



**ORKUSTOFNUN**  
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

# Ársfundur Orkustofnunar 1993

17. mars 1993

OS-93013

Mars 1993



**ORKUSTOFNUN**  
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

# **Ársfundur Orkustofnunar 1993**

**17. mars 1993**

## ÁRSFUNDUR ORKUSTOFNUNAR 1993

Haldinn fimmtudaginn 17. mars kl. 13:30 að Borgartúni 6

### Dagskrá:

- 13:30 *Ávarp iðnaðarráðherra, Jóns Sigurðssonar.*
- 13:40 *Raforkuvinnsla á Íslandi í framtíðinni og nauðsyn landsskipulags.  
Jakob Björnsson, orkumálastjóri.*
- 14:20 *Fordæfræði jarðhitans, Guðni Axelsson, jarðeðlisfræðingur.*
- 15:00 *Kaffihlé.*
- 15:20 *Jöklamælingar og vatnsafl. Oddur Sigurðsson, jarðfræðingur og Tómas  
Jóhannesson, jarðeðlisfræðingur.*
- 15:00 *Umræður.*
- 16:10 *Fundarslit. Sigbór Jóhannesson, formaður stjórnar Orkustofnunar.*
- 16:20 *Yfirlitssýning  
Bodið upp á léttar veitingar.*
- 17:20 *Dagskrárlök.*

*Stuttar fyrirspurnir í lok hvers erindis, en umræður að afloknum erindaflutningi.*

*Fundarstjóri:*

# Raforkuvinnsla á Íslandi í framtíðinni og nauðsyn á landsskipulagi

Jakob Björnsson, orkumálastjóri

## 1. INNGANGUR

Í þessu erindi mínu mun ég fyrst, venju samkvæmt, rekja í stuttu máli starfsemi Orkustofnunar á árinu 1992. Ég læt mér nægja að drepa á það helsta þar, en vísa ykkur að öðru leyti til ársskýrslu stofnunarinnar, þar sem starfsemin er rakin mun ítarlegar. Eftir þetta yfirlit mun ég snúa mér að því efni sem felst í heiti erindisins, sem er að fjalla um þörf raforkuvinnslu iðnaðarins á Íslandi í framtíðinni fyrir vandað landsskipulag.

## 2. ORKUSTOFNUN 1992

### 2.1 Vatnsorkurannsóknir

Meginþættirnir í vatnsorkurannsóknum stofnunarinnar á liðnu ári voru annarsvegar almennar vatnamælingar víðsvegar um land og hinsvegar áttak í vatnsorkurannsóknum, sem raunar felur einnig í sér vatnamælingar, og miðar að því, eins og ég gat um á síðasta ársfundi, að Orkustofnun hafi um aldamót lokið sínum rannsóknarhluta á virkjunarstöðum með samanlagða vinnslugetu er nemur 13 700 GWh/a. Hinum síðustu virkjunum á þessum stöðum gæti þá verið lokið á árunum 2010 - 2015 og þær gætu, ásamt virkjunum á stöðum sem þegar hafa verið rannsakaðir, unnið nærfellt næga orku til að mæta þörfum iðnaðar á borð við þrjú álver, t.d. eins töfaldaðs og annars til, og útflutnings um þrjá sæstrengi.

Þessu átaki hefur miðað hægar en til stóð og það er alveg ljóst að vel verður að halda á spöðunum ef ofangreint markmið á að nást.

Á árinu var lokið við hlut Orkustofnunar í rannsóknum á Efri-Þjórsá, ofan Sultartangalóns. Á öðrum virkjunarsvæðum var einkum unnið við Hraunavirkjun, Austurlandsvirkjun, þ.e. samvirkjun Jökulsár á Fjöllum og Jökulsár á Dal, og Jökulsárvirkjanirnar í Skagafirði. Unnið var að nýjum, samræmdum gagnagrunni fyrir vatnamælingar sem gert er ráð fyrir að allar vatnamælingar á Íslandi verði skráðar eftir í framtíðinni. Haldið var áfram jöklamælingum á Hofsjökli, en frá honum renna ár til nánast allra átta sem áhugaverðar eru til virkjunar. Undirbúið var að taka upp tölvuvætt landupplýsingakerfi (GIS) og að öll kort stofnunarinnar verði framvegis gerð á stafrænu formi. Þetta verkefni er sameiginlegt með Jarðhitadeild.

### 2.2 Jarðhitarannsóknir

Af eigin jarðhitarannsóknum stofnunarinnar bar hæst á árinu 1992 átaksverkefni í rannsókmun á virkjun jarðhita til raforkuvinnslu sem unnið er í samstarfi milli Orkustofnunar, Landsvirkjunar, Hitaveitu Reykjavíkur og Hitaveitu Suðurnesja. Það miðar að því að undirbúa virkjun jarðhita í stórum stíl síðar meir og að því að jafnan séu tiltækir kostir til virkjunar jarðhita sem skjóta má inn í virkjanaraðir sem að öðru leyti samanstanda að mestu af vatnaflsvirkjununum meðan vatnsorkan er enn ódýrari en jarðhitinn til raforku-

vinnslu þegar á heildina er litið. Meginþátturinn í þessu átaki á liðnu ári var áætlun um kostnað við 20 MW virkjun í Bjarnarflagi, sem unnin var í samvinnu við Landsvirkjun, og er fyrri áfangi í að meta kostnað við raforkuvinnslu í stöðluðum 20 MW einingum við hérlandar aðstæður. Af öðrum þáttum þessa verkefnis má nefna frumrannsókn á Brennisteinsfjöllum, sem gert er ráð fyrir að ljúka 1993, yfirborðsrannsóknir á Ölkelduhálsi, sem lokið var við á árinu þannig að það svæði er nú tilbúið undir fyrstu boranir, og að byrjað var á yfirborðsrannsóknnum á Torfajökulssvæðinu. Loks var safnað um 200 bergsýnum úr rofnum megineldstöðvum til mælinga á svonefndum forðafræðistuðlum, en þessir stuðlar eru mikilvægir fyrir raunhæft mat á hagkvæmni raforkuvinnslu úr jarðhita.

Á árinu hófst rannsókn á umhverfisáhrifum af vinnslu jarðhita. Verkefnið, sem gert er ráð fyrir að standi nokkur ár, er unnið í samvinnu milli Jarðhitadeildar Orkustofnunar og helstu nýtenda háhita á Íslandi, sem eru hinir sömu og ég taldi upp rétt áðan. Lágheitinn skiptir mun minna máli í þessu samhengi sökum þess hve umhverfisáhrif af vinnslu hans eru lítil.

Af öðrum verkefnum má nefna aðgerðir til örvunar á gufuafköstum holu í Kröflu; þyngdarmælingar á Reykjanesi og í Svartsengi til að fylgjast með efnistöku úr svæðunum; spá um áhrif af vinnslu úr gufupúða í Svartsengi og undirbúningsvinnu við nýtt reiknilíkan fyrir Nesjavelli. Eins og áður annaðist Jarðhitadeild eftirlit með vinnslu á háhitasvæðum fyrir virkjunaraðila. Unnið var að hagkvæmniathugun á flutningi jarðgufu langar leiðir og niðurstöður hennar gefnar út á upplýsingablöðum á ensku, í samvinnu við Markaðsskrifstofuna, til kynningar erlendis. Lokið var við skýrslu um athuganir á votti af jarðgasi sem fundist hefur í Öxarfirði og undirbúin, í samráði við Iðnaðarráðuneytið, þýðing þeirrar skýrslu á ensku til kynningar meðal hugsanlegra áhugaaðila erlendis.

Unnið var áfram að því fyrir hitaveitur víða um land að koma á skipulegu eftirliti með vinnslu þeirra og leitað var að heitu vatni fyrir fjölmarga aðila víðsvegar um land.

Frá þróun tækja, úrvinnsluaðferða og hugbúnaðar er það helst að segja að lokið var að mestu við smíði viðnámsmælitækis og hitasírta til mælinga í borholum; prófuð voru söfnunartæki til sjálfvirkar skráningar á vinnslugögnum hitaveitna; þróuð var aðferð til að fjarlægja truflandi áhrif rafleiðandi hluta á yfirborði við úrvinnslu gagna úr TEM-viðnámsmælingum í því skyni að gera hana áreiðanlegri og byrjað á endurbættu forriti til að reikna ótruflaðan hita í borholum.

Orkustofnun stóð, ásamt Félagi íslenskra iðnrekenda og fleirum, að alþjóðlegri ráðstefnu um notkun jarðhita í iðnaði sem haldin var í Reykjavík í september, og annaðist Jarðhitadeild um þátt stofnunarinnar í henni. Fimm sérfræðingar á deildinni fluttu erindi á ráðstefnunni.

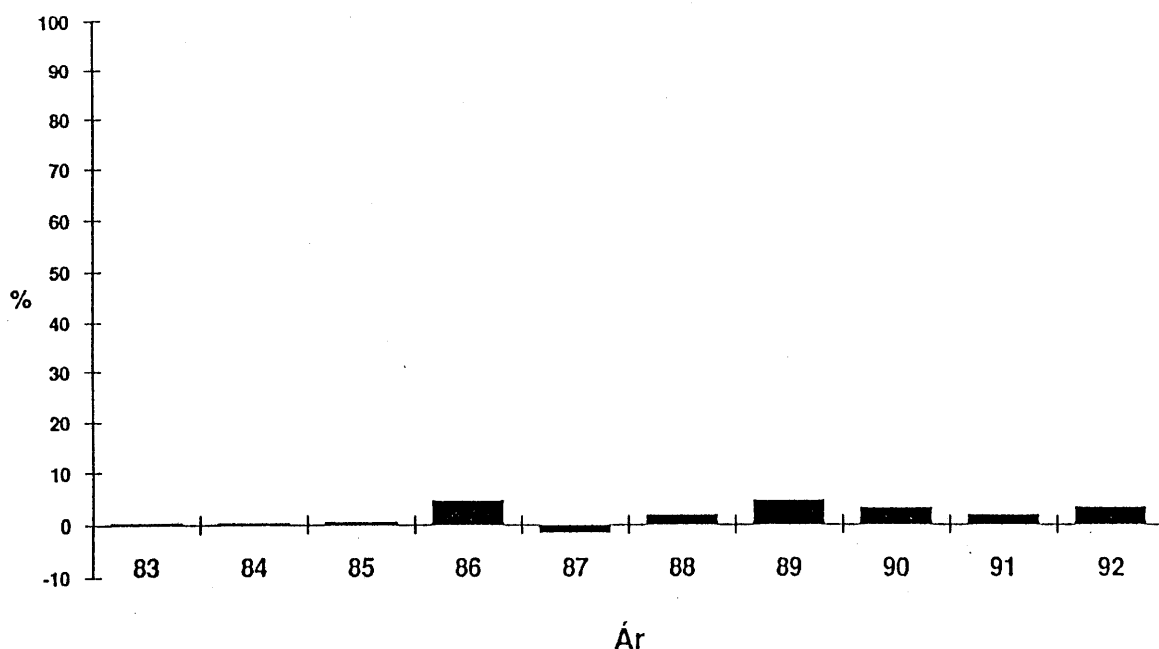
Jarðhitaskólinn var rekinn með sama sniði og áður. Tólf styrkþegar frá sjö löndum útskrifuðust eftir 6 mánaða nám. Skólinn var kostaður af íslenska ríkinu að 85 % og að 15 % af Háskóla Sameinuðu þjóðanna í Tókíó. Frá upphafi skólans, 1979, hefur hann útskrifað 118 styrkþega frá 23 löndum.

### 2.3 Orkubúskaparrannsóknir

Gagnasöfnun um orkumál og úrvinnsla úr þeim var með hefðbundnum hætti. Að venju annaðist Orkubúskapardeild samskipti um íslensk orkumál við alþjóðasamtök og -stofnanir

á orkusviðinu, svo sem NORDEL og nefndir á vegum norrænu ráðherranefndarinnar, Sameinuðu þjóðirnar, OECD, IEA, Alþjóðlega orkuráðið (WEC) og fleiri. Deildin vann eins og áður fyrir Orkuspárnefnd við undirbúning undir orkuspár. Talsvert af þeirri vinnu var keypt að. Á árinu komu út á vegum Orkuspárnefndar tvær nýjar orkuspár: Raforkuspá 1992 - 2020 og Húshitunarspá 1992 - 2020.

Höfuðstóll Orkustofnunar í hlutfalli af heildartekjum  
1983 - 1992



## 2.4 Fjármál

Bókfærð útgjöld Orkustofnunar á árinu 1992 námu 378 milljónum króna, sem samsvarar 6,4 % lækkun að raunvirði frá árinu áður. Fjárveitingar námu 239,5 milljónum króna og lækkuðu þær að raunvirði um 3,4 % frá fyrra ári. Sértekjur námu 138,5 milljónum og lækkuðu þær einnig að raunvirði. Höfuðstóll stofnunarinnar var í árslok 1992 jákvæður um 3,3 % af rekstrartekjum borið saman við 1,8 % í árslok 1991 og 3,2 % í árslok 1990. 1. mynd sýnir höfuðstólinn í lok árána 1983 - 1992. Við á Orkustofnun erum nokkuð stolt yfir þessari mynd sem við teljum að sýni að óhætt sé að fá okkur meira fé í hendur. Við förum vel með fé.

### 3. RAFORKUVINNSLA Á ÍSLANDI Í FRAMTÍÐINI OG NAUÐSYN Á LANDSSKIPULAGI

#### 3.1 Inngangur

Í þessu erindi mun ég fyrst gera grein fyrir landþörf raforkuvinnsluiðnaðar á Íslandi sem annar vinnsla á 43 TWh/a úr vatnsorku og jarðhita til almennra þarfa, raforkufreks iðnaðar og útflutnings, og samsvarar þeirri sviðsmynd sem ég hefi dregið upp á tveimur síðustu ársfundum af hugsanlegri nýtingu orkulindanna árið 2030 ef stefna stjórnvalda í þeim efnum ber árangur til lengri framtíðar. Þessar 43 TWh/a eru 86 % af þeim 50 TWh/a sem talið er að vinna megi með svo lágum tilkostnaði að áhugavert sé vegna raforkufreks iðnaðar og útflutnings á raforku. Af þeim kæmu 30,7 TWh/a úr vatnsorku og 12,3 úr jarðhita.

#### 3.2 Landþörf raforkuvinnsluiðnaðarins í framtíðinni

Tafla 1 sýnir yfirlit yfir hversu mikið land muni verða fyrir meiri eða minni áhrifum af vinnslu á þessum 43 TWh/á. Enn ríkir nokkur óvissa um þessa landþörf sökum þess að rannsóknir eru víða skammt á veg komnar og ekki alveg ljóst hvernig að nýtinguni verður staðið. Reynt hefur verið að taka tillit til þessarar óvissu með því að áætla landþörfina frekar of en van. Sérstaklega er þess að vænta að í reynd verði nokkru minna land fyrir áhrifum af vinnslu raforku á háhitasvæðum er sýnt er á myndum sem hér fylgja með.

Samkvæmt töflunni er heildarflatarmál þessa lands um 2000 km<sup>2</sup>, eða nálægt 2 % af flatarmáli landsins.

Áætlað er að undir miðlunarlón vatnsaflsvirkjana með samanlagða orkugetu 30,7 TWh á ári fari alls rúmlega 1000 km<sup>2</sup>, þar af tæplega 300 km<sup>2</sup> af grónu landi, tæplega 500 af ógrónu þurrlandi og um 260 km<sup>2</sup> af stöðuvötnum og árfarvegum. Landþörfin undir miðlunarlón er þannig um 1 % af landinu alls. Þá stærð er vert að leggja sér á minnið. Af grónu landi er hlutfallið lítið eitt hærra, eða rúmlega 1,1 % .

Vakin skal athygli á að einungis það land sem fer undir vatn og mannvirki leggur raforkuvinnsluiðnaðurinn að fullu hald á þannig að það er ekki nýtanlegt til annars, með þeirri mikilvægu undantekningu þó að miðlunarlónin má nýta til fjölbreytilegra útilfsiðkana eins og gert er víða um heim. Á öðrum hlutum þessa lands er margvísleg *samnýting* mögleg. Til dæmis má nota virkjunarsvæðin til samgangna; undir vegi að ósnortnum byggðum. Líklegt er að helstu samgönguleiðnar um hálendið liggi einmitt um þessi orkuvinnslusvæði. Auk raforkuvinnsluiðnaðarins þarf öflug ferðamannþjónusta á góðum vegum að halda. Ég sé fyrir mér góða vegi um hálendið í framtíðinni, víða malbikaða. Slíkir vegir eru besta vömin sem til er gegn akstri utan vega.

Hér er ekki meðtalin landþörf þeirra iðjuvera sem nýta hluta þessarar orku. Hún er öll, eða mestöll, í byggðum, en verulegur hluti af landþörf raforkuvinnsluiðnaðarins er í óbyggðum, ekki síst á Miðhálandinu.

Tafla 1  
 Áætlað flatarmál lands sem verður fyrir meiri og minni áhrifum af  
 vinnslu á 43 GWh/a af raforku

|  | Gróíð<br>km <sup>2</sup> | Ógróíð<br>km <sup>2</sup> | Vötn og<br>farvegir<br>km <sup>2</sup> | Samtals<br>km <sup>2</sup> |
|--|--------------------------|---------------------------|--|----------------------------|
| <b>-Vatnsorka, 30,7 TWh/a</b>                  |                          |                           |  |                            |
| Miðunar-, veitu-<br>og inntakslón              | 297                      | 480                       | 262                                    | 1039                       |
| Annað land sem<br>fyrir áhrifum verður         | ...                      | ...                       | ...                                    | 100                        |
| <b>VATNSORKA, SAMTALS</b>                      | ...                      | ...                       | ...                                    | <b>1139</b>                |
| <b>-Jarðhiti, 12,3 TWh/a</b>                   |                          |                           |  |                            |
| Sextán háhitasvæði                             | ...                      | ...                       | ...                                    | 400                        |
| <b>-Raforkuflutningslínur</b>                  | ...                      | ...                       | ...                                    | <b>406</b>                 |
| <b>-Raforkuvinnsluiðnaðurinn<br/>samantals</b> | ...                      | ...                       | ...                                    | <b>1945</b>                |

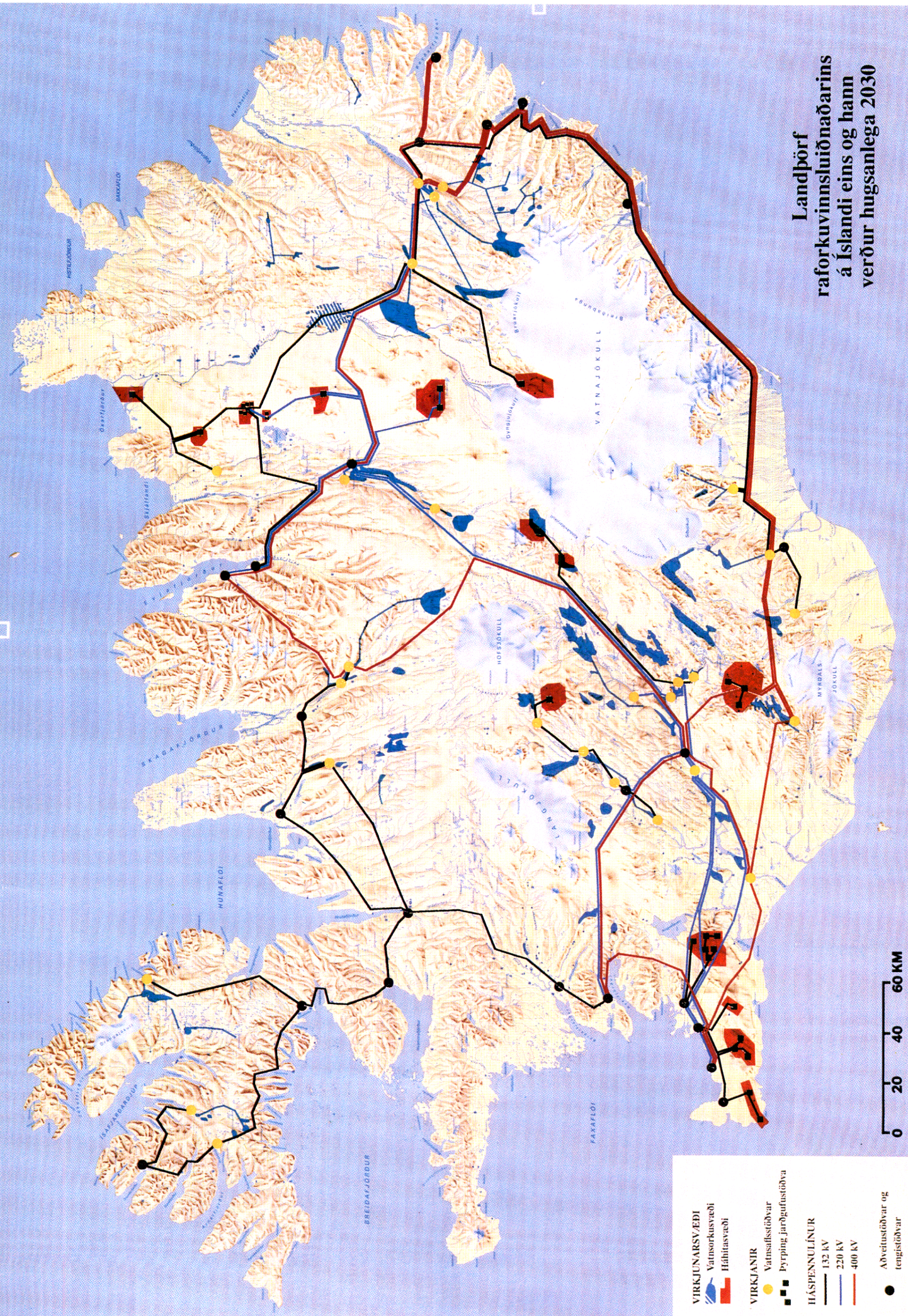
## 2. mynd (sjá næstu síðu)

2. mynd sýnir hvar á landinu þessi orkuvinnslusvæði eru. Ég endurtek að hér er um að ræða landþörf til vinnslu á 43 TWh/a af raforku og meginflutningvirki til að koma þessari orku til notenda og útflutnings. Reiknað er með að 15 TWh/a verði fluttar út frá Austurlandi, en 28 TWh/a notaðar í landinu, þar af 6 til almennra nota víðsvegar um landið, en 22 til raforkufreks iðnaðar á fjórum svæðum fyrst og fremst, nfl. á Reykjanesskaganum, Vesturlandi sunnanverðu, um mibik Norðurlands og miðbik Austurlands. Við þessar forsendur er flutningskerfið miðað.

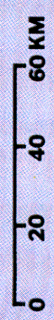
Flutningslínunum má vitaskuld velja mismunandi leiðir. Það val er einmitt eitt þeirra skipulagsatriða sem ég tel brýna þörf á að hefja vinnu við nú þegar. Hér er gengið út frá því að heppilegt þyki að þjappa línunum sem mest saman á ákveðnum "línugöngum". Sú tilhögun hefur þann kost að takmarka áhrif línulagnanna á umhverfið við slíka línuganga og næsta umhverfi þeirra, og einnig þann, að bæði bygging og rekstur línanna verður væntanlega ódýrari með því móti. En tilhögunin hefur þann ókost að auka líkur á að margar línur bili samtímis í einu og sama óveðri. Verði þessi tilhögun valin ríður því á að línugangarnir séu vandlega valdir og þeir hafðir þar sem bilanahætta er í lágmarki, í sem bestu skjóli fyrir óveðursáttum og ísingarhættu. Hér er mikil skipulagsvinna óunnin.



# Landþörf raforkunnsliúðnaðarins á Íslandi eins og hann verður hugsanlega 2030



- VIRKJUNARSVÆÐI**
- Vatnsorkusvæði
- Háhitasvæði
- VIRKJANIR**
- Vatnsfallsstöðvar
- Þyrping, jarðgufustöðva
- HÁSPENNULÍNUR**
- 132 kV
- 220 kV
- 400 kV
- Aðvelfustöðvar og tengistöðvar



### 3.3 Hvað verður ósnortið í óbyggðum af nýtingu orkulindanna ?

Þegar horft er á 2. mynd er nærtækt að spyrja : Verður nokkur ósnortin náttúra eftir í óbyggðum þegar svona er komið ? Svarið er já. Í ríkum mæli. 3. mynd sýnir svæði sem nú eru í óbyggð og hafa verið það um allnokkurt skeið, og byggjast varla aftur, sem *ekki er líklegt að raforkuvinnsluiðnaðurinn á Íslandi muni þurfa á að halda um fyrirsjáanlega framtíð*. Svo sem sjá má verða mörg svæði eftir til hverskonar útivistar og samskipta við náttúruna; sum nærri byggð og því auðsótt þangað fyrir þá sem nærri búa; önnur afskekktari; sum á hálendi en önnur á láglandi, úti við sjó og svo framvegis. Fjölbreytnin er mjög mikil. Þau má skipuleggja til mismunandi útilífsnota; hafa sum auðveld aðkomu og umferðar en önnur torsótt og ósnert. Og eins og ég gat um gætu greiðar aðkomuleiðir að þessum ósnortnu svæðum legið um raforkuvinnslusvæðin og á jöðrum þeirra. Þar gætu einnig verið fjallahótel og ferðaskálar þaðan sem sótt er inn á ósnertu svæðin.

Myndin sýnir einungis hin stærri af þessum "ósnertu" svæðum. Fjölmörg minni slík rúmast á milli þeirra sem sýnd eru annarsvegar og orkuvinnslusvæðanna og byggðanna hinsvegar.

3. mynd (sjá næstu síðu)

### 3.4 Árekstrar við aðra landnotkun

Þrátt fyrir að stór landflæmi verði utan áhugasvæða raforkuvinnsluiðnaðarins um fyrirsjáanlega framtíð er hinu ekki að leynd að margvíslegir árekstrar eru hugsanlegir milli raforkuvinnslunnar og annara hagsmuna. Þeir eru af tvennum toga : Árekstrar við nýtingu annarra náttúruauðlinda og árekstrar við hreinræktuð umhverfisverndarsjónarmið.

#### 3.4.1 Árekstrar við nýtingu annarra náttúruauðlinda

Það er gömul og ný saga að þegar menn vilja nýta mismunandi náttúruauðlindir á einu og sama landssvæði, eða á samliggjandi landssvæðum, geta orðið árekstrar vegna þess að nýting einnar auðlindar getur haft áhrif á möguleikana til að nýta aðrar. Þannig getur virkjun fallvatns haft áhrif á laxagengd og veiði í því og þar með á möguleika til að selja veiðileyfi í ánni. Gróið land sem fer undir miðlunarlón og önnur virkjunarmannvirki rýrir beitarland þeirra jarða sem nýta landið til beitar. Svipaða sögu er að segja um gróið land á háhitasvæði sem virkjun þess leggur hald á. Virkjunarmannvirki í fögru og sérkennilegu umhverfi geta rýrt möguleika á að gera slíkt land eftirsótt fyrir ferðamenn; rýrt möguleika á að gera sérstæða og fagra náttúru að "söluvöru" til ferðamanna. Fleiri slík dæmi mætti nefna.

Hér ríður á að þeir sem hlut eiga að máli setjist niður og ræði saman. Fyrst er að gera sér grein fyrir í hverju árekstrarnir eru fölgirnir. Þvínæst er að athuga hvort breytt tilhögum mannvirkis, eða breytt hönnun þess, getur dregið úr árekstrunum og hvort, og í hvaða mæli, slík breytt tilhögum kann að rýra hagkvæmni mannvirkis þess sem í hlut á. Þegar þetta hefur allt saman verið athugað er næst að *skipuleggja* nýtingu auðlinda á svæðinu með þeim hætti að *heildarávinningur fyrir þjóðarbúið af nýtingu allra auðlindanna verði sem mestur*. Það leiðir venjulega til málamiðlunar af einhverju tagi, þar sem flestir, ef ekki allir, auðlindanýtendur verða að sætta sig við eitthvað skertan hlut frá því sem vera myndi ef tiltekin auðlind væri ein nýtt. Svo kann að fara að nýting einhvers þeirra verði með því móti svo óhagkvæm að hún borgi sig ekki lengur. Verða þá nýtendur hinna auðlindana að



bæta þann skaða. Aðalatriðið er að heildarsjónarmiðið ráði ferðinni í slíkum tilvikum. Hér reynir mjög á skipulag, en með góðu og vönduðu skipulagi á þetta að vera hægt. Ég lýsi eftir samvinnu við yfirvöld skipulagsmála um þetta veigamikla viðfangsefni.

### 3.4.2 Árekstrar við hrein umhverfisverndarsjónarmið

Með hreinum umhverfissjónarmiðum er hér átt við sjónarmið sem ekki lúta að nýtingu neinnar náttúruauðlindar heldur að áhrifum á umhverfið án tillits til efnahagslegra viðhorfa, þ.e. að áhrifum á huglæg verðmæti einvörðungu.

Einnig í slíkum tilvikum er mikilvægt að menn ræði saman og geri sér grein fyrir í hverju árekstrarnir eru fölgirnir og hvort unnt er að draga úr þeim með breyttri tilhögun mannvirkja, eða hönnun þeirra, og hvaða áhrif slíkar breytingar hafa á hagkvæmni nýtingarinnar. En það sem hér er frábrugðið því sem áður er um rætt er það, að hér er enginn sameiginlegur mælikvarði til. Unnt er að mæla *heildarávinninginn af nýtingu mismunandi auðlinda* á sameiginlegan mælikvarða, krónur. Hér verður slíkri aðferð ekki við komið. Huglæg verðmæti verða sjaldnast metin í krónum.

Hér verður að koma til pólitískt mat kjörinna fulltrúa þjóðarinnar. Ásamt Norðmönnum höfum við Íslendingar þá lýðræðislegustu skipan sem fyrirfinnst í veröldinni á ákvarðanatöku um raforkuvirkjanir. Sérhver virkjun stærri en tvö megawött verður að hljóta samþykki Alþingis; hinna kjörnu fulltrúa almennings. Ég hygg að Noregur og Ísland séu einu löndin í allri veröldinni sem ætla þjóðþinginu slíkt hlutverk. Það ætti því að vera vel fyrir því séð að ekki verði gerðar virkjanir hér á landi í framtíðinni sem ekki njóta stuðnings almennings. Við vitum að næstu kosningar líða ekki úr huga neins stjórnmalamanns.

En stjórnmalamenn þurfa *upplýsingar* til að geta tekið ákvarðanir í svona málum. Það er hlutverk okkar embættismanna, hvar sem við störfum, að sjá til þess þeir fái þær á hlutlægan og skilmerkilegan hátt. Og þessar upplýsingar fást aðeins með *rannsóknnum*. Rannsóknir eru undirstaða traustra upplýsinga sem aftur eru forsenda fyrir vel yfirveguðum pólitískum ákvörðunum. Rannsóknir eru því nauðsynlegar - einnig í tilvikum þar sem endanleg ákvörðun verður sú, að ekki skuli virkjað.

## 3.5 Niðurstöður

Niðurstaða mín af þessari skoðun á landþörf raforkuvinnsluiðnaðarins er sú, að við eigum að geta nýtt þá raforku, 43 TWh/ári, sem ég hef á tveimur síðustu ársfundum Orkustofnunar rætt um sem möguleika árið 2030, án þess að ganga nærri nýtingarmöguleikum á öðrum auðlindum og án þess að skerða að neinu marki möguleika okkar sjálfra til samvista við óspillta náttúru. Við getum átt eftir mörg og stór landssvæði sem ekki eru í byggð nú og ekki eru horfur á að byggist fyrir þann tíma, ósnortin af þeirri orkuvinnslu. Þau eru það stór og margbreytileg að þau gefa gnægð tækifæra fyrir okkur sjálf til margháttaðra útilífsiðkana og til að nýta þau sem "söluvöru" í ferðamannaþjónustu. Á þeim svæðum geta bæði verið ósnortin víðemi, án nokkurra mannvirkja, og svæði með aðstöðu fyrir ferðamenn. Slík aðstaða og samgönguæðar geta einnig rúmast á mörkum orkuvinnslu-svæðanna og útilífs-svæðanna.

Eitt verð ég þó að taka fram: Þetta er því aðeins rétt að við nálgumst viðfangsefnið með heilbrigðri skynsemi og forðumst öfgar eins og þær, að ímynda okkur að mestallt Miðhálandið geti um aldur og ævi verið ósnortið land vegna þess eins að það hefur verið

Það hingað til. Miðhálandið er enn að mestu ósnortið aðeins vegna þess að við Íslendingar erum enn skammt á veg komnir í nýtingu náttúruauðlinda landsins í samanburði við nágranna okkar í Evrópu. Þess er auðvitað ekki að dyljast að með þessari orkunýtingu breytum við ásýnd landsins á stórum svæðum frá því sem hún er nú. En sú breyting er sama eðlis og sú sem varð við það að menn settust að á Íslandi. Samskonar og þegar við tökum áður ósnert svæði undir ræktun, búsetu og byggð. Miðhálandið hefur í þessu efni þá einu sérstöðu að það verður numið síðar en aðrir hlutar landsins.

Það verður með engu móti komist hjá að nýta *allar* þær auðlindir sem okkur eru tiltækar, bæði auðlindir náttúrunnar á sjó og landi og mannfólksins sjálfs, ef við ætlum að lifa áfram menningarlífi í þessu landi og búa við lífskjör - í öllum skilningi þess orðs - sem eru meðal hinna bestu í heiminum. Við skulum ekki gleyma því að án trausts og blómlegs efnahags er hæpið að um mikla framtíð verði yfirleitt að ræða í þessu landi. Það er ekki öllu meira mál nú að flytjast búferlum milli landa en það var í byrjun þessarar aldar að flytja suður yfir Djúpið frá Hornströndum, þar sem þá var fjölmenn byggð. Hornstrandir lögðust í eyði af því að þær drógust aftur úr öðrum landshlutum um efnahag og lífskjör. Sama getur hent Ísland allt ef við vanrækjum undirstöðu allrar búsetu og alls menningarlífs á Íslandi: Hinn efnahagslega grundvöll.

Þessi staða býður líka upp á einstakt tækifæri fyrir okkur. Við eigum þess kost að læra af mistökum sem gerð voru á sínum tíma í rótgrónum iðnríkjum í iðnvæðingu þeirra og láta okkur takast betur en þeim að sameina iðnvæðingu og náttúruvernd. Þetta tekst okkur ef við insetjum okkur það. En til þess er góð skipulagning grundvallaratriði. Við þurfum hið fyrsta að gera drög að skipulagi fyrir landið allt; ekki síst hálandið, þar sem raforkuvinnsluiðnaðinum er ætlað landrými eins og ég hef hér lýst.

Ef okkur tekst betur en öðrum að sameina iðnvæðingu og náttúruvernd mundi það skapa Íslandi mikla sérstöðu borið saman við hin rótgrónu iðnríki. Þetta væri mjög eftirsóknarverð sérstaða. Auðnir og óbyggðir eru ekki eftirsóknarverð sérstaða. Væri svo liggur beinast við að flytja þessar 260 000 sálir burt frá landinu og skilja það eftir óbyggt. Ekki er vafi á að óbyggt Ísland hefði mikið aðdráttarafli fyrir ferðamenn hvaðanæfa að úr heiminum. Hér mætti hafa "verstöðvar" bæði til fiskveiða og ferðamannþjónustu sem gerðar væru út annarsstaðar frá. En það er ekki þesskonar Ísland sem við viljum. Við viljum byggja Ísland. Til þess þurfum við traustan og blómlegan efnahag. Hann er einnig forsenda heilnæms og aðlaðandi umhverfis. Við munum ekki varðveita íslenska náttúru til langframa nema við höldum okkur efnahagslega sterkum; sterkari en við erum nú.

Niðurstaða mín er sem sagt sú, að með góðu skipulagi á landnotkun, með því að skipuleggja notkun á landinu öllu, getum við nýtt orkulindimar til að treysta þennan efnahagsgrundvöll í sátt við óskina um að varðveita og skapa holt og heilnæmt umhverfi hér á landi, jafnframt því sem við leggjum okkar skerf af mörkum til að varðveita sameiginlegt umhverfi allra jarðarbúa með því að hemja gróðurhúsaáhrifin. En við erum einmitt svo lánsöm að orkulindir okkar eru hreinar og umhverfisvænar, borið saman við aðrar orkulindir veraldar. Nýting þeirra í stórum stíl stuðlar að því að draga úr gróðurhúsa-vandanum í heiminum.

En þetta er ekki vandalaust. Hér reynir mikið á skipulagshæfni okkar. Gott skiplag til langs tíma, vandlega undirbúið, er hér algert lykilatriði. Við skulum insetja okkur að reynast vandanum vaxin og gera hér betur en aðrir. Sú sérstaða er eftirsóknarverð !

Góðir áheyrndur ! Ég hef lokið máli mínu og þakka áheyrnina !

# FORÐAFRÆÐI JARÐHITANS

Guðni Axelsson

## 1. INNGANGUR

Áherslur í jarðhitarannsóknnum á Íslandi hafa breyst töluvert síðasta áratuginn. Meiri áhersla hefur verið lögð á forðafræðirannsóknir tengdar nýtingu jarðhitasvæða og rekstri orkufyrirtækja en minni áhersla á rannsóknir tengdar jarðhitaleit og borunum. Í þessari grein verður fjallað lítillega um forðafræði jarðhitans. Í fyrsta lagi verður gerð grein fyrir áhrifum vinnslu á jarðhitakerfi hér á landi. Í öðru lagi verður fjallað almennt um rannsóknaraðferðir forðafræðinnar. Í þriðja lagi verður síðan tæpt á nokkrum dæmum um forðafræðirannsóknir vegna jarðhitanýtingar á Íslandi.

Jarðhiti hefur verið nýttur á Íslandi frá því land byggðist, fyrst og fremst til baða og þvotta. Á þessari öld hefur nýting hans margfaldast og í dag eru um 45 % af heildarorku-notkun Íslendinga jarðhiti. Mikilvægasta notkunin er til húshitunar og nú njóta um 85% landsmanna húshitunar með jarðhita. Af 24 jarðhitasvæðum sem nýtt eru af hitaveitum í þéttbýli eru 22 svokölluð lághitasvæði, þ.e. svæði þar sem hitinn er lægri en 150°C. Lághitasvæðin eru utan gosbelta landsins. Því munu flest þau dæmi, sem hér verða til umfjöllunar, tengjast lághitasvæðum

Forðafræði jarðhitans er fræðigrein sem fjallar um þrýsti- og hitaástand í jarðhitakerfum ásamt vökva- og orkustreymi í jarðhitakerfum og jarðhitaborholum. Einnig fjallar forðafræðin um breytingar sem verða á þessum þáttum vegna vinnslu jarðhitans. Í stuttu máli má segja að tilgangur forðafræðiathugana sé í fyrsta lagi að afla upplýsinga um gerð, eiginleika og eðlisástand jarðhitakerfa. Í öðru lagi er tilgangurinn að áætla vinnslugetu og viðbrögð jarðhitakerfa við mismunandi massatöku á grundvelli fyrrgreindra upplýsinga.

Slíkar áætlanir hafa mikið hagnýtt gildi fyrir jarðhitaiðnaðinn. Niðurstöðurnar nýtast við hönnun orkuvera og á grundvelli þeirra má stýra nýtingu jarðhitasvæða þannig að orkuvinnslan verði sem öruggust. Einnig nýtast þær við ákvarðanatöku og hagkvæmnimat vegna ýmissa framkvæmda, t.d. síkkanir dælna, orkusparandi aðgerðir, borun nýrra vinnsluhola, niðurdælingu eða frekari jarðhitaleit. Það auðveldar orkufyrirtækjum að tímasetja kostnaðarsamar framkvæmdir.

Brautryðjendur í forðafræðirannsóknnum á Íslandi má helsta nefna Gunnar Böðvarsson, Þorstein Thorsteinsson og Jónas Elíasson, sem allir unnu á Orkustofnun eða forverum hennar. Í dag fara forðafræðirannsóknir á Íslandi aðallega fram á Orkustofnun, en þar starfa nú fimm sérfræðingar sem sinna forðafræðirannsóknnum. Verkfræðistofan Vatnaskil stundar einnig forðafræðirannsóknir fyrir nokkur orkufyrirtæki auk þess sem Guðmundur Böðvarsson á Lawrence Berkeley Laboratory í Kaliforníu hefur stundað hermi-reikninga fyrir íslensk háhitasvæði.

## 2. ÁHRIF STÓRFELLDRAR VINNSLU Á JARÐHITAKERFI

Um jarðhitakerfin hefur heitt vatn streymt árbúsundum saman. Því er ekki óeðlilegt að telja jarðhitann óþrjótandi orkulind. Svo er þó alls ekki. Talið er að úr flestum vinnslu-svæðum jarðhita sé unnin mun meiri orka en sem svarar náttúrulegu afli þeirra. Áhrif þess á jarðhitakerfin eru því oft mjög mikil, eins og fram kemur hér á eftir.

Á lágheitsvæðum er heita vatninu oftast dælt úr 1 - 2 km djúpum borholum, en úr vinnsluholum á háheitsvæðum streymir vatn og gufa af sjálfsdádum. Afleiðing vinnslu er nær undantekningarlaust sú að þrýstingur lækkar í jarðhitakerfunum líkt og í vatnstanki. Er það einfaldlega vegna þess að meira vatn er tekið upp en nær að streyma inn í kerfin. Þetta veldur því að yfirborðsjarðhiti breytist eða hverfur, sjálfrennsli úr borholum minnk-ar eða hættir og síðast en ekki síst að vatnsborð í borholum fellur. Dýpi á vatnsborð end-urspeglar þrýsting í jarðhitakerfum og á lágheitsvæðum er vatnsborð yfirleitt mælt í stað þrýstings. Einnig hefur orðið smávægilegt landsig á mörgum jarðheitsvæðum.

Hversu mikið og hratt vatnsborðið lækkar ræðst af stærð og eiginleikum jarðhitakerf-anna. Í litlum kerfum, sem vatn streymir treglega um, lækkar vatnsborð mikið við tiltölu-lega litla dælingu. Í mörgum tilfellum lækkar vatnsborð stöðugt við langvarandi vinnslu og oft þarf því að draga úr vinnslu til þess að stöðva lækkunina áður en dælur fara á þurrt. Þannig getur jarðheitsvæði hætt að anna þörfum viðkomandi orkufyrirtækis. Í öðr-um tilfellum tekur kaldara vatn að streyma inn í jarðhitakerfi í stað þess heita sem dælt hefur verið burtu. Við það getur efnainnihald vatns sem fæst úr borholum tekið að breyt-ast ásamt hita þess. Breytingar í efnainnihaldi geta verið til skaða en þær eru auk þess oft fyrirboði kólnunar. Lækkandi vatnshiti veldur minnkandi orkuvinnslu.

Tafla 1 gefur upplýsingar um áhrif vinnslu á nokkur jarðheitsvæði á Íslandi. Öll svæðin eru lágheitsvæði nema Svartsengi. Taflan sýnir hvenær vinnsla hófst á svæðunum, á Laugarnessvæðinu hófst hún t.d. fyrir meira en 60 árum. Taflan sýnir meðalvinnslu árs-ins 1991 fyrir svæðin, en hún er allt frá 19 kg/s upp í 920 kg/s. Viðbrögð jarðhitakerf-anna sjást í síðustu tveimur dálkunum. Niðurdrátturinn, þ.e. lækkun þrýstings í kerfun-um, er mjög misjafn. Á Reykjum er ekki nema um 100 m niðurdráttur þrátt fyrir mjög mikla vinnslu. Á Syðra-Laugalandi í Eyjafirði er niðurdrátturinn um hundraðfalt meiri fyrir hvert kg/s sem tekið er úr svæðinu. Er þetta vegna þess að Reykir eru mjög stórt kerfi með mikla lekt, en Laugaland er lítið kerfi með litla lekt.

Lítil kólnun hefur orðið á þessum svæðum, áhrif massatökunnar eru fyrst og fremst niður-dráttur. Þó hefur vatnshiti lækkað í sumum holum á Reykjum vegna kaldara innrennslis í SV-hluta jarðhitakerfisins. Einnig hefur hitinn lækkað á Urriðavatni, mest þó fram til ársins 1983. Nánar verður fjallað um Urriðavatn hér á eftir.

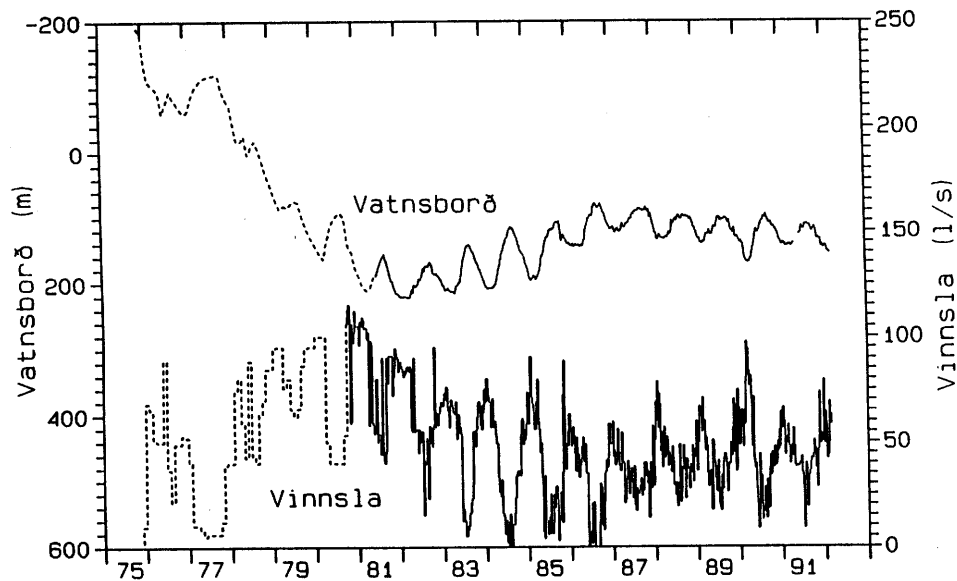
Myndir 1, 2 og 3 sýna nánar áhrif vinnslu á þrjú jarðheitsvæðanna í töflu 1. Mynd 1 sýnir hinn gríðarmikla niðurdrátt sem orðið hefur í jarðhitakerfinu á Syðra-Laugalandi í Eyja-firði sem Hitaveita Akureyrar nýtir (Ólafur G. Flóvenz og fl., 1992). Áður en vinnsla hófst var yfirþrýstingur í jarðhitakerfinu sem svaraði til um 200 m vatnsúlu. Í byrjun árs 1982 var vatnsborðið farið að nálgast dælur í vinnsluholunum á Laugalandi, en eftir það var dregið úr vinnslunni og vatnsborð tók að hækka á ný.

Mynd 2 sýnir viðbrögð jarðhitakerfisins undir Urriðavatni í Fellum sem Hitaveita Egils-staða og Fella nýtir (Guðni Axelsson og fl., 1989). Í því kerfi er niðurdráttur ekki vanda-

TAFLA 1. Áhrif vinnslu á nokkur jarðhitasvæði á Íslandi. Tölur fyrir árið 1991.

| Jarðhitasvæði        | Upphaf vinnslu | Meðalvinnsla (kg/s) | Hiti (°C) | Niðurdráttur (m) | Kólnun (°C)     |
|----------------------|----------------|---------------------|-----------|------------------|-----------------|
| Laugarnes (Reykjav.) | 1930           | 160                 | 127       | 130              | 0               |
| Reykir (Mosfellsbær) | 1944           | 920                 | 64-100    | 100              | 0-13            |
| Hamar (Dalvík)       | 1970           | 24                  | 64        | 35               | 0               |
| S-Laugaland (Eyjaf.) | 1976           | 42                  | 95        | 350              | 0               |
| Urriðavatn (Egilst.) | 1980           | 19                  | 75        | 35               | 2 <sup>1)</sup> |
| Svartsengi           | 1976           | 260                 | 240       | 210              | 0               |

1) kólnun varð mest 15°C árið 1983

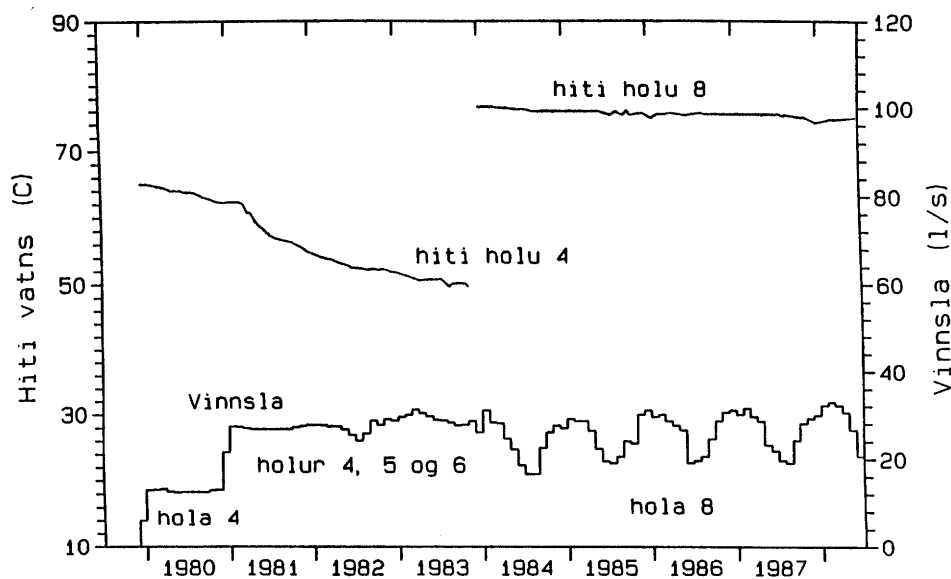


Mynd 1. Vatnsborðsbreytingar og vinnsla á Syðra-Laugalandi í Eyjafirði

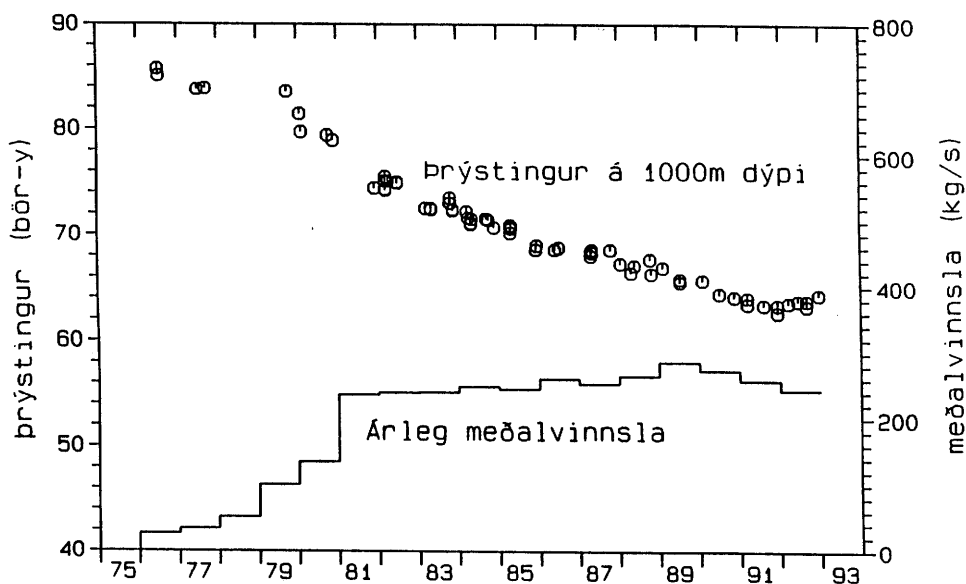
mál, en hins vegar kólnaði vatn úr vinnsluholum mjög mikið fyrstu ár veitunnar. Var það vegna þess að holurnar fengu vatn úr grunnum æðum sem tengdust sprungum upp í botn Urriðavatns. Um þessar sprungur streymdi síðan niður kalt vatn, þegar þrýstingur lækkaði í jarðhitakerfinu, sem kældi grunnar æðarnar. Árið 1983 var boruð ný hola sem skar gjöfular æðar á mun meira dýpi. Eftir það hefur vatnshitinn lækkað óverulega.

Mynd 3 sýnir að lokum viðbrögð háhitasvæðisins í Svartsengi sem Hitaveita Suðurnesja nýtir jafnt til upphitunar sem raforkuframleiðslu (Verkfræðistofan Vatnaskil, 1992). Þar hefur þrýstingur lækkað mikið eins og sést á myndinni, en þó ekki síðustu tvö árin. Er það talið stafa af samspili minnkandi massatöku og aukinnar suðu í jarðhitakerfinu.





Mynd 2. Breytingar á vatnshita og vinnsla á Urriðavatni í Fellum



Mynd 3. Brýstingsbreytingar og vinnsla í Svartsengi á Reykjanesi

### 3. AÐFERÐIR FORÐAFRÆÐINNAR

#### 3.1 GAGNASÖFNUN

Eins og á flestum sviðum vísinda er gagnasöfnun af ýmsu tagi grundvöllur forðafræðirannsóknna. Borholur á jarðhitasvæðum eru oftast afkastaprófaðar fljótlega eftir borun. Á lághitasvæðum er dælt úr þeim til reynslu og fylgst með viðbrögðum þeirra. En þessar prófanir standa yfirleitt yfir í skamman tíma og gefa því takmarkaðar upplýsingar. Síðan eru oft gerðar lengri prófanir þar sem unnið er úr einni eða fleiri holum á jarðhitasvæði og síðan fylgst með viðbrögðum þess í öllum tiltækum holum á svæðinu.

Mikilvægustu gögnin fást hins vegar eftir að vinnsla hefst á viðkomandi jarðhitasvæði og er nákvæmt eftirlit með vinnslu á svæðinu og öruggt og nákvæmt eftirlit með viðbrögðum þess afar mikilvægt. Þessi gagnasöfnun er kölluð vinnslueftirlit. Á lághitasvæðum er fylgst með dælingu eða sjálfrennsli úr öllum holum, vatnsborði eða þrýstingi jafnt í vinnsluholum sem einhverjum mæliholum, hitastigi vatnsins og einnig efnainnihaldi þess. Á háhitasvæðum er fylgst með afköstum hola, þ.e. massastreymi og vermi, toppþrýstingi á vinnsluholum og þrýstingi í eftirlitsholum, efnainnihaldi vatns og gufu, hita- og þrýstiferlar hola eru mældir reglulega auk þess sem hæðar- og þyngdarmælt er á sumum svæðum.

### 3.2 HERMIREIKNINGAR

Í einföldu máli má lýsa aðferðum forðufræðinnar þannig að í fyrsta lagi eru tiltæk gögn túlkuð á grundvelli viðeigandi reiknilíkans af viðkomandi jarðhitakerfi. Það er gert þannig að líkanið er látið herma gögnin, og kallast það hermireikningar. Slíkir reikningar eru í raun mikilvægasta verkfærið við forðufræðiathuganir. Eiginleikar líkansins fela þá í sér upplýsingar um eiginleika hins raunverulega kerfis, eða gefa mat á eiginleikum þess. Það mat er þó líkanháð. Í öðru lagi er líkanið notað til þess að segja fyrir um viðbrögð jarðhitakerfisins við mismunandi massatöku og áætla þannig vinnslugetu þess.

Hægt er að nota jöfnum höndum einföld líkön sem flókin og er eðlilegt að tilgangur reikninganna og þau gögn sem til eru um viðkomandi kerfi ráði hversu flóknu líkani er beitt. Einföld líkön eru notuð ef lítill tími er til taks til reikninganna, ef kostnaði þarf að halda í lágmarki og ef upplýsingar um kerfið eru fábrotnar. Í einföldum líkönum er raunveruleg bygging og dreifing eiginleika kerfis mjög einfölduð. Oftast má leiða út einfaldar stærðfræðijöfnur sem lýsa viðbrögðum líkansins við massatöku. Einföld líkön eru notuð, ef herma á einn þátt í viðbrögðum kerfis, t.d. vatnsborðsbreytingar eða kólnun. Einföld líkön eru fljótleig í notkun.

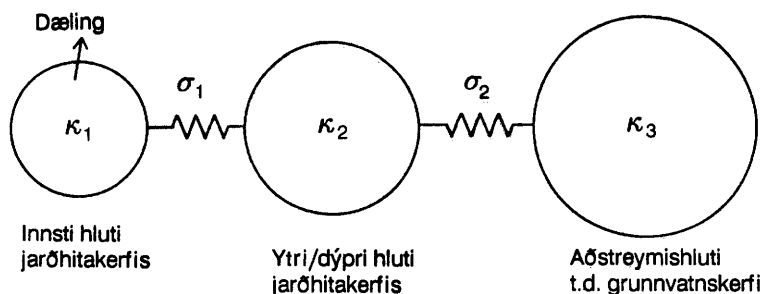
Ef herma á nokkra þætti í gerð, ástandi og viðbrögðum jarðhitakerfis þarf að grípa til mun flóknari reiknilíkana, svokallaðra kubbalíkana (finite element models, finite difference models). Slíkt krefst margbrotinna upplýsinga um kerfið og viðbrögð þess. Flókin kubbalíkön eru byggð úr fjölda kubba með mismunandi eiginleika og geta þau því hermt raunverulega byggingu og dreifingu eiginleika kerfisins mun nákvæmar en einföld líkön. Viðbrögð kubbalíkana þarf að reikna með öflugum tölvum og ef kubbarir eru margir taka reikningarnir mjög langan tíma.

Viðbrögð jarðhitakerfa við vinnslu eru oft flóknari en svo að aðeins sé um vatnsborðs- og þrýstingsbreytingar að ræða og eru afköst jarðhitasvæða háð fleiri þáttum en niðurdrætti. Líklegt er t.d. að kalt vatn streymi inn í flest jarðhitakerfi eftir að nýting þeirra hefst fyrir alvöru. Þetta á sérstaklega við um þau jarðhitakerfi sem eru lítil og/eða þar sem niðurdráttur er mikill. Sjaldnast er hægt að herma eða spá fyrir um slíkt samspil með einföldum líkönum.

## 4. DÆMI UM FORÐAFRÆÐIRANNSÓKNIR Á ÍSLANDI

### 4.1 ÞJÖPPUÐ LÍKÖN

Sem dæmi um notkun einfaldra líkana má nefna svokölluð þjöppuð líkön. Þau má nota til þess að herma vatnsborðs- og þrýstingsbreytingar í jarðhitakerfum töluvert nákvæmlega, jafnvel margra ára eða áratuga gagnasöfn. Orðið þjappað vísar til þess að í þjöppuðum líkönum er eiginleikum stórs hluta jarðhitakerfis þjappað saman í heildargildi. Eins og sýnt er á mynd 4 þá samanstendur þjappað líkan af nokkrum vatnsgeymum og nokkrum rennslisviðnámmum. Vatnsborð eða þrýstingur í geymunum hermir vatnsborð eða þrýsting í mismunandi hlutum jarðhitakerfisins. Viðnámín líkja hins vegar eftir rennslisviðnámi í jarðhitakerfinu, sem stjórnast af lekt bergsins innan þess. Líta má svo á að fyrsti geymirinn samsvari innsta hluta jarðhitakerfisins, annar geymirinn ytri og dýpri hluta þess, en að þriðji samsvari aðstreymishluta jarðhitakerfisins.



Mynd 4. Þriggja geyma þjappað líkan

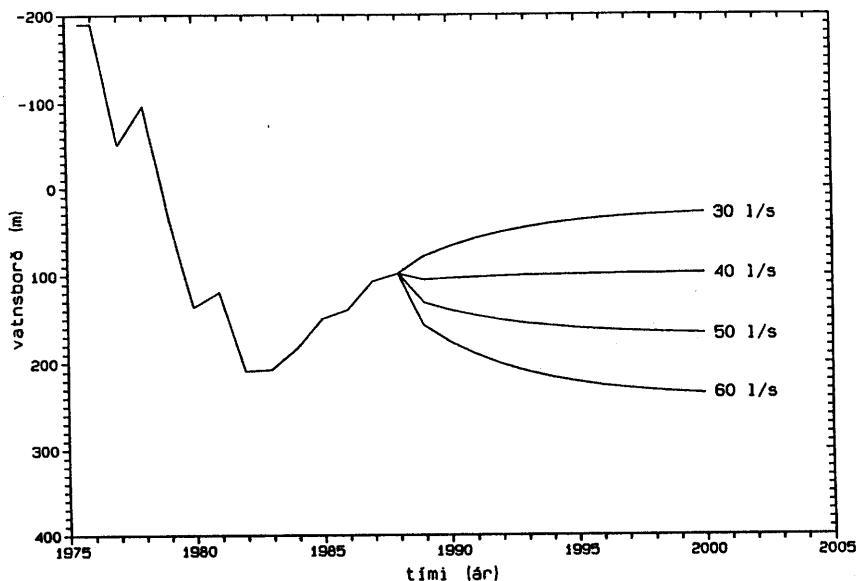
Þróuð hefur verið aðferð til þess að herma vatnsborðsbreytingar með þjöppuðum líkönum. Aðferðin er að mestu leyti sjálfvirk og því mjög fljótleg í notkun (Guðni Axelsson, 1989). Forritið LUMPFIT notar þessa aðferð (Guðni Axelsson og Þórður Arason, 1993). Á síðustu sjö árum hefur forritið verið notað á Jarðhitadeild Orkustofnunar til þess að herma vatnsborðs- og vinnslugögn frá tólf lághitasvæðum á Íslandi með ágætum árangri. Þessi svæði eru talin upp í töflu 2 hér á eftir.

Hagnýtt gildi þjappaðra líkana felst m.a. í því að mjög fljótlegt er að reikna vatnsborðsspár með þeim og áætla þannig vinnslugetu svæða. Mynd 5 sýnir vatnsborðsspár sem reiknaðar voru í byrjun árs 1988 fyrir Syðra-Laugaland í Eyjafirði. Á grundvelli þeirra var áætlað að vinnslugeta svæðisins fram til aldamóta væri um 50 l/s miðað við þann dælubúnað sem var í vinnsluholum á svæðinu. Samsvarandi vatnsborðsspár hafa einnig verið reiknaðar fyrir flest svæðin í töflu 2.

Mynd 6 sýnir annað dæmi um notagildi þjappaðra líkana. Árið 1986 breytti Hitaveita Dalvíkur um sölufyrirkomulag og hóf að selja heita vatnið samkvæmt magnmælum í stað hemla. Við það náðist mun betri orkunýting og dró verulega úr vinnslu á Hamarssvæðinu. Myndin sýnir langtímaáhrifin af sölukerfisbreytingunni reiknuð með þjöppuðu líkani. Þar sést að vatnsborð verður ekki komið í sama dýpi og árið 1986 fyrr en árið 2010, auk þess sem vatnsborðið mun lækka töluvert hægar en ella. Segja má að sölukerfisbreytingin hafi lengt nýtingartíma svæðisins um a.m.k. 25 ár.

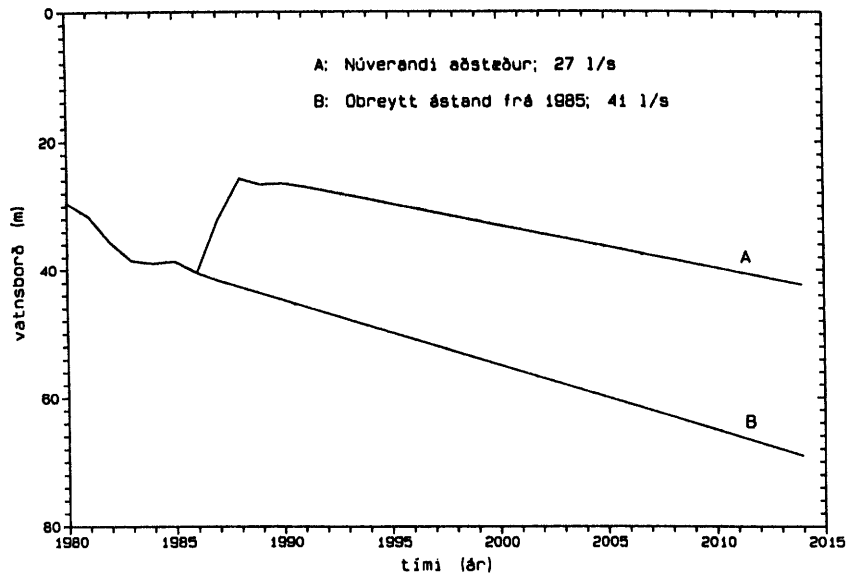
TAFLA 2. Þau jarðhitakerfi á Íslandi sem hermd hafa verið með forritinu LUMPFIT.

| Jarðhitasvæði       | Hitaveita    | Gögn    | Heimild                                   |
|---------------------|--------------|---------|---|
| Laugarnes           | Reykjavíkur  | vinnslu | Orkustofnun og Verkfr.st. Vatnaskil, 1986 |
| Hamar               | Dalvíkur     | vinnslu | Ragna Karlsdóttir og Guðni Axelss., 1986  |
| Laugaland í Holtum  | Rangæinga    | vinnslu | Lúðvík S. Georgsson og fl., 1987          |
| Skútudalur          | Siglfirðinga | vinnslu | Ómar Sigurðsson og fl., 1987              |
| Urriðavatn          | Egilsstaða   | prófun  | Guðni Axelsson, 1987                      |
| Glerárdalur         | Akureyrar    | vinnslu | Guðni Axelsson og fl., 1988               |
| Ytri-Tjarnir        | Akureyrar    | vinnslu | Guðni Axelsson og fl., 1988               |
| S-Laugaland         | Akureyrar    | vinnslu | Guðni Axelsson og fl., 1988               |
| Botn                | Akureyrar    | vinnslu | Guðni Axelsson og fl., 1988               |
| Hamar               | Dalvíkur     | vinnslu | Guðni Axelsson, 1988                      |
| Laugaland í Holtum  | Rangæinga    | vinnslu | Guðni Axelsson, 1990                      |
| Laugarengi          | Ólafsfjarðar | vinnslu | Guðni Axelsson, 1991                      |
| Reykir v. Reykjabr. | Blönduóss    | vinnslu | Grímur Björnsson, 1992                    |
| Laugal. á Pelam.    | Akureyrar    | prófun  | Ólafur G. Flóvenz og fl., 1993            |

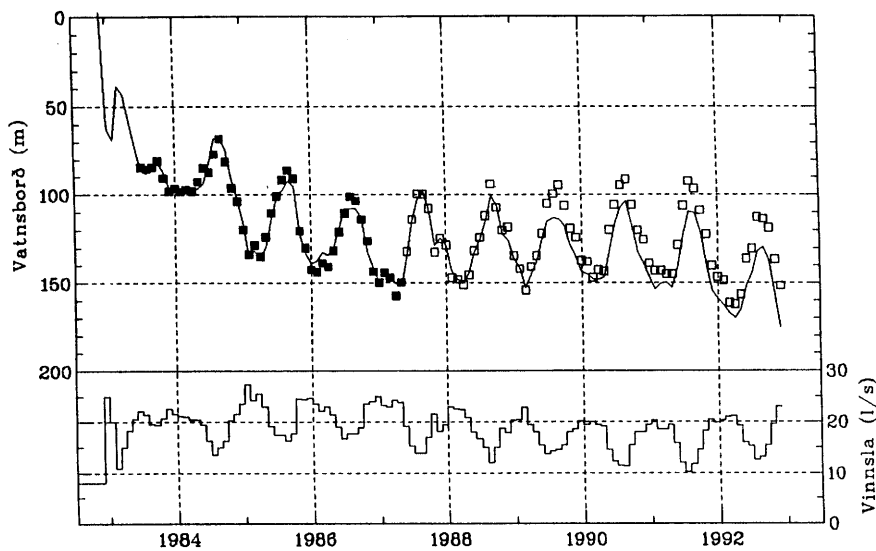


Mynd 5. Vatnsborðsspár fyrir S-Laugaland í Eyjafirði reiknaðar með þjöppuðu líkani.

Þar sem þjöppuð líkön eru mjög einföld er oft efast um áreiðanleika þeirra. Mynd 7, sem er frá Laugalandi í Holtum, sýnir að það er ástæðulaust. Heildregni vatnsborðsferillinn á myndinni er reiknaður fyrir vinnslusögu svæðisins fram til ársins 1993, en með þjöppuðu líkani sem er aðeins byggt á vatnsborðsmælingum fram til áramóta 1986/1987. Opnu kassarnir sýna mælt vatnsborð eftir þann tíma. Myndin sýnir gott samræmi reikninga og raunveruleika, einkum ef tekið er tillit til þess að líkanið byggir aðeins á 4 ára vinnslusögu. Vatnsborð reiknast þó lægra en það mælist seinni árin, en það er vegna þess að yfirléitt er reynt að hafa spár í svartsýnni kantinum.



Mynd 6. Reiknuð áhrif breytts sölufyrirkomulags á vatnsborð á Hamri við Dalvík.



Mynd 7. Áreiðanleiki þjappað líkans af jarðhitakerfinu á Laugalandi í Holtum. Heildregni vatnsborðsferillinn sýnir reiknuð viðbrögð líkans sem byggt er á mælingum til áramóta 1987/1988. Opnir kassar sýna mælt vatnsborð eftir þann tíma.

## 4.2 FLÓKIN KUBBALÍKÖN

Eins og áður hefur komið fram þá eru flókin kubballíkönn byggð úr fjölda kubba oft með mjög mismunandi eiginleika. Með slíkum líkönum má í fyrsta lagi taka tillit til jarðfræðilegrar byggingar og hita- og þrýstiástands jarðhitakerfis og umhverfis þess. Í öðru lagi má með þeim herma vinnslu og mælingar í mörgum holum. Í þriðja lagi má með kubballíkönum herma vatnsborðs- og þrýstingsbreytingar vegna vinnslu. Í fjórða lagi má með þeim herma innstreymi kaldara vatns í kerfið og spá fyrir um efnabreytingum og

kólnun vegna þess. Þau jarðhitakerfi á Íslandi sem hermd hafa verið með flóknum líkön-  
um eru talin upp í töflu 3. Í þessari grein verða hermireikningar fyrir jarðhitakerfin á  
Botni í Eyjafirði (Guðni Axelsson og Grímur Björnsson, 1992) og á Nesjavöllum (Guð-  
mundur Böðvarsson, 1987 og 1993) teknir til örstuttrar umfjöllunar.

TAFLA 3. Flókin kubbalkön af jarðhitakerfum á Íslandi.

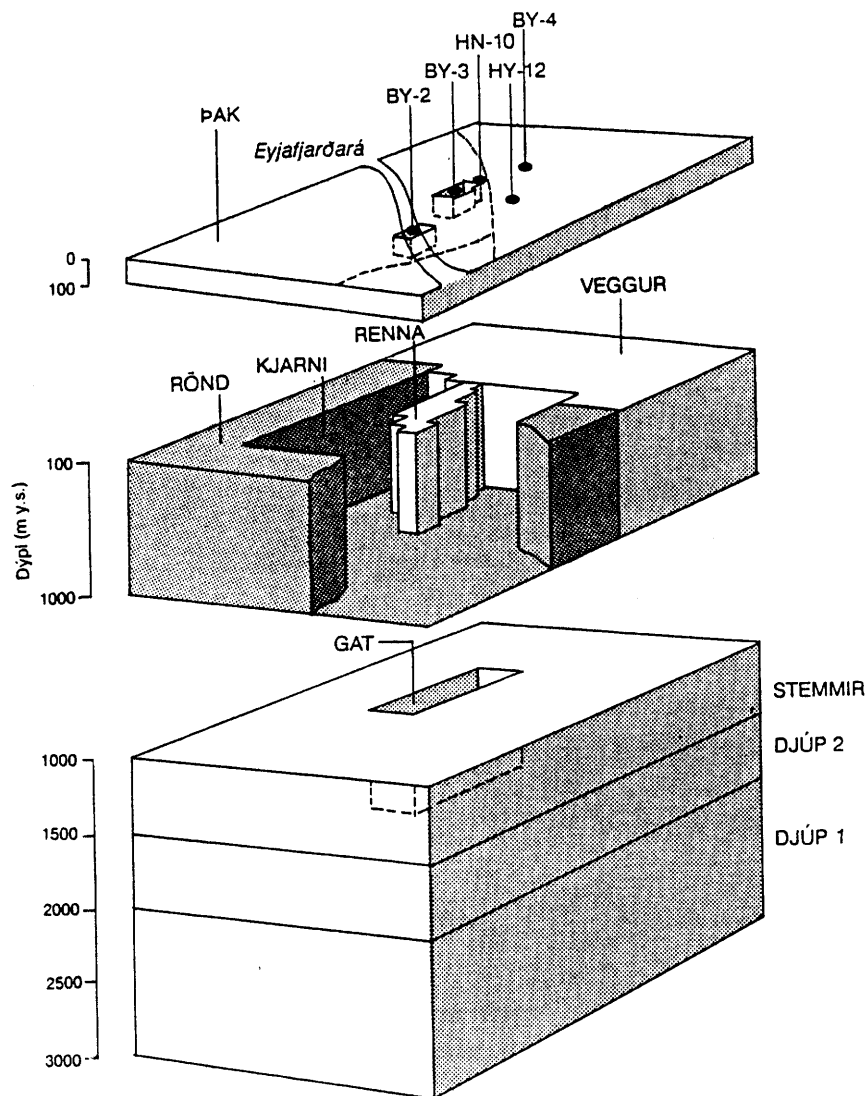
| Jarðhitasvæði | Forrit  | Heimild   |
|---------------|---------|---|
| Krafla        | SHAFT79 | Guðmundur S. Böðvarsson og fl., 1984a, 1984b, 1984c<br>einnig Karsten Pruess og fl., 1984 |
| Laugarnes     | AQUA    | Orkustofnun og Verkfræðist. Vatnaskil, 1986   |
| Nesjavellir   | TOUGH   | Guðmundur S. Böðvarsson, 1987   |
| Seltjarnarnes | PT      | Helga Tulinius og fl., 1987   |
| Glerárdalur   | PT      | Guðni Axelsson og Helga Tulinius, 1987  |
| Svartsengi    | AQUA    | Verkfræðist. Vatnaskil, 1989  |
| Hvíthólar     | TOUGH   | Helga Tulinius og Ómar Sigurðsson, 1991   |
| Botn          | PT      | Guðni Axelsson og Grímur Björnsson, 1992  |
| Nesjavellir   | TOUGH   | Guðmundur S. Böðvarsson, 1993   |

4.2.1 BOTN Árið 1991 var sett upp flókið líkan af jarðhitakerfinu á Botni í Eyjafirði, sem Hitaveita Akureyrar hefur nýtt síðan 1981. Markmiðið var í fyrsta lagi að reyna að herma nánast öll tiltæk gögn um jarðhitakerfið og viðbrögð þess við vinnslu og þannig sannreyna þær hugmyndir sem menn höfðu gert sér um kerfið. Í öðru lagi var takmarkið að þróa líkan sem nota mætti til þess að spá viðbrögðum svæðisins, einkum vatnsborðsbreytingum og kælingu. Mynd 8 sýnir einfaldaða mynd af líkaninu. Það er þrívítt og því er skipt í 7 lög. Hverju lagi er síðan skipt upp í ótal kubba eins og mynd 9 sýnir. Þetta líkan er eitt flóknasta líkan sem gert hefur verið af íslensku jarðhitakerfi.

Í aðalatriðum má segja að líkanið sé byggt upp af öflugum hluta jarðhitakerfisins neðan 1500 m dýpis og vinnsluhluta þess ofan 1000 m dýpis (mynd 8). Í vinnsluhlutanum stjórnast streymi vatns aðallega af sprungubelti með NA-læga stefnu (rennan á mynd 8). Mynd 10 sýnir hitaástand líkansins áður en vinnsla úr því hófst. Er það í ágætu samræmi við hitamælingar í borholum á svæðinu. Samkvæmt líkaninu streymdi heitt vatn úr djúpa hluta kerfisins upp í gegnum sprungubeltið og þaðan upp til yfirborðs um tvær rásir.

Það sem helst olli áhyggjum í tengslum við framtíðarnýtingu Botnssvæðisins var hugsanleg kólnun þess. Mynd 11 sýnir reiknaða kólnun efstu 750 m líkansins eftir um 10 ára vinnslu. Kólnunin er töluverð í efstu 300 m, en líkanið spáir því þó að hiti vatns úr aðal vinnsluholunni á svæðinu muni aðeins lækka um 2 - 3°C næstu 20 árin, jafnvel þó vinnslan verði aukin nokkuð.

4.2.2 NESJAVELLIR Seinna dæmið um flókin kubbalkön er líkan sem gert hefur verið fyrir háhitasvæðið á Nesjavöllum. Þeir reikningar voru gerðir af Guðmundi Böðvarssyni fyrir Hitaveitu Reykjavíkur, en byggðir á viðamiklum rannsóknum sem stundaðar höfðu verið á svæðinu. Líkanið var fyrst sett upp árið 1986 og byggði það á gögnum um

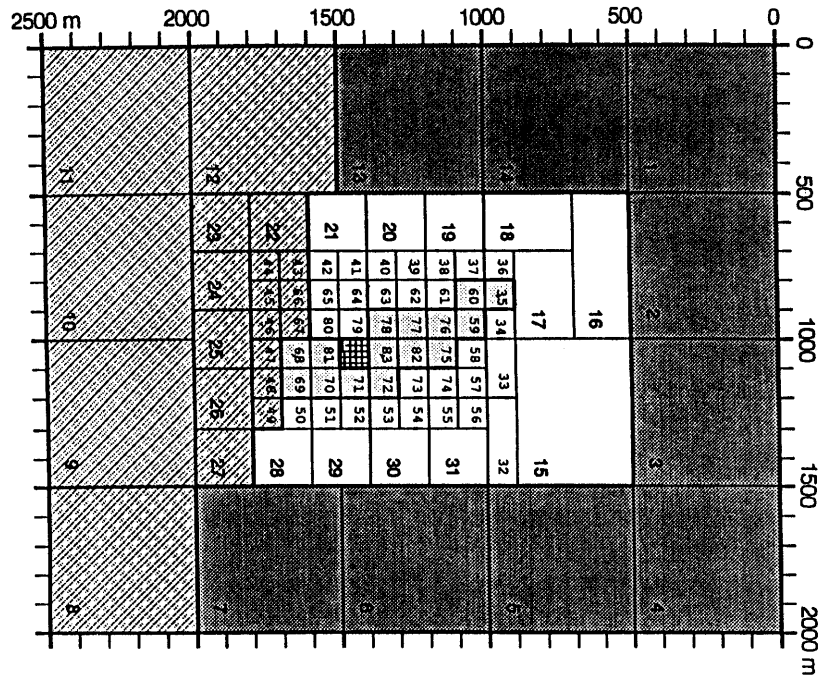


Mynd 8. Einfölduð mynd af þrívíðu kubbalkani af jarðhitakerfinu á Botni í Eyjafirði.

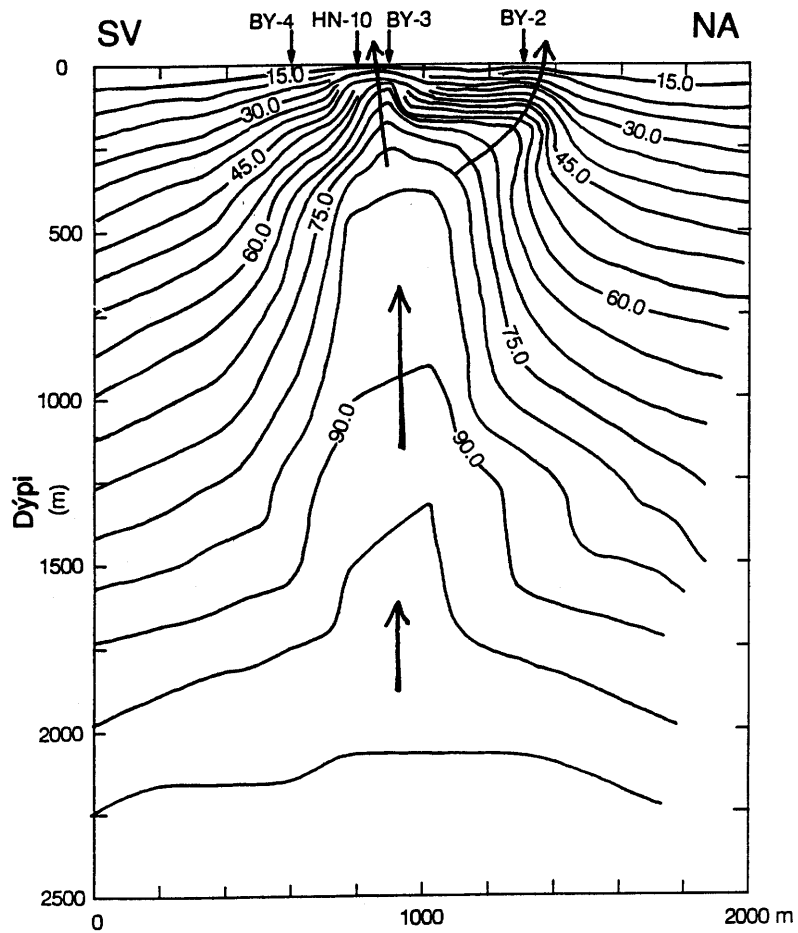
hita- og þrýstidreifingu í kerfinu, upplýsingum um tveggja fasa hluta þess, gögnum um breytingar í massaflæði og vermi vinnsluhola og gögnum um þrýstibreytingar sem urðu vegna vinnslu fram til þess tíma. Markmið reikninganna var fyrst og fremst að meta vinnslugetu kerfisins vegna fyrirhugaðrar byggingar orkuvers á svæðinu og aðveitu til Reykjavíkur. Var það í fyrsta sinn á Íslandi sem hönnun orkuvers var byggð að verulegu leyti á niðurstöðum hermireikninga. Auk þess var markmið reikninganna að draga fram þá þætti sem mest áhrif hafa á viðbrögð kerfisins við vinnslu.

Niðurstöður líkansins frá 1986 voru þær helstar að lækkun þrýstings muni takmarka vinnslugetu Nesjavallasvæðisins og var vinnslugetan áætluð 300 MW<sub>t</sub> í 30 ár. Það svarar til 1700 l/s af 83°C heitu vatni. Auk þess mætti framleiða um 65 MW<sub>e</sub> rafmagns með sömu vinnslu.

Er frá leið kom í ljós að líkanið spáði meiri lækkun þrýstings en raun varð á. Það er ekki óeðlilegt því líkanið var byggt á mjög stuttri vinnslusögu og haft í svartsýnni kantinum að vanda. Til þess að endurmeta vinnslugetu svæðisins með tilliti til lengri vinnslusögu var líkanið endurskoðað árið 1992. Þá þurfti að auka lekt líkansins töluvert, eða úr 1 - 50 mD

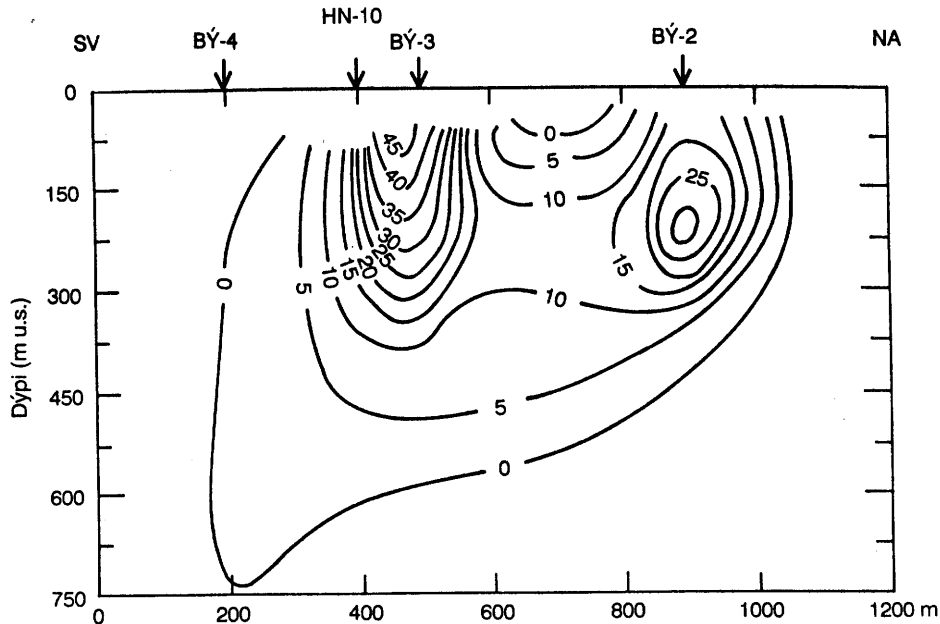


Mynd 9. Skipting laga 2-4 í Botnslíkaninu í kubba með mismunandi eiginleika.



Mynd 10. Reiknað hitaþversnið gegnum Botnslíkanið.





Mynd 11. Reiknuð kólnun efri hluta Botnslíkansins eftir 10 ára vinnslu.

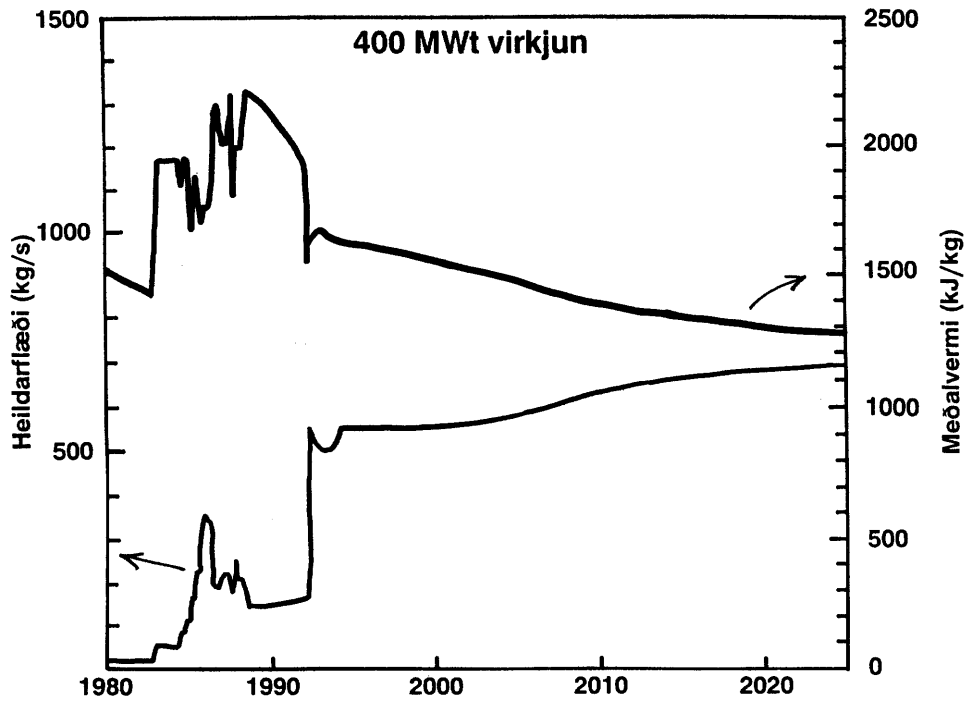
í 1 - 200 mD. Aðrar breytingar á líkaninu urðu smávægilegar. Samkvæmt endurskoðaða líkaninu er vinnslugeta Nesjavalla nú áætluð 400 MW<sub>t</sub> í 30 ár, sem svarar til framleiðslu 2200 l/s af 83°C heitu vatni. Auk þess má framleiða tæp 90 MW<sub>e</sub> rafmagns. Mynd 12 sýnir heildarrensli og meðalvermi vinnsluhola á Nesjavöllum fyrir 400 MW<sub>t</sub> virkjun samkvæmt endurskoðaða líkaninu. Samkvæmt þeim niðurstöðum má búast við að meðalvermi fari lækkandi í framtíðinni. Er það vegna innstreymis kaldara vatns í kerfið.

### 4.3 NIÐURDÆLINGARTILRAUNIR

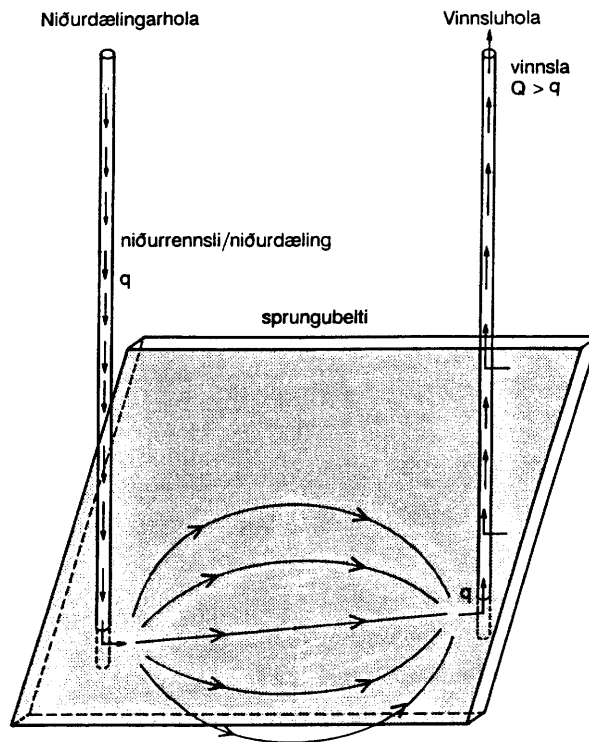
Mikil varmaorka er fólgin í flestum jarðhitakerfum og er meginhluti varmans í berginu, en lítill hluti hans í heitu vatninu. Næst því aðeins lítill hluti hennar með hefðbundinni vinnslu. Í tilfellum þar sem jarðhitakerfi eru í góðum tengslum við kaldara vatn umhverfis nær innstreymi þess vatns nokkru af varma bergsins áður en vatninu er dælt úr vinnsluholum kerfisins. Í öðrum tilfellum eru jarðlög umhverfis jarðhitakerfi þétt og fellur þá þrýstingur í þeim stöðugt með tímanum. Í slíkum tilfellum má með niðurdælingu kaldara vatns í ónotaðar borholur ná hluta af varma bergsins, ef vatnið hitnar áður en því er aftur dælt upp um vinnsluholur. Niðurdæling vinnur í þeim tilfellum einnig gegn lakkun vatnsborðs og vinnslugeta viðkomandi jarðhitasvæðis eykst.

Niðurdæling hefur verið stunduð á háhitasvæðinu í Svartsengi en ekki enn á neinu lág-hitasvæði á Íslandi. Niðurdælingartilraun var hins vegar gerð á Syðra-Laugalandi í Eyjafirði vorið 1991 (Ólafur G. Flóvenz og fl., 1991). Niðurstöður hennar voru þær að niðurdæling væri mjög vænlegur kostur á því svæði. Hér verður stuttlega sagt frá niðurdælingartilraun sem gerð var á Laugalandi í Holtum haustið 1992 og þeim einföldu forðarfræðilegu aðferðum sem notaðar voru við athugunina (Grímur Björnsson og fl., 1993).

Á Laugalandi í Holtum hagar þannig til að tvær holur skera sprungubelti (mynd 13). Er önnur holan vinnsluhola Hitaveitu Rangæinga en hin er varahola, sem mætti nýta til niðurdælingar. Í fyrsta lagi voru tengsl holanna könnuð með því að setja ferlunarefnið natrium-flúorescein niður í varaholuna og láta það berast með náttúrulegu niðurrensli út í

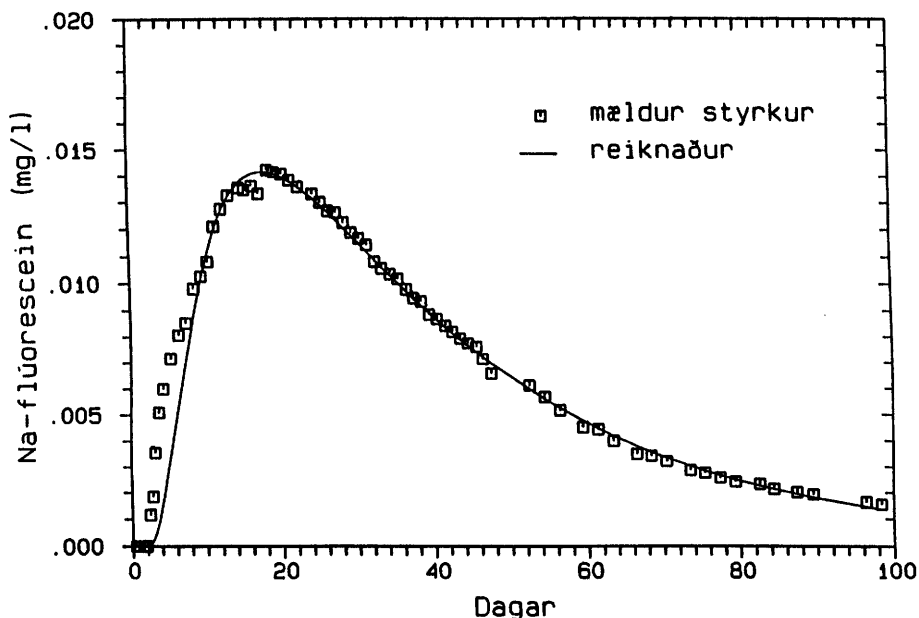


Mynd 12. Heildarrensli og meðalvermi á Nesjavöllum fyrir 400 MW<sub>t</sub> virkjun samkvæmt endurskoðuðu kubbalkani.



Mynd 13. Einfölduð mynd af sprungubelti sem tengir niðurdælingarholu og vinnsluholu.

sprungubeltið. Síðan var fylgst með því hversu hratt ferlunarefnið skilaði sér yfir í vinnsluholuna. Þetta er sýnt á mynd 14 ásamt reiknuðum styrk efnisins samkvæmt einföldu líkani af sprungubeltinu.



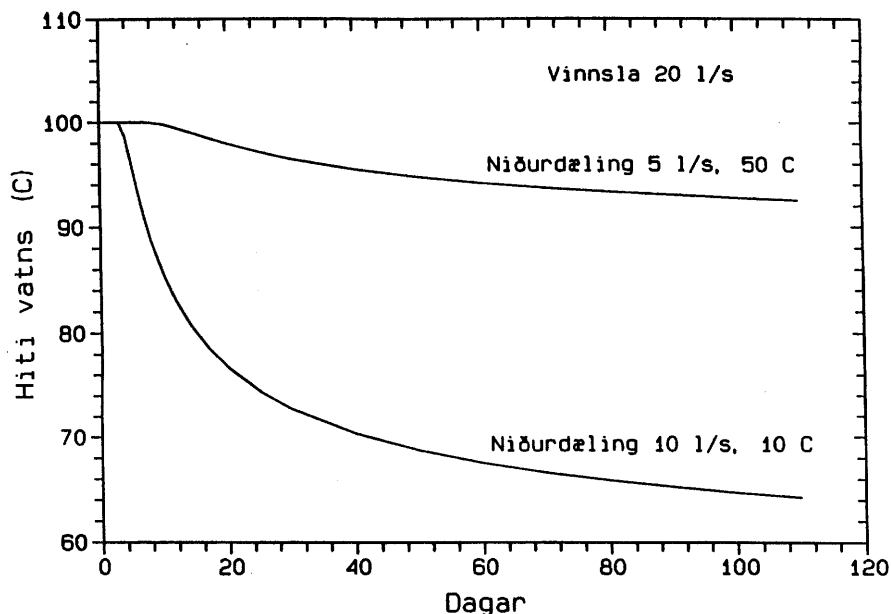
Mynd 14. Mældur og reiknaður styrkur ferlunarefnis í niðurdælingarprófun á Laugalandi í Holtum.

Líkanið af sprungubeltinu var síðan notað til þess að áætla hita vatns úr vinnsluholunni við mismikla niðurdælingu í varaholuna. Niðurstöður fyrir tvö tilfelli eru birtar á mynd 15. Annars vegar tilfelli þar sem dælt er niður 5 l/s af 50°C heitu vatni og hins vegar tilfelli þar sem dælt er niður 10 l/s af 10°C. Í seinna tilfellinu kólnar vatn úr vinnsluholunni það mikið að vinnslugeta hennar minnkar. Er það vegna þess að holurnar tengjast um sprungu og aðeins eru um 100 m milli holanna. Í fyrra tilfellinu aukast hins vegar afköst holunnar vegna þess að rennslið eftir sprungunni er mun hægara og vatnið nær því meiri varma úr berginu. Einnig er vatnið sem dælt er niður mun heitara. Hægt er að dæla nokkrum l/s af 30 - 50°C heitu vatni úr grunnu vatnskerfi á Laugalandssvæðinu. Framangreindir reikningar benda til þess að hættulítið verði að dæla því niður í jarðhitakerfið í hæfilegri fjarlægð frá vinnsluholunni.

## 5. LOKAORÐ

Forðafræðirannsóknir, sem byggjast á hermireikningum af ýmsu tagi, eru í dag orðnar mikilvægur þáttur í rekstri orkufyrirtækja sem nýta jarðhita. eru það aðallega hitaveitur, en hitaveitur í þéttbýli nýta 22 lágheatasvæði og 2 háheatasvæði. Um 85 % alls húsrýmis á Íslandi er í dag hitað með jarðhitaorku.

Í greininni er fjallað um notkun þjappaðra líkana sem hefur reynst ódýr og fljótleg aðferð til þess að spá fyrir um vatnsborðsbreytingar í lágheatakerfum. Hafa slíkar spár verið notaðar til þess að meta vinnslugetu jarðhitakerfa og við vinnslustýringu. Forritið LUMP-FIT hefur verið notað til þess að herma tólf jarðhitakerfi á Íslandi síðustu sjö árin.



Mynd 15. Reiknaður hiti vatns úr vinnsluholu á Laugalandi í Holtum fyrir tvö tilfalli niðurdælingar í nálæga holu.

Vegna tilkomu mjög öflugra tölva er nákvæm og flókin líkangerð með svokölluðum kubbalíkönum nú notuð til þess að herma jarðhitakerfi þar sem flókin gerð og samspil nokkurra þátta ræður viðbrögðum við massatöku. Hafa flókin kubbalíkön nú verið gerð fyrir átta jarðhitakerfi á Íslandi. Niðurstöður þeirra hafa verið notaðar við vinnslustýringu og jafnvel sem hönnunarforsendur.

Athuganir eru hafnar á því hvort auka megi orkuvinnslu úr jarðhitakerfum með niðurdælingu kaldara vatns. Niðurstöður benda til þess að slíkt sé vænlegur kostur fyrir mörg lág-hitakerfi. Þó mun verða nauðsynlegt að stunda niðurdælingu með gát, þ.e. dæla niður litlu magni í nægilegri fjarlægð frá vinnsluholum.

Að mati höfundar mun jarðhitaiðnaðurinn æ meira styðjast við forðafræðileg líkön í framtíðinni, jafnt við vinnslustýringu sem hönnun orkuvera. Jafnframt er líklegt að niðurdæling verði mikilvægur þáttur í rekstri jarðhitasvæða. Á það má benda að margar jarðhitaholur á Íslandi eiga eftir að endast áratugum saman og ætti orkuvinnsla úr þeim holum að verða mjög hagkvæm. Það er einnig álit höfundar að hlutur jarðhitans í orkubúskap íslendinga muni enn aukast, m.a. með tilkomu nýrra vinnslusvæða, jafnt háhitasvæða, með borun hola sem fá vatn af meira dýpi en þær holur sem nú hafa verið boraðar og ekki síst með síðari öxuldælum en notaðar eru á Íslandi í dag.

## 6. ÞAKKIR

Ég vil þakka samstarfsmönnum mínum á Forðafræðideild Jarðhitadeildar, þeim Valgarði Stefánssyni, Benedikt Steingrímssyni, Grími Björnssyni og Ómari Sigurðssyni, fyrir dyggilega aðstoð við skrif þessarar greinar.

## RITSKRÁ

- Grímur Björnsson, 1992: Reykir við Reykjabraut. Vinnslusaga og vatnsborðsspár. Orkustofnun OS-92016/JHD-05 B, 15 bls.
- Grímur Björnsson, Guðni Axelsson, Jens Tómasson, Kristján Sæmundsson, Árni Ragnarsson, Sverrir Þórhallsson og Hrefna Kristmannsdóttir, 1993: Hitaveita Rangæinga. Jarðhitarannsóknir 1987-1992 og möguleikar á frekari orkuöflun. Orkustofnun, OS-93008/JHD-03 B, 69 bls.
- Guðmundur S. Böðvarsson, 1987: The Nesjavellir Geothermal Field, Iceland: Reservoir Evaluation. Hitaveita Reykjavíkur, 186 bls.
- Guðmundur S. Böðvarsson, 1993: Recalibration of the Three-dimensional Model of the Nesjavellir Geothermal Field. Hitaveita Reykjavíkur, 111 bls.
- Guðmundur S. Böðvarsson, Sally Benson, Ómar Sigurðsson, Valgarður Stefánsson og Einar T. Elfásson, 1984a: The Krafla Geothermal Field, Iceland. 1. Analysis of Well Test Data, *Water Resour. Res.*, 20, 1515-1530.
- Guðmundur S. Böðvarsson, Karsten Pruess, Valgarður Stefánsson og Einar T. Elfásson, 1984b: The Krafla Geothermal Field, Iceland. 2. The Natural State of the System, *Water Resour. Res.*, 20, 1531-1544.
- Guðmundur S. Böðvarsson, Karsten Pruess, Valgarður Stefánsson og Einar T. Elfásson, 1984c: The Krafla Geothermal Field, Iceland. 3. The Generating Capacity of the Field, *Water Resour. Res.*, 20, 1545-1559.
- Guðni Axelsson, 1987: Jarðhitasvæðið Urriðavatni. Vatnafræðileg athugun í ágúst 1987. Orkustofnun OS-87048/JHD-28 B, 42 bls.
- Guðni Axelsson, 1988: Jarðhitasvæðið að Hamri í Svarfaðardal. Um afköst vinnsluhola Hitaveitu Dalvíkur. Orkustofnun OS-88053/JHD-11, 38 bls.
- Guðni Axelsson, 1989: Simulation of pressure response data from geothermal reservoirs by lumped parameter models. *Proceedings 14th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, USA*, 257-263.
- Guðni Axelsson, 1990: Laugaland í Holtum. Hermireikningar og vatnsborðsspár. Orkustofnun OS-90043/JHD-24 B, 96 bls.
- Guðni Axelsson, 1991: Jarðhitasvæðið á Laugarengi í Ólafsfirði. Prófun og vatnsborðsspár. Orkustofnun OS-91012/JHD-03, 38 bls.
- Guðni Axelsson, og Helga Tulinius, 1988: Jarðhitasvæðið á Glerárdal. Hermireikningar og vinnsluspár. Orkustofnun greinargerð GAx/HTul-88/01, 25 bls.
- Guðni Axelsson og Grímur Björnsson, 1992: Botn í Eyjafjarðarsveit. Líkanreikningar fyrir jarðhitakerfið. Orkustofnun OS-92012/JHD-01, 71 bls.
- Guðni Axelsson og Þórður Arason, 1992: *LUMPFIT. Automated simulation of pressure changes in hydrological reservoirs. User's Guide, version 3.1*, September 1992, 32 bls.

- Guðni Axelsson, Helga Tulinius, Ólafur G. Flóvenz og Þorsteinn Thorsteinsson, 1988: Vatnsöflun Hitaveitu Akureyrar. Staða og horfur 1988. Orkustofnun OS-88052/JHD-10, 33 bls.
- Guðni Axelsson, Halldór Ármannsson, Guðrún Sverrisdóttir og Magnús Ólafsson, 1989: Hitaveita Egilsstaða og Fella. Eftirlit með jarðhitavinnslu að Urriðavatni 1988. Orkustofnun OS-89024/JHD-09 B, 33 bls.
- Helga Tulinius, Amada L. Spencer, Guðmundur S. Böðvarsson, Hrefna Kristmannsdóttir, Þorsteinn Thorsteinsson og Árný E. Sveinbjörnsdóttir, 1987: Reservoir Studies of the Seltjarnarnes Geothermal Field, Iceland. Orkustofnun OS-87032/JHD-07, 55 bls.
- Helga Tulinius og Ómar Sigurðsson, 1991: Krafla. Þrívíð hermun fyrir vinnslusvæðið á Hvíthólum. Orkustofnun OS-91046/JHD-07, 37 bls.
- Lúðvík S. Georgsson, Auður Ingimarsdóttir, Guðni Axelsson, Margrét Kjartansdóttir og Þorsteinn Thorsteinsson, 1987: Laugaland í Holtum. Hóla GN-1 í Götu og vatnsvinnsla á Laugalandssvæðinu. Orkustofnun OS-87022/JHD-04, 65 bls.
- Karsten Pruess, Guðmundur S. Böðvarsson, Valgarður Stefánsson og Einar T. Elíasson, 1984: The Krafla Geothermal Field, Iceland. 4. History Match and Prediction of Individual Well Performance, *Water Resour. Res.*, 20, 1561-1584.
- Ólafur G. Flóvenz, Guðni Axelsson og Hrefna Kristmannsdóttir, 1991: Niðurdæling vatns á lághitasvæðum. Erindi flutt á Orkuþingi 91, 5 bls.
- Ólafur G. Flóvenz, Grímur Björnsson og Guðni Axelsson, 1993: Vatnsöflun Hitaveitu Akureyrar. Staða og horfur í febrúar 1993. Bráðabirgðaskýrsla. Orkustofnun, OS-93006/JHD-02 B, 18 bls.
- Ólafur G. Flóvenz, Guðni Axelsson og Guðrún Sverrisdóttir, 1992: Hitaveita Akureyrar. Vinnslueftirlit 1991. Orkustofnun, OS-92020/JHD-07 B, 34 bls.
- Ómar Sigurðsson, Ragna Karlsdóttir og Margrét Kjartansdóttir, 1987: Hitaveita Siglu-fjarðar. Mat á jarðhitasvæðinu í Skútudal. Orkustofnun OS-87034/JHD-08, 71 bls.
- Orkustofnun og Verkfræðistofan Vatnaskil hf, 1986: Laugarnessvæði. Vinnslusaga og framtíðarhorfur. Hitaveita Reykjavíkur, 129 bls.
- Ragna Karlsdóttir og Guðni Axelsson, 1986: Vatnsöflun Hitaveitu Dalvíkur. Úttekt á jarðhitasvæðinu við Hamar. Orkustofnun OS-86044/JHD-12, 51 bls.
- Verkfræðistofan Vatnaskil hf., 1989: Svartsengi. Reiknilíkan af jarðhitakerfinu. Orkustofnun OS-89031/JHD-05, 111 bls.
- Verkfræðistofan Vatnaskil hf., 1992: Svartsengi. Vinnslueftirlit júlí 1991 - júlí 1992. Orkustofnun OS-92037/JHD-18 B, 26 bls.

# Jöklamælingar og vatnsafl

Oddur Sigurðsson og Tómas Jóhannesson

## 1. INNGANGUR

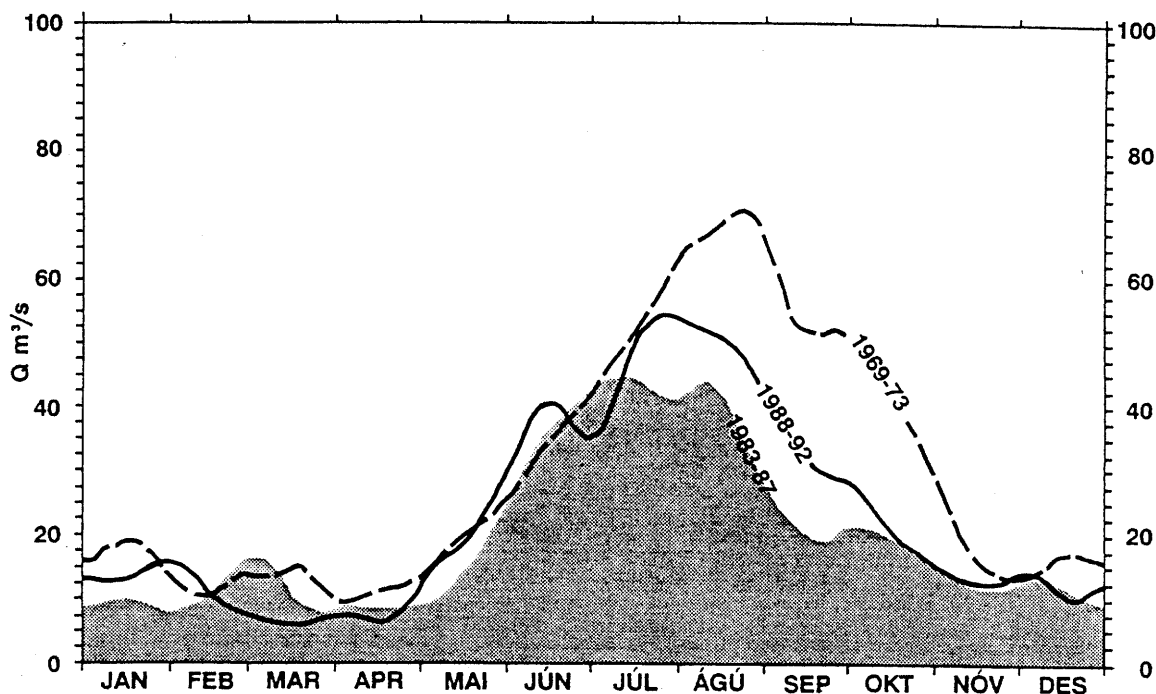
Eitt helsta hlutverk Orkustofnunar er að afla grunnupplýsinga um fallvötn. Til þess mælum við m.a. rennsli ána og finnum hvernig það skipar sér niður á árstíðir og árabíl. Með þessum gögnum má einnig finna út hvernig afrennslishættir eru á mismunandi hlutum landsins. Fer það eftir mörgum eiginnum lands og andrúmslofts svo sem hæð yfir sjó, afstöðu til helstu vindátta, hitafari, úrkomu, afstöðu til sólar, gerð jarðlaga og fleiru.

Reglulegar samfelldar vatnamælingar hafa nú verið stundaðar á Orkustofnun og fyrirrennara hennar í nær hálfra öld. Þessar mælingar ná til fallvatna, stöðuvatna og grunnvatns en að mjög litlu leyti til jökla þótt þar sé fólgin hlutfallslega mest vatnsorka. Á landinu eru jöklar rúmlega 11.000 km<sup>2</sup> og meðalþykkt þeirra er rúmlega 400 m (munnlegar upplýsingar frá Helga Björnsyni). Þetta eru samtals 4.000-5.000 km<sup>3</sup> af vatni, sem er nálægt tvítug- til þrítugfaldri ársúrkomu á landið allt. Úrkomu er misdreift á landið. Víðast eykst hún með hæð og lætur nærri að fimmti hluti úrkomunnar falli á jöklana sem þó eru aðeins rúmlega tífundi hluti flatarmáls landsins. Séu jöklarnir í jafnvægi, þ.e.a.s. renni jafnmikið vatn frá þeim og svarar til úrkomunnar sem á þá fellur, skila þeir frá sér tvöfalt meira vatni á flatareiningu en það sem rennur að jafnaði af landinu í heild. Þegar þess er gætt að nánast öll leysing á jökli fer fram á 3-4 mánuðum á ári hverju er ljóst hver vandi er að nýta þennan fjársjóð svo vel fari. Það liggur einnig í hlutarins eðli að jöklarnir liggja á hæstu hlutum landsins og er því yfirleitt fólgin meiri stöðuorka í vatni sem frá þeim fellur en afrennsli frá öðrum hlutum landsins. Þekking á vatnafari jökla skiptir því vatnsorkuiðnaðinn meginmáli.

## 2. MARKMIÐ

Farið var út í jöklamælingar á Vatnsorkudeild Orkustofnunar til að svara ýmsum spurningum um vatnafar sem vaknað höfðu við mælingar á jökulám og til að afla gagna sem mætti nota í rennslislíkön sem notuð eru við hönnun á vatnsaflsvirkjunum. Við hönnun virkjunar er reynt að áætla rennslið til virkjunarinnar og hvernig það breytist eftir árstíðum til að unnt sé að reikna miðlunarbörfina. Áraskipti og langtímabreytingar skipta þar að sjálfsögðu verulegu máli. Sérlega mikilvægt er að áætla hvert sé rennsli vatnsrýrustu ára sem búast má við. Til þessa eru notuð rennslislíkön þar sem reynt er að meta sem flesta þætti sem máli skipta í sambandi við rennsli ána. Þeir þættir sem ekki eru mældir og meta þarf með óbeinum hætti auka að sjálfsögðu ónákvæmni líkansins. Hver þáttur til viðbótar sem næst að mæla gerir líkanið trúverðugra.

Nú má spyrja hvers vegna ekki er látið nægja að mæla rennslið í jökulánum beint í stað þess að flækja málið með mælingum á ákomu og leysingu jökla, fyrst tilgangurinn er fyrst og fremst að öðlast skilning á rennsli ána. Því er til að svara að við margvíslega örðugleika að etja í vatnamælingum í jökulvötnum á hálendinu. Má þar nefna framburð, óstöðuga farvegi, ísmyndun o.fl. Jöklamælingarnar geta komið í góðar þarfir við að leysa úr vandamálum sem upp koma í sambandi við úrvinnslu vatnamælinga á hálendinu. Einnig komumst við með jöklamælingunum nær hinum eiginlegu orsökum að breytingum í rennsli ána. Jöklamælingarnar sýna með beinum hætti hvernig sveiflur í hita og úrkomu hafa áhrif á afrennsli frá jöklunum. Þær má því nota til þess að meta breytileika jökulafrennslis út frá mælingum á hita og úrkomu sem staðið hafa mun



vhm 150 Djúpá, Fljótshverfi: Langtíma ársferill 31 dags skarvegin meðaltöl

1. MYND: Jafnað rennsli þriggja 5 ára tímabila í Djúpá í Fljótshverfi (vhm 150). Tímabilið 1983-87 rann þar fram þriðjungi minna vatn en á árunum 1969-73.

lengur en jöklamælingarnar eða samfelldar rennismælingar uppi á hálendinu. Einnig má nota það samband milli veðurfars og jökulafrennsli sem mælingarnar leiða í ljós til þess að meta hvaða áhrif hugsanlegar breytingar á veðurfari munu hafa á jökulafrennsli eins og vikið verður á hér á eftir. Þessar upplýsingar væri mun erfiðara að fá á grundvelli rennismælinga einna.

Í vatnamælingum sem staðið hafa í áratugi hefur komið fram breytilegt rennsli milli tímabila, jafnvel svo tugum hundraðshluta skiptir (1. mynd). Orsök þessara sveiflna liggur að öllum líkindum í samspili veðurfars og jökla og er því nánast borin von að finna hana án þess að þekkja vel það sem fer fram á jökli. Með langtíma jöklamælingum er von til þess að finna megi skýringar á slíkum breytingum.

Afkomumælingar á jöklu hafa einnig ýmsa aðra almenna þýðingu: Þær fela oft í sér nákvæma mælingu á úrkomu á svæðum þar sem mjög lítið er um úrkomumælingar og þær eru mikilvægar í sambandi við túlkun á mældu hopi og framgangi jökulsporða.

### 3. FYRRI AFKOMUMÆLINGAR

Mönnum hefur lengi verið ljóst hvaða þættir skipta helst máli í sambandi við afkomu jökla og afrennsli frá þeim, en skort hefur á að þessir þættir hafi verið mældir þannig að koma megi tölum yfir þá. Augljóslega eykst flatarmál jökla að öðru jöfnu er þeir bæta við sig massa. Fyrstu reglulegu jöklamælingarnar héraendis fólust í því að fylgjast með hvort jökulsporðar gengju fram eða hopuðu. Þær mælingar hóf Jón Eyþórsson 1930 og hefur þeim verið haldið áfram víða um land til þessa dags. Fljótlega varð mönnum ljóst að ekki var einhlítt að jökulsporðar gengju fram eftir snjópungan vetur. Gátu meira að segja liðið mörg slík ár áður en þess fór að gæta við sporðinn. Auk þess eru dæmi um að jöklar hlaupi fram langar leiðir eftir langvarandi hlýindatímabil. Að sjálfsögðu er þó sambengi milli útbreiðslu jökla og afkomu þeirra til langframa þótt oft sé erfitt að koma auga á það í svip. Þess vegna segja sporðamælingar mikið um búskap jöklanna og



standa vonir til þess að hægt verði að tengja þær beinum afkomumælingum þegar fram líða stundir. Sigurjón Rist vatnamælingamaður hafði umsjón með árlegum mælingum á stöðu jökulsporða eftir að Jón Eypórsson féll frá. Nú á Orkustofnun gott samstarf við Jökklarannsóknafélag Íslands um þessar mælingar með sérstökum samningi.

Afkoma íslenskra jökla var fyrst mæld beint á fjórða áratug þessarar aldar (H. W:son Ahlmann og Sigurður Þórarinsson, 1937-43). Bærilega samfelld röð mælinga er til frá Íshellunni á Grímsvötnum en þar er ákoma mæld árlega í vorferð Jökklarannsóknafélags Íslands (Helgi Björnsson, 1985).

Í sambandi við vatnafræðilega túlkun afkomumælinga á jöklum er mikilvægt að rennslis- stefna vatns undir jökli og sér í lagi lega vatnaskila sé þekkt. Þar hefur kortagerð Raunvísinda- stofnunar og Landsvirkjunar á jöklum hérlendis með íssjármælingum komið í góðar þarfir.

#### 4. JÖKLAMÆLINGAR ORKUSTOFNUNAR

Árið 1988 voru jöklamælingar Orkustofnunar auknar svo um munaði (Oddur Sigurðsson, 1988, 1990). Áður höfðu vatnamælingamenn í samvinnu við ýmsa aðra farið stöku sinum á jök- ul til mælinga af ýmsu tagi en ekki hafði því verið sinnt á reglubundinn hátt. Fyrst varð fyrir að mæla það sem nefnist afkoma eða búskapur jökuls og skiptir helst sköpum í vatnafari jökla. Góður skilningur á búskap jökuls næst ekki nema með því að mæla ákomu vetrar annars vegar og leysingu sumars hins vegar. Þannig fást líka bestar upplýsingar um áhrif jökulsins á árnar sem frá honum renna.

Að sjálfsögðu var lagt upp í afkomumælingar á Orkustofnun með það í huga að fá sem mestar upplýsingar með sem minnstri fyrirhöfn og tilkostnaði. Hofsjökull varð fyrir valinu vegna þess að uppi eru áætlanir um nýtingu alls vatns sem frá honum rennur (þ.e. Þjórsá, Jökulsárnar í Skagafirði, Blanda og Hvítá í Árnessýslu), en sumar þeirra eru þegar nýttar til raforkuframleiðslu. Í öðru lagi er jökullinn sæmilega aðgengilegur á öllum tímum árs og ekki sakar að hann liggur á landinu miðju. Hann hefur einnig verið kortlagður betur en aðrir jöklar landsins. Út er komið á vegum Raunvísindastofnunar Háskóla Íslands og Landsvirkjunar kort af yfirborði jökulsins og jökulbotni, jökulþykkt, ísa- og vatnaskilum svo og straum- og mættislfnum.

Síðustu 2 árin hefur afkoma einnig verið mæld á Þrándarjökli og Eyjabakkajökli í sambandi við áform um vatnsaflsvirkjanir á Austurlandi.

Sá kostur var valinn að mæla hluta af Hofsjökli allstarlega (Ísasvið Vestari-Jökulsár í Skaga- firði) og til viðmiðunar snið upp eftir jöklinum á tvær aðrar hliðar (á austanverðum og suðvestan- verðum jöklinum). Á þessu ætti að sjást hvort afkoma væri mjög breytileg milli svæða á jöklin- um.

Afkoma ársins er mæld í tvennu lagi. Fyrst er ákoma vetrarins mæld að vori og síðan hve mikið leysir af jöklinum um sumarið. Ákoman er mæld með því að kortleggja snjóþýpi og finna eðlisþyngd snævarins. Þykkt snjólags frá síðastliðnum vetri má finna með því að grafa eða bora niður á mót í snjónum frá síðasta hausti. Þessi mót eru oft vandfundin en komast má nærri þeim með ýmsum ráðum. Að bora og grafa er býsna tímafrekt og er því þreifað niður á jökulís á neðan- verðum jöklinum með grannri stálstöng (sem raunar er skriðdreka loftnet).

Stengur eru boraðar niður í jökulinn að vori og lesið af þeim um sumarið og haustið hve mik- ið hefur bráðnað á hverjum stað. Ofan snælfnu er jafnframt mæld þykkt og eðlisþyngd þess snæv- ar sem eftir er til þess að meta hversu mikill hluti leysingavatnsins hefur ekki náð að renna í burtu og hvort snjó hafi bætt á um sumarið. Með þessu móti er fundið hvernig leysing breytist með hæð yfir sjó og er það reiknað yfir á allan jökulinn. Þannig fæst afrennsli jökulsins til hvernar ár sem frá honum fellur. Afkoma jökulsins er einfaldlega mismunur ákomu og leysingar.

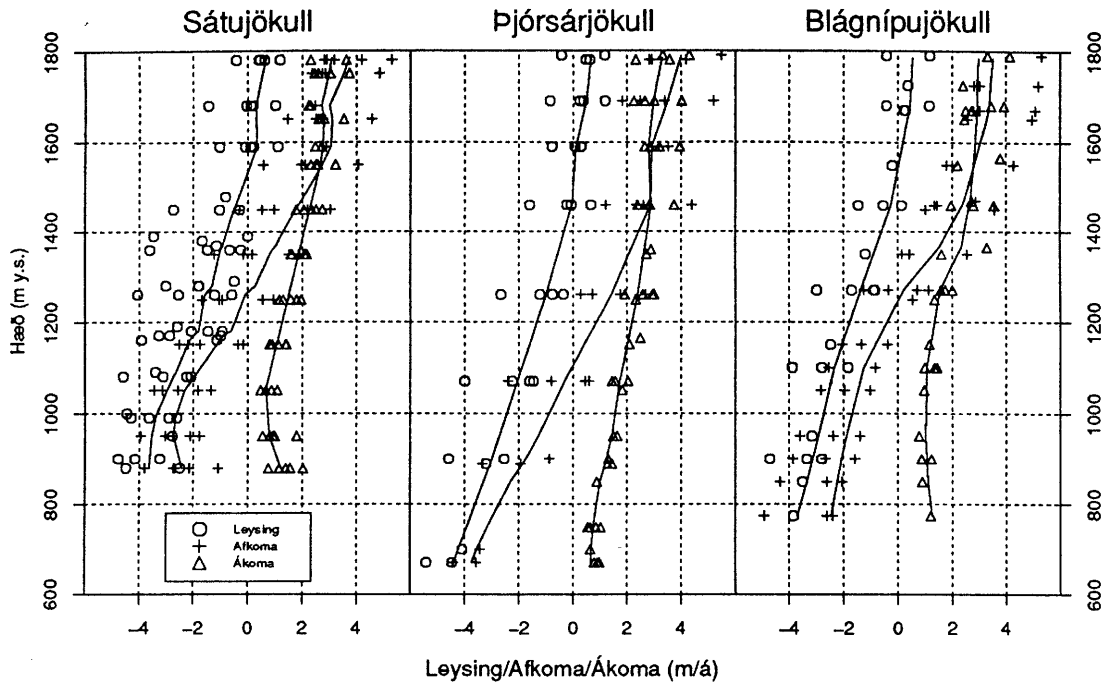
1. TAFLA: Niðurstöður úr afkomumælingum Orkustofnunar, 1987-92 (Oddur Sigurðsson, 1989, 1991 og óbirt gögn).

| Vatnasvið                  | Ár        | Flatarmál<br>km <sup>2</sup> | Ákoma                          |      | Leysing                        |      | Afkoma                         |       |
|----------------------------|-----------|------------------------------|--------------------------------|------|--------------------------------|------|--------------------------------|-------|
|                            |           |                              | 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> | m    | 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> | m    | 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> | m     |
| <b>HOF SJÖKULL</b>         |           |                              |                                |      |                                |      |                                |       |
| Vestari-Jökulsá            | 1987-1988 | 90,6                         | 119                            | 1,31 | 206                            | 2,27 | -87                            | -0,96 |
| Vestari-Jökulsá            | 1988-1989 | 90,6                         | 157                            | 1,74 | 112                            | 1,24 | 45                             | 0,50  |
| Vestari-Jökulsá            | 1989-1990 | 90,6                         | 132                            | 1,45 | 186                            | 2,05 | -54                            | -0,60 |
| Vestari-Jökulsá            | 1990-1991 | 90,6                         | 176                            | 1,94 | 304                            | 3,35 | -128                           | -1,41 |
| Vestari-Jökulsá            | 1991-1992 | 90,6                         | 170                            | 1,87 | 74                             | 0,81 | 96                             | 1,06  |
| samt. '87-'92              |           |                              |                                |      |                                |      | -128                           | -1,41 |
| <b>ÞJÓRSÁ N ARNARFELLS</b> |           |                              |                                |      |                                |      |                                |       |
| Þjórsá N Arnarfells        | 1988-1989 | 248,8                        | 553                            | 2,22 | 304                            | 1,22 | 249                            | 1,00  |
| Þjórsá N Arnarfells        | 1989-1990 | 248,8                        | 436                            | 1,75 | 408                            | 1,64 | 27                             | 0,11  |
| Þjórsá N Arnarfells        | 1990-1991 | 248,8                        | 519                            | 2,09 | 766                            | 3,08 | -247                           | -0,99 |
| Þjórsá N Arnarfells        | 1991-1992 | 248,8                        | 645                            | 2,59 | 243                            | 0,98 | 402                            | 1,61  |
| samt. '88-'92              |           |                              |                                |      |                                |      | 431                            | 1,73  |
| <b>JÖKULKVÍSL</b>          |           |                              |                                |      |                                |      |                                |       |
| Jökulkvísl                 | 1988-1989 | 51,3                         | 89                             | 1,73 | 66                             | 1,28 | 23                             | 0,45  |
| Jökulkvísl                 | 1989-1990 | 51,3                         | 69                             | 1,35 | 104                            | 2,02 | -35                            | -0,68 |
| Jökulkvísl                 | 1990-1991 | 51,3                         | 89                             | 1,73 | 164                            | 3,21 | -76                            | -1,49 |
| Jökulkvísl                 | 1991-1992 | 51,3                         | 101                            | 1,96 | 66                             | 1,28 | 35                             | 0,68  |
| samt. '88-'92              |           |                              |                                |      |                                |      | -53                            | -1,03 |
| <b>ÞRÁNDARJÖKULL</b>       |           |                              |                                |      |                                |      |                                |       |
| Hamarsá, Geithellnaá       | 1990-1991 | 19,4                         | 44                             | 2,25 | 63                             | 3,24 | -19                            | -0,99 |
| Hamarsá, Geithellnaá       | 1991-1992 | 19,4                         | 44                             | 2,27 | 36                             | 1,88 | 8                              | 0,39  |
| samt. '90-'92              |           |                              |                                |      |                                |      | -11                            | -0,60 |
| <b>EYJABAKKAJÖKULL</b>     |           |                              |                                |      |                                |      |                                |       |
| Jökulsá í Fljótssdal       | 1990-1991 | 107,9                        | 246                            | 2,28 | 344                            | 3,19 | -93                            | -0,90 |
| Jökulsá í Fljótssdal       | 1991-1992 | 107,9                        | 227                            | 2,11 | 223                            | 2,07 | 5                              | 0,04  |
| samt. '90-'92              |           |                              |                                |      |                                |      | -88                            | -0,86 |

## 5. AFKOMA HOF SJÖKULS 1987-1992

Afkomumælingar á Hofsjökli byrjuðu jökulárið 1987-88 en jökulár er frá því að leysing er mæld að hausti (venjulega í september) þar til hún er mæld aftur næsta haust. Á þeim árum sem síðan eru liðin hefur árferði á jökli verið afar breytilegt (1. tafla).

Minnsta ákoma hefur verið um 2/3 af því sem mest hefur mælst en búast má við að þarna geti orðið helmingsmunur á ef miðað er við úrkomutölur frá Hveravöllum. Ákomunni er nokkuð mis-skipt á Hofsjökli. Hún mælist svipuð á norðanverðum jöklinum og á suðvesturhlíðinni og hefur haldið sig á bilinu 1300-2000 mm í vatnsgildi (úrkomu). Á Hofsjökli austanverðum (Þjórsárjökli) er hins vegar alltaf miklu meiri ákoma. Þar hefur hún í flestum árum verið vel yfir 1gildi 2000 mm úrkomu. Einnig hefur þess orðið vart án þess að beinum mælingum hafi verið komið við að mun minna sest af snjó á neðanverðan jökulinn á vatnasviði Blöndu en annars staðar.



2. MYND: Afkomumælingar á Hofsjökli 1988-92 (tákn). Leysing er táknud með „○“, afkoma með „+“ og ákoma með „△“. Heilar línur tákna meðaltal árunna 1988-90 og 1992. Árinu 1991 er sleppt við útreikning á meðaltali vegna afbrigðilegrar leysingar sem Hekluaska olli það ár.

Miklu minni munur er eftir svæðum á leysingu en ákomu á Hofsjökli. Leysing verður hlutfallslega því minni sem ákoma vetrarins á undan var meiri af því að þurr snjór byrjar á því að draga í sig leysingavatnið og þyngjast áður en hann hleypir leysingavatninu í gegn. Þannig verður leysing því minni sem ákoman er meiri að öðru jöfnu. Á sama veg verkar það að nýr snjór endurvarpar geislum betur en gamall. Af jöklinum bráðnar að meðaltali yfir sumarið tæplega 1000 til rúmlega 3000 mm að vatnsgildi eftir árferði og sveiflast leysing því mun meira en ákoman milli ára (2. mynd, 1. tafla). Leysingin reynist eins og búast mátti við mjög háð sumarhita. Þannig var leysingin minnst sumrin 1989 og 1992 en þá mældust jafnframt köldustu sumur á Hveravöllum þau ár sem afkomumælingarnar hafa staðið. Langmest mældist leysingin sumarið 1991 og reyndist sumarhiti á Hveravöllum þá jafnframt mestur eða 2,3 gráðum hærri en sumrin 1989 og 1992. Eins og vikið verður að á eftir má nota jöklamælingarnar til þess að koma tölum yfir orsakasambandið milli hita og jökulleysingar og reikna þannig út hvaða áhrif tiltekin hlýnun eða kölnun hefur á jökulleysingu.

Við samanburð á leysingu á jöklinum og afrennsli ána sem frá honum renna skýrt í ljós hve mismikil áhrif leysingin hefur. Við vatnshæðarmæli í Vestari-Jökulsá í Skagafirði er jökull á 13,8% vatnasviðsins. Þar hefur leysing á jöklinum sveiflast milli 15 og 35% af ársrennslinu á þeim árum sem mælingarnar á Sátujökli hafa staðið. Samsvarandi tölur fyrir Þjorsá við Norðlingaöldu þar sem jökull liggur á 21,3% vatnasviðsins eru 19 til 40%. Þessi breytileiki í jökulþættinum er líklega stærsti einstaki þátturinn sem veldur sveiflum milli ára í rennsli þessara áa.

Þau ár sem afkoma hefur verið mæld á Hofsjökli rýrnaði jökullinn mest um rúman metra að jafnaði yfir allan jökulinn en mest hefur hann bætt á sig rétt um einum metra. Þetta verða að teljast miklar sveiflur og má búast við að venjuleg sveifla frá jafnvægi sé umtalsvert minni.

Mest leysing á Hofsjökli mældist sumarið 1991 og var hún fjórfalt meiri en þegar minnst mældist en það var sumarið 1992. Verður að gera hér ofurlitla grein fyrir þessari aftakleysingu sem átti sér stað sumarið 1991. Þá mældist hlýrra sumar en nokkru sinni fyrr á Hveravöllum og m.a. var júlfránuður heilli gráðu heitari en sá sem næsthlýjastur var. Þetta er þó ekki öll sagan því Hekla gaus veturinn á undan og lagði öskuteppi yfir allan jökulinn. Þessi svarta slika, sem var vel innan við 1 mm á þykkt, dró mjög í sig geislahita eftir því sem hún kom fram undan nýsnævi sem á hana féll um veturinn. Það vildi svo til að á einum stað í tæplega 1500 m y.s. hafði öskuna skafið af jöklinum á smá flekkjum og var þar hægt að mæla beint hve mikil áhrif hún hafði á bráðnunina. Á skilum milli öskuflekkja og öskulausra var alls staðar brattur stallur um 2 m hár um haustið. Þetta samsvarar því að ígildi eins metra vatns hafi bráðnað þar aukalega. Yfirfært á jökulinn í heild, sem ekki er fjarri lagi, hefur hátt í 1 km<sup>3</sup> vatns leyst ofan á þá miklu bráðnun sem hlýindin ollu. Hefði öskulagið verið þykkara svo nokkru næmi hefði það eflaust haft talsverð einangrandi áhrif og þar með minnkað bráðnun. Nú mætti hugsa sér að hægt væri að auka leysinguna með „handafli“ með því að dreifa svörtu efni á jökulinn. Hugsum okkur að til þess væri notað litarefni með eðlisþyngdina 1 og að 0,1 mm þykkt lag af því dygði til verksins. Þá þyrfti 100.000 tonn til að þekja allan jökulinn.

Svo sérstakt sem sumarið 1991 var hvað leysingu varðar þá var sumarið eftir algjör andstæða. Um Jónsmessu kom hret og snjóaði svo hálandið varð alhvítt og jöklarnir þar með. Þá þegar var ljóst að leysing yrði með minnsta móti það sumarið nema eitthvað sérstakt kæmi til. Sumarið í heild varð í kaldara lagi og fleiri hret gerði með snjókomu á jökli. Með því að klæða jökulinn hvítu æ ofan í æ um sumarið jókst endurkast geislunar og bráðnun minnkaði gagnstætt því sem verið hafði sumarið áður með Hekluöskunni.

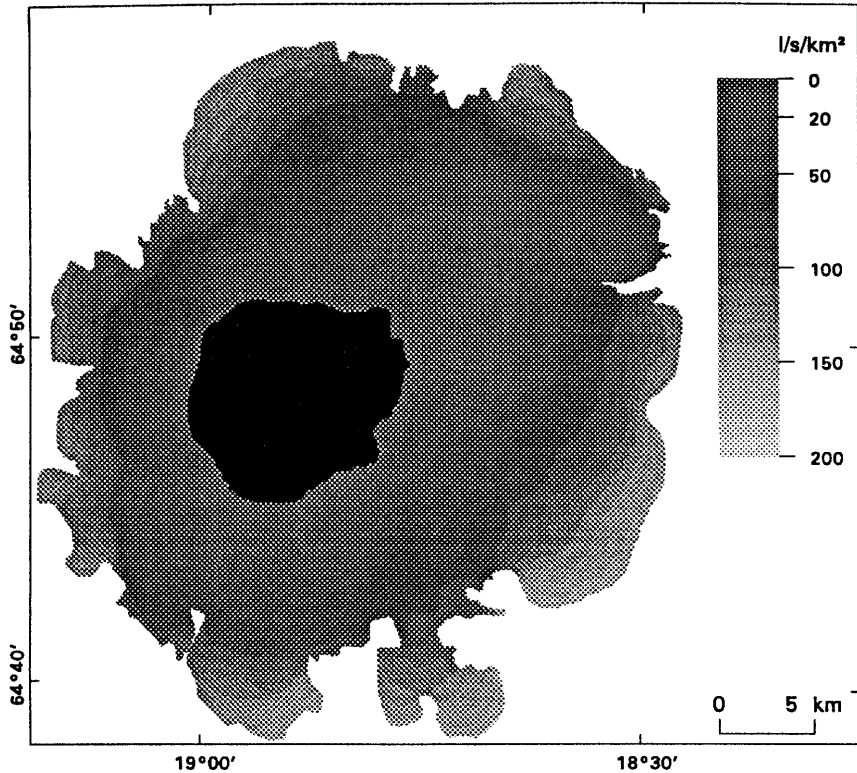
## 6. AFRENNSLI

Kort yfir sumarleysingu á Hofsjökli (meðaltal áranna 1988-90 og 1992) sýnir sumarleysingu reiknaða yfir í meðalafrennsli yfir árið í einingunni l/s/km<sup>2</sup> (3. mynd). Þess skal gætt að hér er leysingunni jafnað út á allt árið en hún fer að sjálfsögðu fram á þriðjung ársins þannig að afrennslistölurnar má reuna þrefalda og gilda þær þá aðeins yfir sumarmánuðina. Heita má að jökullinn sé afrennslislaus að vetrinum. Leysingin er einkum háð hita og þar með hæð yfir sjó og er kortið því mjög svipað korti af yfirborði Hofsjökuls. Ofarlega fellur meiri snjór en nær að bráða yfir sumarið og verður reiknað afrennsli sem svarar til sumarleysingar því núll efst á jöklinum. Heildarafrennsli sumarsins er nokkru meira en kortið sýnir vegna rigningar og vegna þess að snjór sem fellur að sumarlagi dregst frá við útreikning á sumarleysingu.

## 7. RENNSLISLÍKÖN

Sem dæmi um rennslislíkan fyrir jökulá má nefna líkan af Jökulsá í Fljótsdal. Fyrir liggur langtímaröð um rennsli við Hól í Fljótsdal og skammtíamælingar við Eyjabakka, en þar er nánast eingöngu jökulvatn. Berggrunnur er þéttur þannig að á grundvelli þessara gagna er nokkuð auðvelt að meta jökulþátt rennslisins án beinna mælinga á ákomu og leysingu. Öðru máli gegnir með rennslislíkan fyrir Jökulsá á Fjöllum en þar hefur reynst erfitt að koma saman líkani með þeim mælingum sem liggja fyrir um rennsli og veðurfar (Vatnaskil, 1993). Langmestur hluti rennslisins er kominn frá jökli enda óvísða á landinu jafn úrkomusnautt og á hálandinu norðan Vatnajökuls. Hluti leysingavatns frá jöklinum leitar niður í grunnvatn enda berggrunnur mjög gljúpur á þessu svæði og hefur reynst vandkvæðum bundið að fella niðurstöður rennslislíkans að mældu rennsli árinna. Úr þessari óvissu myndi draga ef leysing á Dyngju- og Brúarjökli yrði mæld og enn frekar ef ákoman yrði kortlögð líka og þar með breyting úrkomu með hæð.

Ákomumælingarnar eru jafnframt úrkomumælingar og mjög nákvæmar sem slíkar. Gefa þær skýrt til kynna hvernig úrkoma breytist með hæð. Efst á jöklinum nær snjólagið iðulega ekki að



3. MYND: Dreifing sumarleysingar á Hofsjökli (meðaltal áranna 1988-90 og 1992). Leysingin er reiknuð yfir í meðalafrennsli yfir árið. Heildarafrennsli sumarsins er nokkru meira en kortið sýnir vegna rigningar og vegna þess að snjór sem fellur að sumarlagi dregst frá við útreikning á sumarleysingu.

Þiðna í gegn heldur bætir í sig og á allri úrkomu sem þar fellur. Þar fæst heildarúrkoma ársins með því að mæla þykkt og eðlisþyngd snjólagsins. Efst á Hofsjökli mældist úrkomun frá 11. september 1991 til 21. september 1992 5300 mm vatns. Betri úrkomumæli verður vart á kosið. Er það mikill fengur í rennislífkönnum sem notuð eru við virkjanarannsóknir.

## 8. LÍKANREIKNINGAR AF AFKOMU JÖKLA

Mælingar á afkomu jökla eru eðli máls samkvæmt einungis frá fáum mælistöðum á hverjum jökli og ná alla jafna yfir tiltölulega stutt tímabil. Til þess að meta meðaltal eða breytileika afkomu á heilum vatnasviðum á jökli yfir langt árabil þarf að meta afkomuna yfir stærra svæði og lengra tímabil en afkomumælingarnar ná til. Reiknilíkön af jökulafkomu eru notuð í þessum tilgangi. Líkönin byggjast á því sambandi milli jökulafkomu og veðurfars sem jöklamælingarnar hafa leitt í ljós. Jökulafkoman er reiknuð á grundvelli veðurathugana, oftast hita og úrkomu, og má nota niðurstöðurnar til þess að fylla í göt í jöklamælingunum, reikna jökulafkomu ára utan tímabilsins sem jöklamælingarnar spanna, meta þann breytileika í jökulafrennsli sem svarar til tiltekens breytileika í veðurfari og spá fyrir um afleiðingar hugsanlegra veðurfarsbreytinga á afkomu jökla.

Líkön af afkomu jökla eru til af nokkrum gerðum og nefnast þær helstu *orkujafnvægislíkön* og *gráðudagalíkön*. Í orkujafnvægislíkönnum er orkubúskapur yfirborðs jökulsins reiknaður út frá inngæislun (að teknu tilliti til endurkasts), útgeislun, varmaflæði og orkuskiptum í sambandi við þéttingu eða uppgufun vatns. Þessi líkön krefjast mjög umfangsmikilla veðurathugana og eru yfirleitt notuð í sambandi við sérhæfðar rannsóknir sem beinast að einstökum ferlum sem máli

skipta í sambandi við orkubúskap jökulyfirborðsins. Þau hafa einnig verið notuð við almennar rannsóknir á afkomu jökla og viðbrögðum jökla við breytingum á afkomunni. Gráðudagalskön eru mun einfaldari en orkujafnvægislökön og byggjast á mældu sambandi milli jökulleysingar og hita. Gráðudagalskön eru oft notuð við rannsóknir á viðbrögðum jökla við veðurfarsbreytingum þar sem reynt er að einfalda sambandið milli veðurfars og jökulafkomu eins og kostur er.

Undanfarið ár hefur verið þróað gráðudagalskan til útreikninga á jökulafkomu í samvinnu Orkustofnunar og hliðstæðrar stofnunar í Noregi. Markmiðið með þróun lskansins er að meta áhrif hugsanlegrar hlýnunar af völdum gróðurhúsaáhrifa á jökulafkomu á Norðurlöndum. Þróun lskansins er hluti af samnorrænu rannsóknaverkefni sem meta á áhrif þessarar hlýnunar á vatnafar og orkuframleiðslu á Norðurlöndum.

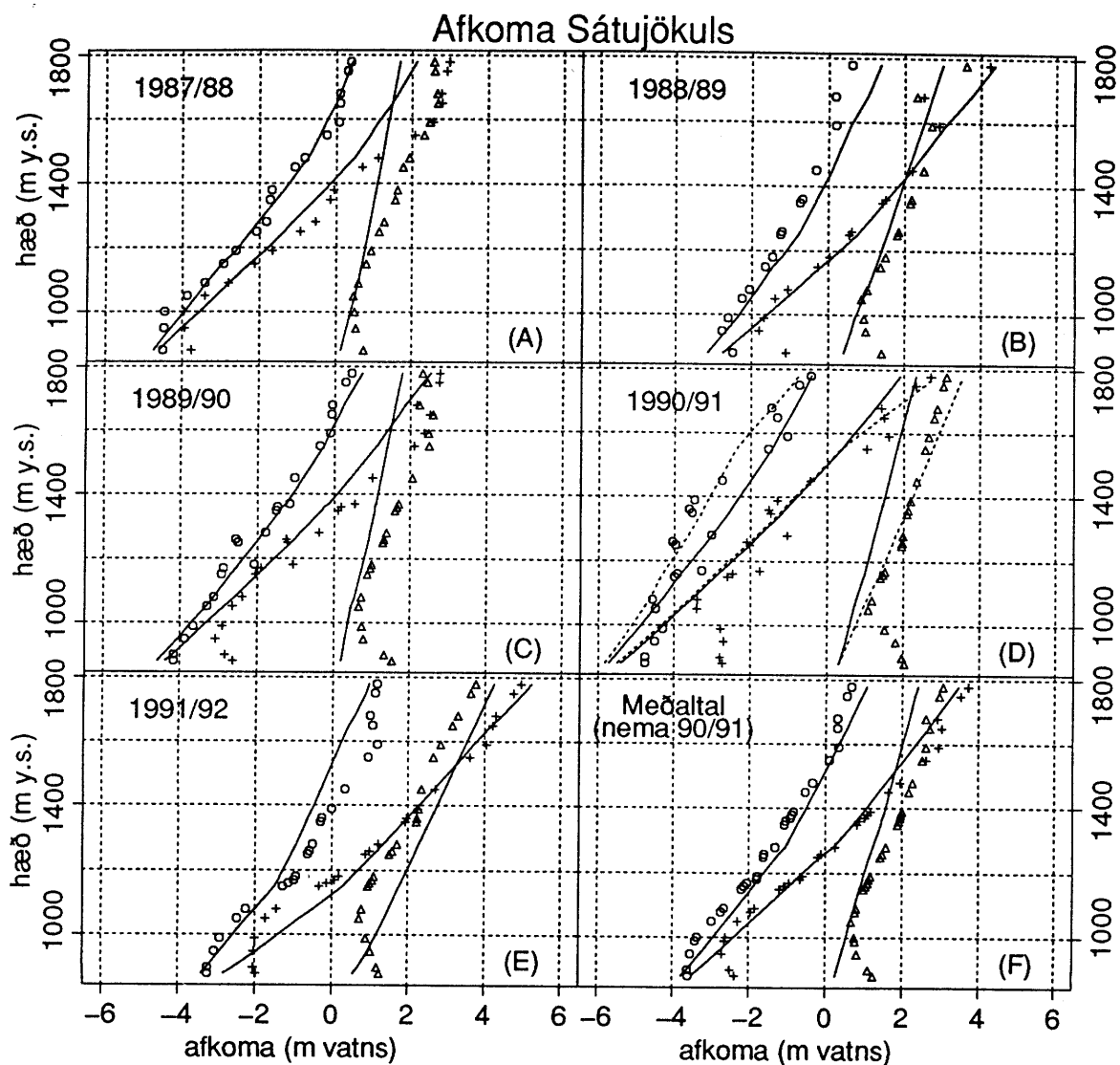
Afkomulskanið byggist á gráðudagalskönum sem þróuð hafa verið til vatnafræðilegra lskanreikninga á undanförmum árum og áratugum í Svíþjóð, Danmörku, Noregi og Íslandi. Lskanið reiknar jökulafkomu út frá mælingum á hita og úrkomu á nálægri veðurstöð. Það gerir ráð fyrir að hiti falli línulega með hæð yfir sjó og að úrkoma vaxi línulega með hæð. Lskanið er kvarðað sem kallað er með því að fella niðurstöður reikninganna að jöklamælingum nokkurra ára. Með kvörðuninni fæst mat á gráðudagastuðlum sem segja til um það hversu mikið leysir á dag af snjó eða ís fyrir hverja gráðu sem hiti er yfir frostmarki. Einnig er metinn hitastigull og úrkomustigull með hæð.

Lskanið hefur nýlega verið prófað á Sátujökli í Hofsjökli og Nigardsbreen í Suður-Noregi. Fyrir Hofsjökul voru veðurgögn frá Hveravöllum notuð við reikningana en veðurgögn frá veðurstöð í næsta nágrenni jökulsins voru notuð fyrir Nigardsbreen. Niðurstöður kvörðunarinnar reyndust í nokkuð góðu samræmi við þá stuðla sem notaðir hafa verið við vatnafræðilega lskanreikninga hér á landi og í Noregi. Á 4. mynd er sýnd mæld og reiknuð vetrarákoma, sumarleysing og ársafkoma sem fall af hæð yfir sjó fyrir þessa jökla. Lskanið reynist skýra breytingu leysingar með hæð á sannfærandi hátt. Einnig skýrir það um 75% af breytileika leysingar milli ára fyrir Sátujökul og rúmlega 50% fyrir Nigardsbreen. Þegar lskanið hefur verið kvarðað fyrir ákveðinn jökul má nota það til þess að reikna afkomu jökulsins aftur í tímann svo langt sem veðurathuganir ná. Þetta má nota til þess að meta hve stór þáttur breytingar í jökulafrennsli hafa verið í þeim sveiflum sem mælst hafa á rennsli milli tímabila og kemur í góðar þarfir við túlkun á vatnamælingum fyrri ára.

Lökön af þessum toga er hugsanlegt að nota til þess að nýta betur mannafla og tækjakost þegar fylgst er samfellt með afkomu jökla yfir margra ára tímabil. Þá yrðu fyrstu ár mælinganna á hverjum jökli notuð til þess að kvarða lskan af jöklinum en dregið úr umfangi mælinganna þegar frá líður og lskanniðurstöður notaðar til þess að fylla í eyðurnar. Þannig mætti smám saman fjölga jöklum sem fylgst er með án þess að fyrirhöfn eða kostnaður ykist að sama skapi. Mælingar grænlenku jarðfræðistofnunarinnar á jökulafkomu á Grænlandi hafa verið skipulagðar með þessum hætti (Olesen og Braithwaite, 1989).

## 9. HLÝNUN AF VÖLDUM GRÓÐURHÚSAÁHRIFA

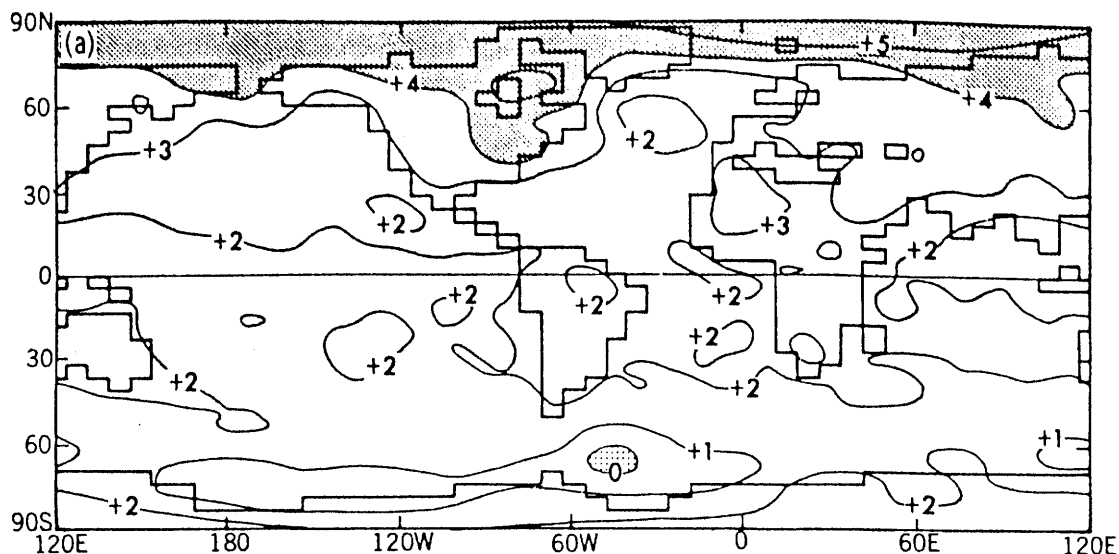
Hlýnandi loftslag af völdum gróðurhúsaáhrifa hefur verið mikið í fréttum síðustu ár. Margir veðurfræðingar „spá“ því að það muni hlýna um u.þ.b. 0,3 °C á áratug að meðaltali yfir jörðina á næstu ártugum (IPCC, 1992). Á 5. mynd er sýnd dreifing hlýnunar yfir jörðina skv. veðurfarslökani rannsóknarstofnunar í Bandaríkjunum, miðað við að styrkur CO<sub>2</sub> í andrúmsloftinu aukist um 1% á ári. Myndin sýnir hlýnunina 70 árum eftir að reikningar hefjast. Á myndinni sést að meginlönd hlýna meira en hafsvæði. Heimskautaslóðir, sérstaklega á norðurhveli, hlýna einnig meira en svæði nær miðbaugi. Hlýnun í grennd við Ísland er háð mikilli óvissu og líklega er sú óvissa mun meiri en fyrir önnur svæði jarðarinnar.



4. MYND: Mæld afkoma (tákni) og reiknuð afkoma (heildregnar línur) Sátujökuls árin 1988-92. Ákoma er táknuð með „ $\Delta$ “, leysing með „ $\circ$ “ og afkoma með „+“. Notuð er sama kvörðun á líkaninu fyrir öll árin. Líkanniðurstöður falla illa að mælingum á leysingu sumarið 1991. Ef gráðudagsstuðull fyrir snjó er aukinn til þess að taka tillit til áhrifa ösku á yfirborði jökulsins verða niðurstöður í betra samræmi við mælingar (slitnar línur).

Áhrif vaxandi gróðurhúsaáhrifa á úrkomu eru enn óvissari en hlýnunin. Þó er talið að úrkoma muni aukast eitthvað að meðaltali samfara hlýnun, e.t.v. um 5% fyrir hverja  $^{\circ}\text{C}$  sem hlýnar, en aukningin verður líklega mjög breytileg í tíma og milli svæða.

Nokkurt bakslag hefur komið í þessar kenningar á allra síðustu árum vegna þess að rannsóknir hafa sýnt að hlýnun síðustu 20 til 30 árin hefur reynst mun minni en kenningar um gróðurhúsaáhrif sögðu fyrir. Einnig reyndist árið 1992 mun kaldara en árin á undan og var það vatn á myllu efasemdarmanna um hlýnun af völdum gróðurhúsaáhrifa. Ljóst er að náttúrulegur breytileiki veðurfars á jörðinni er svo mikill að ekki er að búast við því að úr því fáist skorið með fullri vissu



5. MYND: Dreifing hlýnunar skv. veðurfarslíkani GFDL rannsóknarstofnunarinnar í Bandaríkjunum. Reikningarnir miðast við að styrkur CO<sub>2</sub> í andrúmsloftinu aukist um 1% á ári og sýnir myndin hlýnunina u.þ.b. 70 árum eftir að reikningar hefjast (Manabe og fleiri, 1991).

hvort hlýnar umtalsvert vegna gróðurhúsaáhrifa fyrr en að minnsta kosti að 10 til 20 árum liðnum. Nefna má að brennisteins- og rykmengun frá iðnaði er talin hafa haft svo mikil kælandi áhrif á síðustu áratugum að það geti hafa vegið upp hlýnun vegna gróðurhúsaáhrifa á sama tímabili að verulegu leyti. Þessi mengun mun hins vegar ekki aukast verulega á næstu árum. Einnig er talið að skýra megi fremur kalt veðurlag ársins 1992 með eldgosinu í Pinatubo á árinu 1991. Ef þessar skýringar eru réttar má búast við því að hlýnun vegna gróðurhúsaáhrifa verði umtalsverð á næstu áratugum en það verður engu að síður að teljast mikilli óvissu undirorpið.

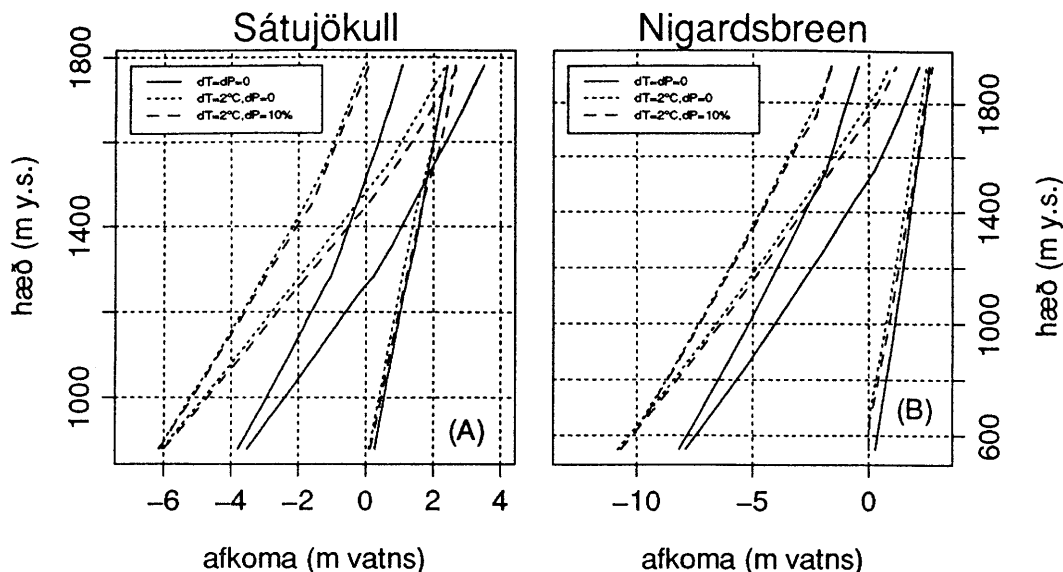
## 10. AFLEIÐINGAR HLÝNUNAR FYRIR AFKOMU JÖKLA

Ef veður hlýnar í samræmi við það sem líkanreikningar benda til þá mun það hafa mjög mikil áhrif á vatnafar ekki síst hér á Íslandi þar sem áhrif jökla á vatnafar eru mikil. Afkomulíkan má nota til þess að meta hvaða afleiðingar tiltekin hlýnun mun hafa fyrir afkomu jökuls sem líkanið hefur verið kvarðað fyrir.

Spyrja má hvort verjandi sé að beita líkani sem kvarðað hefur verið fyrir núverandi veðurfarsaðstæður á allt annað veðurfar í framtíðinni. Því er til að svara að jöklar spanna yfirleitt breitt svið í afkomu, bæði frá ári til árs en einnig og ekki síður með hæð. Þannig eru sveiflur í sumarihita árunna 1988-1992, sem mælingar Orkustofnunar á Sátujökli hafa staðið rúmar 2 °C, og mismunur í meðalhita ársins frá því neðst á leysingarsvæði jökulsins upp á efsta hluta afkomusvæðisins er ekki minni en 5 °C. Þetta er mun breiðara svið en hlýnunin sem búist er við á næstu áratugum. Hitamunur milli ára og með hæð kemur með eðlilegum hætti fram í niðurstöðum líkansins fyrir þau ár sem mælingar hafa staðir. Þess vegna er ekki fráleitt að ætla að líkanið megi nota til þess að meta áhrif umtalsverðrar hlýnunar á jökulleysingu þegar fram líða stundir.

Á 6. mynd eru sýndar reiknaðar afkomubreytingar af völdum 2 °C hlýnunar fyrir Sátujökul og Nigardsbreen. Það svarar til að veðurfar hlýni um 0,3 °C á áratug í 70 ár. Afkomubreytingarnar eru miðaðar við meðaltal árunna sem mælingar hafa staðið á hvorum jökli. Niðurstöður eru sýndar bæði fyrir óbreytta úrkomu og fyrir 10% aukningu á úrkomu. Leysing eykst mjög mikið á báð-



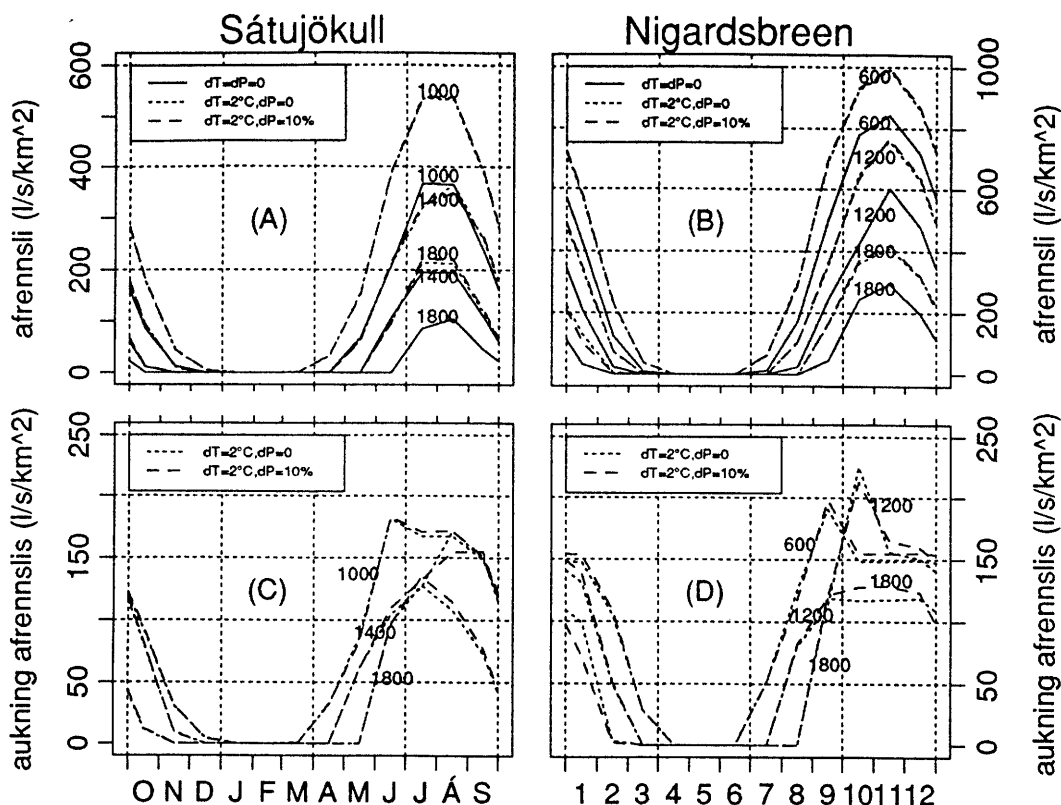


6. MYND: Reiknaðar afkomubreytingar af völdum 2 °C hlýnunar fyrir Sátujökul og Nigardsbreen.

um jöklunum eins og búast mátti við en ákoman breytist tiltölulega lítið. Aukning leysingar er frá nálægt 2500 mm vatns á ári neðst á leysingarsvæðinu niður í rúmlega 1000 mm vatns á ári efst á ákomusvæðinu. Jafnvægislína hækkar um u.þ.b. 200 m fyrir Sátujökul og um u.þ.b. 250 m fyrir Nigardsbreen. Úrkomuaukning um 10% virðist breyta litlu um afkomu jöklanna.

Til þess að meta vatnafræðilegar afleiðingar hlýnunar var reiknað jökulafrennsli sem svarar til hlýnunarinnar sem lýst er hér að framan. Dreifing afrennslis innan ársins skiptir miklu máli fyrir nýtingu þess í sambandi við vatnsaflsvirkjanir og þarf því að huga bæði að stærð og dreifingu afrennslisbreytinganna. Á 7. mynd er sýnt reiknað heildarafrennsli (bæði leysing og rigning) frá jökli í einingunni l/s/km<sup>2</sup> fyrir nokkrar mismunandi hæðir yfir sjó sem fall af mánuði innan ársins. Efri hluti myndarinnar sýnir afrennslið fyrir og eftir hlýnunina. Neðri hluti myndarinnar sýnir afrennslisaukninguna af völdum hlýnunarinnar. Sjá má að jökulafrennsli hefst um mánuði fyrr á vorin og stendur lengra fram á haustið vegna hlýnunarinnar. Aukningin er á stærðarþrepinu 100 l/s/km<sup>2</sup> yfir sumarmánuðina fyrir Hofsjökul, mest neðst á jöklinum og minna eftir því sem ofar dregur. Að meðaltali yfir jökulinn er afrennslisaukningin ekki undir 50 l/s/km<sup>2</sup>. Það er ekki fjarri meðalafrennsli landsins alls og nærri meðaltali sumarleysingar á Hofsjökli samkvæmt mælingum. Afrennslisaukningin svarar til um 40-50 m<sup>3</sup>/s að meðaltali yfir árið í rennsli jökuláa sem falla frá Hofsjökli.

Ljóst er að hlýnun vegna vaxandi gróðurhúsaáhrifa mun hafa í för með sér miklar breytingar á íslensku vatnafari ef hlýnunin verður jafn mikil og margt bendir til. Ekki er ólíklegt að breytingar á vatnafari á næstu 40 árum verði mun meiri en þær breytingar sem mælst hafa á þessari öld, en þær hafa verið mjög miklar, ekki síst frá hlýju árunum milli 1930 og 1965 annars vegar til köldu árunna milli 1965 og 1985 hins vegar. Það er því full ástæða fyrir Íslendinga að fylgjast vel með rannsóknum á gróðurhúsaáhrifum á næstu árum. Enn sem komið er verða niðurstöðurnar að teljast svo óvissar að ekki er grundvöllur fyrir því að byggja hönnun mannvirkja eða aðrar framkvæmdir á þeim hugmyndum sem fram hafa komið um líklegustu hlýnun. Hins vegar er full ástæða til þess að hönnuðir hafi í huga möguleikann á umtalsverðum breytingum frá meðaltali síðustu áratuga og hagi hönnun þannig að hægt sé með sem minnstum tilkostnaði að bregðast við breyttum forsendum þegar niðurstöður rannsókna á gróðurhúsaáhrifum verða ótvíræðar.



7. MYND: Reiknað heildarafrennsli Sátujökuls og Nigardsbreen og aukning þess af völdum 2 °C hlýnunar. Afrennslið er sýnt sem fall af tíma innan ársins. Fyrir Sátujökul er tími sýndur í almanaksmánuðum en fyrir Nigardsbreen er tími talinn í mánuðum frá 15. september ár hvert.

## 11. FRAMTÍÐARHORFUR

Afkomumælingar Orkustofnunar á Hofsjökli hafa nú staðið í 5 ár. Mælingarnar hafa sýnt dreifingu ákomu og leysingar á jöklinum. Komið hefur í ljós mikil fylgni milli leysingar og sum-arhita og má nota hana til þess að meta breytingar í jökulafrennsli svo langt aftur sem veðurat-huganir á Hveravöllum ná. Brýnt er að halda áfram mælingunum þannig að fáið áreiðanlegar mæliraðir yfir lengra tímabil. Þannig verður mælingum á Hofsjökli haldið áfram og einnig mæl-ingum á Þrándarjökli og Eyjabakkajökli. Framvegis verður lögð meiri áhersla á túlkun og úr-vinnslu mælinganna en unnt var á fyrstu árunum þegar megináhersla var lögð á að afla frum-gagna. Reikningar með afkomulfkönnum verða notaðir í auknum mæli, bæði við úrvinnslu mæl-inganna auk þess sem mælingarnar sjálfar verða skipulagðar með tilliti til þeirra möguleika sem reikningar með afkomulfkönnum bjóða upp á.

Auk ákomumælinga í Grímsvötnum eru nokkrar slitróttar mælingar til héðan og þaðan af Vatnajökli. Æskilegt væri að stunda þær samfelt á einhverjum stöðum svo að nota megi niður-stöðurnar til reikninga. Einkum á þetta við um norðan- og vestanverðan jökulinn en stærstur hluti helstu vatnsfalla á Norð-Austurlandi og í Vestur-Skaftafellssýslu er kominn beint eða óbeint frá jökli.

Jöklamælingar eru dýrar sem og aðrar vatnamælingar á hálendinu. Hins vegar er eftir miklu að slægjast með beinum mælingum á hálendinu vegna þess að upplýsingar um vatnafar þar eru mun mikilvægari fyrir hönnun virkjana en upplýsingar af láglendi. Með slíkum mælingum er

leitað svara við spurningum um breytingar í rennsli milli tímabila sem samsvara hundruðum GWh/a á góðum virkjunarstöðum. Í jöklum landsins er fólgin mikill orkuforði. Þekking á eðli hans er nauðsynleg til þess að okkur farist nýting hans vel úr hendi.

## 12. HEIMILDIR

- H. W:son Ahlmann og Sigurður Þórarinnsson, 1937-43. Vatnajökull. Scientific results of the Swedish-Icelandic investigations 1936-37-38. *Geograf. Annaler*, 19, 20, 21, 22, 25.
- Helgi Björnsson, 1985. The winter balance in Grímsvötn 1954-1985 (Vetrarafkoma í Grímsvötnum 1954-1985). *Jökull* 35, 107-109.
- IPCC, 1992. Climate change 1992: *The supplementary report to the IPCC scientific assessment. ritsj.* J. T. Houghton, B. A. Callander og S. K. Varney. Cambridge University Press, Cambridge. 200 bls.
- S. Manabe, R. J. Stouffer, M. J. Spelman og K. Bryan, 1991. Transient responses of a coupled ocean-atmosphere model to gradual changes of atmospheric CO<sub>2</sub>. Part I: annual mean response. *Journal of Climate*, 4, 785-818.
- Oddur Sigurðsson, 1988. Áætluð verkefni í jöklarannsóknunum Orkustofnunar. *Jökull*, 38, 88-89.
- Oddur Sigurðsson, 1989. Afkoma Hofsjökuls 1987-1988. OS-89005/VOD-02 B, Orkustofnun, 1989, 10 bls.
- Oddur Sigurðsson, 1990. Áætlun um mælingar á afkomu íslenskra jökla. *Vatnið og landið. Vatnafræðiráðstefna, október 1987*, 197-200. *ritstj.* Guttormur Sigbjarnarson. Orkustofnun, Reykjavík, 307 bls.
- Oddur Sigurðsson, 1991. Afkoma Hofsjökuls 1988-1989. OS-91052/VOD-08 B, Orkustofnun, 1991, 19 bls.
- Ole B. Olesen og Roger J. Braithwaite, 1989. *Glacier Fluctuations and Climate Change*, 207-218. *ritstj.* J. Oerlemans. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 417 bls.
- Vatnaskil, 1993. Austulandsvirkjun. Rennslislíkan I. Reykjavík. 31 bls.