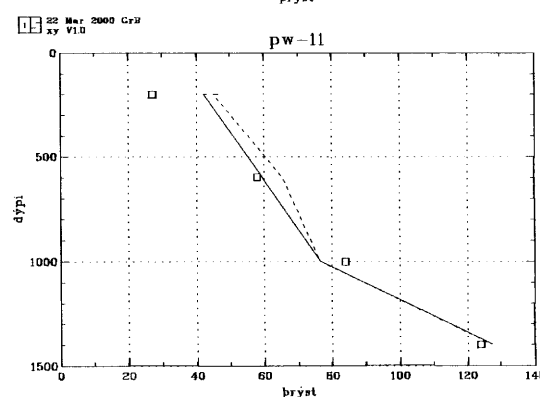
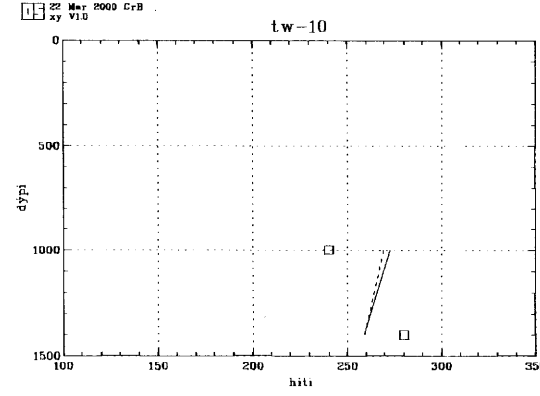
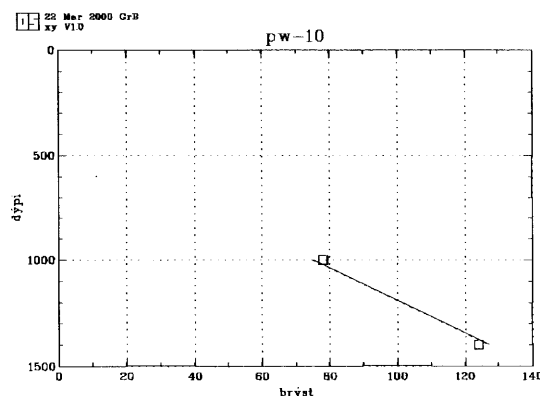
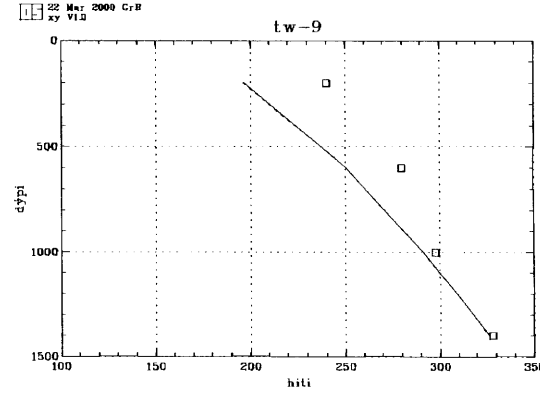
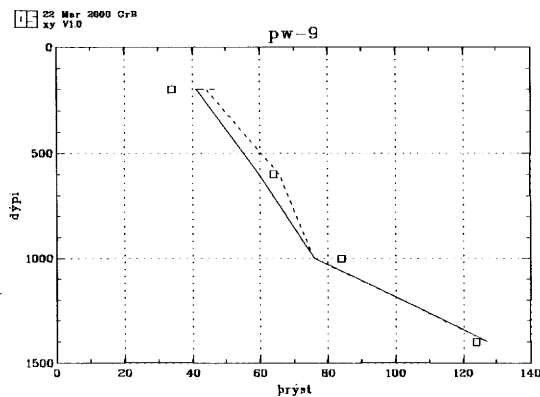
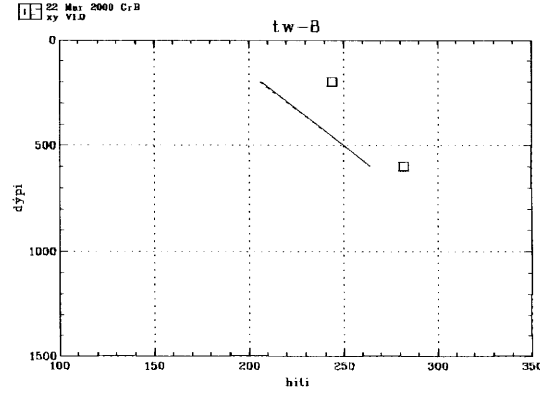
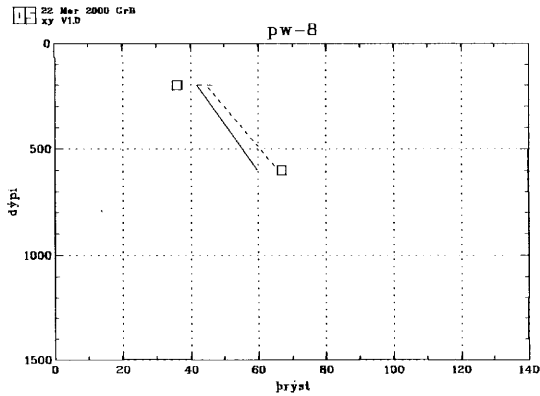
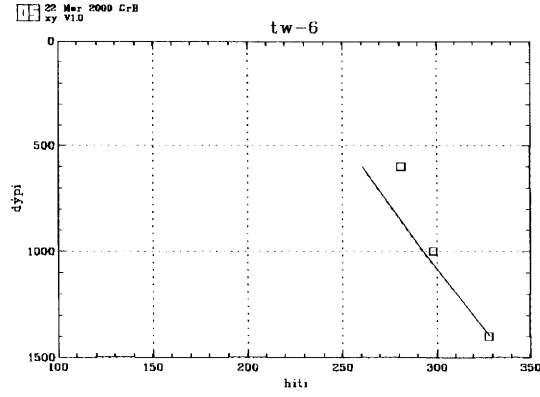
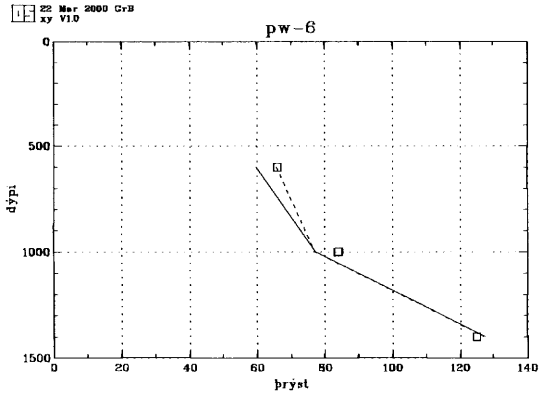
**GMT** Mar 22 14:55 Keyrt á /ftr/tough/nesjav/dyrmaett/rocklitir með skipuninni: lita.gridd input.mes R

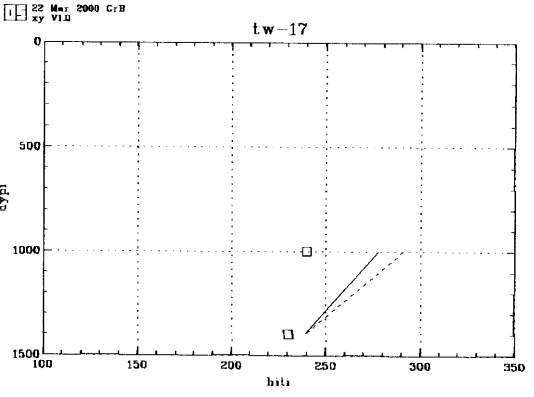
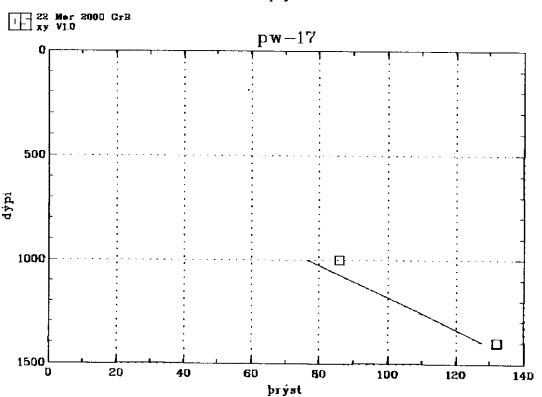
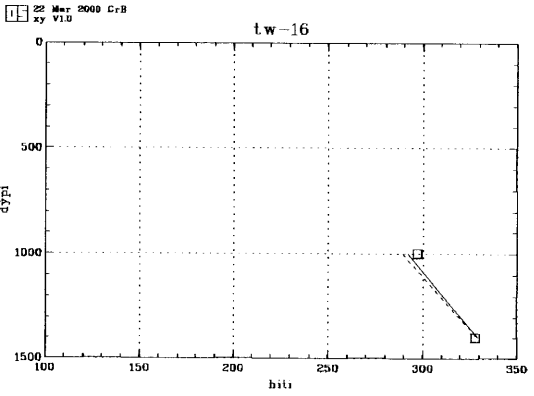
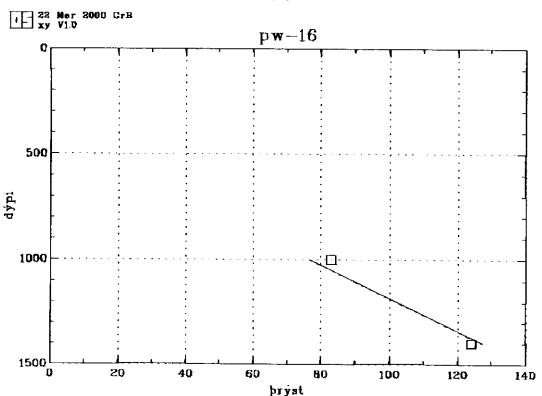
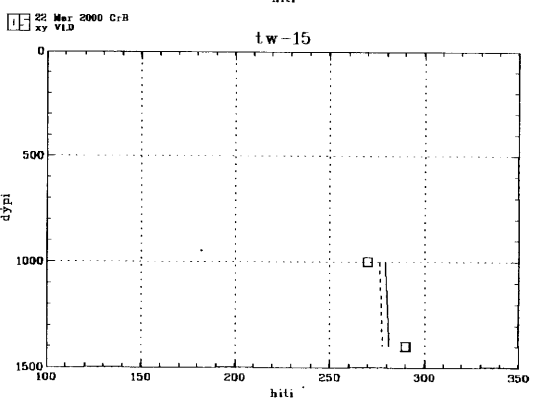
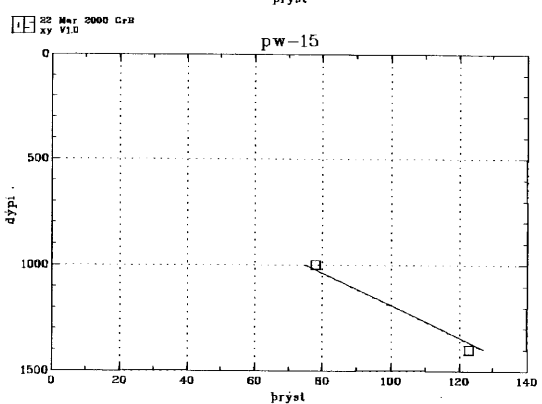
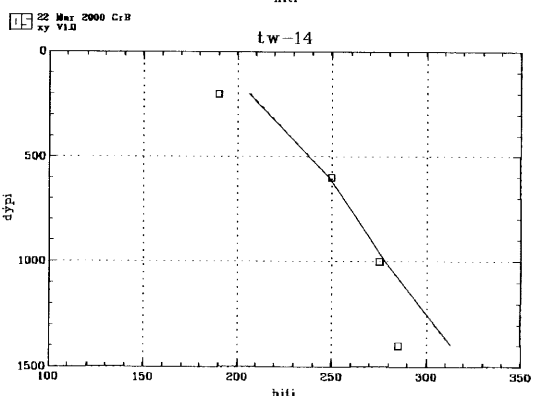
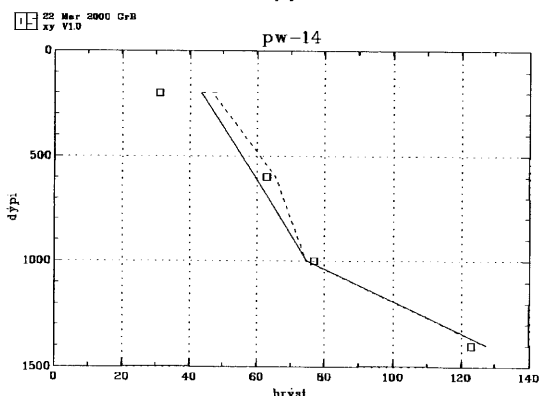
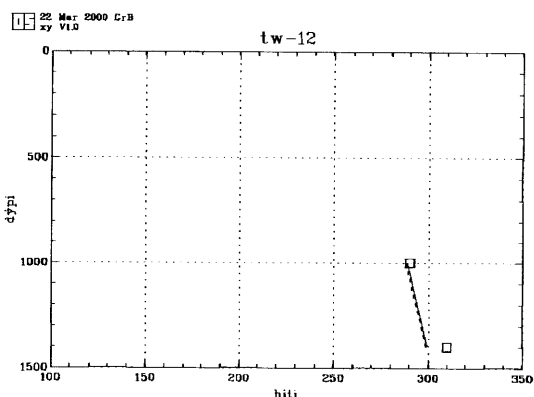
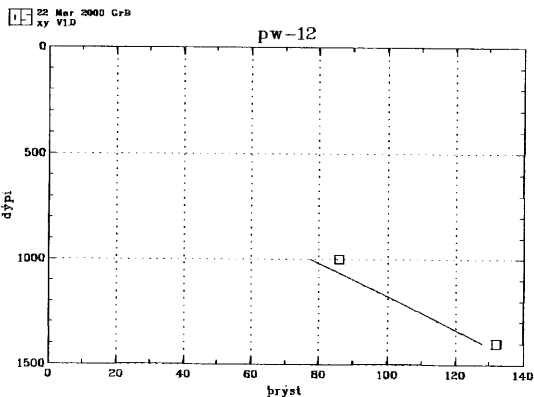
Skipting bergeiginleika í lagi R (1000 til 1800 m u.s.).

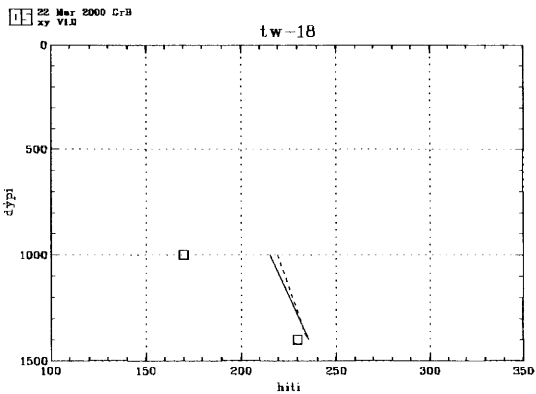
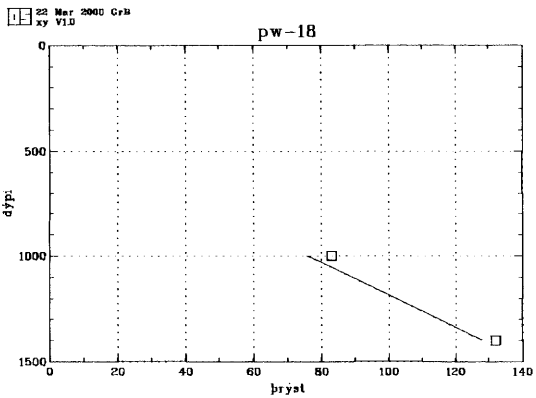
## **Viðauki B: Hermun upphafshita og -þrýstings í Nesjavallalíkani**

Mæld gildi eru einkennd með kassa, upphafslíkan með slitnum ferlum og lokalíkan með heildregnum línnum. Holunöfn eru ofan mynda, með nokkum krúsidúllum, til að þjónka iTOUGH2 kóðanum og teikniseljum.

Kvörðun líkansins miðar við að það sé upphaflega í sama hita og þrýstingi og notað var sem upphafsástand í síðustu Kaliforníuútgáfu frá 1998 (B. Steingrímsson o.fl., 2000). Þessu ástandi er nú hnikað 500 árum aftur í tímann. Síðan fær líkanþrýstingurinn þessi sömu 500 ár til að jafna sig að þeim nýju lektum sem sjálfleitin ákvarðar, áður en vinnsla hefst úr holum árið 1975. Hiti jafnar sig hins vegar ekki á svo skömmum tíma.





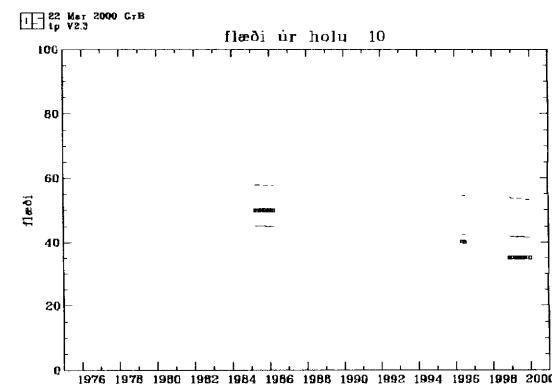
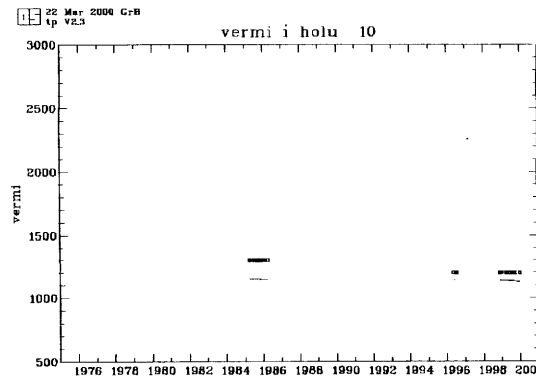
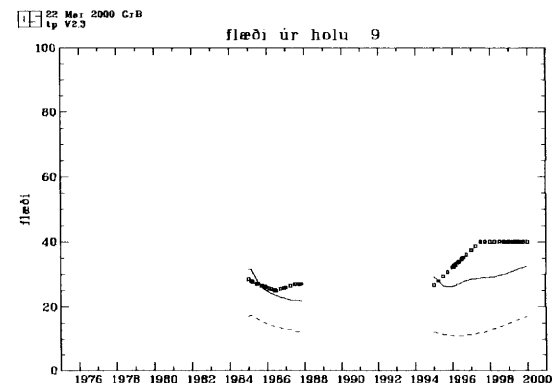
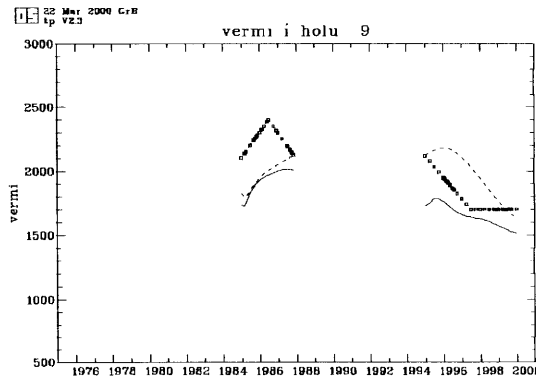
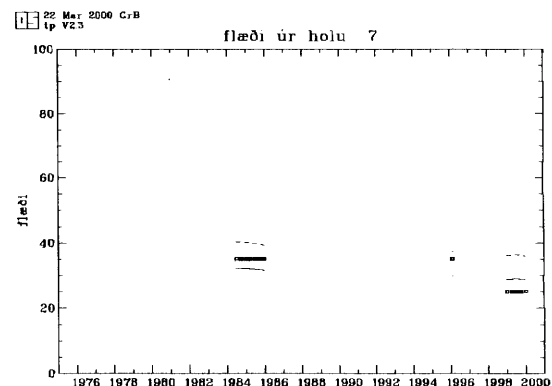
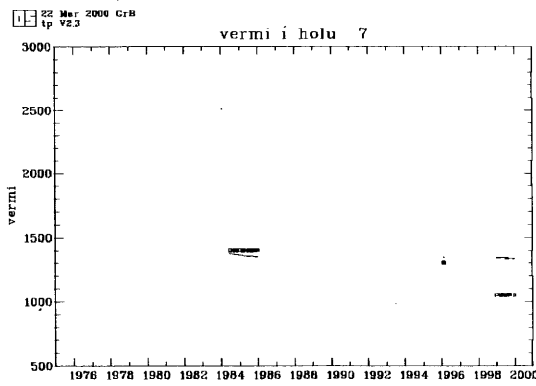
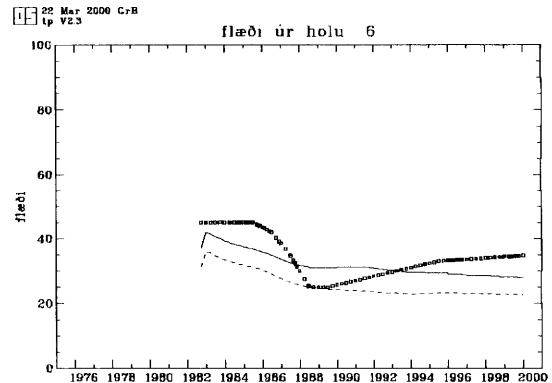
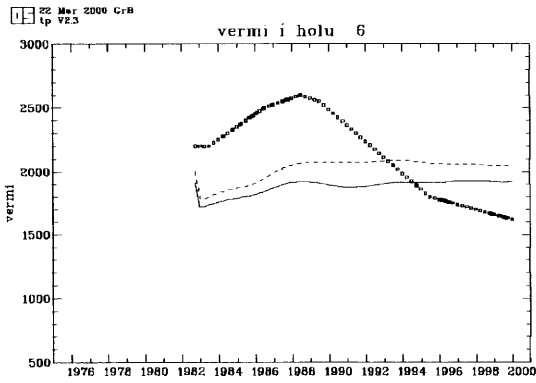
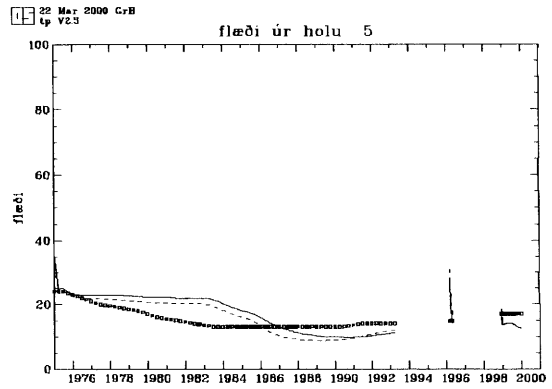
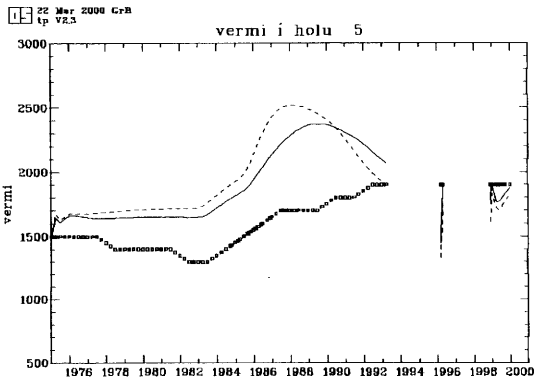


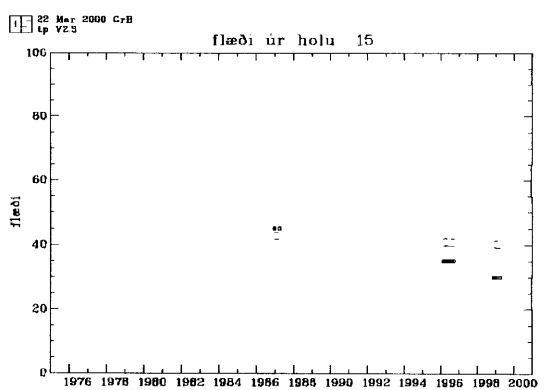
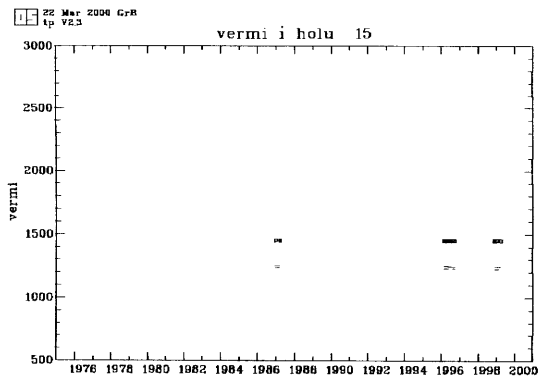
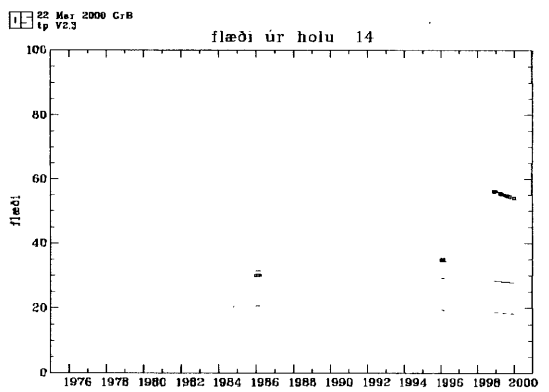
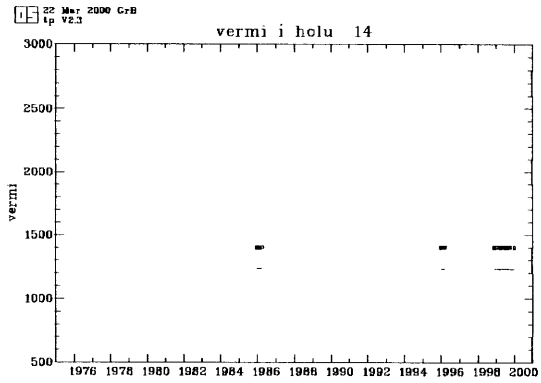
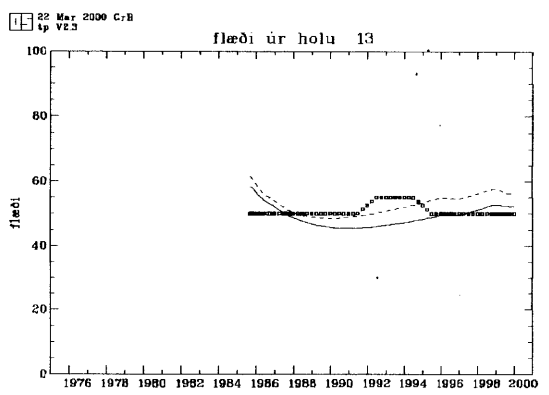
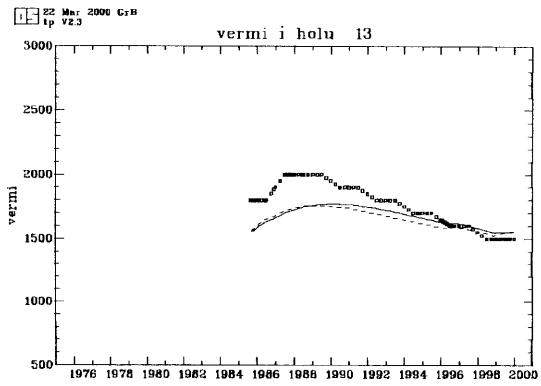
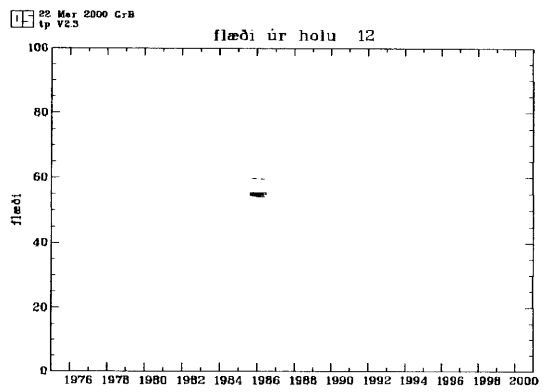
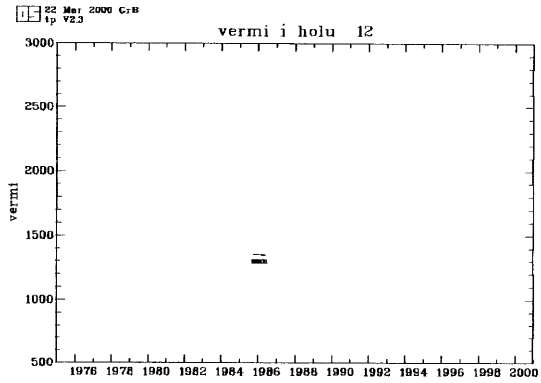
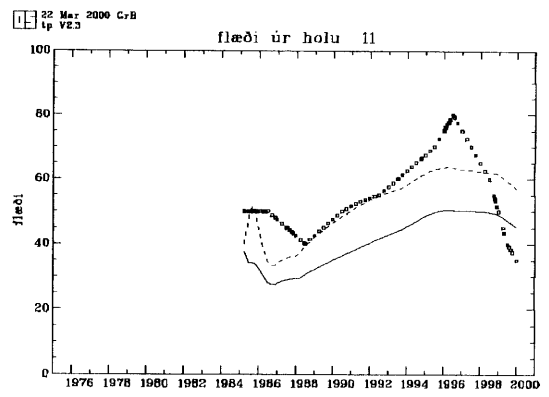
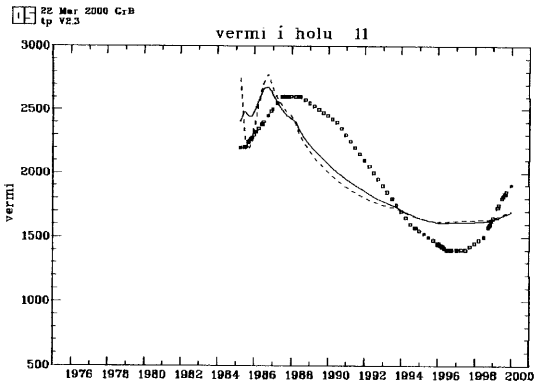
### **Viðauki C: Hermun vinnslu í Nesjavallahólum árabilið 1975-2000**

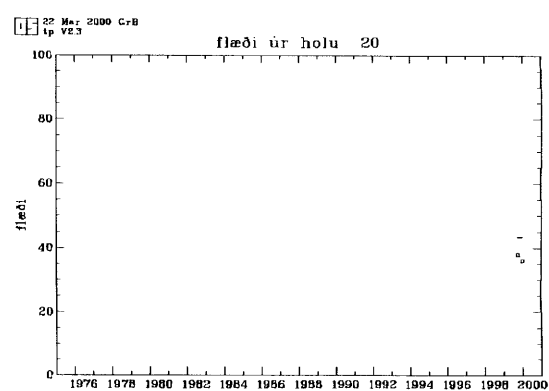
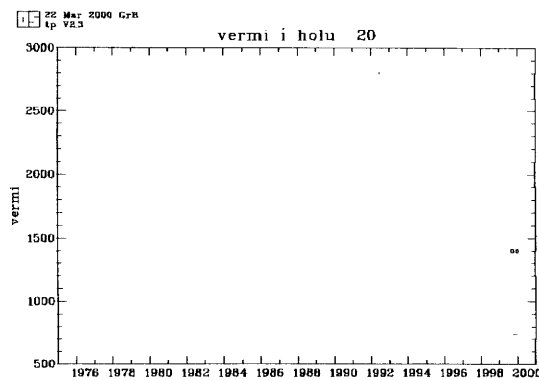
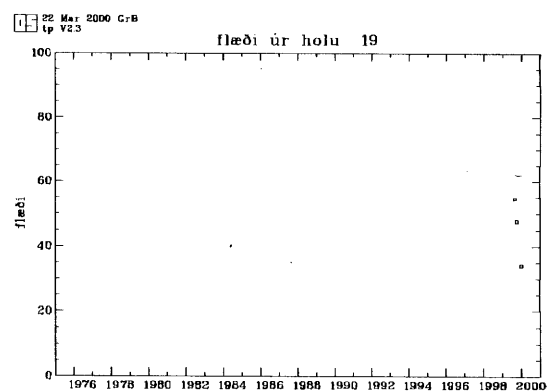
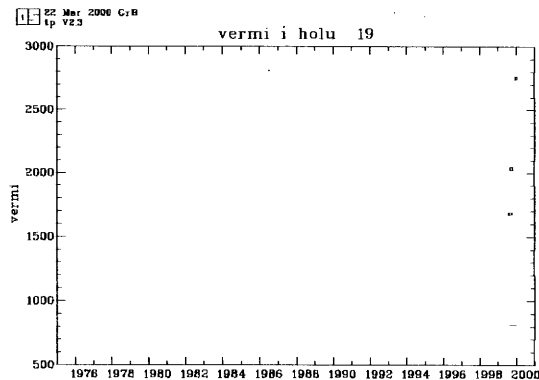
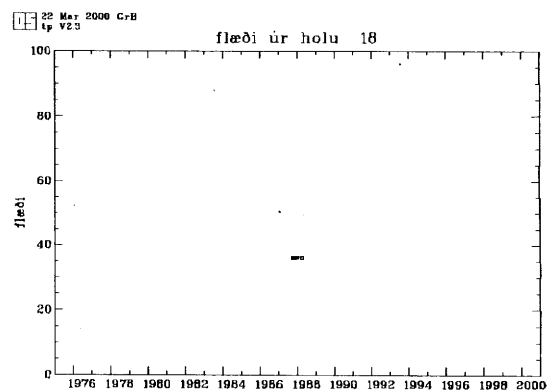
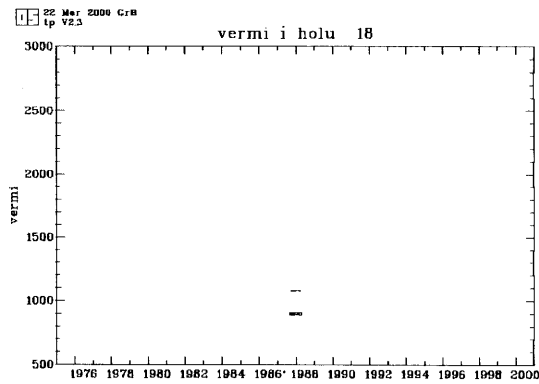
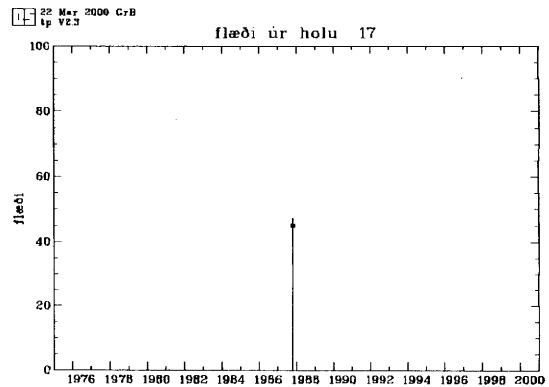
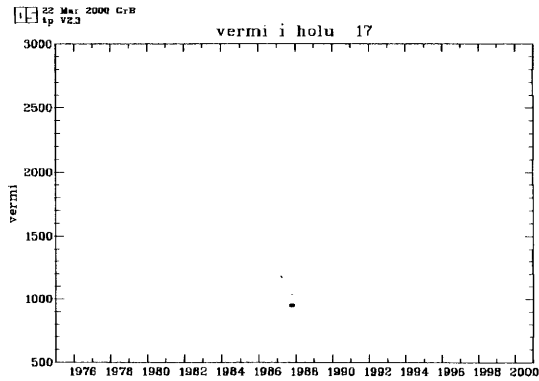
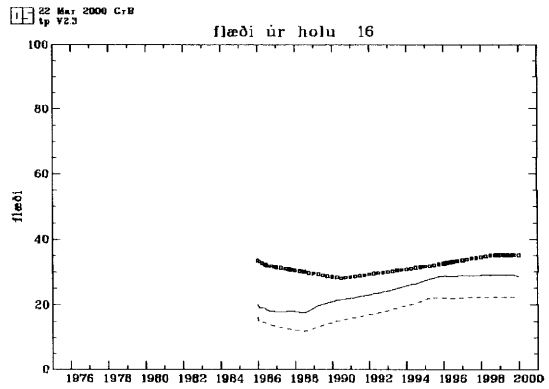
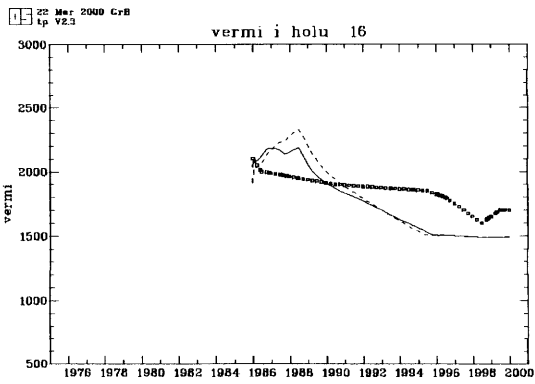
Mæld gildi eru einkennd með kössum, upphafslíkan með slitnum ferlum og lokalíkan með heildregnum línnum. Holunöfn eru ofan mynda.

Mikil vinna var lögð í að tryggja að allar blástursprófanir í sögu Nesjavalla væru til staðar í gagnaskrá og að reiknilíkanið kveikti eða slykki á þeim á réttum tíma. Er það til samræmis við anda sjálfleitarfræða, þar sem grundvallaratriði er að sem allra flestar mælingar komi að líkankvörðuninni.





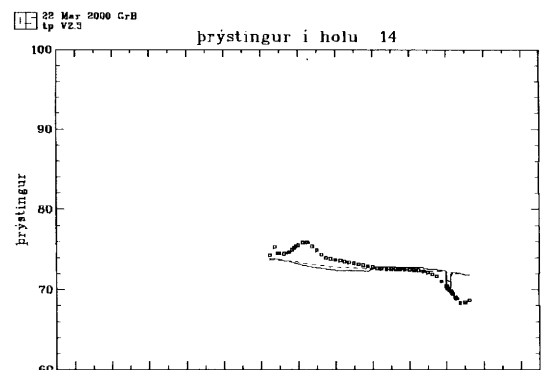
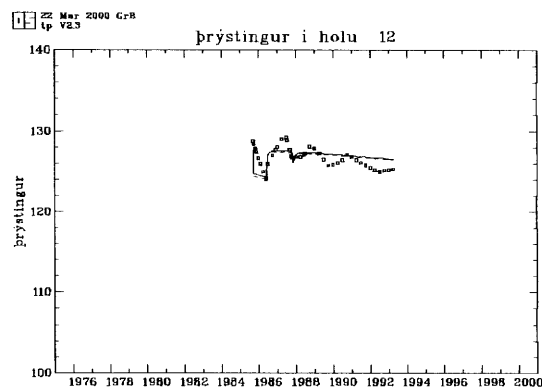
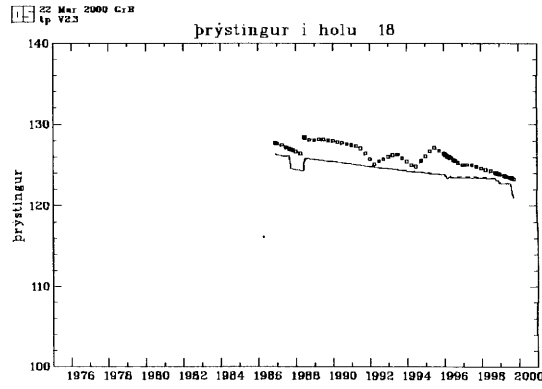
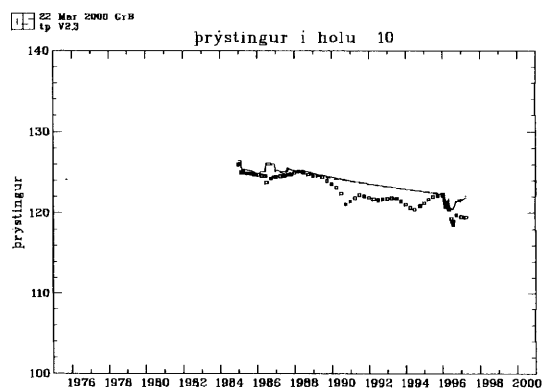
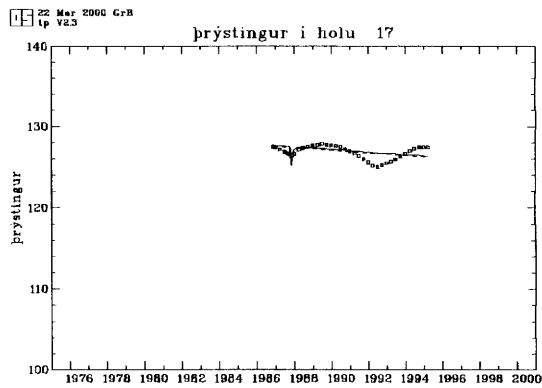
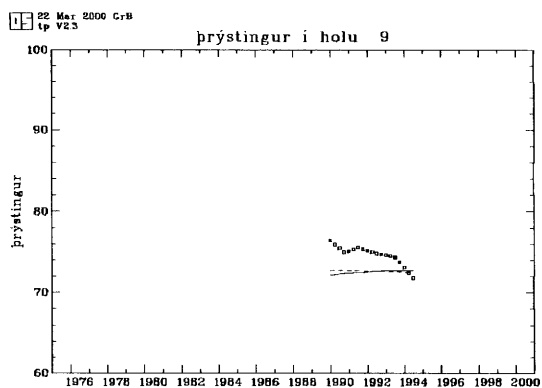
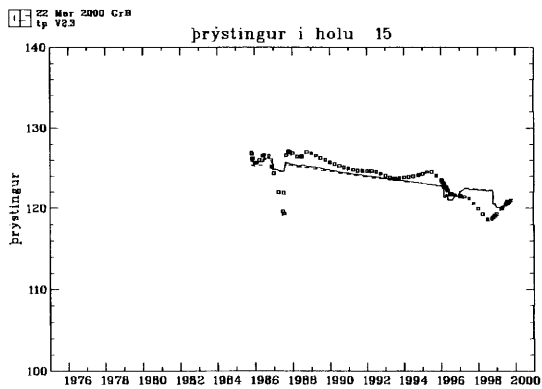
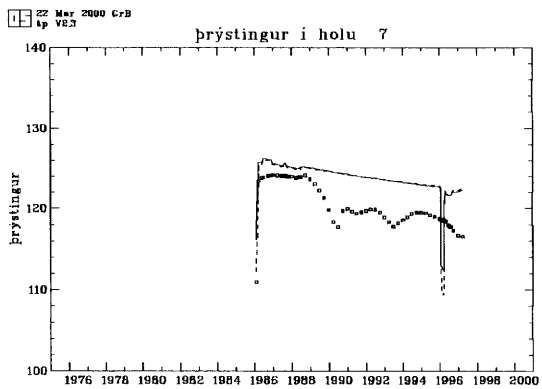




### **Viðauki D: Hermun þrýstisögu í Nesjavallaholum árabilið 1975-2000**

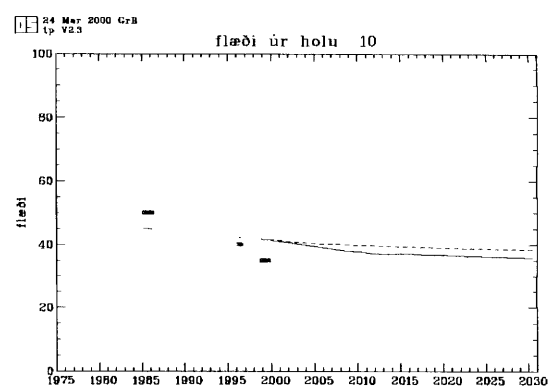
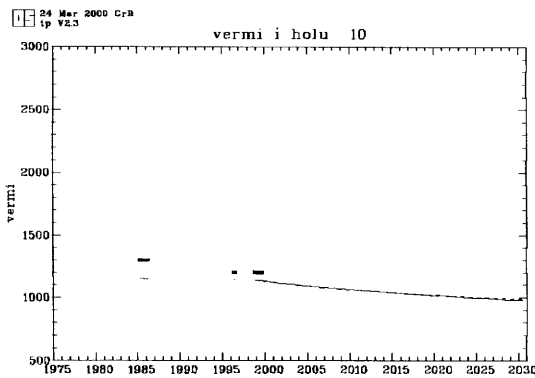
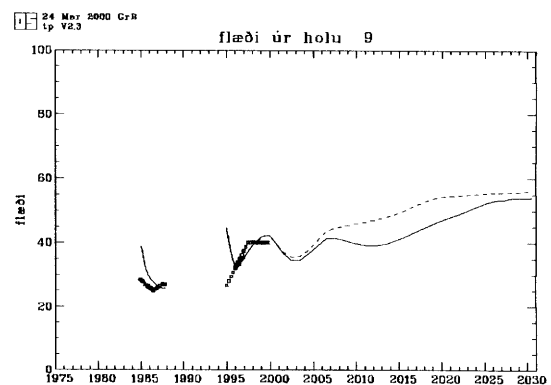
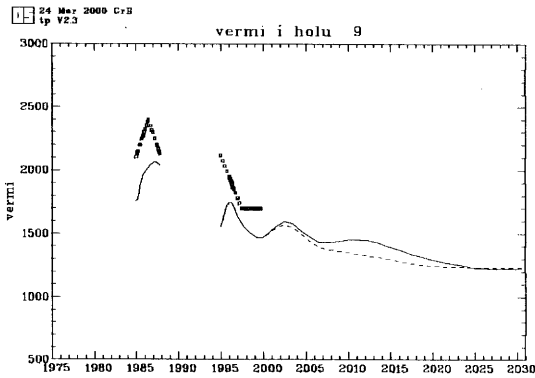
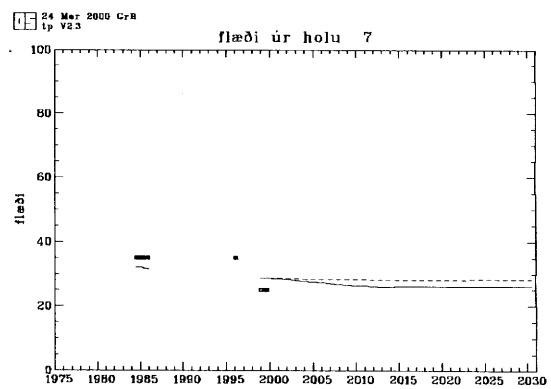
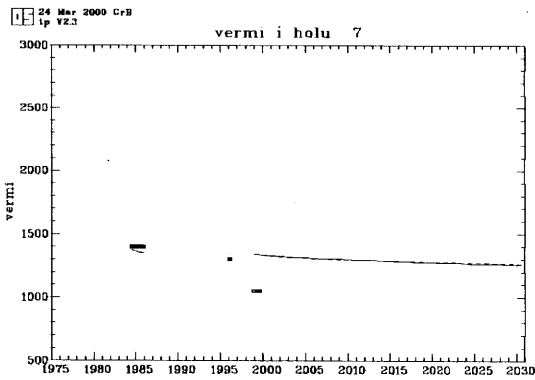
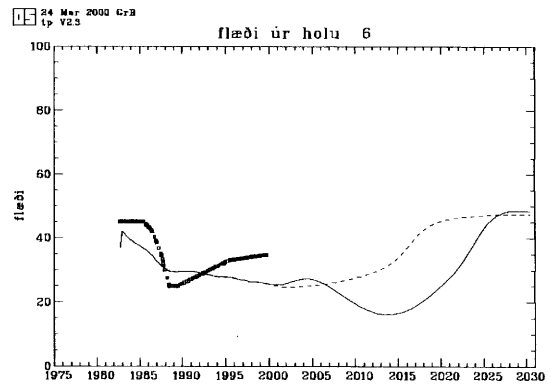
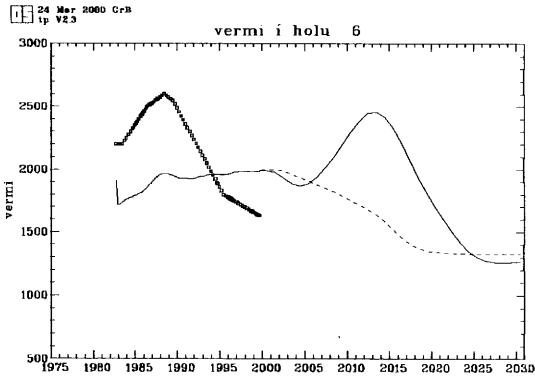
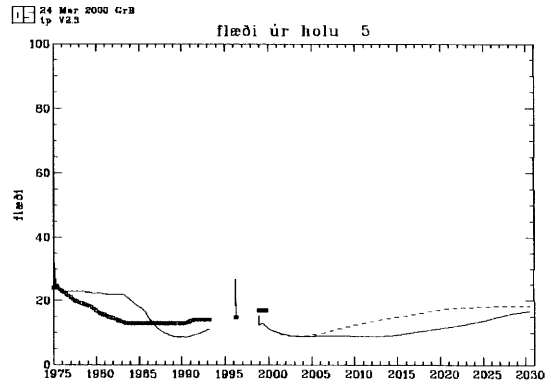
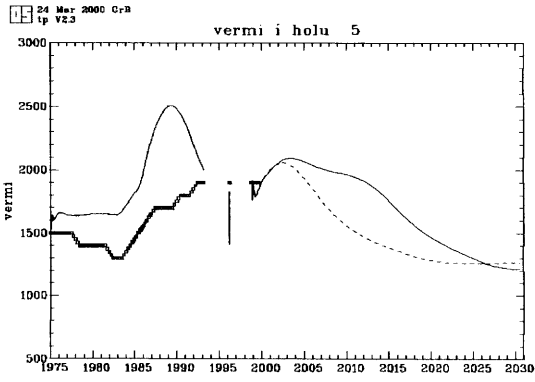
Mæld gildi eru einkennd með kassa, upphafslíkan með slitnum ferlum og lokalíkan með heildregnum línunum. Holunöfn eru ofan mynda.

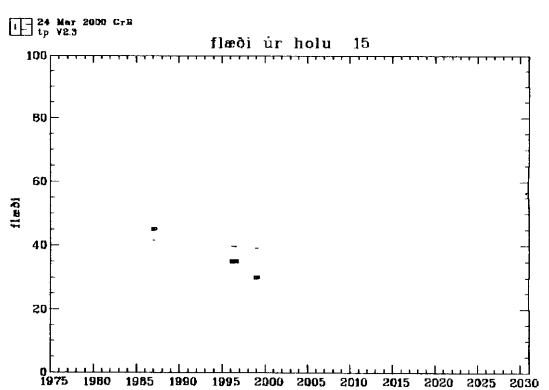
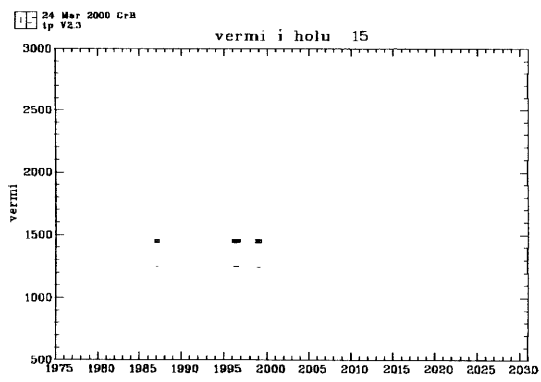
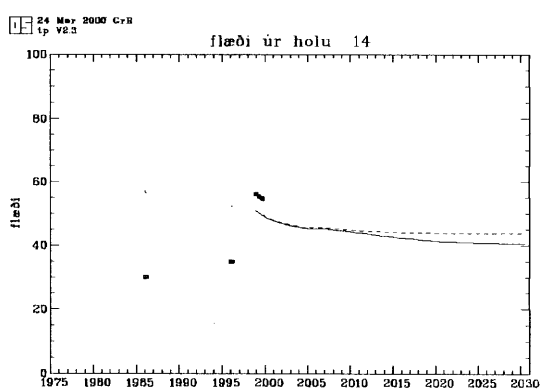
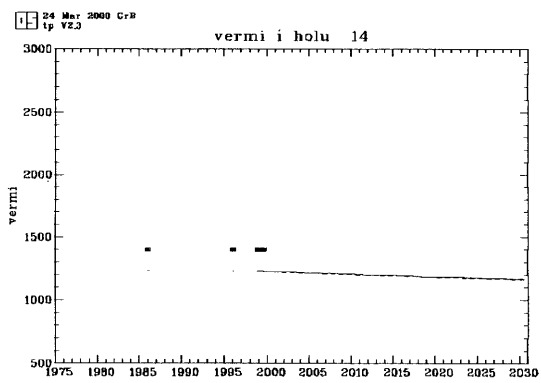
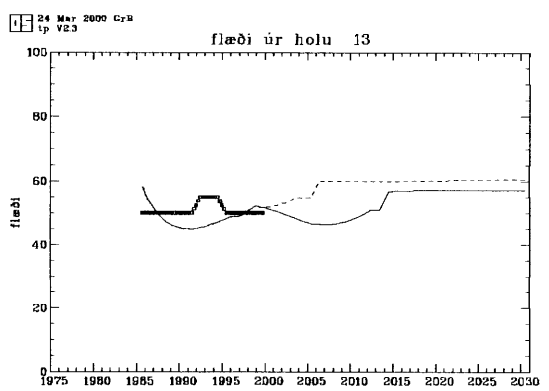
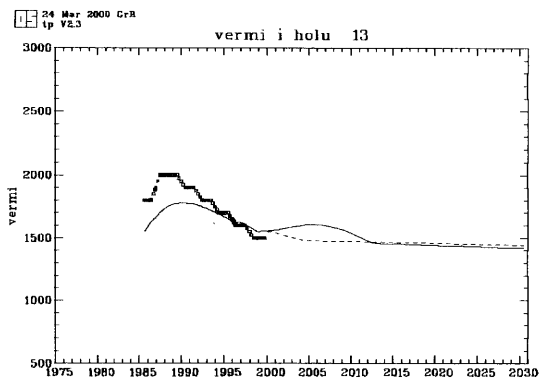
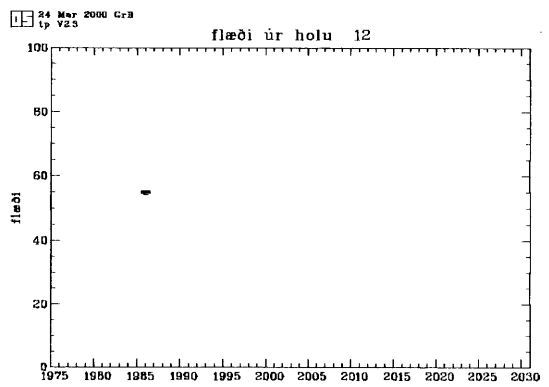
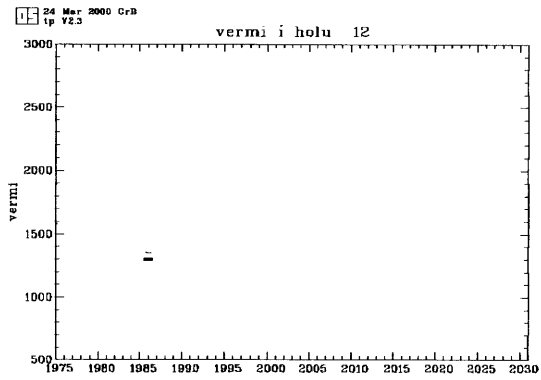
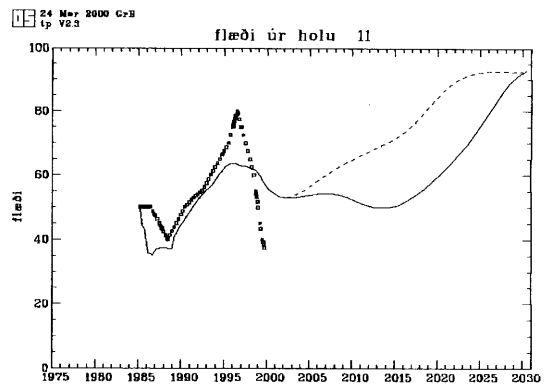
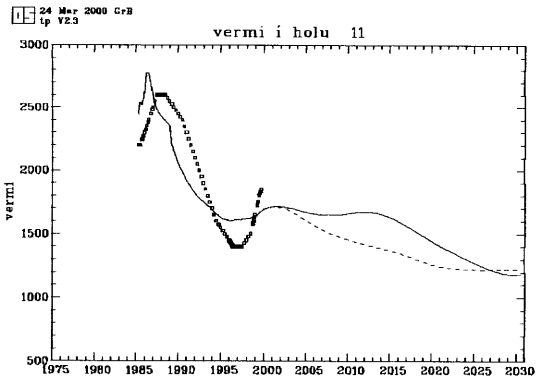
Hér er ólokið stillingum á tímagluggum þrýstings. Í núverandi stillingu brúar iTOUGH2 mæld gildi inn í tímabil þar sem hola blæs og ekkert er mælt. Látið gott heita nú þar sem samræmi mældra og reiknaðra gilda er samt sem áður mjög gott.



**Viðauki E: Hermun og spár um vinnslu úr Nesjavallaholum árabilið 1975-2030**

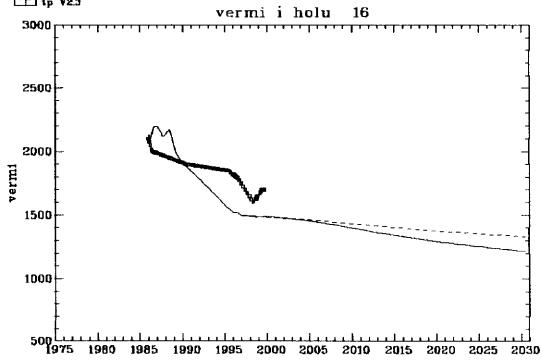
Mæld gildi eru einkennd með kassa, áframkeyrsla núverandi holna (5-16) með slitnum ferlum (60 MW rafmagns og 200 MW varma) og keyrsla holna 5-22 með heildregnum línunum (90 MW rafmagns og 200 MW varma). Holunöfn eru ofan mynda.



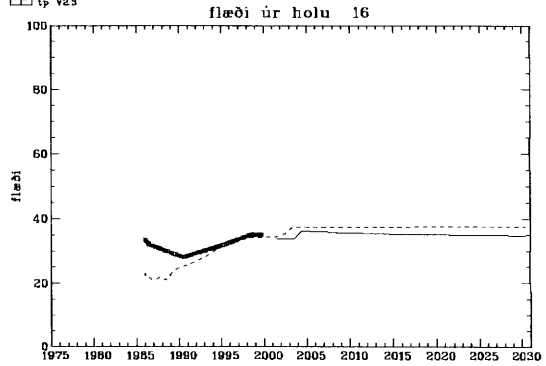




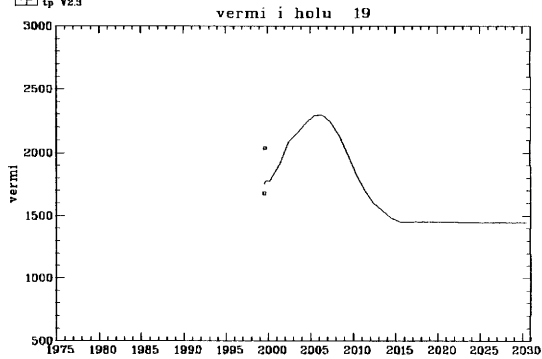
24 Mar 2000 CrB  
tp V2.3



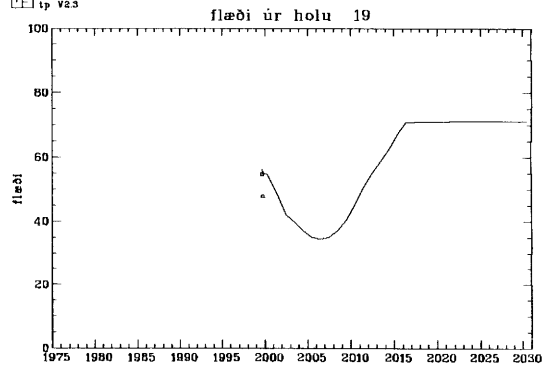
24 Mar 2000 CrB  
tp V2.3



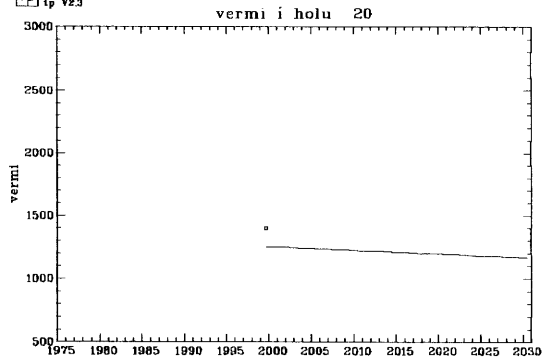
24 Mar 2000 CrB  
tp V2.3



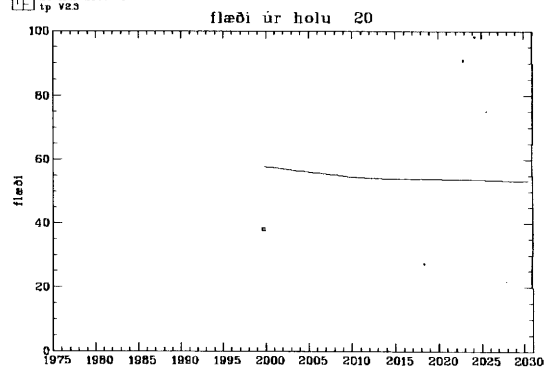
24 Mar 2000 CrB  
tp V2.3



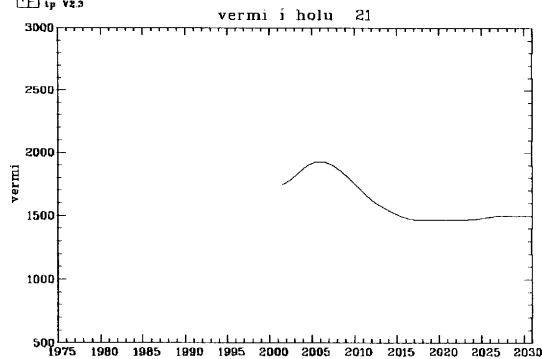
24 Mar 2000 CrB  
tp V2.3



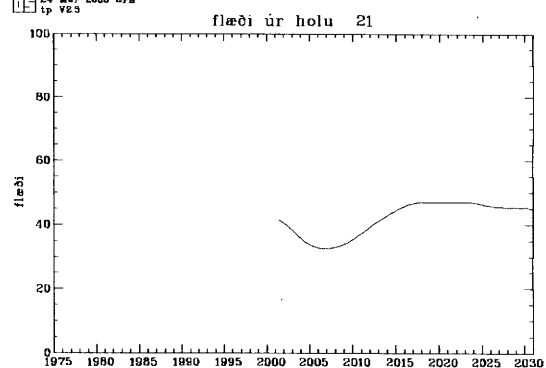
24 Mar 2000 CrB  
tp V2.3



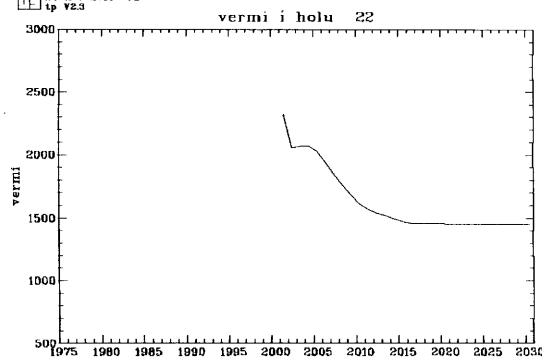
24 Mar 2000 CrB  
tp V2.3



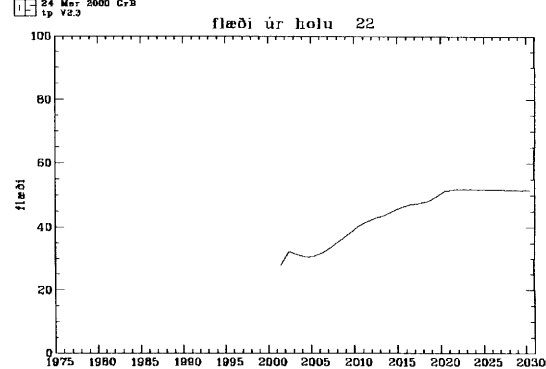
24 Mar 2000 CrB  
tp V2.3



24 Mar 2000 CrB  
tp V2.3



24 Mar 2000 CrB  
tp V2.3



**Viðauki F: Hermun og spád þrýstisaga Nesjavallaholna árabilið  
1975-2030**

Mæld gildi eru einkennd með kassa, áframkeyrsla núverandi holna (5-16) með slitnum ferlum (60 MW rafmagns og 200 MW varma) og keyrsla holna 5-22 með heildregnum línunum (90 MW rafmagns og 200 MW varma). Holunöfn eru ofan mynda.

