



ORKUSTOFNUN
Jarðhitadeild

Árangur jarðhitarannsókna

Grein lögð fram á málþingi SÍH og OS 21. janúar 1993

Valgarður Stefánsson
Guðni Axelsson
Benedikt Steingrímsson

OS-93003/JHD-01

Janúar 1993



ORKUSTOFNUN
Grensásvegur 9, 108 Reykjavík

Verknr. 570 200

Árangur jarðhitarannsókna

Grein lögð fram á málþingi SÍH og OS 21. janúar 1993

Valgarður Stefánsson
Guðni Axelsson
Benedikt Steingrímsson

OS-93003/JHD-01

Janúar 1993

ISBN 9979-827-14-9

ÁRANGUR JARÐHITARANNSÓKNA

Valgarður Stefánsson
Guðni Axelsson
Benedikt Steingrímsson

ORKUSTOFNUN

Inngangur

Umfjöllun um jarðhita á Íslandi hefst oft með tilvísun í Snorra Sturluson og laug þá sem hann létt gera í Reykholti. Sjaldnar er vitnað til þess að fyrstu jarðhitaboranir á Íslandi voru gerðar á Laugarnessvæðinu í ágústmánuði árið 1755. Það voru þeir Eggert Ólafsson og Bjarni Pálsson sem stóðu að þeim borunum og notuðu jarðnafar Konunglega Danska Vísindafélagsins til verksins. Ári síðar, 1756, boruðu þeir Eggert og Bjarni í Krísvík og þar fékkst fyrsta blásandi gufuhola landsins, ef ekki í heiminum.

Þróun jarðhitamála á Íslandi var nokkuð tilviljunarkennd í byrjun, en eftir að jarðhitinn varð önnur helsta orkulind landsins, hefur þróunin verið markviss.

Íslenska þjóðin hefur lagt til mikið fjármagn og mikla fyrirhöfn í jarðhitarannsóknir, en uppskeran hefur líka verið ríkuleg. Orkulega séð er jarðhitinn um 45% af vergri orkunotkun þjóðarinnar (Guðmundur Pálason 1992), og er þetta hærra hlutfall en í nokkru öðru landi.

Þýðing jarðhitans fyrir Íslendinga kemur líklega best í ljós ef við hugsum okkur að jarðhitinn væri ekki fyrir hendi. Orkunotkun til húshitunar er nú um 4500 GWh. Ef við notuðum olíu eingöngu eða raforku eingöngu til húshitunar hefði kostnaður neytanda á árinu 1991 verið:

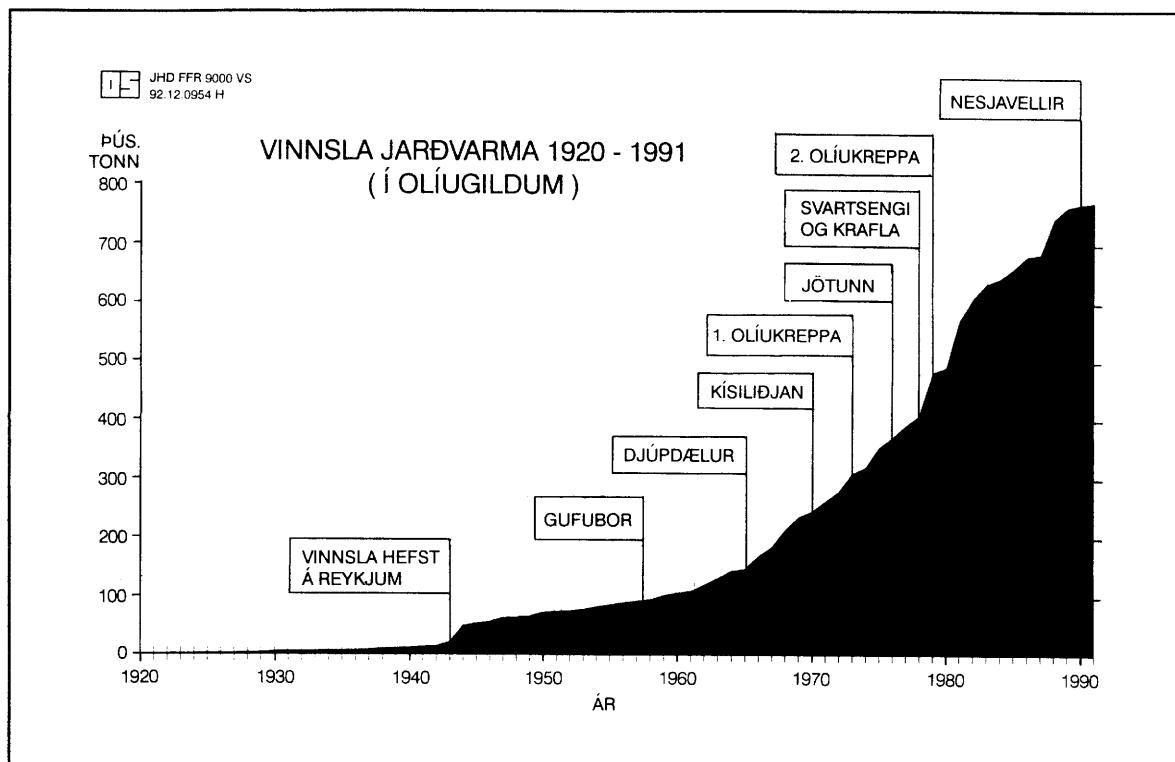
Heildarkostnaður með olíu	12,0 milljarðar
Heildarkostnaður með niðurgreiddu rafmagni	11,2 miljarðar
Raforkukostnaður án niðurgreiðslna	14,8 milljarðar
Raunkostnaður	5,5 milljarðar

Árlegur sparnaður neytenda af því að nota jarðhita til húshitunar í stað olíu eða raforku er því á bilinu 6-9 milljarðar. Til samanburðar má geta þess að samanlagt útflutningsverðmæti áls og járnblendis var á árinu 1991 um 10 milljarðar króna.

Þessi mikli sparnaður kom ekki fram í einni svipan heldur er þetta árangur áratuga þróunar. Í þessari grein verður vikið að nokkrum dæmum sem hafa stuðlað að þessari þróun.

Próun íslenska jarðhitaiðnaðarins

Nýting jarðhita á Íslandi hefst ekki fyrr en snemma á þessari öld. Mynd 1 sýnir



Mynd 1. Nýting jarðhita á Íslandi á árunum 1920-1991.

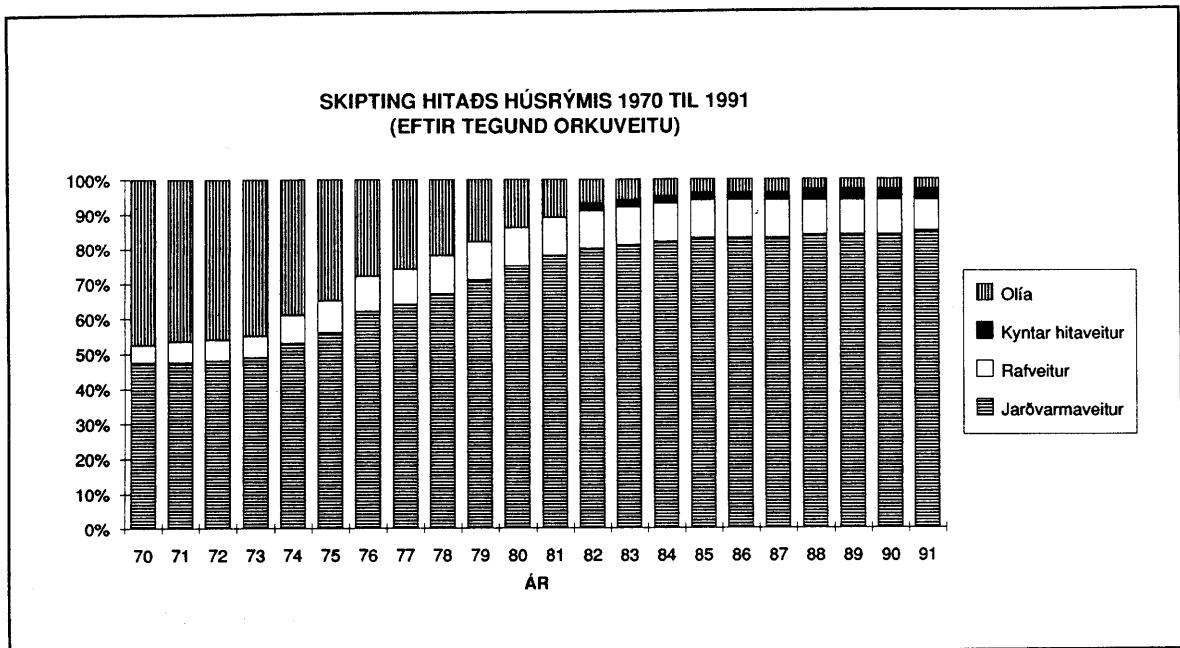
jarðhitankunina á landinu á árabilinu 1920-1991. Nýtingin byrjar hægt, en stærsta stökkbreytingin í allri jarðhitasögu þjóðarinnar er tilkoma hitaveitu frá Reykjunum í Mosfellssveit til Reykjavíkur.

Þó að bortækni við jarðhitaboranir taki stökkbreytingum með komu Gufubors 1957, fer þeirra áhrifa ekki að gæta fyrr en notkun djúpdæla verður almenn hjá Hitaveitu Reykjavíkur um 1965. Samfara þessu gerir Þorsteinn Thorsteinsson (Þorsteinn Thorsteinsson og Jónas Elíasson 1970) forðafræðilega úttekt á Laugarnessvæðinu, og voru niðurstöðurnar á þá leið að hægt væri að auka vinnsluna verulega með því að nota djúpdælur. Á þessum árum var hröð aukning í jarðhitanytingu enda fóru þá saman samvirkandi þættir:

- * ný bortækni
- * ný vinnsluaðferð
- * brautryðjandastarf á sviði jarðhitaforðafræði.

Í kjölfar fyrstu olíukreppunnar 1973 er gert mikið átak til að auka notkun jarðhita á kostnað olíu til upphitunar. Þetta átak, hitaveituvæðingin, sést vel á mynd 2, sem sýnir skiptingu hitaðs húsrýmis landsmanna eftir tegund orkuveitu.

Aukningin í jarðhitankun á árunum 1973 til 1980 er að miklu leyti árangur hitaveituvæðingarinnar, en bæði Svartsengi og Krafla taka einnig til starfa á þessum árum (mynd 1).



Mynd 2. Skipting hitaðs húsrýmis landsmanna eftir tegund orkuveitu. Árleg gildi tímabilið 1970-1991.

Forsendur árangurs

Pegar kemur að því að selja einhverja vöru eru það einkum tvö atriði, sem skipta meginmáli fyrir árangur. Þessi atriði eru:

- * Markaðshlutdeild
- * Gæði og verð vörunnar

Ef jarðhitinn er skoðaður í þessu ljósi er það fyrst og fremst

- * jarðhitaleit

sem stuðlar að því að auka markaðshlutdeild jarðhitans. Nú er staðan sú að 85% af húsrými landsmanna er hitað með jarðhita. Að ná þessum síðustu 15% markaðsins verður erfitt vegna þess að nýting jarðhita verður að vera tiltölulega nálægt þeim stað þar sem jarðhitinn er unnninn, og búsetudreifingin í landinu tekur lítið mið af því hvar á landinu er hægt að vinna jarðhita. Fólksflutningar innanlands hafa þó verið hagstæðir fyrir jarðhitánýtingu vegna þess að fólkis hefur fjölgæð á hitaveitusvæðum en fækkað á rafhitunarsvæðum.

Ýmsir þættir jarðhitarannsóka stuðla bæði að því að bæta gæði og verð jarðhitans. Hér verður

þessum atriðum skipt í þrjá hópa:

- * Bortækni og borholurannsóknir
- * Vinnslutækni
- * Forðafræðilegur rekstur jarðhitakerfis

Á meðan á hitaveituvæðingunni stóð, á árunum 1973-1980, var árangur jarðhitaleitar mjög greinilegur, en einkenni síðasta áratugs eru frekar þau að bæta rekstur jarðhitavinnslunnar á grundvelli forðafræðirannsókna og að gera jarðhitann ódýrari til langstíma litið fyrir notendur. Á áratug hitaveituvæðingarinnar voru menn í kapphlæpi við tímann við að koma hitaveitunum í gagnið, og gáfu sér ekki alltaf tíma til þess að hugsa fyrir öllu. Eftir að um hefur hægst hafa menn farið að huga betur að því sem menn hafa í höndunum og koma málum svo fyrir að jarðhitanytingin verði gerð á sem skynsamlegastan hátt. Menn hafa gert sér ljóst að orkuforði jarðhitakerfanna er endanlegur, og að það er eðli jarðhitakerfa að vinnslugetan minnkar með tíma vegna niðurdráttar eða kólnunar. Á sama tíma eykst eftirspurnin eftir heitu vatni ár frá ári. Hitaveitumar þurfa því að haga vinnslunni þannig að nýting jarðhitakerfisins verði sem hagkvæmust til langstíma litið og að hægt sé að tryggja nægt vatn vegna aukinnar eftirspurnar. Eðlileg vinnsluaukning hjá starfandi hitaveitum er orðinn stærri þáttur í aukningunni á jarðhitaneftirspurnum landsmanna heldur en sí aukning sem fæst við jarðhitaleit fyrir nýjar hitaveitur. Þessar viðhalds- og rekstraraðgerðir hjá starfandi hitaveitum hafa því miklu meiri áhrif á heildarjarðhitaneftirspurnum heldur en jarðhitaleit á svæðum þar sem jarðhiti er ekki notaður núna.

Nokkur þróunarverkefni

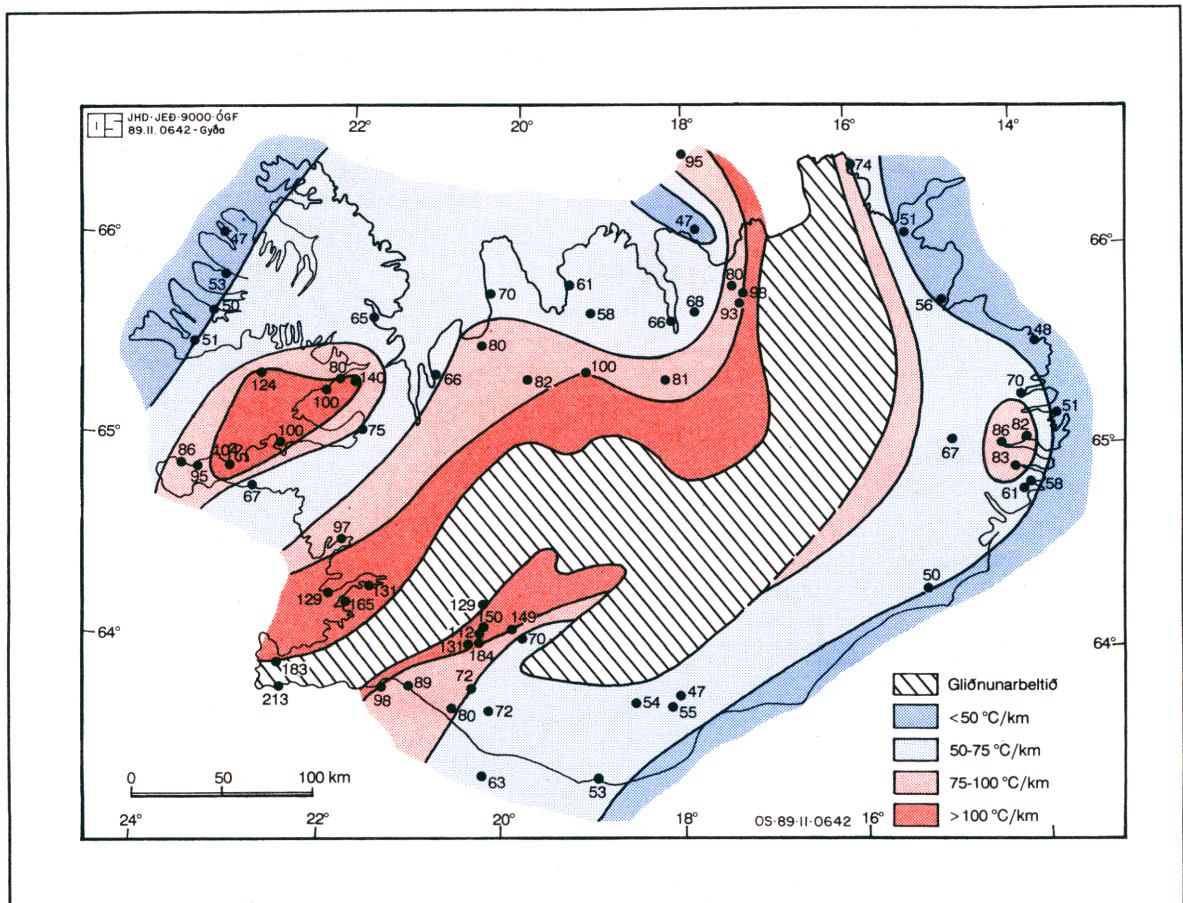
Í þessum kafla verða rakin nokkur þróunarverkefni, sem augljóslega hafa skilað árangri fyrir jarðhitanytingu í landinu. Listinn yfir slík verkefni er mjög langur og er því aðeins stiklað á stóru hér. Flokkunin hér að neðan:

- * Jarðhitaleit
- * Bortækni og borholurannsóknir
- * Vinnslutækni
- * Forðafræðilegur rekstur jarðhitakerfa

verður notuð til þess að auðvelda framsetninguna, en einnig til þess að sýna fram á að þróunarverkin spanna öll svið jarðhitaneftirspurnum. Í sumum tilvikum getur þó sama þróunarverkið haft áhrif á mörgum sviðum jarðhitaneftirspurnum og jarðhitanytingum.

Jarðhitaleit

Hitastigulsboranir. Forsenda þess að finna jarðhita er að skilja eðli jarðhitans og hafa einhverja hugmynd um hvar eigi að leita. Viss hluti jarðhitaneftirspurnum fer því í það að reyna að skilja eðli jarðhitans betur. Einn þessara þátta er að kortleggja hitadreifinguna í jarðskorpunni undir Íslandi. Boraðar eru rannsóknarholur í þétt berg utan jarðhitasvæða og athugað hvernig hitinn eykst með dýpi. Með þessu fæst svokallað hitastigulkort af landinu eins og sýnt er á mynd 3. Megindrættirnir í þessari mynd eru að hitastigullinn er hæstur við

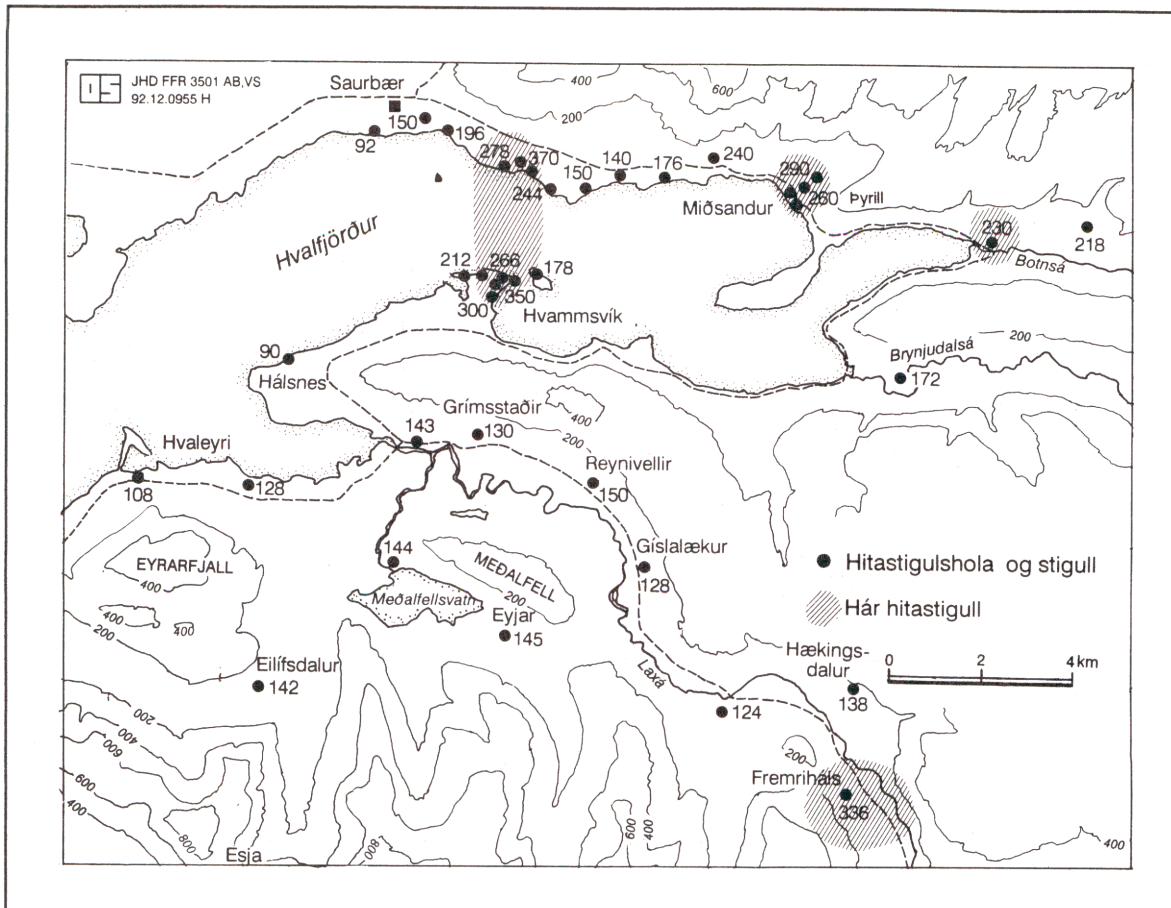


Mynd 3. Hitastigulskort af Íslandi.

gosbeltin, en vegna þess að berg inni í gosbeltunum er mjög lekt, gefa hitastigulsboranir ekki vitnesku um hitadreifinu þar.

Þó hitastigulskort af landinu gefi í stórum dráttum hitadreifinguna í berggrunninum og skipti landinu þannig í *köld svæði og heit svæði* þá er hitinn í jarðskorpanni undir Íslandi svo hár að jafnvel á köldustu svæðum landsins eru starfandi hitaveitur (Suðureyri við Súgandafjörð). Það sem skiptir máli er því ekki beinlínis hvort svæðin eru heit eða köld, heldur hvort bergið er nōgu lekt til þess að flytja varmann úr bergeninu til yfirborðs. Þar sem bergið er lekt kemur fram truflun í hitastigli (þ. e. að sums staðar er hitastigull hærri eða lægri en svæðisbundinn hitastigull) og þessar truflanir sýna hvar vænlegast er að leita eftir jarðhita með borunum.

Jarðhitaleit með hitastigulsborunum hefur löngum þótt dýr rannsóknaraðferð, og heildarfjöldi hitastigulshola á landinu öllu var til skamms tíma aðeins um 50. Með tilkomu endurbættrar bortækni (lofthamarsboranir) var hægt að lækka borkostnað mjög verulega. Í reynd er um að ræða allt að tífalda lækkun á rannsóknarkostnaði miðað við það sem áður var. Jarðhitaleit með hitastigulsborunum varð því snögglega mjög álitlegur kostur. Þessari leitaraðferð hefur meðal annars verið beitt með skipulögðum hætti í Kjós og við norðanverðan Hvalfjörð (Kristján Sæmundsson, 1989). Í Hvalfirði og Kjós er enginn eiginlegur jarðhiti á yfirborði. Mynd 4 sýnir hitastigul í grunnum borholum í Kjós og á Hvalfjarðarströnd. Svæðisbundinn hitastigull er um 150 °C/km, en einstakir staðir á myndinni eru með hitastigul sem er hærri en 200 °C/km. Rennsli vatns í berggrunninum hefur truflað varmastrauminn í bergeninu á þessum



Mynd 4. Hitastigull í grunnum borholum í Kjós og á Hvalfjarðarströnd.

stöðum, en það er einmitt vísbending um að þar sé vinnanlegur jarðhiti. Væntanlegar vinnsluholar hafa verið boraðar á fjórum stöðum á þessu svæði og eru niðurstöður þessar:

Staður	Borár	Rennsli l/s	Hitastig °C
Miðsandur	1980	12 (sjálfrennsli)	140
Hraf nabjörg	1987	25-30 (sjálfrennsli)	80
Hvammsvík	1992	20-30 (með 50 m niðurdrætti)	95
Fremri Háls	1992	20-30 (með 50 m niðurdrætti)	120

Svipaðar aðstæður eru í Norðurárdal (Guðmundur Ó. Friðleifsson og Lúðvík S. Georgsson, 1991; Guðmundur Ó. Friðleifsson, 1991). Þar er svæðisbundinn hitastigull talinn vera á bilinu 50-100 °C/km (mynd 3), en grunnar hitastigulsholur við Bifrost og Svartgil sýndu hitastigul á bilinu 160-180 °C/km. Á þessum slóðum er enginn eiginlegur jarðhiti á yfirborði, en athuganir á jarðfræði sýndu að þarna voru fyrir hendi brotabelti sem gætu verið hagstæð fyrir jarðhitakerfi. Ekki var farið út í að kortleggja hitastigul nákvæmlega á þessu svæði heldur

borað þar sem jarðfræðilegar aðstæður voru hagstæðar og vitað var að hitastigull var hærri en svæðisbundinn hitastigull. Niðurstöður vinnsluboranna eru þessar:

Staður	Borár	Rennsli l/s	Hitastig °C
Bifrost	1992	10-15 (með 60 m niðurdrætti)	63
Svartgil	1992	30-50 (í loftdælingu)	71

Þessar niðurstöður úr Kjósinni, frá Hvalfjarðarströnd og úr Norðurárdal eru mjög athyglisverðar í ljósi þess að á þessum svæðum hefur tekist að finna vinnanlegan jarðhita þar sem enginn eiginlegur jarðhiti er á yfirborði. Fyrir svo sem tíu árum var það talið mjög ólíklegt að hægt væri að finna nýtanlegan jarðhita á þessum svæðum. Nú er hafin jarðhitanyting á Hvalfjarðarströnd og nýting um það bil að hefjast í Kjós og Norðurárdal. Jarðhitinn hefur náð aukinni markaðshlutdeild, og það vakna vonir um að hægt og sígandi sé möguleiki á því að jarðhitinn nái þessum síðustu 15% af húshitunarmarkaðnum.

Hitadreifing í bergi. Auk þess sem ódýrar hitastigulsboranir hafa gert það mögulegt að kortleggja hitastigul við yfirborð, hafa miklar framfarir orðið við að kortleggja og túlka hitadreifingu dýpra í berggrunninum og finna þannig þróngar uppstreymirsásir sem ekki er hægt að sjá með mælingum á yfirborði. Þessum aðferðum hefur verið beitt á nokkrum svæðum, en hér verður einungis bent á Laugaland á Pelamörk (mynd 5) sem dæmi um þetta (Ólafur G. Flóvenz og fl., 1990). Túlkunaraðferðin byggist á því að setja upp einfalt líkan af jarðhitakerfinu og reikna fram legu á jarðhitasprungunni sem getur skýrt mælda hitadreifingu í bergen. Til þess að reikna fram hitadreifinguna hafa verið gerð tölvuforrit sem reikna út jafnvægishita í bergen miðað við einhverja gefna legu á jarðhitasprungu og það hitastig sem áætlað er á vatninu. Með því að nota þessa aðferð og samtlíka niðurstöðurnar með niðurstöðum hefðbundinna yfirborðsrannsóknna tókst að staðsetja og bora betri vinnsluholu á Laugalandi á Pelamörk sumarið 1992.

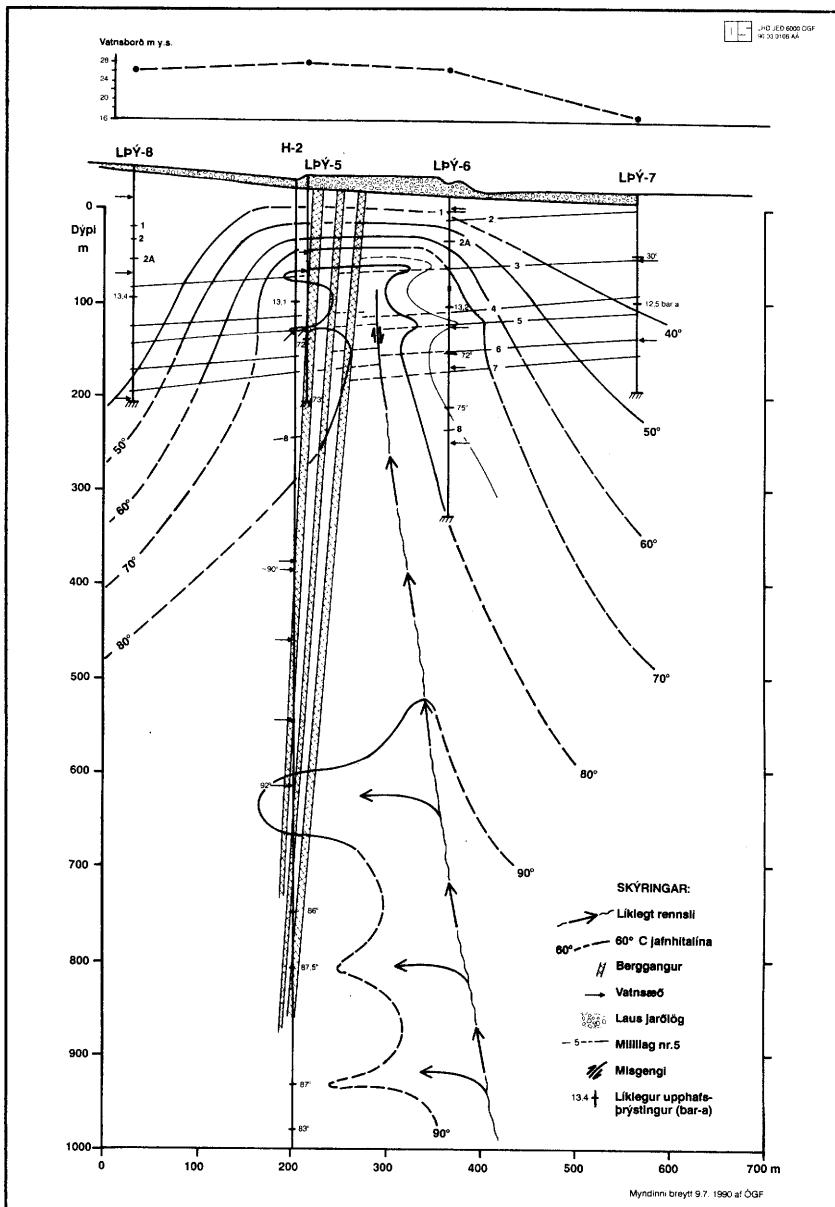
Þó menn tengi oft árangur jarðhitaborana við ákveðna rannsóknaraðferð, er reyndin þó sú að samtlíkun margra rannsóknaraðferða gefur haldbærustu niðurstöðurnar. Heildarniðurstaðan er miklu traustari en niðurstöður einstakra rannsóknaraðferða. Þessar aðstæður eru oft vanmetnar, m.a.s. á Jarðhitadeild Orkustofnunar þar sem fagskipting deildarinnar gerir starfsmenn að sérfræðingum á vissu svíði jarðhitarannsókna. Mesti árangur jarðhitarannsókna næst hins vegar þar sem samtlíkun er notuð. Í þeim tilvikum er oft erfitt að benda á einstakt atriði eða einstaka rannsóknaraðferð sem hefur skipt sköpum. Laugaland á Pelamörk er eitt dæmi um árangur jarðhitarannsóknar þar sem mörgum rannsóknaraðferðum er beitt og samtlíkun gagna notuð til þess að finna vinnanlegan jarðhita. Annað gott dæmi er frá jarðhitasvæðinu við Urriðavatn, sem sér Hitaveitu Egilsstaða og Fella fyrir heitu vatni.

Kínamælingar. Hitaveita Egilsstaða og Fella tók til starfa 1979. Tekist hafði að finna nægjanlegt vatn fyrir hitaveituna með borun 6 hola við Urriðavatn, jafnvel með því að bora úti í vatninu. Menn töldu sig vita allmikið um jarðhitakerfið. Dreifing jarðhitans á botni vatnsins var fundin með því að kortleggja vakir á ísnum þegar vatnið var ísi lagt að vetri. Menn sáu að vakirnar fylgdu berggöngum, en lega þeirra var fundin með segulmælingum á

ísum. Túlkunin var því sú að jarðhitinn væri dæmigerður gangajarðhti og að gangarnir stjórmuðu rennsli í jarðhitakerfinu. Borholur voru því staðsettar þannig að gangar voru skomir á vissu dýpi. Árangurinn var sem sagt viðunandi og nægjanlegt vatn fékkst fyrir hitaveitu.

Eftir að hitaveitan tók til starfa komu hins vegar í ljós að jarðhitavatnið kólnaði mjög ört og efnasamsetningin sýndi að ferskvatn kom inn í holurnar. Kælingin var stöðug og mjög veruleg, 10-15 °C, þannig að framtíð hitaveitunnar var í mjög mikilli hættu. Var þá gengið í það verk að endurmetsa allar aðstæður og beita öllum þeim rannsóknaraðferðum sem hægt var að beita. Á þessum tíma höfðu svokallaðar Kínamælingar rutt sér rúms hér á landi, og var þeim einnig beitt við Urriðavatn. Nafn sitt fékk þessi mæliaðferð af því að Kínverjar byrjuðu fyrst að nota þessa aðferð við viðnámsmælingar, en skömmu eftir að menn fengu upplýsingar um mæliaðferðina var hún endurbætt og þróuð frekar og tekin upp við jarðhitaleit á Íslandi.

Pegar allar niðurstöður voru skoðaðar í samhengi (Sigmundur Einarsson og fl., 1983), fundu menn út að það var ekki nema hálfur sannleikur að berggangarnir stýrðu rennsli jarðhitavatnsins. Kínamælingarnar sýndu mjög greinilega lágvíðnámssprungu, sem skar þá ganga, sem menn höfðu í upphafi túlkað sem "vatnsleiðara" á svæðinu. Niðurstaðan af samtíulkunni varð sú að lágvíðnámssprungan, sem einungis kom fram í Kínamælingunum, væri hin eiginlega uppsteymisrás í jarðhitakerfinu, en nálægt yfirborði rynni heita vatnið meðfram berggöngunum, og uppsteymið á botni vatnsins fylgdi þeim. Þær holur sem fram að þessu höfðu verið boraðar tóku inn vatn tiltölulega grunnt og þess vegna átti vatn úr Urriðavatn greiðan aðgang niður á það dýpi þar sem vinnslan fór fram. Lagt var til að reyna að vinna



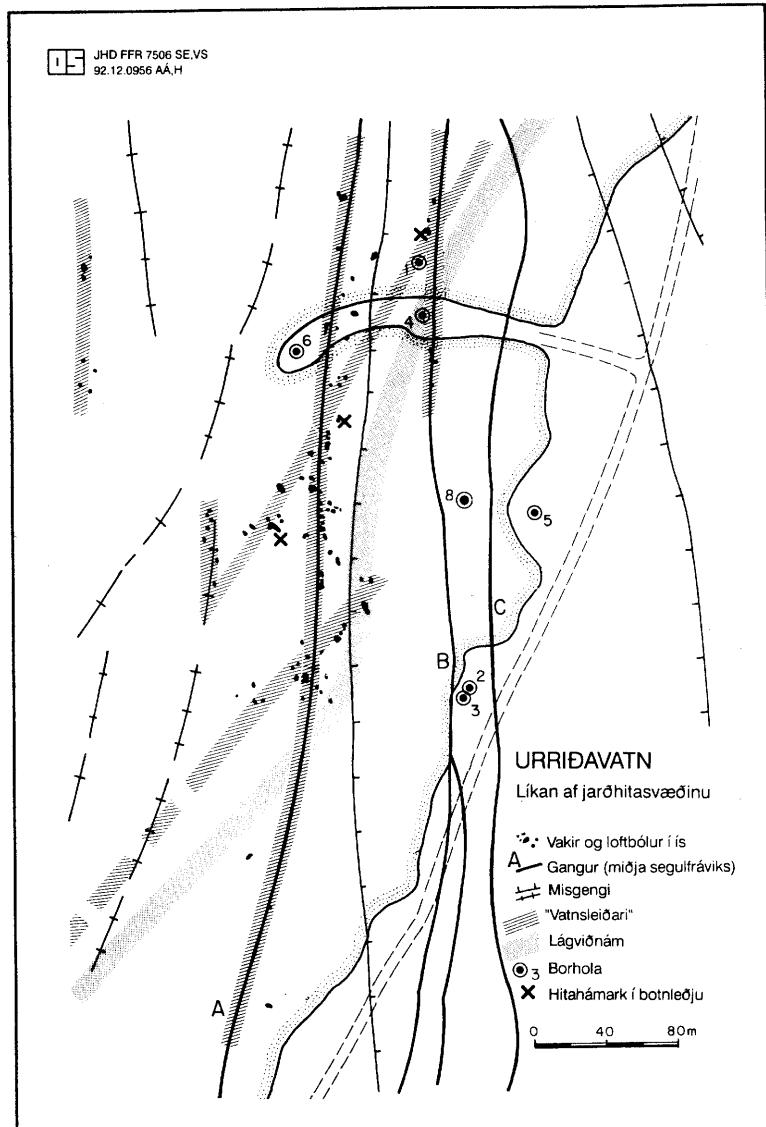
Mynd 5. Hitapversnið frá Laugalandi á Pelamörk.

jarðhitann á meira dýpi, og ná jarðhitavatnini úr lágvíðnámsprungunni áður en það færí að renna út í berggangana.

Áttunda holan við Urriðavatn var staðsett með hliðsjón af þessu nýja líkani af jarðhitakerfinu, og var sú hola boruð árið 1983. Árangur borunnar var mjög góður. Hitastigið á vatninu var um 10 °C heitara en upprunalega fékkst úr gömlu holunum og vinnslugeta holunnar var margfalt meiri en vinnslugeta fyrri hola. Hola 8 vinnur vatn á meira dýpi en aðrar holur á svæðinu, og talið er að hún skeri aðaluppstreymisrás jarðhitakerfisins. Það sem skipti þó meginmáli er sú vitneskja sem liggur fyrir nú, tæpum áratug síðar, að lítil kæling hefur orðið á vatninu sem unnið hefur verið úr þessari holu.

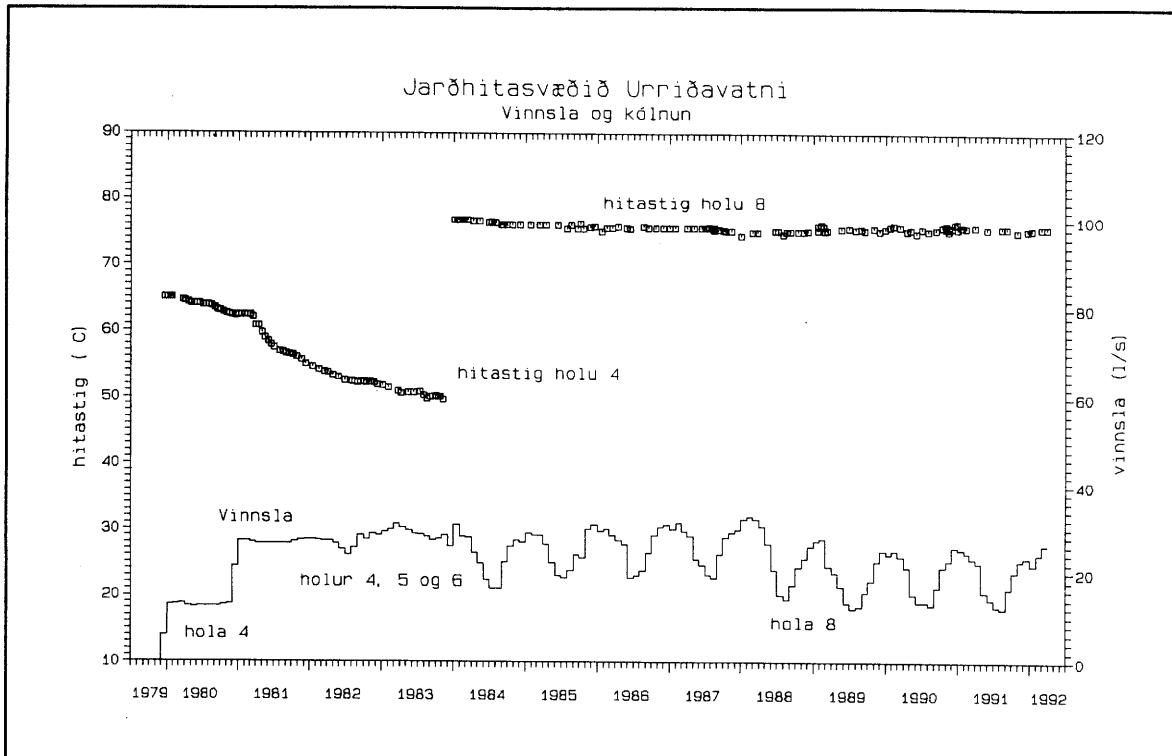
Mynd 7 sýnir vinnlusöguna frá Urriðavatni. Fyrstu fjögur árin var notað vatn úr holum 4, 5 og 6, og sýnir myndin hvernig hitastig vatnsins úr holu 4 kólnaði með tíma. Frá 1984 hefur eingöngu verið notað vatn úr holu 8. Mynd 7 sýnir að árangur jarðhitarannsóknna við Urriðavatn hefur haft góð áhrif á rekstur hitaveitunnar. Fyrir um það bil áratug var hitaveitan í miklum vanda, og framtíð hitaveitunnar mjög óviss. Eftir allmikið rannsóknarátak tókst að finna betri leið að vinna jarðhitann, og nú gengur rekstur hitaveitunnar ágætlega.

TEM-mælingar. Að síðustu er hér tekið eitt dæmi af háhitasvæði. Nú er það svo að menn telja sig vita um öll háhitasvæði landsins, og varla líkur á að menn finni nýtt áður óþekkt háhitasvæði. Háhitasvæðið í Brennisteinsfjöllum hefur líka verið þekkt í aldir, og reynd var brennisteinsvinnsla þar á öldinni sem leið. Brennisteinsfjöll hafa alla til verið á skrá sem háhitasvæði, en menn hafa gefið svæðinu lága einkunn og talið það lítið svæði. Megin ástæðan fyrir þessu mati hefur verið sú að jarðhitaummerki á yfirborði eru mjög óveruleg og staðbundin.



Mynd 6. Jarðhitalegar aðstæður við Urriðavatn. Myndin sýnir dreifingu jarðhita, legu bergganga og misgengja, lágvíðnámssprungu og staðsetningu borhola.

Mynd 7 sýnir vinnlusöguna frá Urriðavatni. Fyrstu fjögur árin var notað vatn úr holum 4, 5 og 6, og sýnir myndin hvernig hitastig vatnsins úr holu 4 kólnaði með tíma. Frá 1984 hefur eingöngu verið notað vatn úr holu 8. Mynd 7 sýnir að árangur jarðhitarannsóknna við Urriðavatn hefur haft góð áhrif á rekstur hitaveitunnar. Fyrir um það bil áratug var hitaveitan í miklum vanda, og framtíð hitaveitunnar mjög óviss. Eftir allmikið rannsóknarátak tókst að finna betri leið að vinna jarðhitann, og nú gengur rekstur hitaveitunnar ágætlega.



Mynd 7. Vinnslusaga frá Urriðavatni 1979-1992.

Seinni hluta vetrar 1992 voru gerðar viðnámsmælingar með svo kallaðri TEM aðferð á þessu svæði. TEM er stytting úr ensku (Transient ElectroMagnetic) og er ein af þeim mæliaðferðum sem hægt er að nota til að mæla viðnám í jörðinni. Orkustofnun hefur þróað þessa mæliaðferð og gert hana að jarðhitaleitartæki á Íslandi. Kostir mæliaðferðarinnar eru einkum þeir að hægt er að gera mælingarnar á mun ódýrari hátt en með eldri aðferðum eins og til dæmis með Schlumberger aðferð. Á ógreiðförnu landi er heppilegast að gera svona mælingar seinni hluta vetrar þegar greiðfært er á snjósleða um svæðið. Petta var sú aðferð, sem notuð var í Brennisteinsfjöllum.

Niðurstöður mælinganna er sýndur á mynd 8 (Ragna Karlsdóttir, 1992). Það sem er athyglisvert við þessar niðurstöður er það að lágvíðnámssvæðið (minna en $10 \Omega\text{m}$) nær yfir landssvæði sem er um $3 \times 6 \text{ km}$. Petta er álíka stórt svæði og í Námafjalli, og mun stærra en áður var talið.

Þó niðurstöðurnar á mynd 8 séu frumniðurstöður og frekari rannsóknir eigi eftir að gera þar, benda þessar niðurstöður til þess að Brennisteinsfjöll séu mun áhugaverðara háhitasvæði en áður var talið. Það er of djúpt í árina tekið að segja að menn hafi fundið nýtt háhitasvæði, en það má með vissum rétti segja að menn hafi fundið að svæðið sé um tíu sinnum stærra en áður var talið.

Það á eftir að koma í ljós hvaða þýðingu þessi vitneskja um Brennisteinsfjöll hefur í framtíðinni. Talið er að hægt sé að virkja jarðhita til raforkuframleiðslu á mun hagkvæmari hátt en áður var talið (Valgarður Stefánsson, 1992) og að virkjun jarðhita til raforkuvinnslu muni verða mun almennari í framtíðinni heldur en reyndin hefur verið fram að þessu. Sú staðreynd að auk Reykjaness, Hengils og Krísuvíkur sé fyrir hendi álitlegt háhitasvæði hér í

næsta nágrenni höfuðborgarsvæðisins, getur haft veruleg áhrif á framvindu þeirra mála.

Bortækni og borholurannsóknir

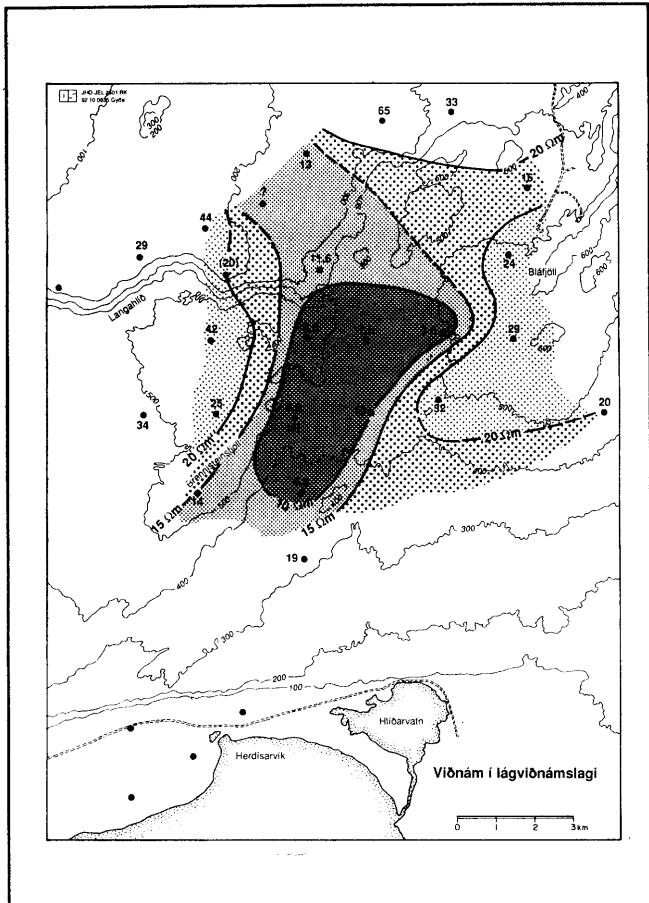
Lofthamarsborun. Svo sem rakið var hér að framan hafði endurbætt bortækni það í för með sér að það varð fjárhagslega mögulegt að nota hitastigulsboranir til þess að leita að jarðhita á stórum landssvæðum. Lofthamarsboranir hafa einkum komið að notum í grunnum holum, svo sem rannsóknarholum af ýmsu tagi. Hitastigulsboranir í Kjós og norðan Hvalfjarðar eru ágætt dæmi um gagnsemi þessarar boraðferðar. Þessi boraðferð hefur einnig verið notuð við boranir á vinnsluholum fyrir jarðhita (Sverrir Pórhallsson, 1989).

Sogborun. Önnur boraðferð, svo kölluð sogborun, hefur hins vegar komið að góðum notum við borun vinnluhola. Þessi aðferð var fyrst reynd á Siglufirði árið 1983. Orkustofnun var frumkvöðull að þessari prófun, en Orkusjóður styrkti verkið.

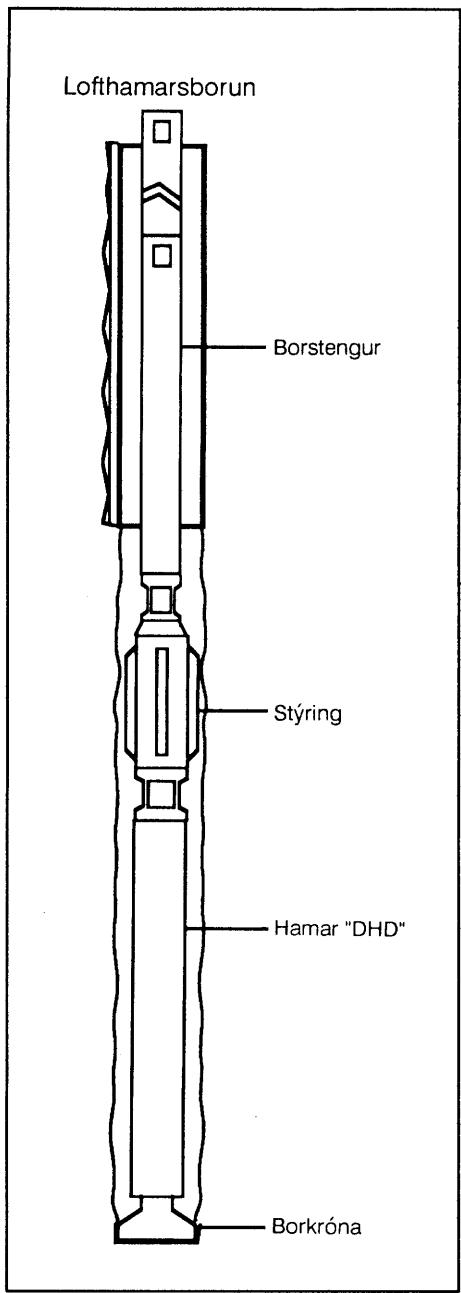
Sogborun er skyld lofthamarsborun að því leytinu að þrýstiloft er notað við borunina. Lengra nær samlikningin varla. Þrýstiloftið í sogborun er notað til þess að létta vatnssúluna við borun, og á að sjá til þess að það sé alltaf undirþrýstingur í holunni miðað við þrýsting í jarðhitakerfi. Það þýðir að skolvökvinn mun ekki þrengja sér út í vatnsæðar, heldur ætti að renna úr jarðhitakerfinu inn í holuna strax eftir að vatnsæð er skorin. Með þessu móti kemur árangur borunar strax í ljós á meðan á borun stendur, borunin kemur ekki til með að kæla jarðhitakerfið, og síðast en ekki síst er komið í veg fyrir að borsvarsf safnist til í vinnsluæðum holunnar og stíflí þær (Sverrir Pórhallsson, 1989).

Sogborun var reynd sem fyrr segir á Siglufirði og reyndist árangur góður. Síðan hefur sogborun einnig verið notuð á Elliðaárvæðinu, Seltjarnarnesi, Laugalandi á Þelamörk, Laugalandi í Holtum, Selfossi og við Urriðavatn.

Hreinsun í blæstri. Kalkútfellingar eru fylgifiskur nýtingar á sumum háhitasvæðum, einkum í Hveragerði og Svartsengi. Kalkútfellingarnar koma fram í borholunum þar sem borholuvökvinn sýður í holunni. Einfalt er að lifa við þessar útfellingar með því að hreinsa kalkið úr holunum með vissu millibili. Við hreinsun er notaður jarðbor, og kalkútfellingarnar einfaldlega boraðar út. Aðgerðin sjálf tekur aðeins dagsstund, en ef kæla þarf holuna vegna



Mynd 8. Viðnámsdreifing í Brennisteinsfjöllum.



Mynd 9. Bortæki við loft-hamarsborun.

geislavirkni. Öll þessi atriði hafa aukið vitnesku um jarðhitakerfin, en það sem kom mönnum fyrst til að skilja gagnsemi þessarar tækni við boranir voru annars vegar tæki sem mælir vídd borholu og hins vegar tæki sem mælir steypugæði á bak við fóðurrör í borholu. Það kom brátt í ljós að þessi tæki veittu ómetanlegar upplýsingar fyrir framgang borverks, og niðurstaðan varð sú að nú vilja menn ekki bora háhitaholu á Íslandi nema hafa borholumælingabíl tiltækan, ef eitthvað kemur uppá við borunina.

Með þessari borholumælingatækni er hægt að staðsetja vatnsæðar í holu með mikilli nákvæmni og sjá hvort vatn rennur inn í holuna eða út úr henni. Þegar breytingar verða á vinnslu í einhverri holu hjá hitaveitum eru borholumælingar notaðar til þess að finna út hvað

hreinsunar verða margra daga rekstrartruflanir vegna svona aðgerðar. Þess vegna var snemma farið að gera þessar hreinsanir þannig að holan væri í blæstri á meðan á hreinsun stæði. Fyrstu aðgerðir af þessu tagi voru gerðar í Hveragerði fyrir um það bil 30 árunum, en aðferðin var síðan endurbætt í Svartsengi um 1978, og má nú segja að þetta sé almenn aðferð við hreinsun háhitahola á Íslandi. Kalkútfellingar eru almennt vandamál vísá um heim, og kom einn Filippseyngur gagngert hingað árið 1987 til þess að læra þessa bortækni. Víða ætti því að vera hægt að nota þessa íslensku tækni.

Kalkútfellingar eru ekki taldar vandamál á Íslandi, en kalkútfellingar eru ennþá mikið vandamál í Kizildere í Tyrklandi og í Miravalles í Costa Rica, svo nokktir staðir séu nefndir.

Borholumælingar. Fyrir um 15 árum varð mjög veruleg breyting á tækni við mælingar í borholum hér á landi. Fengin voru borholumælitæki og sérstakir mælingabílar, sem olíuiðnaðurinn notar við mælingar í olíuholum. Segja má að sú breyting sem varð á borholumælingum á árunum 1976-1977 hafi verið sambærileg við þá breytingu í jarðhitaborunum sem varð þegar Gufuborinn kom til landsins árið 1957.

Árangur af þessari nýju tækni við borholumælingar er einkum sá að miklu betri og ítarlegri upplýsingar fást um holuna sjálfa og um jarðhitakerfið sem holan er boruð í. Allar mæliniðurstöður eru skráðar jafnóðum í mælingabílum, og þannig er hægt að fylgjast mjög náið með hvað er að gerast í holunni og umhverfi hennar.

Auk þess að mæla vanalegar jarðhitastærðir eins og hita og þrýsting, er nú hægt að mæla ýmsa eiginleika bergsins eins og viðnám, poruhluta, eðlisþyngd og

er að gerast í holunni og ákveða hvernig megi endurbæta hana.

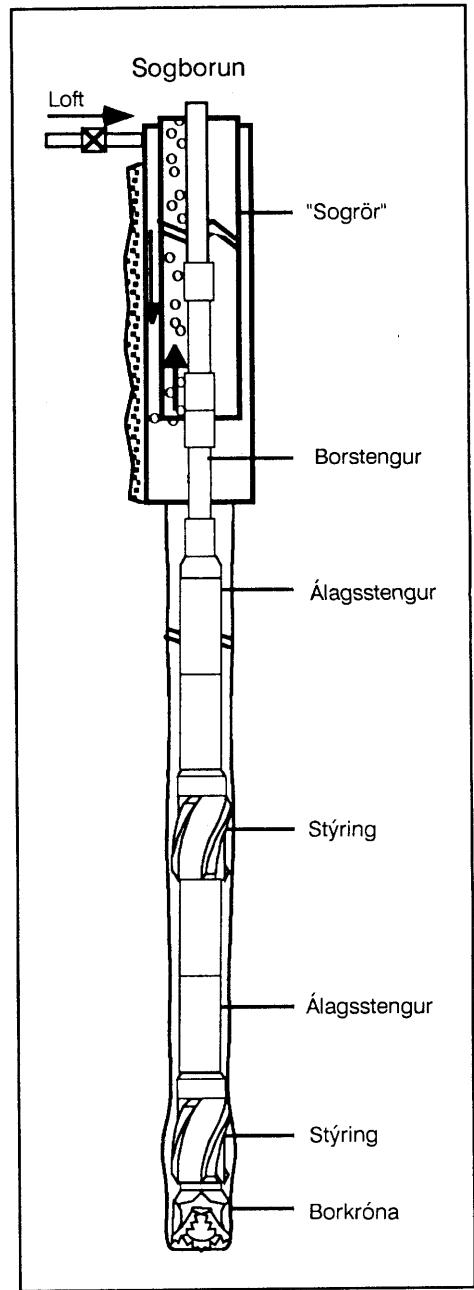
Á mynd 11 er sýnt hvernig ástand holu MG-23 á Suður Reykjum í Mosfellsbæ var áður en gert var við holuna. Mælingarnar sýna hitastig og rennsli í holunni og vídd hennar. Mæliniðurstöður sýna glögglega að "kalt" vatn rennur inn í holuna á 410 m og 500 m dýpi. Þetta vatn rennur síðan niður holuna og út úr henni á 765 m dýpi. Niðurrennslíð í holunni var um 15 l/s. Þetta kalda vatn inniheldur súrefni sem hefur komið fram í rennsli frá nálægum vinnsluholum.

Gert var við holuna með því að steypa nýja fóðringu í hana, sem nær niður á 600 m dýpi og kemur þannig í veg fyrir að kalt vatn renni inn í holuna.

Allar upplýsingar um ástand holunnar fást í þessu tilviki með borholumælingum, og viðgerðin er hönnuð og framkvæmd á grundvelli þessara upplýsinga.

Vinnslutækni

Djúpdælur. Mesta byltingin í vinnslu jarðhita á Íslandi er eflaust notkun djúpdæla, og voru Íslendingar um 20 árum á undan öðrum þjóðum á því sviði. Jóhannes Zöega var frumkvöðull að þessari vinnsluaðferð og gjörbreytti þessi vinnslutækni öllum rekstraraðstæðum fyrir Hitaveitu Reykjavíkur á sínum tíma (Árni Gunnarsson, 1992). Nú má segja að djúpdælur séu sjálfssagður hlutur hjá flestum íslenskum hitaveitum, og á síðasta áratug hefur notkun djúpdæla líka verið tekin upp við jarðhitanytingu í Frakklandi, Ungverjalandi, Rúmeníu og USA.

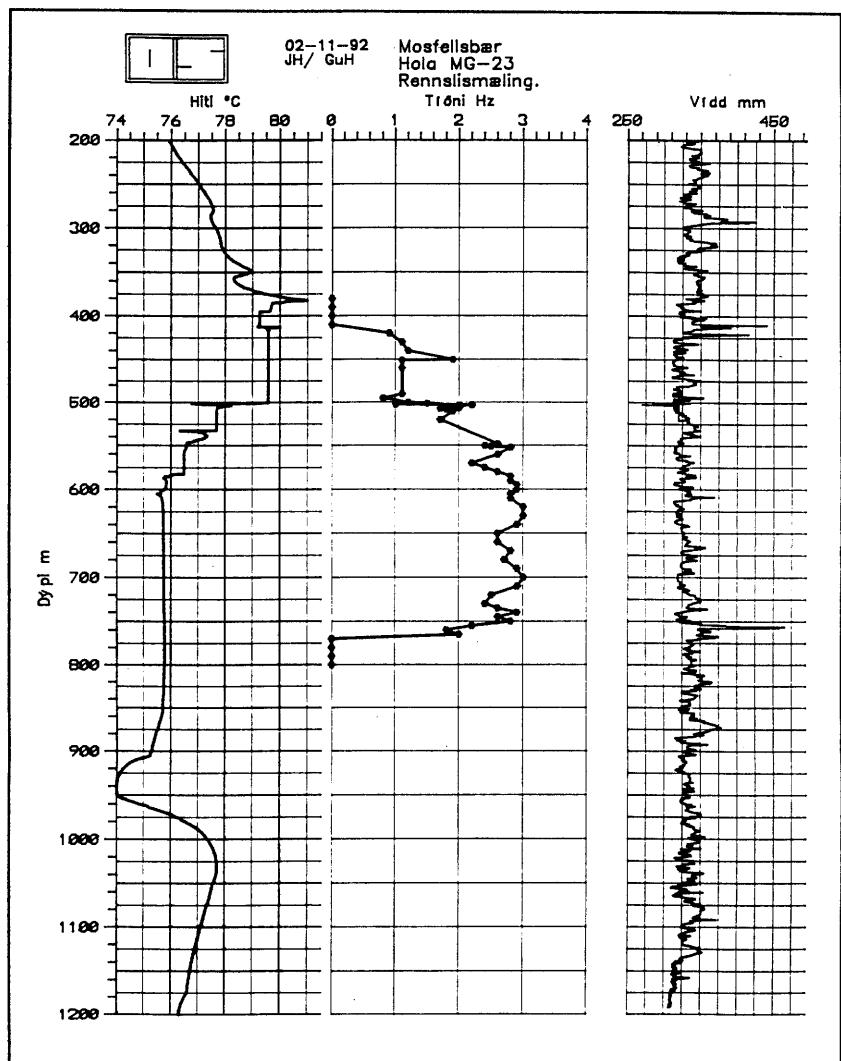


Mynd 10. Bortæki við sogborun.

Upphitun á grunnvatni. Þó upphitun á grunnvatni sé viðhofð í öllum kyntum hitaveitum, eru Íslendingar brautryðjendur í því að nota varmaorku frá háhitasvæðum til þess að hita upp grunnvatn til hitaveitunota. Áður en kom til nýtingar í Svartsengi setti Orkustofnun upp og rak tilraunastöð þar á árunum 1973-1975. Þessi rekstur var á sínum tíma kostaður af sérfjárveitingu frá Alþingi. Tilraunastöðin var síðan flutt á Nesjavelli og rak Orkustofnun stöðina þar árin 1976-1977 á vegum Hitaveitu Reykjavíkur. Hitaveita Reykjavíkur var með tilraunarekstur á upphitun og afloftun grunnvatns á Nesjavöllum fram til 1990. Helstu nýmælin sem Hitaveitan tók upp í tilraunarekstrinum var notkun sérstakra kúluvarmaskipta (fluidized bed) þar sem málmflísum eða vírstubbum er hringdælt inni í rörvarmaskiptinum til þess að hreinsa burt þær útfellingar sem setjast innan á rörin. Árangur þessara tilrauna var svo góður að slíkir varmaskiptar eru nú notaðir í stöðinni

á Nesjavöllum, og nýtir stöðin allan varma frá borholuvökva niður í 20 °C.

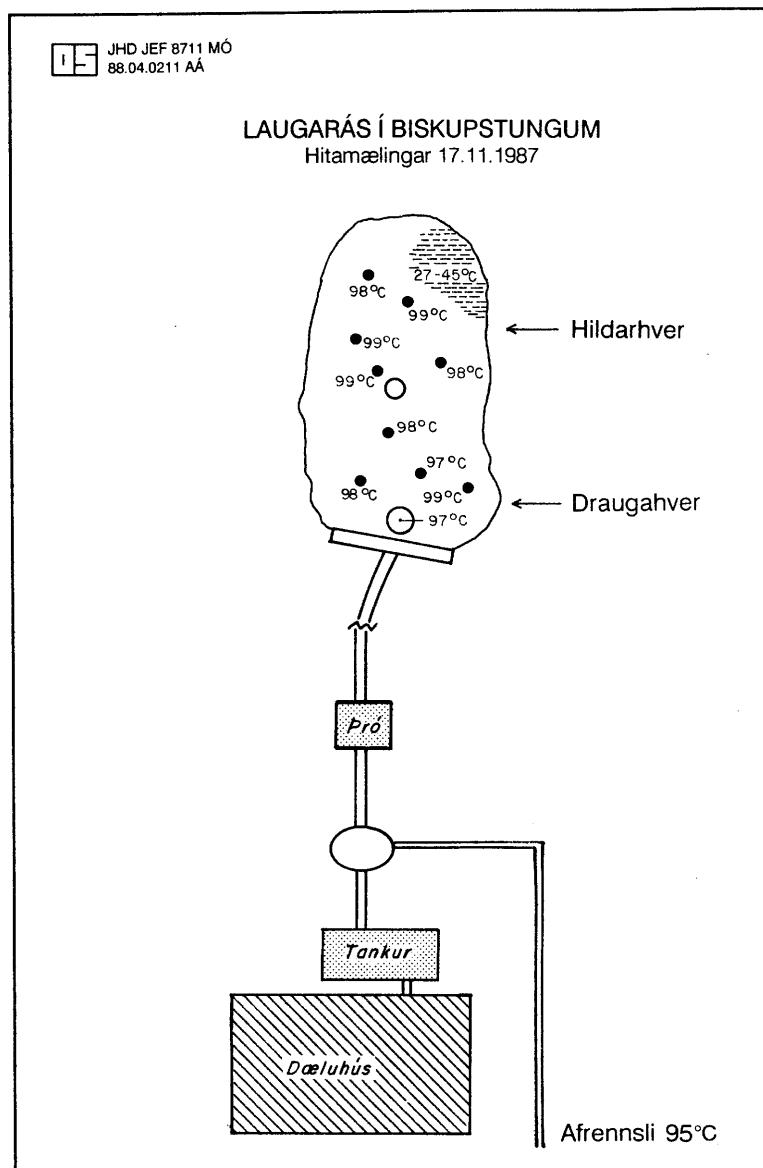
Útfellingar, magnesíumsiliköt. Magnesiumsiliköt eru föst efni, sem leysast trauðla upp í vatni. Uppleyst magnesium og kísil er því ekki að finna saman í vatni, nema í mjög litlum mæli. Íslenskt ferskvatn er mettað með tilliti til magnesíumsilikata og er uppleyst magnesium gjarnan á bilinu 1-10 mg/l en uppleystur kísill hins vegar 10-25 mg/l. Ólikt flestum öðrum efnum, þá minnkar leysni magnesiumsilikata með hækkandi hita. Einnig er styrkur þessara efna háður pH gildi vatnsins. Þetta eru ástæður þess að jarðhitavatn, sem er kísilríkt, inniheldur nánast ekkert uppleyst magnesium (<0,005 mg/l). Þegar ferskvatn hitnar upp í berggrunninum og leysir upp kísil úr bergeninu hreinsast vatnið af magnesium við útfellingu magnesiumsilikata.



Mynd 11. Ástand holu MG-23 fyrir viðgerð.

Útfellingar magnesiumsilikata eru þekkt vandamál í gufukötlum og kallast "ketilsteinn". Peirra gætti hins vegar lengi vel ekki hjá hitaveitum á meðan hitaveitur notuðu eingöngu jarðhitavatn, sem er mjög snautt af magnesium. Eftir að farið var að nota upphitað ferskvatn í hitaveitum komu útfellingar af magnesiumsilikotum í ljós. Fyrst komu þessar útfellingar fram 1977-78 í aðveituæðinni frá Svartsengi til Grindavíkur. Útfelling magnesiumsilikata hefur verið visst vandamál hjá öllum hitaveitum sem nota upphitað afloftað grunnvatn, þ.e. hjá Hitaveitu Reykjahlíðar, Hitaveitu Suðurnesja og Hitaveitu Hveragerðis. Þessar útfellingar komust þó fyrst verulega í svíðsljósið, þegar Hitaveita Reykjavíkur tók Nesjavallavirkjun í notkun haustið 1990. Nesjavallavatnið, sem er upphitað og afloftað ferskvatn, blandaðist við jarðhitavatn úr Mosfellsbæ, og komu fram útfellingar í veitunni. Lausnin á þessu var sú að nota vatnið frá Nesjavöllum á vissa hluta veitunnar, en vatnið frá Mosfellsbæ og jarðhitasvæðunum í Reykjavík á aðra hluta veitunnar, og sjá til þess að blöndun ætti sé ekki stað.

Allt frá 1978 hafa verið gerðar viðamiklar rannsóknir á magnesíum útfellingum á vegum Orkustofnunar og af þeim hitaveitum þar sem þessi vandamál hafa komið upp. Bæði hafa efnafræðilegir þættir útfellinganna verið athugaðir og tilraunir verið gerðar með upphitun, afloftun og blöndun við jarðhitavatn. Eftir að útfellingavandamál komu fram hjá Hitaveitu Reykjavíkur fór fram ítarleg rannsókn á leysni magnesíumsilíkata hjá Hitaveitu Reykjavíkur á árunum 1991-1992. Svipuð rannsókn fór fram árið 1992 hjá Hitaveitu Suðurnesja. Liggjur nú fyrir ítarleg þekking á leysni magnesíumsilíkata og myndun útfellinga. Er hægt út frá efnasamsetningu ferskvatnsins að spá fyrir um útfellingahættu, útfellingahraða og þar með að segja til um hvernig halda megi útfellingum í lágmarki. Meginniðurstaða rannsókna hjá Hitaveitu Reykjavíkur var þó sú að ekki væri hægt að blanda saman jarðhitavatni og upphituðu ferskvatni (Trausti Hauksson og fl. 1992).



Mynd 12. Aðstæður við vatnsvinnslu í Laugarási í Biskupstungum.

Dæmið um útfellingar

magnesíumsilíkata sem sýnt er á mynd 12 er þó frá Hitaveitu Laugarás, en sú hitaveita notar eingöngu jarðhitavatn, sem er unnið beint úr hverum. Samkvæmt ofansögðu ætti því ekki að vera hætta á magnesíumsilíkotum þar. Sagan frá Laugarási (Magnús Ólafsson 1988) er þannig að eftir að hitaveitan hafði notað sjálfrennandi vatn frá hverum þar frá árinu 1964, var veitan endurbætt árið 1985. Heitari hverinn, svonefndur Hildarhver, var grafinn upp, ný lögn lögð frá hverum og nýtt dæluhús reist. Rennsli jókst nokkuð í Hildarhver þegar hann var grafinn upp.

Árið 1987 fundust útfellingar í veitunni, sem reyndust vera magnesíumsilíköt. Leitað var um alla veitu að mögulegum leka þar sem kalt vatn blandaðist við hitaveituvatnið, og fundu menn að það hlyti að vera í hvernig sjálfum. Með því að mæla hitastigið í hvernig sást að kalt vatn seitlaði inn í hverinn eins og sýnt er á mynd 12. Var talið að útgröftur hversins hefði skaðað hverskálina. Til þess að koma í veg fyrir kalt innstreymi í hverinn var grafinn skurður

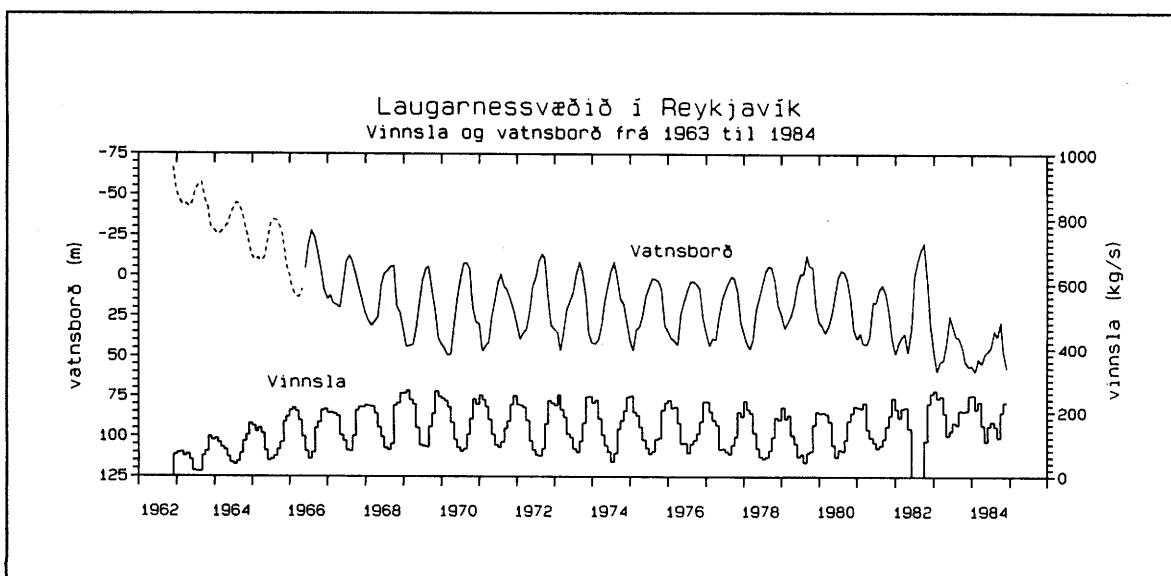
í hálfring umhverfis hverinn og kalda vatninu veitt burt. Hitamælingar í hvernum sýndi að aðgerðin hafði læknað meinið að mestu leyti.

Iðnaðargas. Koldíoxíð hefur löngum þótt til trafala við jarðhitanytingu. Hins vegar er CO₂ notað í ýmsum iðnaði svo sem í gosdrykkjaframleiðslu. Á Hæðarenda í Grímsnesi er jarðhitahola þar sem mikið CO₂ fylgir rennsli úr holu. Þar hefur verið komið fyrir búnaði til þess að vinna koldíoxíðið og er það nú orðin söluvara, sem er ódýrari en það koldíoxíð sem framleitt hefur verið á annan hátt hér á landi. Eftir að þetta iðnaðargas fór að bjóðast á góðum kjörum hefur markaðurinn aukist og nú er koldíoxíð notað í gróðurhúsaræktun, og þykir nú ómissandi þegar gervilýsingur er beitt við gróðurhúsarækt. Koldíoxíðvinnsla var um skeið á háhitasvæðinu á Reykjanesi og er nú búist við að sú vinnsla hefjist aftur annað hvort á Reykjanesi eða í Svartsengi.

Forðafræðilegur rekstur jarðhitakerfa

Um jarðhitakerfi landsins hefur heitt vatn streymt árpúsundum saman. Það er því ekki 6eðlilegt að telja jarðhitann óþrjótandi orkulind. Svo er þó alls ekki. Úr flestum vinnslusvæðum jarðhita er unnin mun meiri orka en sem svarar náttúrulegu afli þeirra. Eftir að farið var að nýta jarðhitann í miklum mæli hafa komið upp ýmis vandamál sem tengjast nýtingu hans og viðbrögðum jarðhitakerfanna við stórfellda vinnslu.

Á lághitasvæðunum er heita vatninu oftast dælt úr 1-2 km djúpum borholum. Afleiðing þess er nær undantekningalaust að vatnsborð lækkar í jarðhitakerfunum líkt og þegar vatni er dælt úr vatnstanki. Er það einfaldlega vegna þess að meira vatni er dælt upp en nær að streyma inn í kerfin. Hversu mikið og hratt vatnsborðið lækkar ræðst af stærð og eiginleikum jarðhitakerfanna. Í litlum kerfum, sem vatn streymir treglega um, lækkar vatnsborð mikið við tiltölulega litla dælingu.



Mynd 13. Gögn um vinnslu og vatnsborðsbreytingar á Laugarnessvæðinu í Reykjavík.

Í mörgum tilvikum lækkar vatnsborð stöðugt við langvarandi vinnslu. Þannig getur jarðhitasvæði hætt að anna þörfum viðkomandi hitaveitu. Í öðrum tilvikum fer kaldara vatn að streyma inn í jarðhitakerfi í stað þess heita sem dælt hefur verið burt. Við það breytist efnasamsetning vatnsins sem kemur úr borholunum og getur það jafnvel kólnað.

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 á þessum þáttum vegna vinnslu jarðhitans. Tilgangur forðafræðiathugana er í fyrsta lagi að afla upplýsinga um eðli og eiginleika jarðhitakerfa. Í öðru lagi er tilgangurinn að áætla viðbrögð jarðhitakerfa við framtíðarvinnslu og meta vinnslugetu þeirra. Slíkar áætlunar koma að miklu gagni við rekstur hitaveitna. Á grundvelli þeirra má stýra nýtingu jarðhitasvæða og sjá fyrir hvenær þörf verður á frekari orkuöflun, t.d. með því að síkka dælur, bora nýjar holur eða með frekari jarðhitaleit. Þetta auðveldar hitaveitunum að tímasetja kostnaðarsamar framkvæmdir.

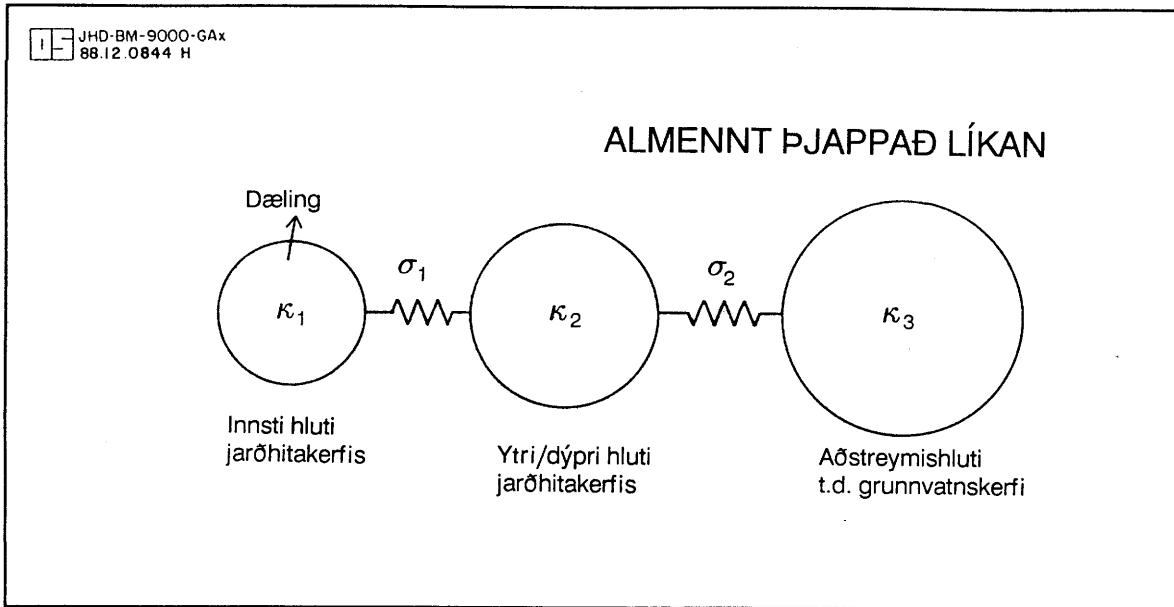
Gagnasöfnun og vinnslueftirlit. Grundvöllur forðafræðiathugana er gott eftirlit með vinnslu á svæðinu og að viðbrögð svæðisins séu skrásett með öruggum hætti. Þessi gagnasöfnun er kölluð vinnslueftirlit. Á lághitasvæðum er fylgst með dælingu eða sjálfreynslu úr öllum holum, vatnsborði eða þrýstingi jafnt í vinnsluholum sem mæliholum, hitastigi vatnsins sem unnið er og efnainnihaldi þess. Breytingar á efnainnihaldi heita vatnsins koma t.d. fyrr fram en hitastigsbreytingar, ef kalt vatn byrjar að streyma inn í jarðhitakerfið.

Á síðasta áratug hefur komist á náin samvinna Orkustofnunar og flestra hitaveitna landsins um vinnslueftirlit á vinnslusvæðum hitaveitnanna. Fylgst er reglulega með hita og þrýstingi í jarðhitakerfunum, tekin eru efnasýni reglulega, og hefur Orkustofnun einnig þróað sjálfvirka gagnaskráningu fyrir vinnslugögn hitaveitnanna. Þessi gögn eru svo notuð til forðafræðireikninga á viðkomandi jarðhitakerfi. Gefur það hitaveitunum möguleika á því að sjá hvert stefnir, og hvaða rekstraraðgerða þarf að grípa til í náinni framtíð.

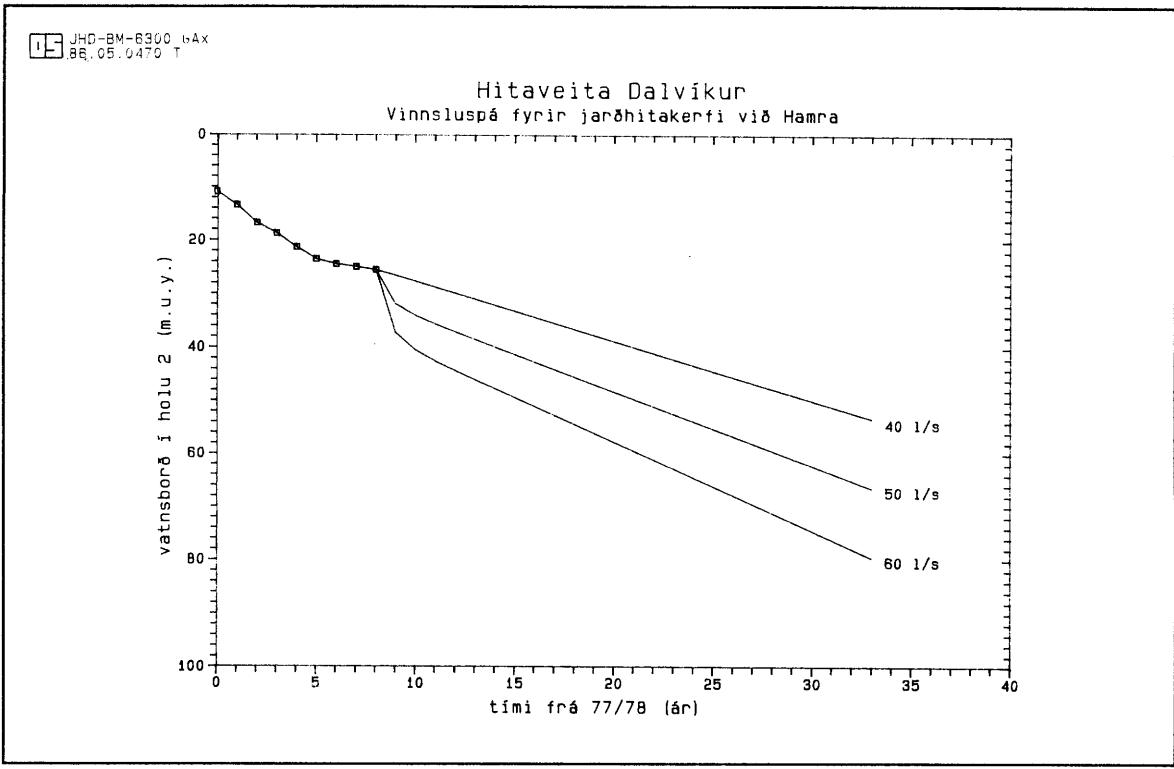
Mynd 13 sýnir gögn um vinnslu og vatnsborðsbreytingar á Laugarnessvæðinu árin 1962-1984. Myndin sýnir vel hvernig vatnsborð í jarðhitakerfinu breytist með vinnslu. Þegar vinnslan úr svæðinu er lítil stendur vatnsborðið hátt, en lækkar svo þegar vinnslan er aukin yfir veturninn.

Hermireikningar. Mikilvægasta verkfærið við forðafræðiathuganir eru svokallaðir hermireikningar. Á þetta jafnt við um athuganir á eðli og gerð jarðhitasvæðanna og spár um viðbrögð við vinnslu. Hermireikningar fara þannig fram að gert er reiknilíkan af viðkomandi jarðhitakerfi og það látið herma þau gögn, sem til eru um kerfið og viðbrögð þess við vinnslu. Eiginleikar reiknilíkansins endurspeglar eiginleika hins raunverulega kerfis, og þegar tekist hefur að velja eiginleika reiknilíkansins þannig að niðurstöður reikninganna passi við mældar stærðir er reiknilíkanið notað til þess að spá fyrir um viðbrögð kerfisins og afköst í framtíðinni. Jafnt er hægt að nota einföld líkön sem flókin og er eðlilegt að tilgangur reikninganna og fyrirliggjandi gögn ráði hversu flóknu líkani er beitt.

Einföld líkön. Einföld líkön eru notuð, ef herma á einn þátt í eðli eða viðbrögðum jarðhitakerfis. Til dæmis má nota svokölluð þjöppuð líkön til þess að herma vatnsborðs- og þrýstibreytingar nokkuð nákvæmlega. Eins og sýnt er á mynd 14 á samanstendur þjappað líkan af nokkrum vatnsgeymum og nokkrum viðnánum á milli þeirra.



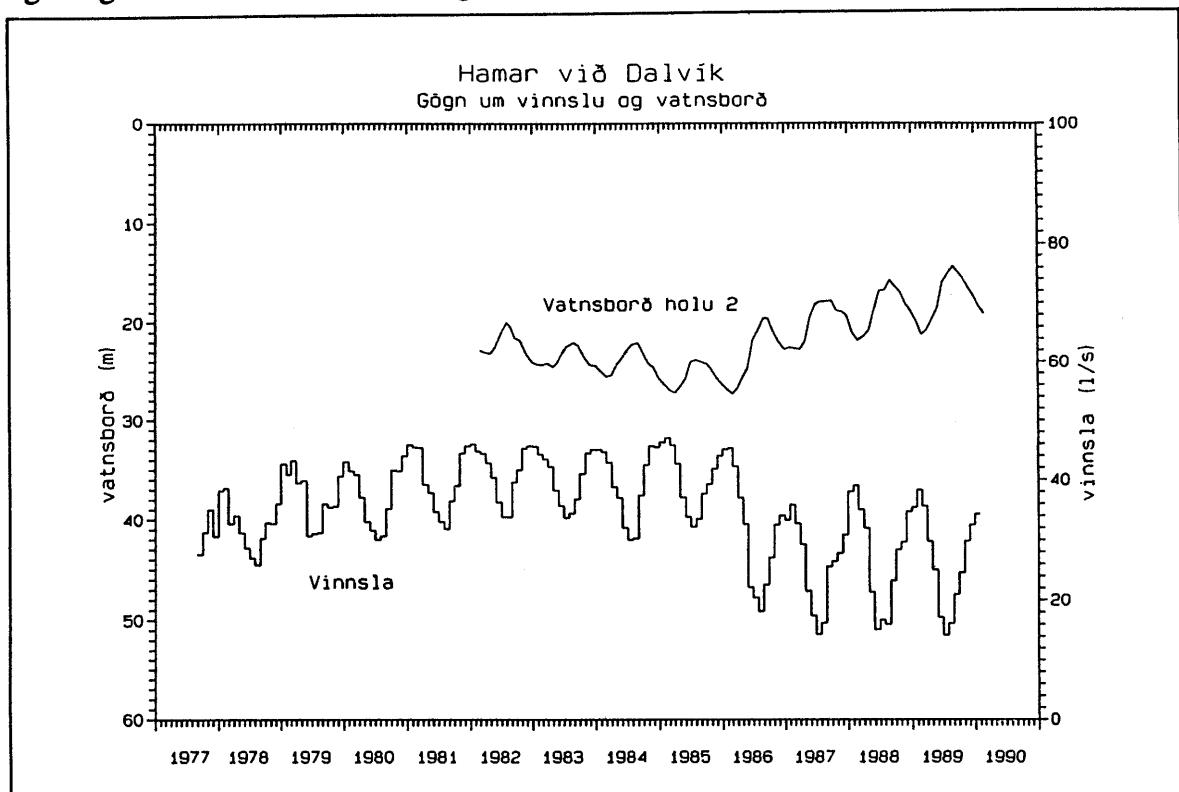
Mynd 14. Þjappað líkan að jarðhitakerfi.



Mynd 15. Vinnsluspá gerð 1986 fyrir jarðhitakerfið við Hamar.

Próuð hefur verið aðferð til þess að herma vatnsborðsbreytingar með þjöppuðum líkönum, sem er að nokkru leyti sjálfvirk og því mjög fljótleg í notkun. Þetta tölvuforrit er kallað LUMPFIT og hefur það verið notað á Jarðhitadeild Orkustofnunar til þess að herma viðbrögð

margra lághitasvæða á Íslandi með ágætum árangri.



Mynd 16. Vinnslu og vatnsborðsbreytingar við Hamar í Svarfaðardal.

Mynd 15 sýnir vinnsluspá sem gerð var árið 1986 fyrir jarðhitakerfið við Hamar í Svarfaðardal sem sér Hitaveitu Dalvíkur fyrir heitu vatni. Þessi spá sýndi að miðað við óbreytta vinnslutilhögun myndi vatnsborð í jarðhitageyminum lækka jafnt og þétt.

Hitaveita Dalvíkur breytti söluþyrirkomulagi sínu á árinu 1986 og fór veitan að selja heitt vatn samkvæmt magnmælingu, en hafði áður notað hemla við vatnssölu. Árangur þeirrar aðgerðar kemur vel fram á mynd 16, sem sýnir vinnslu og vatnsborðsbreytingar við Hamar fram til ársins 1990. Glöggt kemur fram að söluþyrirkomulagsbreytingin hafði í fórr með sér minnkaða vinnslu úr jarðhitasvæðinu, og í stað þess að vatnsborð í kerfinu lækkaði jafnt og þétt hefur vatnsborðið hækkað eftir að farið var að nota magnmæla í stað hemla.

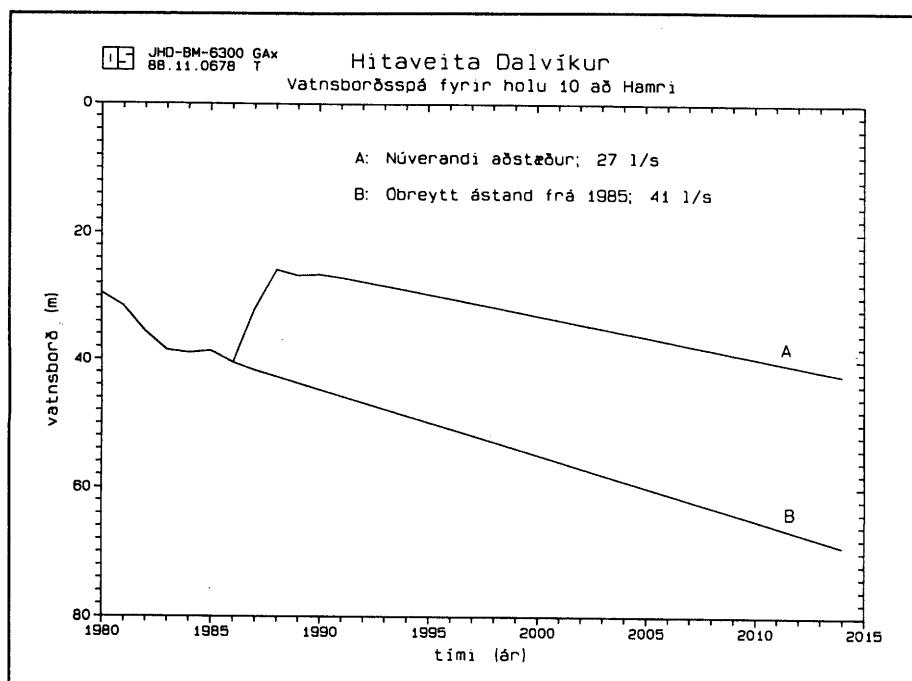
Mynd 17 sýnir langtímaáhrifin af breyttu söluþyrirkomulagi á Dalvík. Miðað við hemlanotkun 1985 var meðalvinnsla úr svæðinu 41 l/s, en með magnmælum er meðalvinnslan 27 l/s. Vatnsborð í jarðhitakerfinu hækkar fyrst í stað en byrjar svo að lækka aftur, en með minni hraða heldur en var þegar 41 l/s var að meðaltali dælt úr kerfinu. Mynd 17 sýnir að það tekur um 25 ár þangað til vatnsborðsstaðan verður sú sama og var 1985 þegar breytt var um söluþyrirkomulag. Það má því segja að breyting á söluþyrirkomulagi hafi lengt líftíma jarðhitakerfisins um 25 ár. Miðað við gjaldskrá Hitaveitu Dalvíkur og 27 l/s meðaldælingu eru verðmæti heitavatnsins sem sparast um 550 milljónir króna.

Einnig má nota einföld þjöppuð líkön til þess að herma breytingar á efnasamsetningu jarðhitavökva. Mynd 18 sýnir tilraun til að herma breytingar í styrk klórfðs í vatni frá holu

8 á Urriðavatni. Dreifingin í efnafræðigögnunum er hins vegar svo mikil, að erfitt er að segja til um hvort reiknilíkanið hermir raunveruleikann vel eða illa. Til þess að herma samtímis þrýstibreytingar og breytingar á efnasamsetningu þarf þó að grípa til flóknari líkana.

Flókin líkön.

Viðbrögð jarðhitakerfa eru flóknari en svo að aðeins sé um vatnsborðs- eða þrýstibreytingar að ræða. Afköst jarðhitakerfanna eru háð fleiri þáttum en niðurdrætti, þó svo að niðurdráttur sé mjög mikilvæg stærð við alla jarðhitavinnslu. Líklegt er að kalt vatn streymi að og inn í flest jarðhitakerfi eftir að vinnsla hefst fyrir alvöru.



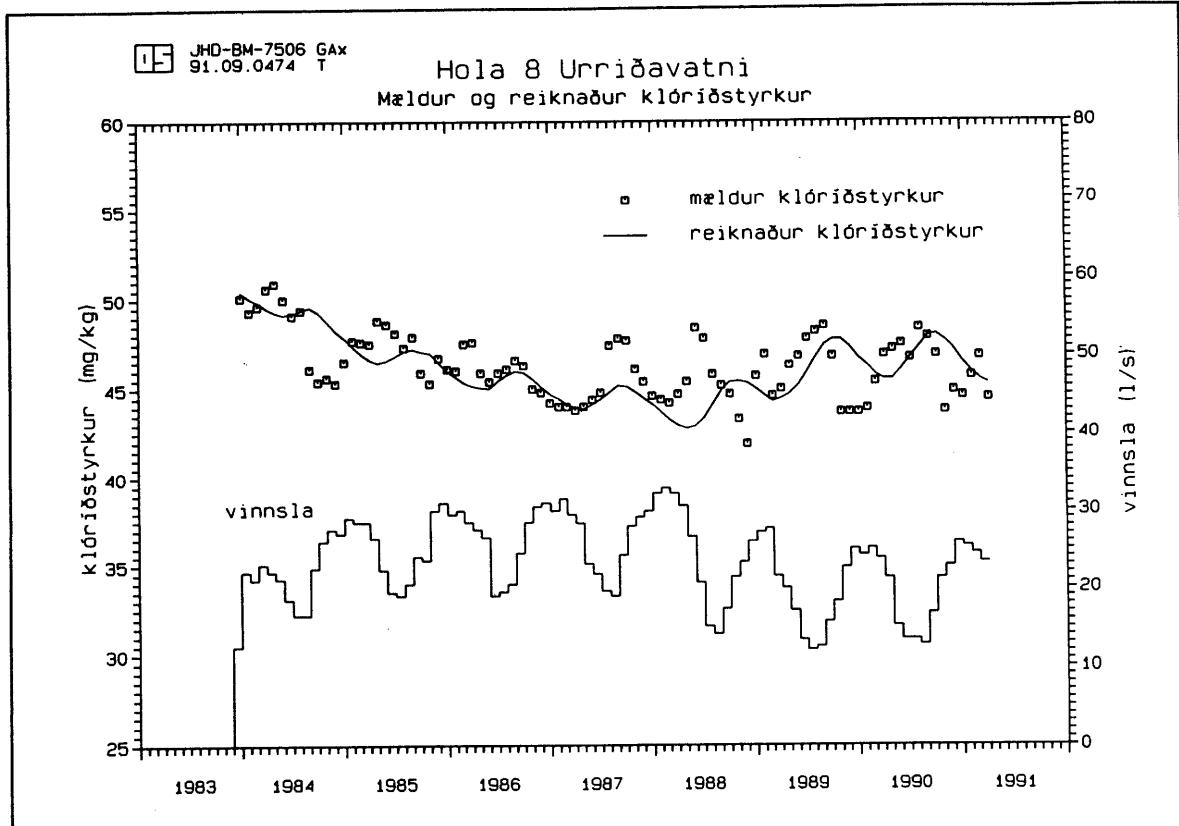
Mynd 17. Áhrif breytts sölufyrirkomulags á jarðhitasvæðið við Hamar.

Aðstreymi af köldu vatni getur bæði verið til góðs eða ills fyrir nýtingu jarðhitakerfis. Ef aðstreymið er þannig að kalda vatnið nær að hitna á leið sinni til vinnsluholanna er aðstreymið til mikilla bóta fyrir vinnsluna, því þá dregur vatnið varma úr bergeninu og ending jarðhitakerfisins verður mikil. Ef kalda aðstreymið nær hins vegar að vinnsluholum án þess að hitna á leiðinni er aðstreymið til bölvunar eins og dæmið frá Urriðavatni sýnir (mynd 7). Aðstreymi af köldu vatni að jarðhitakerfinu á Nesjavöllum mun hins vegar verða til þess að vinnslugeta svæðisins er mun meiri en upphaflega var talið (Guðmundur Böðvarsson, óbirt gögn).

Ef herma á nokkra þætti í gerð, eðli og viðbrögðum jarðhitakerfis þarf að grípa til mun flóknari reiknilíkana, sem kölluð hafa verið kubbalsíkan á íslensku. Á ensku ganga slík líkön undir nöfnnum eins og finite element models, finite difference models eða distributed models. Með slíkum líkönum má taka tillit til jarðfræðilegrar uppbyggingar svæðisins, láta líkönin herma hita- og þrýstidreifingu í kerfinu og láta líkanið herma þrýstibreytingar í kerfinu eða jafnvel í einstökum borholum samfara vinnslu og innstreymi kalds vatns á mörgum stöðum.

Mynd 19 sýnir kubbalsíkan sem notað var við hermireikninga á Hvítaholasvæðinu við Kröflu (Helga Tulinius og Ómar Sigurðsson 1991). Við svona líkanreikninga er jarðhitasvæðinu skipt upp í marga kubba, þar sem hver kubbur hefur sína sérstöku eiginleika. Hiti og þrýstingur er reiknaður út fyrir alla kubbana sem fall af tíma.

Par sem allir kubbarnir eru tengdir á einn eða annan hátt berast áhrif frá einum stað til annars í jarðhitakerfinu. Galdurinn er sá að velja réttu eiginleikana fyrir hvern kubb þannig að



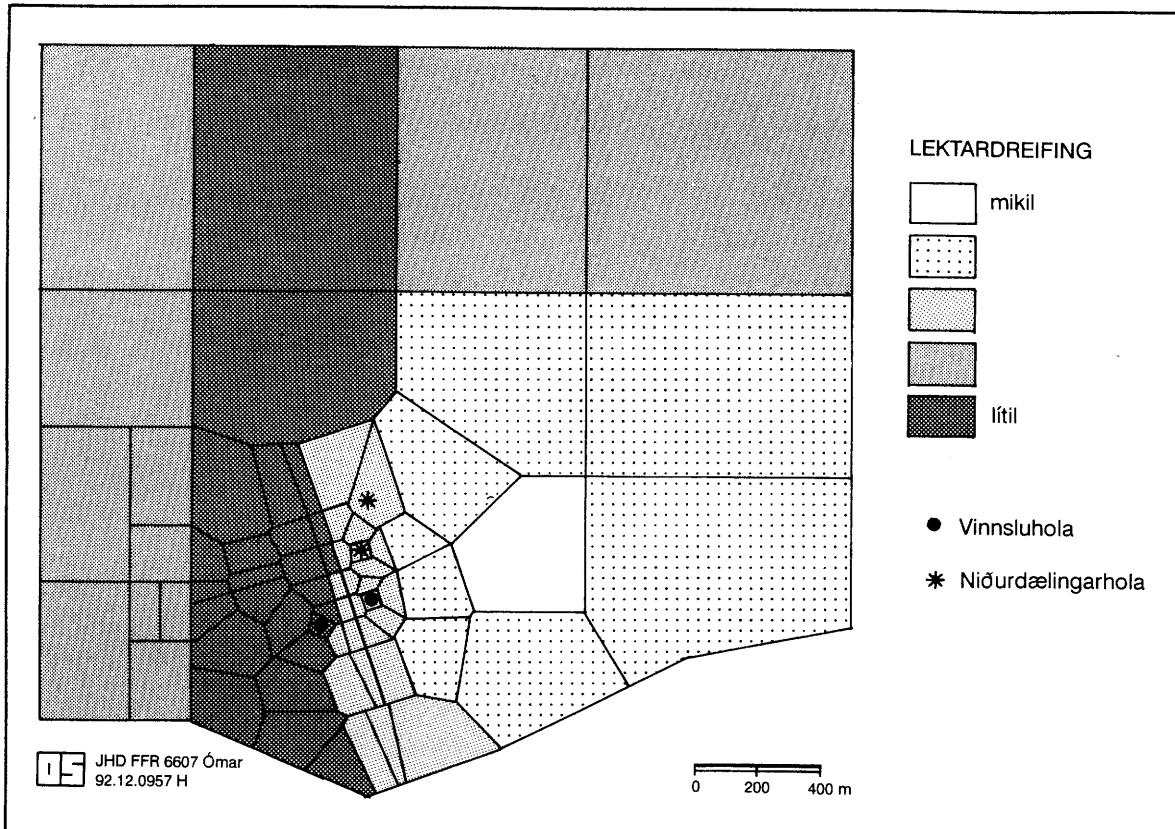
Mynd 18. Mældur og reiknaður klóríðstyrkur í rennsli frá holu 8 Urriðavatni.

niðurstöður reikninganna komi heim við það sem mælt hefur verið. Hermireikningar af þessu tagi eru gerðir í tölву, og fyrir líkön með mörgum kubbum taka reikningarnir m.a.s. langan tíma í öflugum tölvum. Til skamms tíma voru ekki fyrir hendi nægilega öflugar tölvar hér á landi til þess að herma kubbalíkön með mörgum kubbum. Próunin á tölvusviðinu er þó ör, og segja má að nægjanlega góður tölvukostur hafi verið fyrir hendi síðastliðin eitt eða tvö ár.

Þau tölvuforrit sem notuð hafa verið til þess herma íslensk jarðhitasvæði með kubbalíkönnum eru:

- | | |
|-------|--|
| AQUA | hermir tvívítt eins fasa kerfi. Snorri Páll Kjaran og samstarfsmenn hjá Verkfræðistofunni Vatnaskilum hafa þróað og notað þetta forrit. Eldri útgáfur af þessu forriti voru í notkun um skeið hjá Orkustofnun. |
| PT | hermir þrívíð eins fasa kerfi. Í notkun á Orkustofnun, en þróað hjá Lawrence Berkeley Laboratory í USA. |
| TOUGH | hermir þrívíð tveggja fasa kerfi. Í notkun á Orkustofnun, en þróað hjá Lawrence Berkeley Laboratory í USA. |

Mikil vinna liggar að baki gerð tölvuforrita til hermireikninga. Próunarvinna við gerð ofangreindra forrita er nokkur mannár fyrir hvert þeirra, og líklega hefur próunarvinna við TOUGH verið tugir mannára. Þessi próunarvinna er grundvöllur forðafræðilegs eftirlits með vinnslusvæðum íslenskra hitaveitna.



Mynd 19. Kubbalíkan af jarðhitasvæðinu við Hvíthóla í Kröflu.

Tafla 1 sýnir að alls hafa verið gerðir 28 hermireikningar fyrir íslensk jarðhitasvæði. Flestar hermanir, eða 13, hafa verið gerðar með forritinu LUMPFIT, enda er það einfaldast í notkun. Tvær hermanir hafa verið gerðar með forritinu AQUA. Með forritinu TOUGH eða fyrri útgáfu þess SHAFT 79 hafa verið gerðar 5 hermanir, en með PT hafa þrjár hermanir verið gerðar. Með ýmsum einföldum líkönum hafa 6 hermanir verið gerðar.

Próunarverk í gangi

Forðafræði jarðhita. Ætla má að verkefni á sviði forðafræði jarðhita verði vaxtarbroddurinn í íslenskum jarðhitarannsóknum á komandi árum líkt og verið hefur nú um nokkur ár. Þau atriði sem nú þegar eru í gangi, og koma eflaust til með að verða til athugunar næstu árin eru einkum eftirfarandi atriði:

- * Sjálfvirk söfnun vinnslugagna
- * Forðafræðistuðlar
- * Niðurdæling
- * Sporefni (tracer)

Þróaður hefur verið sérstakur gagnasöfnunarþúnaður, sem skráir vinnslugögn hitaveitna sjálfvirk, og sendir einnig gögnin sjálfvirk í gegn um síma til Orkustofnunar. Nú er unnið að því að láta gögnin fara sjálfvirk inn í gagnabanka Orkustofnunar. Mikil hagræðing er að

þessu fyrirkomulagi fyrir allar forðafræðilegar athuganir sem gerðar eru á Orkustofnun.

Tafla 1. Listi yfir hermireikninga fyrir íslensk jarðhitasvæði.

Jarðhitasvæði	Ár	Forrit	Heimild
Laugarnes	1968	Einfalt líkan	Þorsteinn Thorsteinsson og Jónas Ólafsson, 1970
Svartsengi	1977	Einfalt líkan	Jónas Ólafsson og fl., 1977
Svartsengi	1980	Einfalt líkan	Snorri Páll Kjaran og fl., 1980
Elliðaárvæði	1982	Einfalt líkan	Vatnaskil, 1982
Krafla	1982	SHAFT 79	Guðmundur Böðvarsson et al., 1984a, 1984b, 1984c, Karsten Pruess et al., 1984
Mosfellssveit	1985	Einfalt líkan	Vatnaskil, 1985
Laugarnes	1986	LUMPFIT og AQUA	Orkustofnun og Vatnaskil, 1986
Dalvík	1986	LUMPFIT	Ragna Karlisdóttir og Guðni Axelsson, 1986
Nesjavellir	1986	TOUGH	Guðmundur Böðvarsson et al., 1990a, 1990b
Seltjarnarmes	1987	PT	Helga Tulinius et al., 1987
Urriðavatn	1987	LUMPFIT	Guðni Axelsson, 1987
Siglufjörður	1987	LUMPFIT	Ómar Sigurðsson og fl., 1987
Laugal. Holtum	1987	LUMPFIT	Lúðvík S. Georgsson og fl., 1987
Glerárdalur	1987	PT	Guðni Axelsson og Helga Tulinius, 1988
Glerárdalur	1988	LUMPFIT	Guðni Axelsson og fl., 1988
Ytri Tjarnir	1988	LUMPFIT	Guðni Axelsson og fl., 1988
Laugal. Eyjafj.	1988	LUMPFIT	Guðni Axelsson og fl., 1988
Botn	1988	LUMPFIT	Guðni Axelsson og fl., 1988
Dalvík	1988	LUMPFIT	Guðni Axelsson, 1988
Hvíthólar	1988	SHAFT 79	Helga Tulinius og Ómar Sigurðsson, 1988
Svartsengi	1989	AQUA	Vatnaskil, 1989
Laugal. Holtum	1990	LUMPFIT	Guðni Axelsson, 1990
Ólafsfjörður	1991	LUMPFIT	Guðni Axelsson, 1991a
Urriðavatn (efnafr. hiti)	1991	Þjappað líkan	Guðni Axelsson, 1991b
Laugal. Eyjafj. (sporefni)	1991	Þjappað líkan	Ólafur G. Flóvenz og fl., 1991
Hvíthólar	1991	TOUGH	Helga Tulinius og Ómar Sigurðsson, 1991
Blönduós	1992	LUMPFIT	Grímur Björnsson, 1992
Botn Eyjafj.	1992	PT	Guðni Axelsson og Grímur Björnsson, 1992

Eiginleikar bergs eins og poruhluti, berglekt og varmaleiðni eru frumstærðir í hermireikningum, og gildi þessara stuðla hefur áhrif á niðurstöður hermunar um afl og orku jarðhitakerfa. Hins vegar liggja ekki fyrir miklar beinar mælingar á þessum stærðum. Á næstu árum verður því gert átak í því að safna heppilegum bergsýnum úr borholum og frá yfirborði og gera viðeigandi mælingar á þessum sýnum. Markmið með þessari starfsemi er að koma upp vísi að gagnabanka um forðafræðistuðla.

Niðurdæling hefur aðeins verið reynd á tveimur íslenskum jarðhitasvæðum, en búist er við að þessi vinnsluaðferð verði tekin upp hér á landi eins og í öðrum löndum. Áður en niðurdæling verður almenn þarf að gera ýmsar fræðilegar athuganir og gera prófanir á jarðhitasvæðum. Á næstu árum mun verða gerð fræðileg athugun á áhrifum niðurdælingar og hvernig vinnanleg orka jarðhitasvæða er háð því hvort niðurdæling er notuð eða ekki. Sett verða upp einföld kubbalíkön og hermt eftir mismunandi vinnsluaðferðum.

Streymisleiðir í jarðhitakerfi skipta sköpum þegar kubbalíkön eru notuð í hermireikningum. Hægt er að fá vissar upplýsingar með því að setja niður sporefni í borholur og sjá hvernig efnið dreifist um jarðhitakerfið. Slíkar prófanir hafa verið gerðar á fjórum jarðhitasvæðum. Komið hefur í ljós að túlkun gagnanna er ekki einföld, og er talið nauðsynlegt að sinna þessari rannsóknaraðferð bæði fræðilega og með fleiri prófunum á jarðhitasvæðum.

Rannsókn háhitasvæða vegna raforkuvinnslu. Allt bendir nú til að mun hagkvæmara sé að vinna raforku úr jarðhita en talið hefur verið síðasta áratug eða svo. Þegar farið verður að byggja raforkuver á nýjan leik á Íslandi má því búast við að jarðhitinn veiti vatnsorkunni verulega samkeppni. Til þess að sá möguleiki verði raunhæfur, er nauðsynlegt að nýta tímann fram að næstu aldamótum til þess að rannsaka háhitasvæðin að því marki að virkjanir þar verði mögulegar þegar ákvörðun um næsta raforkuver verður tekið. Pessar rannsóknir munu annars vegar beinast að yfirborðsrannsóknum á vissum háhitavæðum eins og Brennisteinsfjöllum og Torfajökulsþæði, en hins vegar að hagkvæmniathugunum á háhitasvæðum, þar sem rannsóknir eru lengra komnar eins og í Bjarnarflagi og háhitasvæðum á SV-landi.

Umhverfismál jarðhitanytingar. Áhrif jarðhitavinnslu á umhverfi er nú til endurskoðunar hér á landi. Í byrjun felst starfið einkum í því að meta eðlileg áhrif háhitasvæðanna á umhverfi sitt, svo hægt sé í framtíðinni að segja til um hver eru áhrif vinnslunnar og hver eru náttúruleg áhrif jarðhitasvæðanna. Slíkt umhverfismat er nauðsynlegur grundvöllur til þess að ákvarða innan hvaða marka er skyndamlegt að takmarka áhrif jarðhitavinnslu á umhverfið.

Lokaorð

Í þessari grein er fjallað um valin atriði, sem auðsjáanlega hafa haft áhrif á þróun jarðhitanytingar á Íslandi og þannig stuðlað að því að jarðhiti til húshitunnar er ódýrasta orka sem notuð er á Íslandi. Sparnaður notenda á árinu 1991 var á bilinu 6-9 milljarðar króna miðað við hitun með olíu eða rafmagni.

Pessi árangur hefur náðst annars vegar með jarðhitaleit víðs vegar um landið sem hefur leitt

til þess að 85% landsmanna nota nú jarðhita til hitunar, og hins vegar með því að skipuleggja vinnsluna þannig að jarðhitakerfin nýtist um langan aldur og að orkuvinnslan verði sem öruggust.

Reynslan á síðasta áratug sýnir að við hönnun aðveitna og dreifikerfa hefur yfirleitt ekki verið tekið tillit til eiginleika jarðhitakerfanna, en þrátt fyrir ýmsa snögga bletti hafa jarðhitarannsóknir komið að miklum notum við jarðhitanýtingu á Íslandi og stuðlað að því að gera jarðhitann að hagkvæmasta orkugjafa þjóðarinnar.

Heimildir

Árni Gunnarsson, 1992: Heitavatnsdælur. 5. kafli í Hitaveituhandbók SÍH.

Grímur Björnsson, 1992: Reykir við Reykjabraut. Vinnslusaga og vatnsborðsspár. Skýrsla Orkustofnunnar OS-92016/JHD-05 B, 15 bls.

Guðmundur S. Böðvarsson, Sally Benson, Ómar Sigurðsson, Valgarður Stefánsson, and Einar T. Elíasson, 1984a: The Krafla Geothermal Field, Iceland 1. Analysis of Well Test Data, Water Resources Research, Vol. 20 (11), pp. 1515-1530.

Guðmundur S. Böðvarsson, Karsten Pruess, Valgarður Stefánsson, and Einar T. Elíasson, 1984b: The Krafla Geothermal Field, Iceland 2. The Natural State of the System, Water Resources Research, Vol. 20 (11), pp. 1531-1544.

Guðmundur S. Böðvarsson, Karsten Pruess, Valgarður Stefánsson, and Einar T. Elíasson, 1984c: The Krafla Geothermal Field, Iceland 3. The Generating Capacity of the Field, Water Resources Research, Vol. 20 (11), pp. 1545-1559.

Guðmundur S. Böðvarsson, Sveinbjörn Björnsson, Árni Gunnarsson, Einar Gunnlaugsson, Ómar Sigurðsson, Valgarður Stefánsson, and Benedikt Steingrímsson, 1990a: The Nesjavellir Geothermal Field, Iceland. Part 1. Field Characteristics and Development of a Three-dimensional Model, Geotherm. Sci. and Tech., Vol. 2 (3), pp. 189-228.

Guðmundur S. Böðvarsson, Sveinbjörn Björnsson, Árni Gunnarsson, Einar Gunnlaugsson, Ómar Sigurðsson, Valgarður Stefánsson, and Benedikt Steingrímsson, 1990b: The Nesjavellir Geothermal Field, Iceland. Part 2. Evaluation of the Generating Capacity of the System, Geotherm. Sci. and Tech., Vol. 2 (4), pp. 229-261.

Guðmundur Ó. Friðleifsson, 1991: Framhald jarðhitaleitar í Norðurárdal. Greinargerð GÓF/91-02, Orkustofnun, 8 bls.

Guðmundur Ó. Friðleifsson og Lúðvík S. Georgsson, 1991: Jarðhitaleit í Norðurárdal 1991. Greinargerð GÓF-LSG/91-01, Orkustofnun, 10 bls.

Guðmundur Pálason, 1992: Geothermal Energy in Iceland. Electricity Production and Direct Heat Use. Skýrsla Orkustofnunar OS-92047/JHD-24 B, 11 bls.

- Guðni Axelsson, 1987: Jarðhitasvæðið Urriðavatni. Vatnafræðileg athugun í ágúst 1987. Skýrsla Orkustofnunar OS-87048/JHD-28 B, 42 bls.
- Guðni Axelsson, 1988: Jarðhitasvæðið að Hamri í Svarfaðardal. Um afköst vinnsluhola Hitaveitu Dalvíkur. Skýrsla Orkustofnunar OS-88053/JHD-11, 38 bls.
- Guðni Axelsson, 1990: Laugaland í Holtum. Hermireikningar og vatnsborðsspár. Skýrsla Orkustofnunar OS-90043/JHD-24 B, 96 bls.
- Guðni Axelsson, 1991a: Jarðhitasvæðið á Laugarengi í Ólafsfirði. Prófun og vatnsborðsspár. Skýrsla Orkustofnunnar OS-91012/JHD-03, 38 bls.
- Guðni Axelsson, 1991b: Jarðhitasvæðið Urriðavatni. Einfaldir hermireikningar og spár um kólnun vatns úr holu 8. Skýrsla Orkustofnunar OS-91037/JHD-21 B, 15 bls.
- Guðni Axelsson og Helga Tulinius, 1988: Jarðhitasvæðið á Glerárdal. Hermireikningar og vinnsluspár. Greinargerð GAx/HTul-88/01 Orkustofnun, 25 bls.
- Guðni Axelsson og Grímur Björnsson, 1992: Botn í Eyjafjarðarsveit. Líkanreikningar fyrir jarðhitakerfið. Skýrsla Orkustofnunar OS-92012/JHD-01, 71 bls.
- Guðni Axelsson, Helga Tulinius, Ólafur G. Flóvenz og Þorsteinn Thorsteinsson, 1988: Vatnsöflun Hitaveitu Akureyrar. Staða og horfur 1988. Skýrsla Orkustofnunar OS-88052/JHD-10, 33 bls.
- Helga Tulinius, Amada L. Spencer, Guðmundur S. Böðvarsson, Hrefna Kristmannsdóttir, Þorsteinn Thorsteinsson, and Árný E. Sveinbjörnsdóttir, 1987: Reservoir Studies of the Seltjarnarnes Geothermal Field, Iceland. Orkustofnun Report OS-87032/JHD-07, 55p.
- Helga Tulinius og Ómar Sigurðsson, 1988: Jarðhitasvæðið við Hvítá. Hermireikningar og vinnsluspá. Skýrsla Orkustofnunar OS-88007/JHD-03 B, 24 bls.
- Helga Tulinius og Ómar Sigurðsson, 1991: Krafla. Prívíð hermun fyrir vinnslisvæðið á Hvítólum. Skýrsla Orkustofnunar OS-91046/JHD-07, 37 bls.
- Jónas Elíasson, Sigurður St. Arnalds, 1977: Svartsengi. Straumfræðileg rannsókn á jarðhitasvæði. Skýrsla Orkustofnunar OS-ROD-7718 og OS-SFS-7702, 37 bls.
- Lúðvík S. Georgsson, Auður Ingimarsdóttir, Guðni Axelsson, Margrét Kjartansdóttir og Þorsteinn Thorsteinsson, 1987: Laugaland í Holtum. Hola GN-1 í Götu og vatnsvinnsla á Laugalandssvæðinu. Skýrsla Orkustofnunar OS-87022/JHD-04, 65 bls.
- Karsten Pruess, Guðmundur S. Böðvarsson, Valgarður Stefánsson, and Einar T. Elíasson, 1984: The Krafla Geothermal Field, Iceland 4. History Match and Prediction of Individual Well Performance, Water Resources Research, Vol. 20 (11), pp. 1561-1584.
- Kristján Sæmundsson, 1989: Hitastigulsboranir í jarðhitaleit. Erindi flutt á ársfundi Orkustofnunar 1989.

Ólafur G. Flóvenz, Jens Tómasson og Grímur Björnsson, 1990: Rannsóknarboranir við Laugaland á Þelamörk 1989. Skýrsla Orkustofnunar OS-90014/JHD-02, 38 bls.

Ólafur G. Flóvenz, Guðni Axelsson og Hrefna Kristmannsdóttir, 1991: Niðurdæling vatns á lághitasvæðum. Erindi flutt á Orkupingi 91, 5 bls.

Ólafur Pálsson, Jón Ingimarsson og Rútur Halldórsson, 1991: Orkuverð á Íslandi 1990. Skýrsla Orkustofnunar OS-910011/OBD-01, 31 bls.

Ómar Sigurðsson, Ragna Karlsdóttir og Margrét Kjartansdóttir, 1987: Hitaveita Siglufjarðar. Mat á jarðitasvæðinu í Skútudal. Skýrsla Orkustofnunar OS-87034/JHD-08, 71 bls.

Orkuspármefnd, 1992: Húshitunarspá 1992-2020. Skýrsla Orkustofnunar OS-92023/OBD-01, 147 bls.

Orkustofnun og Verkfræðistofan Vatnaskil hf, 1986: Laugarnessvæði. Vinnsusaga og framtíðarhorfur. Skýrsla Hitaveitu Reykjavíkur 129 bls.

Ragna Karlsdóttir, 1992: Brennisteinsfjöll. TEM-mælingar 1992. Skýrsla Orkustofnunar OS-92051/JHD-27 B, 20 bls.

Ragna Karlsdóttir og Guðni Axelsson, 1986: Vatnsöflun Hitaveitu Dalvíkur. Úttekt á jarðitasvæðinu við Hamar. Skýrsla Orkustofnunar OS-86044/JHD-12, 51 bls.

Sigmundur Einarsson, Margrét Kjartansdóttir, Brynjólfur Eyjólfsson og Ólafur G. Flóvenz, 1983: Jarðitasvæðið í Urriðavatni. Jarðfræði- og jarðeðlisfræðirannsóknir 1978-1982. Skýrsla Orkustofnunar OS-83005/JHD-03, 83 bls.

Snorri Páll Kjaran, Jónas Elfasson og Gísli Karel Halldórsson, 1980: Svartsengi. Athugun á vinnslu jarðhita. Skýrsla Orkustofnunar OS80021/ROD10-JHD17, 98 bls.

Sverrir Þórhallsson, 1989: Boranir fyrir hitaveitir. Erindi flutt á vetrarfundi SÍH og SÍR.

Trausti Hauksson, Sverrir Þórhallsson, Einar Gunnlaugsson og Gestur Gíslason, 1992: Útfellingar magnesíumsilíkata. Skýrsla um niðurstöður tilrauna á Grafarholti með blöndun jarðhitavatns frá Reykjum í Mosfellsbæ og upphitaðs ferskvatns frá Nesjavallavirkjun. Skýrsla Hitaveitu Reykjavíkur. 132 bls.

Valgarður Stefánsson, 1992: Jarðhiti til raforkuvinnslu. Erindi flutt á ársfundi Orkustofnunnar 26. mars 1992, í skýrslu Orkustofnunar OS-92013.

Verkfræðistofan Vatnaskil hf., 1989: Svartsengi. Reiknilíkan af jarðhitakerfinu. Skýrsla Orkustofnunar OS-89031/JHD-05, 111 bls.

Verkfræðistofan Vatnaskil hf., 1982: Elliðaárvæði. Áhrif jarðhitavinnslu á orkuforða, 90 bls.

Verkfræðistofan Vatnaskil hf., 1985: Mosfellssveit. Áhrif jarðhitavinnslu á orkuforða, 61 bls.

Þorsteinn Thorsteinsson og Jónas Elíasson, 1970: Geohydrology of the Laugarnes Hydrothermal System in Reykjavík, Iceland. Geothermics - Special Issue 2, 2, pp. 1191-1204.