



ORKUSTOFNUN

JARÐHITARANNSÓKNIR FYRIR HITAVEITUR

Yfirlit um eðli jarðhitasvæða, jarðhitaleit og vinnslu jarðvarma.

Tekið saman á
Jarðhitadeild Orkustofnunar
fyrir
Samband íslenskra hitaveitna.

Lagt fram sem **handrit** á ársfundi SÍH
Egilsstöðum, 8-9. júní 1989.



ORKUSTOFNUN

JARÐHITARANNSÓKNIR FYRIR HITAVEITUR

Yfirlit um eðli jarðhitasvæða, jarðhitaleit og vinnslu jarðvarma.

Tekið saman á
Jarðhitadeild Orkustofnunar
fyrir
Samband íslenskra hitaveitna.

Lagt fram sem **handrit** á ársfundi SÍH
Egilsstöðum, 8-9. júní 1989.

EFNISYFIRLIT

0. FORMÁLI

1. ORKULINDIN JARÐHITI

- 1.1. Nýting jarðhita á Íslandi
- 1.2. Jarðhitasvæði - Uppruni jarðhitans
- 1.3. Jarðhitarannsóknir - Markmið og skipulag

2. JARÐHITALEIT - FORRANNSÓKNIR

- 2.1. Jarðfræðikortlagning
- 2.2. Jarðefnafræði
- 2.3. Jarðeðlisfræðileg könnun
- 2.4. Hitastigulsboranir

3. BORHOLURANNSÓKNIR

- 3.1. Jarðboranir
- 3.2. Borholujarðfræði
- 3.3. Borholumælingar
- 3.4. Varsla borholugagna

4. VINNSLURANNSÓKNIR

- 4.1. Vinnsluprófanir
- 4.1. Efnaeftirlit
- 4.3. Forðafræði

5. VIÐAUKAR

- 5.1. Rannsóknaraðilar jarðhita á Íslandi
- 5.2. Borverktakar
- 5.3. Frekara lesefni

FORMÁLI

Þrátt fyrir almennan áhuga hér á landi á hverjum og laugum og mikilvægi jarðhitaorku er fæstum vel ljós uppruni jarðhitans né hvernig staðið er að jarðhitaleit og borun á jarðhitasvæðum. Kemur þar tvennt til. Í fyrsta lagi er ekki ýkja langt síðan farið var að nota jarðhitavatn almennt til húshitunar hér á landi og í öðru lagi eru jarðhitakerfi neðanjarðar og ósýnileg augum manna. Beita þarf flóknum rannsóknaraðferðum við leit að jarðhita og við mat á afköstum jarðhitakerfa. Þessar rannsóknir spanna yfir mörg fræðasvið og hefur reynst nauðsynlegt á undanförunum árum að þróa aðferðir fyrir íslenskar aðstæður, samhliða rannsóknunum og vinnslu jarðhita.

Á aðalfundi Sambands íslenskra hitaveitna (SÍH), er haldinn var í Vestmannaeyjum í júní 1988, kom fram sú hugmynd að skrifa upplýsingarit um jarðhitarannsóknir. Ritið skyldi einkum vera ætlað hitaveitumönnum, sveitarstjórnarmönnum og öðrum þeim er láta sig rekstur hitaveitna varða, en hafa ekki sérþekkingu á einstökum þáttum jarðhitarannsókna og jarðhitavinnslu.

SÍH snéri sér til Orkustofnunar og bað um að slíkt upplýsingarit yrði tekið saman. Árangurinn liggur fyrir í þessu hefti. Við höfum leitast við að gera stutt yfirlit um eðli og uppruna jarðhitans, jarðhitaleit, boranir og vinnslu jarðhita án þess að fara út í flókin jarðvísindaleg eða tæknileg atriði. Þessi meðalvegur er vandrataður en við vonum að þessi samantekt verði hitaveitumönnum að nokkru gagni í daglegu starfi þeirra við öflun og vinnslu jarðhita.

Ritið skiptist í nokkra kafla, sem lesa má sem sjálfstæðar einingar. Í viðaukum verða nokkrar handhægar upplýsingar um borverktaka, aðila er rannsaka jarðhita hér á landi og skrá um frekara lesefni. Þessum kafla er ekki lokið.

Undirritaður og Jón Steinar Guðmundsson lögðu drög að efnisinnihaldi og gerðu uppkast að texta. Síðan lásu félagar okkar á Orkustofnun handritið yfir og lögðu til ýmsar endurbætur og viðbótarefni. Þau, sem einkum komu við sögu eru Benedikt Steingrímsson, Ásgrímur Guðmundsson, Hrefna Kristmannsdóttir, Kristján Sæmundsson, Ómar Sigurðsson og Sverrir Þórhallsson. Endanleg samantekt og frágangur var í höndum undirritaðs og allt sem missagt kann að vera í þessum texta skrifast á hans reikning.

Þessi samantekt er lögð fram sem handrit á ársfundi SÍH á Egilsstöðum, dagana 8.-9. júní 1989. Ég vona að þar gefist tækifæri til að ræða jarðhitarannsóknir fyrir hitaveitur og að hitaveitumenn beri fram athugasemdir sínar við þetta plagg svo unnt verði að endurbæta það og laga, þannig að það nýtist þeim sem best.

Axel Björnsson

1. ORKULINDIN JARÐHITI

1.1 NÝTING JARÐHITA Á ÍSLANDI

Jarðhiti er ómissandi í daglegu lífi flestra Íslendinga. Við notum jarðhitavatn til upphitunar í hitaveitum og við böðum okkur og syndum í jarðhitavatni. Yfir þriðjungur af allri orku, er Íslendingar nota, kemur úr jarðhita. Því má fullyrða að jarðhiti sé einn veigamesti hornsteinn undir nútíma velferðarþjóðfélagi hér á landi. Það er erfitt að gera sér í hugarlund í hvers konar þjóðfélagi við byggjum ef jarðhitans hefði ekki notið við. Líklegt er að verðhækkunar á olíu síðustu áratugi hefðu getað haft alvarlegar afleiðingar fyrir efnahagslegt sjálfstæði þjóðarinnar, ef ekki hefði verið unnt að grípa til innlendra orkugjafa.

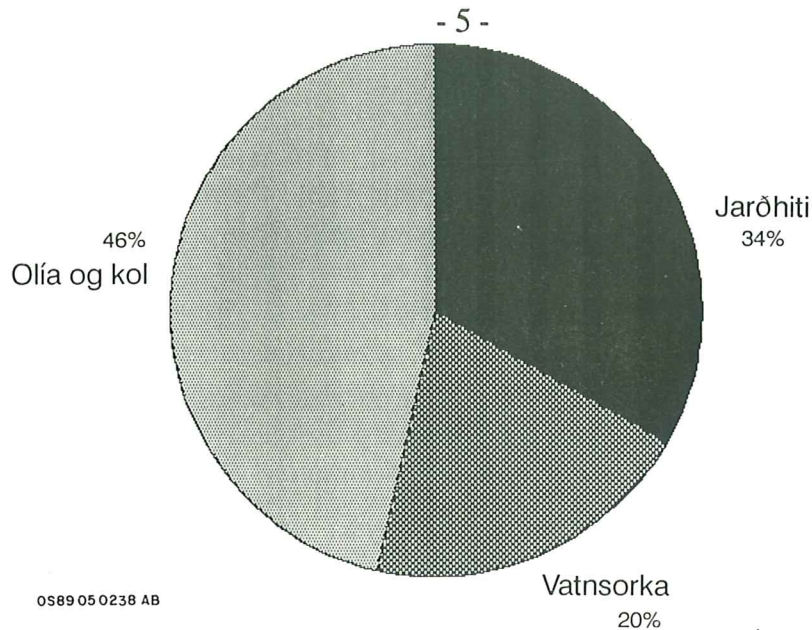
Ekki er einhlítt hvernig best er að bera saman mismunandi orkugjafa. Jarðhiti nýtist best í upphitun og í ýmiss konar iðnaði. Vatnsafl er hentugur orkugjafi til raforkuframleiðslu og olía er eini orkugjafinn sem hagkvæmt er að nota á samgöngutækni. Áætlað er að verg orkuframleiðsla (framleidd á Íslandi og innflutt) árið 1990 jafngildi því að nota þyrfti um 2400 þúsund tonn af olíu til þess að fullnægja orkuþörfinni. Þar af er gert ráð fyrir að olíunotkun innanlands og vegna flutninga til og frá landinu verði um 700 þúsund tonn. Þegar tekið er tillit til nýtni einstakra orkugjafa kemur í ljós að notuð orka hjá endanlegum orkunotenda árið 1988 skiptist þannig:

Olía og fast eldsneyti	34,4 PJ	9630 GWh	46%
Vatnsorka	15,0 PJ	4200 GWh	20%
Jarðhiti	25,0 PJ	7000 GWh	34%

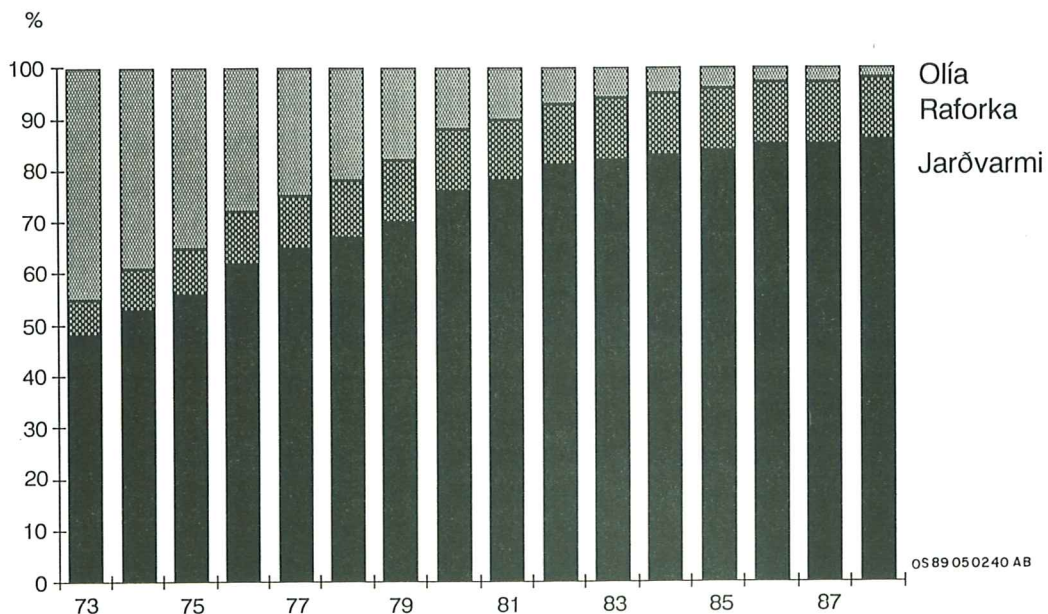
Eitt PJ (Petajoule) eru 10 í fimmtánda Joule og ein Gígawattstund (GWh) er ein milljón kílówattstunda. Orkan í einni GWh samsvarar orku í 17200 tonnum af heitu vatni sem kólnar úr 80°C í 30°C, en það samsvarar um 0,5 sekúndulítrum af 80°C heitu vatni í eitt ár (1 GWh = 0,5 l/s).

Af þessu má ráða hversu mikilvægur jarðhitinn er í þjóðarbúskap okkar. Um 34% allrar orku sem við notum kemur úr heitu vatni og jarðgufu. Einnig er ljóst að við munum verða verulega háð olíu um ókomin ár og um þriðjungur hennar er keyptur erlendis á skip og flugvélar vegna flutninga til landsins. Um helmingur vatnsorkunnar er notaður í stóriðju.

Lang mikilvægasta notkun jarðhitans er í húshitun. Fyrsta hitaveitan var lögð í Reykjavík um 1930. Í fyrstu var vatnið notað í sundlaug, til upphitunar á spítala, skóla og nokkrum tugum íbúðarhúsa. Síðan hefur notkun jarðhita vaxið hröðum skrefum og njóta nú um 86% landsmanna upphitunar frá hitaveitum. Um 40 hitaveitur smáar og stórar eru nú reknar á landinu.



1. mynd: Orkunotkun Íslendinga 1988 skiptist eftir tegundum í jarðhita, vatnsorku og innflutt eldsneyti, einkum olíu en einnig kol. 9630 GWh (Gígawattstundir) eða 46% komu úr olíu og kolum. Þar af er um þriðjungur olía keypt erlendis á skip og flugvélar vegna flutninga til og frá landinu. Vatnsorkan nam 4700 GWh eða 20%. Þar af var um helmingur notaður í stóriðju. Jarðhitinn var 7000 GWh eða 34% og einkum notaður til húshitunar. Ein Gígawattstund er milljón kílóvattstunda (kWh) og samsvarar það ársrennsli af 0,5 sekúndulítrum af 80°C heitu vatni, sem nýtt er niður í 30°C. (Gögn frá Orkubúskapardeild Orkustofnunar, OBD).



2. mynd: Aukning jarðhita í húshitun - útrýming olíu. Hluttur jarðhita í húshitun hér á landi hefur vaxið úr 48% árið 1973 og upp í 86% á árinu 1989. Á sama tíma hefur hluttur innfluttrar olíu minnkað úr 45% í 4%, sem hefur leitt til mikils sparnaðar fyrir þjóðarbúið. (Gögn frá OBD).

En jarðhiti er notaður víðar en til húshitunar. Frá landnámsöld hafa menn nýtt jarðhitann til þvotta og baða eins og víða kemur fram í fornsögunum. Frægust er laug Snorra í Reykholti. Þangað sótti sagnaritarinn hvíld og hressingu og ræddi þjóðmál líðandi stundar við félagu sína líkt og enn er gert í heitu pottunum í sundlaugum landsins. Nú á dögum er sundsprettur í heitri laug ómissandi þáttur í daglegu lífi margra Íslendinga.

Notkun jarðhita til ræktunar í gróðurhúsum hefur vaxið mikið á þessari öld og jarðhiti er í auknum mæli notaður við þurrkun í iðnaði, í fiskeldisstöðvum og til snjóbræðslu. Mynd 3 sýnir áætlaða notkun jarðhita á næstu áratugum.

Í þeirri jarðhitaspá, sem sýnd er á 3. mynd er ekki innifalin áætlun fyrir raforkuframleiðslu með jarðgufu, en tekið er tillit til hennar í raforkuspá. Enda þótt Kröfluvirkjun hafi orðið fyrir miklum skakkaföllum af völdum eldvirkni og fljótfærni við undirbúning virkjunarinnar, þá er ekki ósennilegt að raforka verði framleidd í auknum mæli með jarðgufu á komandi árum. Auðvelt er að virkja jarðhitann í smáum einingum til raforkuframleiðslu eingöngu eða í tengslum við hitaveitur frá háhitasvæðum líkt og gert er í Svartsengi og fyrirhugað er á Nesjavöllum. Ef ekki kemur til frekari stóriðja á næstu árum gætu litlar jarðgufustöðvar orðið jafn hagkvæmur kostur og litlar vatnsaflsstöðvar til þess að sinna aukningu á almennum raforkumarkaði, þegar raforka frá Blönduvirkjun er fullnýtt.

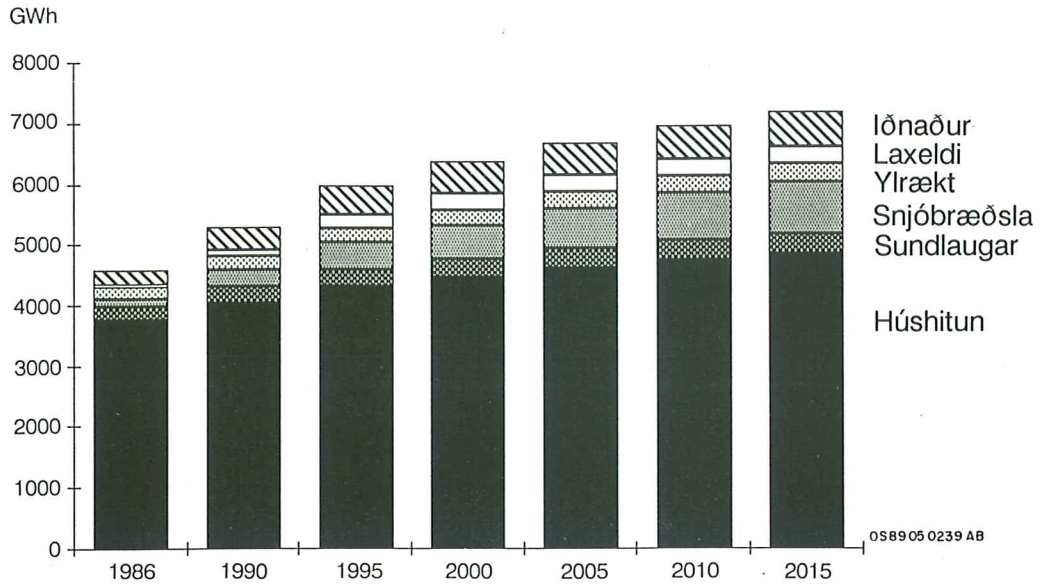
En jarðhitinn er ekki einungis mikilvægur orkugjafi heldur einnig heillandi sérkenni íslenskrar náttúru. Flestir ferðamenn leggja lykkju á leið sína til þess að dást að ólgandi hverum og litadýrð leirhvera. Þetta á ekki síst við um erlenda ferðamenn, sem tengja nafn Íslands við eldgos og goshveri. Besta dæmið um það er Geysir í Haukadal sem hefur ljáð nafn sitt sem samheiti allra goshvera í heiminum.

Ekki er unnt að meta í beinum tölum gildi jarðhitans og eldvirkni á Íslandi fyrir ferðamannaíðnaðinn. En fullyrða má að það er töluvert og mætti í því sambandi líkja Geysi og Heklu við skakka turnin í Písa og Eiffelturnin í París.

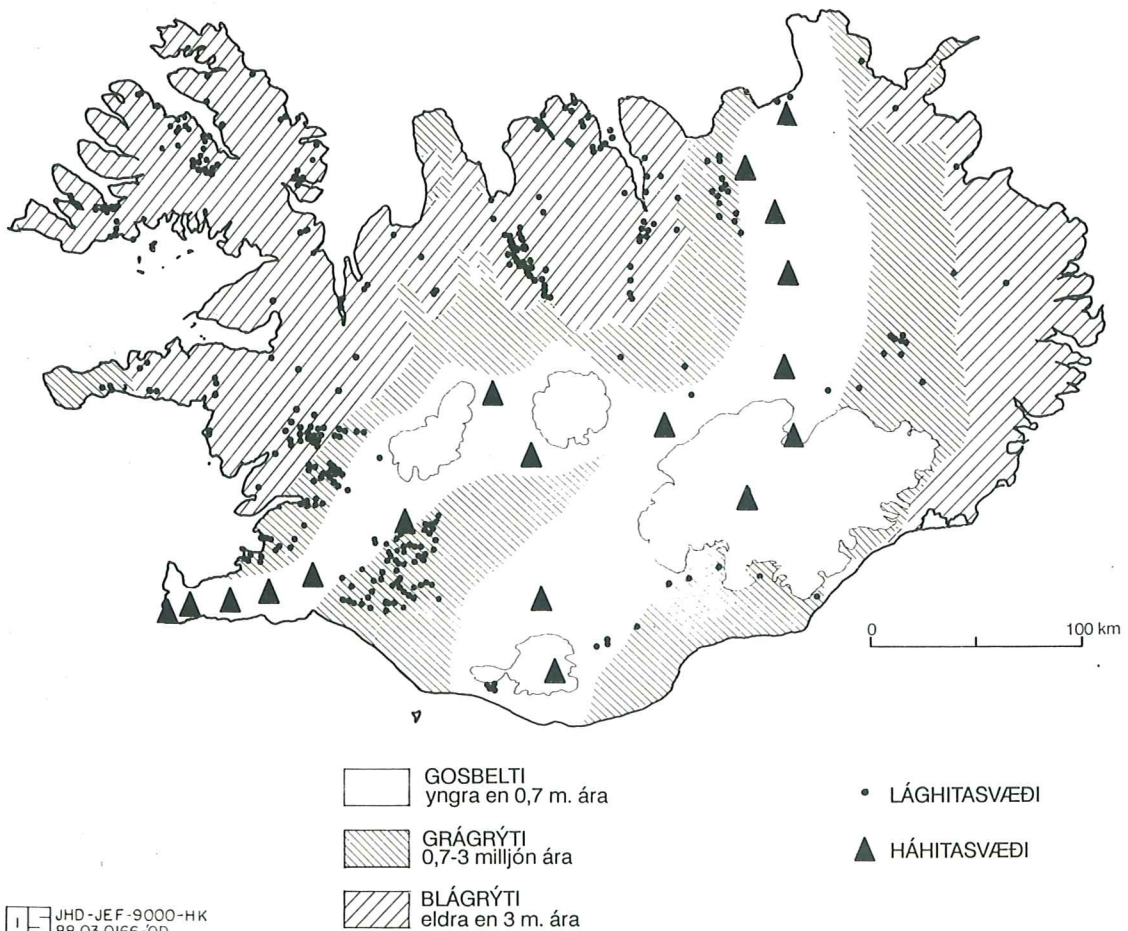
1.2 JARÐHITASVÆÐI - UPPRUNI JARÐHITANS

Jarðfræði Íslands

Samkvæmt landrekskenningunni er yfirborð jarðar gert úr tylft feiknastórra platna úr föstu efni, sem fljóta ofan á seigu eða hálfbráðnu efni í svokölluðum möttli jarðarinnar. Iðustraumar í möttlinum valda því að plöturnar eru á stöðugu reki og er því hreyfingin nefnd landrek. Þar sem tvær plötur rekur hvora frá annarri myndast rifur á milli þeirra, sem jafnharðan fylltast með bráðnu efni, sem streymir upp úr möttlinum. Ísland liggur á slíkum plötumótum og skapar landrekið stöðugt nýja jarðskorpu í gosbeltum landsins.



3. mynd: Spá um notkun jarðhita til hitunar. Því er spáð að notkun jarðhita muni vaxa allnokkuð á næstu áratugum. Notkun jarðhita í húshitun eykst vegna fólksfjölgunar og stækkandi húsrýmis. Önnur aukning verður líklega einkum í snjóbræðslu og iðnaði. (Gögn frá OBD).



4. mynd: Jarðfræðikort af Íslandi. Óskyggða svæðið um miðbik landsins sýnir gosbeltin. Sitt hvoru megin er eldra berg, fyrst grágrýtismyndunin og austast og vestast á landinu blágrýtismyndunin. Háhitasvæðin eru einkennd með þríhyrningum, þau eru öll innan gosbeltanna. Lághitasvæðin eru sýnd með punktum. Þau öflugustu eru nálægt jöðrum gosbeltanna á Suðvesturlandi og í Þingeyjarsýslum. Mun minna er um jarðhita austan gosbeltanna heldur en vestan þeirra. Þetta ræðst af mismunandi virkni jarðskorpunnar á þessum landshlutum.

Megingosbelti landsins nær frá Reykjanesi norður til Langjökuls, sveigir þar til austurs í Vatnajökul og teygir sig þaðan norður í Öxarfjörð. Á Suðurlandi greinist eldvirka beltið í tvennt. Eystri greinin liggur frá Vatnajökli suðvestur í Vestmannaeyjar. Leifar gamals gosbeltis er einnig að finna á Snæfellsnesi. Megingosbeltið markar plötuskilin og innan þess er yngsta berg landsins, yngra en 700 þúsund ára gamalt, og þar eru öll virku eldfjöllin. Gosbeltin einkennast af móbergsfjöllum, sem hrúgast hafa upp við eldgos undir jöklum og hraunbreiðum, sem runnið hafa eftir að jökla leysti Þessar jarðmyndanir eru gljúpar og mikið er um opnar sprungur og virk misgengi, sem vatn getur leikið um.

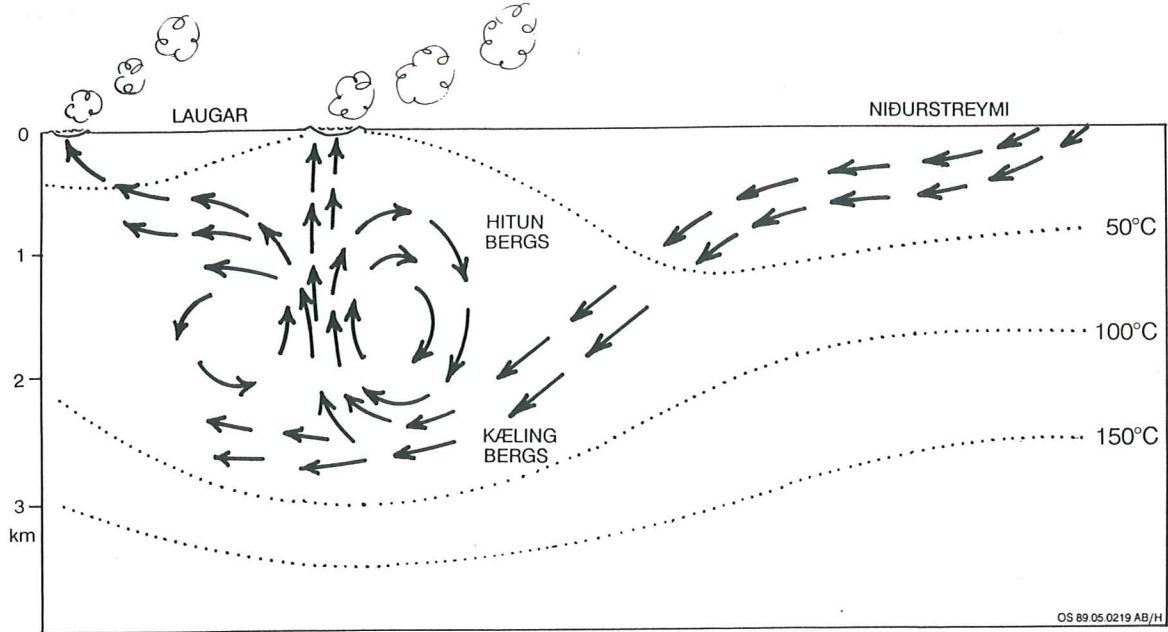
Utan gosbeltanna taka við 0,7-3 milljón ára gömul jarðlög, sem nefnd er grágrýtismyndun (Kvarter myndun). Austast og vestast á landinu, svo og á Mið-Norðurlandi eru elstu jarðlögin, 3-15 milljón ára gömul. Er sú myndun kennd við blágrýti (Tertíer myndun). Blágrýtisfjöllin eru staflar úr nær láréttum, víðáttumiklum hraunlögum, sem hlaðist hafa hvert ofan á annað. Flestar sprungur og holur hafa fyllst af útfellingum (holufyllingum), sem fallið hafa út úr jarðvatninu í tímans rás þannig að vatnsgengd er frekar lítil. Hún takmarkast einkum við einstakar sprungur og brot, sem oft liggja meðfram berggöngum, en gangur er nær lóðrétt sprunga, sem kvika hefur storknað í.

Varmastraumur upp til yfirborðs er mjög hár á Íslandi eða tvisvar til fjórum sinnum hærri en algengt er á meginlöndum. Varmaflæðið er hæst næst gosbeltunum, en þar er jarðskorpan þynnst og ekki nema um 10 km niður á bráðið berg. Hitastigullinn er 80-120 °C/km, sem þýðir að hitastig vex um 80 - 120 gráður við hverja 1000 m niður í jörðina. Þegar fjær dregur gosbeltunum þykknar jarðskorpan og varmaflæðið minnkar. Á blágrýtissvæðunum, fjærst gosbeltunum, er hitastigullinn um 50 °C/km.

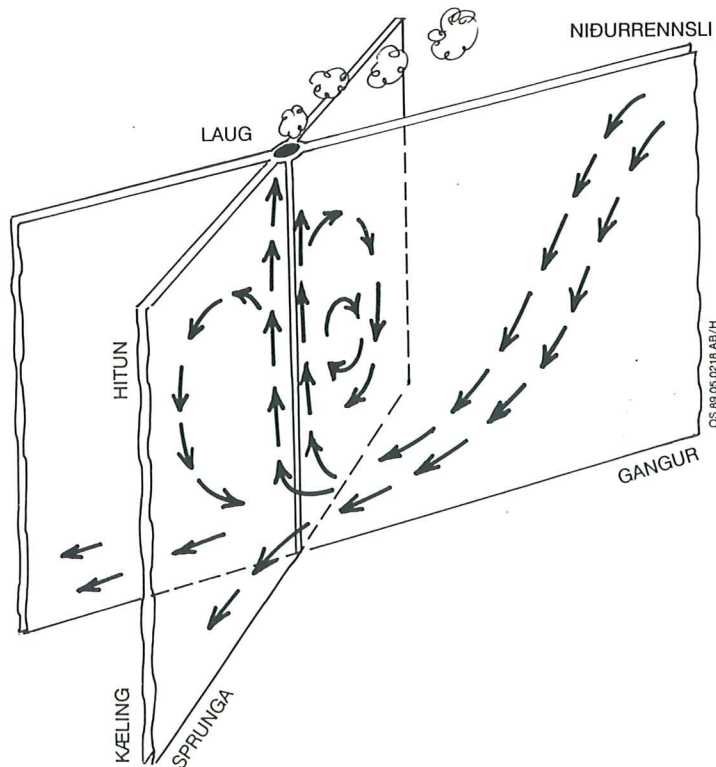
Eðli jarðhitakerfa

Það er einkum þrennt, sem þarf til þess að mynda jarðhitasvæði. Í fyrsta lagi þarf að vera jarðvatn (eða sjór) í berginu. Í öðru lagi þarf bergið að vera sprungið eða brotið og þar með vel vatnsleiðandi niður á eins til þriggja km dýpi. Og í þriðja lagi verður hitastigull að vera nægjanlega hár eða staðbundnir varmagjafar að vera í jarðskorpunni á fárra km dýpi. Slíkir varmagjafar geta verið bráðnir kvikuhleifar eða kólnandi innskot.

Jarðhitasvæðum á Íslandi er skipt í tvo flokka eftir eðli jarðhitakerfanna og hitastigi. Þeir eru lághitasvæði og háhitasvæði. **Lághitasvæðin** eru öll utan gosbeltanna. Þau myndast þar sem kalt grunnvatn nær að smjúga niður á 1 - 3 km dýpi í sprungum. Þar fær vatnið varma úr berginu, hitnar og stígur aftur til yfirborðs í hverum og laugum. Þessi staðbundna hringrás vatnsins kælir bergið í rótum jarðhitakerfisins og flytur varmann upp í efri jarðlög. Öflugustu jarðhitasvæðisins eru þar sem hitastig er hæst í jarðskorpunni og sprungur víðáttumiklar og virkar. Af þessu er ljóst að lághitakerfin eru ekki óþrjótandi orkulindir. Jarðhitavinnslu má bera saman við námagröft þar sem forðinn minnkar eftir því sem meira er tekið úr námunni. Eldri hugmyndir manna um að jarðhitakerfin fái vatn úr jarðvatnsstraumi, sem er á hægri ferð frá hálendinu til sjávar og hitnar af stöðugum varmastraumi úr iðrum jarðar, samrýmast ekki að öllu leyti upplýsingum er safnast hafa á síðustu árum.



5. mynd: Líkan af lághitasvæði. Lághitasvæðin myndast við hringrás vatns í sprungum og brotnu bergi. Kalt regn og grunnvatn seitlar djúpt niður í jarðskorpuna. Þar hitnar það í heitu bergi, og stígur síðan upp til yfirborðs eftir sprungum og myndar hverir og laugar. Hringrás vatnsins nemur varma úr neðri hluta skorpunnar, sem kólnar við það og flytur varmann upp í efri jarðlög. Afl lághitasvæða er einkum háð lekt jarðlaga og hitastigli.

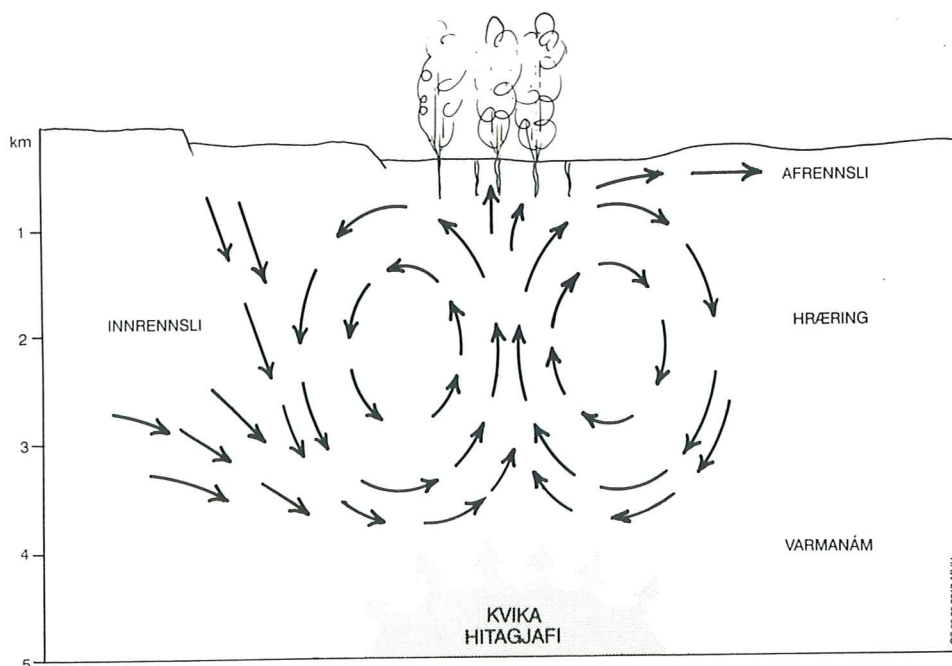


6. mynd: Lághitasvæði eru gjarnan tengd tveimur sprungukerfum með mismunandi stefnu. Þar sem sprungurnar skerast er lektin best og heita vatnið leitar þar upp til yfirborðs.

Háhitasvæðin eru öll innan gosbeltisins. Líkt og lághitasvæðin myndast þau við staðbundna hringrás jarðvatns. Munurinn er einkum sá að hitastig í jarðskorpunni er mun hærra innan gosbeltanna en utan og í rótum flestra háhitasvæða eru kvikuhólf eða kólnandi bergmassi (innskot), sem vatnið kemst í snertingu við. Hitastig vatnsins er oft á bilinu 250-350 °C á tveggja kílómetra dýpi. Þetta háa hitastig veldur því að vatnið leysir upp mikið magn fastra efna úr berginu og tekur í sig gastegundir.

Efnainnihald og uppruni heita vatnsins

Nær allt jarðhitavatn á Íslandi er að uppruna regnvatn, sem sytrar niður í berggrunninn og hitnar. Á einstaka stað við strendur landsins háttar svo til að sjór streymir inn í grunnvatnskerfi og vatnið verður því saltmengað. Einnig getur vatn orðið saltmengað við að renna um gömul sjávarset, sem geta legið í berggrunninum langt inni í landi. Vatnið rennur um berggrunninn, hitnar og leysir upp efi úr honum, en einnig falla efni út úr vatninu og mynda útfellingar. Uppleysanleiki flestra efna eykst með hækkandi hitastigi og því er meira af uppleystum efnum í vatni því heitara sem það er. Í vatni á lághitasvæðunum er styrkur uppleystra efna fremur lágur nema þar sem vatnið er sjóblandað. Oftast er það hæft beint til neyslu og ekki mikil vandamál við nýtingu þess í hitaveitum. Vatn frá háhitasvæðunum inniheldur hins vegar miklu meira af uppleystum efnum og er nær alltaf óneysluhæft. Það er ekki hægt að nýta beint í hitaveitur vegna hættu á útfellingum og málmtæringu.



7. mynd: Einfölduð mynd af háhitasvæði. Háhitasvæði myndast við staðbundna hringrás vatns í sprungnu bergi yfir kvikuhólfi eða kólnandi innskoti sem er á fárra kílómetra dýpi í jarðskorpunni.

1.3 JARÐHITARANNSÓKNIR - MARKMIÐ OG SKIPULAG

Markmið

Markmið hagnýtra jarðhitarannsókna er að finna leiðir til þess að nýta þessa mikilvægu auðlind sem hagkvæmast fyrir jarðhitanotendur og þjóðarbúið í heild.

Hitaveitur eru alla jafnan mikil og dýr mannvirki. Borun eftir heitu vatni er oftast nokkurt áhættuverk þar sem ekki er unnt að meta árangur með neinu öryggi fyrir en að borun lokinni. Þess vegna er mikilvægt að ákvarðanir um boranir og tilhögun mannvirkja séu byggðar á vönduðum forrannsóknum. Eftir að jarðhitavatns hefur verið aflað og vinnsla þess hafin, er mikilvægt að vel sé fylgst með viðbrögðum jarðhitageymisins. Finna þarf bestu tilhögun vinnslunnar þannig að sú takmarkaða auðlind, sem jarðhitinn er, sé hvorki van- né ofnýtt. Vandaðar rannsóknir minnka áhættuna við borun og geta lækkað kostnað verulega við vatnsöflun og rekstur hitaveitna.

Skipulag

Rannsóknir á jarðhita eru að mörgu leiti frábrugnar rannsóknum vegna vatnsaflsvirkjana. Því er ekki auðvelt að nota beint sömu hugtök og sömu áfangaskiptingu við rannsókn og nýtingu jarðhita og vatnsafls. Munar þar mestu að jarðhitakerfin eru neðanjarðar og ekki er unnt að afla marktækra upplýsinga um afl og endingu orkulindarinnar fyrir en boraðar hafa verið holur og þær prófaðar um lengri eða skemmri tíma.

Mikilvægt er að gera sér glögga grein fyrir eðlilegri áfangaskiptingu í forrannsóknum, orkuöflun og byggingu mannvirkisins. Þar verður einum áfanga að vera lokið áður en hafist er handa við þann næsta, sem er að jafnaði mun dýrari og umfangsmeiri en sá næsti á undan. Því miður eru allmörg dæmi til frá síðustu árum hér á landi þar sem of geyst hefur verið farið og tekin of mikil áhætta með þeim afleiðingum að virkjun hefur orðið mun dýrari en nauðsynlegt var.

Að fenginni reynslu við jarðhitarannsóknir og byggingu hitaveitna og annarra jarðhitamannvirkja hér á landi má skipta slíkum framkvæmdum í nokkra áfanga. Mörkin milli verkþátta eru ekki alltaf glögg og er umfang hvers þáttar verulega háð eðli jarðhitasvæðisins og þeirri nýtingu, sem fyrirhuguð er. Oft er einnig nauðsynlegt að staldra við eftir einhvern þátt, fara til baka og endurbæta athuganir á fyrri stigum. Sem dæmi má nefna að niðurstöður borana geta kallað á frekari forrannsóknir til að auðvelda staðsetningu fleiri hola.

1. Yfirlitsrannsóknir-Svæðisbundnar rannsóknir

Makmið yfirlitsrannsókna er að leita að jarðhitakerfum, afmarka þau og finna vænlegustu virkjunarstaðina innan hvers jarðhitasvæðis. Þessar rannsóknir ná gjarnan yfir stór landsvæði, 10 - 500 ferkílómetra, og eru gerð yfirlitskort í mælikvarða 1:50.000 eða grófari. Yfirlitsrannsóknir taka 1-3 ár allt eftir aðstæðum á hverjum stað.

2. Forrannsókn virkjunarstaðar

Þegar vænlegustu virkjunar- eða borsvæðin hafa verið fundin hefst nákvæm rannsókn fyrirhugaðs virkjunarstaðar, sem getur náð til 5 - 20 ferkílómetra. Beitt er nákvæmri jarðfræðikortlagningu og framkvæmdar yfirborðsmælingar til þess að kanna innviði jarðhitakerfisins sem best. Reynt er að staðsetja einstakar sprungur eða jarðlög, sem leiða heitt vatn. Tilgangur nákvæmra forrannsókna á virkjunarstað er að staðsetja fyrstu rannsóknarholurnar á sem markvissastan hátt og draga þannig úr áhættu og kostnaði. Þessar rannsóknir geta tekið 1-3 ár á hverju virkjunarsvæði, en kosta yfirleitt ekki nema lítinn hluta af kostnaði vinnsluholu.

3. Rannsóknarboranir og prófun

Markmið rannsóknarborana er að afla upplýsinga um jarðhitageyminn, sem ekki er unnt að fá með yfirborðskönnun. Má þar fyrst nefna hitastig vatns og bergs og efnainnihald vatnsins með tilliti til neysluhæfni og nýtingar. Ekki er síður mikilvægt að reyna að meta afkastagetu einstakra hola og svæðisins í heild, t.d. með langtíma rennslis- eða þrúfudælingu úr holum. Þessar rannsóknir ganga undir nafninu vinnslurannsóknir. Þessar upplýsingar eru forsenda þess að unnt sé að hanna mannvirkið með sem mesta hagkvæmni í huga og að reksturinn verði tryggður í framtíðinni.

4. Hönnun og framkvæmdir - borun vinnsluhola

Þegar ítarlegra upplýsinga hefur verið aflað um eiginleika og endingu jarðhitasvæðisins er réttlætanlegt að hanna mannvirkið og gera útboðsgögn. Samhliða þeirri vinnu er borun vinnsluhola haldið áfram uns vatnsöflun er lokið. Mikilvægt er að vinnslurannsóknnum sé haldið áfram í þessum áfanga.

5. Rekstur hitaveitu - vinnsla jarðhita

Þótt lagningu hitaveitu sé lokið og rekstur hafinn er áhættusamt að hætta rannsóknnum. Mikilvægt er að vinnslurannsóknnum og eftirliti með jarðhitageyminum sé haldið áfram svo lengi sem jarðhitavatn er unnið úr jarðhitakerfinu. Einkum er mikilvægt að fylgjast með hitastigi og vatnstöku úr einstökum holum og vatnsborði í jarðhitageyminum. Án þessara gagna er ekki unnt að meta endingu svæðisins og haga vinnslunni á sem hagkvæmastan hátt á hverjum tíma. Einnig er nauðsynlegt að fylgjast reglulega með efnainnihaldi vatnsins. Breytingar á því geta gefið mikilvægar upplýsingar, til dæmis um blöndun grunnvatns við jarðhitavatnið og þar með yfirvofandi kólnun þess. Slík blöndun getur gert boð á undan sér í efnainnihaldi vatnsins löngu áður en hún sést í hitamælingum.

2. JARÐHITALEIT - FORRANNSÓKNIR

Forrannsóknir eru margvíslegar athuganir, sem gerðar eru á jarðhitasvæðum áður en rannsóknarboranir eru hafnar. Markmið þeirra er þrjúþætt. Í fyrsta lagi er leitað að jarðhitakerfum, bæði þar sem jarðhiti er á yfirborði og eins þar sem engin sjáanleg ummerki eru. Í öðru lagi er reynt að afmarka jarðhitasvæðin og staðsetja vatnsrásir og vatnsleiðandi jarðlög og þar með staðsetja fyrstu rannsóknarholur. Í þriðja lagi er reynt að kanna innviði jarðhitakerfisins og meta eiginleika þess.

Þeir grundvallareiginleikar jarðhitakerfis auk stærðar þess, sem skipta mestu máli fyrir hagkvæma nýtingu jarðhitans, eru **hitastig, þrýstingur, vatnsgengd og efnainnihald** jarðhitavatsins. Í forrannsóknnum er yfirleitt ekki unnt að meta eða mæla þessa eiginleika beint heldur verður að kanna ýmsa aðra þætti sem eru þeim tengdir á einn eða annan hátt.

Í forrannsóknnum er nauðsynlegt að tvinna saman fleiri en eitt fagsvið til þess að geta sett fram líkan af jarðhitakerfinu, sem seinni rannsóknir geta byggt á. Þau atriði sem mestu máli skipta eru nákvæm jarðfræðikortlagning, úttekt á efnainnihaldi jarðhitavatsins og ýmsar jarðeðlisfræðilegar mælingar.

Árangur forrannsókna er mældur í þeim tíma og peningum sem sparast við öflun jarðhita. Árangur er bestur ef unnt er að staðsetja borholur sem markvissast og fækka árangurslausum holum.

2.1 JARÐFRÆÐIKORTLAGNING

Markmið

Nákvæm jarðfræðikortlagning er forsenda og grundvöllur undir aðrar forrannsóknir á jarðhitasvæðum. Markmið hennar er að tengja rennislleiðir heita vatnsins við bergbyggingu svæðisins, einkum einstök jarðlög, brot og sprungur. Niðurstöður jarðfræðiathugana eru settar fram á jarðfræðikortum og í fyrsta líkani af jarðhitakerfinu. Líkanið er síðan notað til að skipuleggja jarðeðlisfræðilegar mælingar, velja staði til töku efnasýna og við aðrar forrannsóknir.

Hlutverk jarðfræðinga

Aðalhlutverk jarðfræðinga í jarðhitarannsóknnum er að gera kort yfir bergbygginguna og jarðhitann, svo benda megi á líklegustu rennislleiðir heita vatnsins á jarðhitasvæðum. Þekking á bergbyggingu er nauðsynlegur grundvöllur undir úrvinnslu jarðeðlisfræðilegra mælinga, sem beitt er í jarðhitaleit. Þýðingarmikið er að hafa heildarsýn yfir vatnafar og grunnvatnsstreymi þess jarðhitakerfis, sem rannsaka skal. Streymi grunnvatns ræðst af gerð berglaga, samþjöppun þeirra, ummyndun og holufyllingu. Á blágrýtissvæðunum skiptast gjarnan á þétt hraunlög og þunn millilög úr lausara efni. Hraunlagastaflanum hallar yfirleitt um nokkrar gráður frá lárétu og er stefna skurðlínu hrauna og yfirborðs kallað strik jarðlagastaflans. Lárétt rennsli er mest samhliða hraunlögnum í stefnu striksins en minnst þvert á hraunlögin. Sprungur

og berggangar skera hraunlagastaflann og geta veitt köldu vatni niður og heitu vatni upp til yfirborðs. Göngum og sprungum hallar oft um fáar gráður frá lóðréttu.

Jarðfræðikortlagning hefst á yfirlitskortlagningu, sem þarf að ná frá jarðhitasvæðinu til þess svæðis, þar sem vatnið sytrar niður í jörðina. Á jarðhitasvæðinu sjálfu þarf að kanna útbreiðslu lauga og hvera sem nákvæmast og mæla rennsli og hitastig. Athugað er hvort einhver brot séu nálægt í berggrunnum, sem gætu ráðið aðstreymi og uppstreymi heita vatnsins. Sérstaklega er mikilvægt að kanna hvort sprungur eða brot með mismunandi stefnu skerast í grennd við jarðhitasvæðið, því þar er berg gjarnan vatnsgengara en ella. Jarðhiti á lágheitsvæðum er oft tengdur slíkum krosssprungnum svæðum. Kanna þarf þykkt og útbreiðslu lausra jarðlaga, sem áhrif gætu haft á hvar heita vatnið sprettur fram. Þegar breytingar verða á jarðhitasvæðum, t.d. í jarðskjálftum, þarf að bregða við og kanna, hvort tengsl brota og jarðhita skýrast.

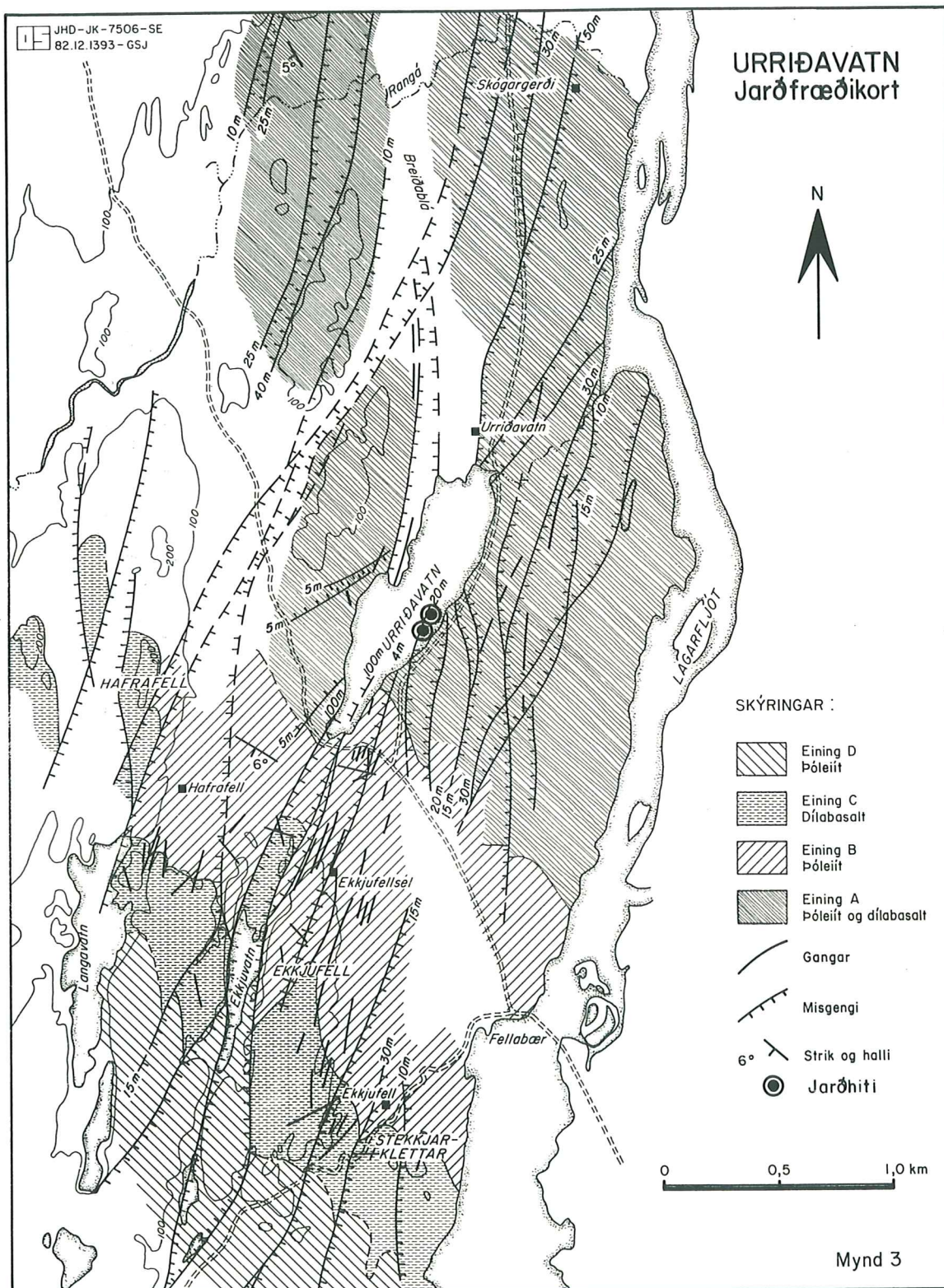
Enn má nefna, að hlutverk jarðfræðingsins er að leita uppi og rannsaka gömul útkulnuð ummerki jarðhita í rofnum bergstafla. Útfellingar í holum og sprungum sýna hvaða leiðir heita vatnið hefur runnið um berglöggin, áður en rofið átti sér stað. Má af slíku fræðast um eðli vatnsleiðara í virkum jarðhitakerfum innan gosbeltanna og hið næsta þeim, þar sem bergstaflinn er enn órofinn.

Á háhitasvæðum, sem flest eru innan virkra eldstöðva, þarf auk jarðfræðikortlagningar á hitasvæðinu sjálfu að rannsaka sem nákvæmast eldgosasöguna og ummerki sprunguhreyfinga. Á þann hátt má meta veigamikla áhættuþætti sem taka þarf tillit til við hönnun mannvirkja og nýtingu jarðhitans.

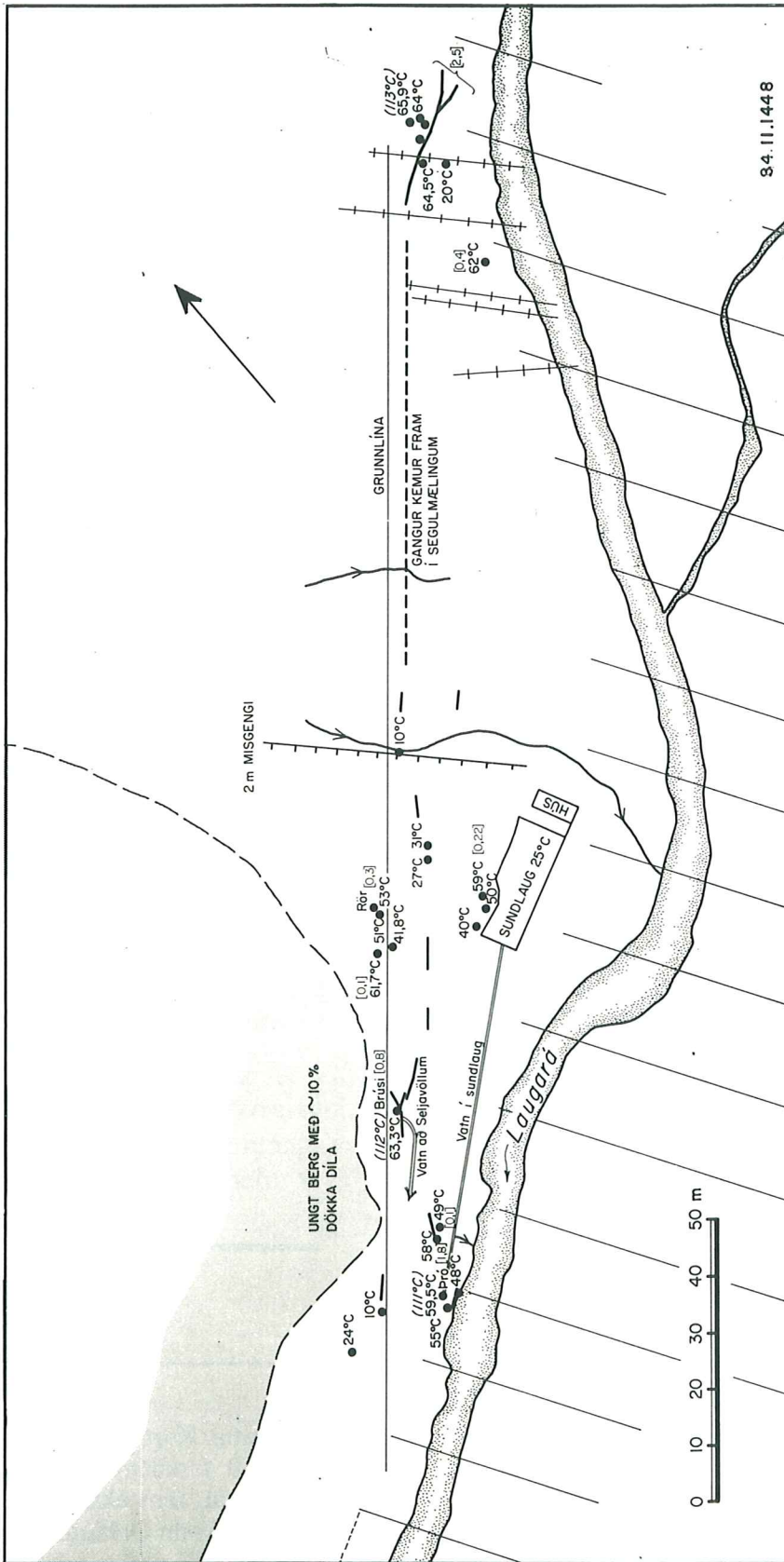
Jarðfræðikort

Á jarðfræðikortum þarf að sýna hvergi og laugar, helstu jarðmyndanir svo og öll brot, sprungur og misgengi er tengst gætu rennislíleiðum vatnsins. Gjarnan eru unnin tvenns konar kort. Í fyrsta lagi eru yfirlitskort, sem sýna jarðhitastaði og bergbyggingu í næsta nágrenni þeirra, jafnvel heilla landshluta. Í öðru lagi eru gerð nákvæm kort er sýna einstaka hvergi og laugar innan eins jarðhitasvæðis og öll brot og jarðmyndanir er tengjast dreifingu þeirra.

Jarðfræðikortlagning er ekki ýkja kostnaðarsöm en tímafrek. Oftast vinnur einn jarðfræðingur við kortlagninguna og getur útvinnna tekið frá viku og upp í marga mánuði allt eftir umfangi verksins. Innvinnna er einnig tímafrek og felst í úrvinnslu gagna sem safnað hefur verið í útvinnnu, skoðun loftmynda og teikningu korta.



8. mynd: Jarðfræðikort af næsta nágrenni jarðhitasvæðisins í Urríðavatni. Kortið sýnir helstu jarðmyndanir á svæðinu og öll misgengi, sprungur og ganga á 10 ferkílómetra svæði. Jarðhitinn kemur upp úr vatnsbotninum og virðist vera tengdur sprungu, sem ekki sást við jarðfræðikortlagningu, en fannst í viðnámsniðmælingum. Kortið er úr skýrslu Orkustofnunar eftir Sigmundur Einarsson o.fl. frá 1983 (OS-83005/JHD-03).



9. mynd: Kort af nágrenni Sejavallalaugar undir Eyjafjöllum, er sýnir tengsl lauga við misseugi og sprungur. Einnig er sýnt hitastig, kísilhiti og rennsli úr einstökum laugum. Myndin er úr skýrslu Orkustofnunar eftir Helga Torfason o.fl. frá 1984 (OS-84090/JHD-40 B).

2.2 EFNAFRÆÐIRANNSÓKNIR

Uppleyst efni í jarðhitavatni

Þegar ferskt vatn rennur um berg leysir það upp steinefni úr berginu og safnar í sig gastegundum. Styrkur uppleystu efnanna er háður hitastigi og er yfirleitt meiri því hærra sem hitastigið er. Vatnið leysir efni úr berginu uns það mettast og jafnvægi kemst á. Einnig eru í jarðhitavatni mismunandi súrefnis- og vetnissamsætur (ísótópar). Með greiningu uppleystra efna og samsæta má fá mikilvægar upplýsingar um uppruna og hitastig heita vatnsins og um það berg, sem vatnið hefur runnið um.

Við breytingu á hitastigi, suðu eða afloftun raskast efnajafnvægið og geta efni fallið aftur út úr vatninu og myndað fallegar holufyllingar og geislasteina í bergi eða hvimleiðar útfellingar í hitaveiturörum. Á sumum jarðhitasvæðum nálægt strönd er hluti jarðhitavatnsins ættaður úr sjó og inniheldur því í einhverjum mæli salt og önnur efni sem uppleyst eru í sjónum.

Markmið efnarannsókna

Rannsókn á efnainnihaldi heita vatnsins nýtist á öllum stigum jarðhitarannsókna það er við leit, borun og nýtingu. Efnafræði er fljótverk og fremur ódýr aðferð, sem veitir ýmsar nauðsynlegar upplýsingar, sem ekki verður aflað með öðrum hætti.

Í forrannsóknum er efnafræðin einkum notuð í fernum tilgangi. Í fyrsta lagi er unnt að meta hitastig vatnsins djúpt í jarðhitakerfinu út frá efnainnihaldi þess. Í öðru lagi er efnainnihald jarðhitavatns notað til að afmarka og greina í sundur mismunandi jarðhitakerfi. Í þriðja lagi er unnt að kanna uppruna heita vatnsins, ef til vill rennislísiðir og athuga hvort það hefur blandast köldu grunnvatni í uppstreymisrásum. Í fjórða lagi er unnt að meta eiginleika vatnsins með tilliti til fyrirhugaðrar nýtingar, meta hættu á tæringu og útfellingum og hugsanleg umhverfisáhrif.

Aðferðir

Fyrsta skrefið í efnafræðirannsókn er að ná sýni af því sem rannsaka skal. Oftast er um vatn að ræða, en einnig eru tekin sýni af gasi og gufu, einkum á háhitasvæðum.

Við sýnatökuna er handhægast að nota sérbúinn bíl þar sem unnt er að kæla sýnið (þetta gufu) og meðhöndla það undir frekari greiningu. Meðhöndlun sýnanna er nauðsynleg þar sem við breytingu á hitastigi og þrýstingi geta orðið efnabreytingar í þeim og efni fallið út áður en næst að greina þau. Því þarf að binda sum efni í stöðug efnasambönd, þynna önnur sýni eða breyta sýrustigi til þess að greiningar á efnastofu síðar, verði marktækar fyrir hið upprunalega jarðhitavatn

Þegar sýnið kemur á rannsóknarstofu er gerð nákvæm greining á hinum ýmsu efnum og unnið úr niðurstöðum með hjálp tölvu. Það fer eftir því í hvaða tilgangi sýnið er tekið hversu mörg efni eru greind. Algengt er að mældur sé styrkur kísils, natríums, kalíums, kalsíums, magnesíums, karbónats, súlfíðs, klóríðs, flúoríðs, járn og áls og fleiri efna. Sýrustig er ávallt mælt og stundum eru þungmálmur greindir, til dæmis í vatni sem nota skal til fiskeldis. Einnig eru samsætu hlutföll súrefnis og vetnis oft mæld.

Bæði sýnataka og efnagreining er mikið nákvæmnisverk og auðvelt er að gera verulegar skekkjur. Þess vegna er mikilvægt að vanur efnafræðingur taki sýnin og fylgist náið með greiningu þeirra frá upphafi til enda og sjái um túlkun niðurstaðna í samvinnu við aðra jarðhitamenn.

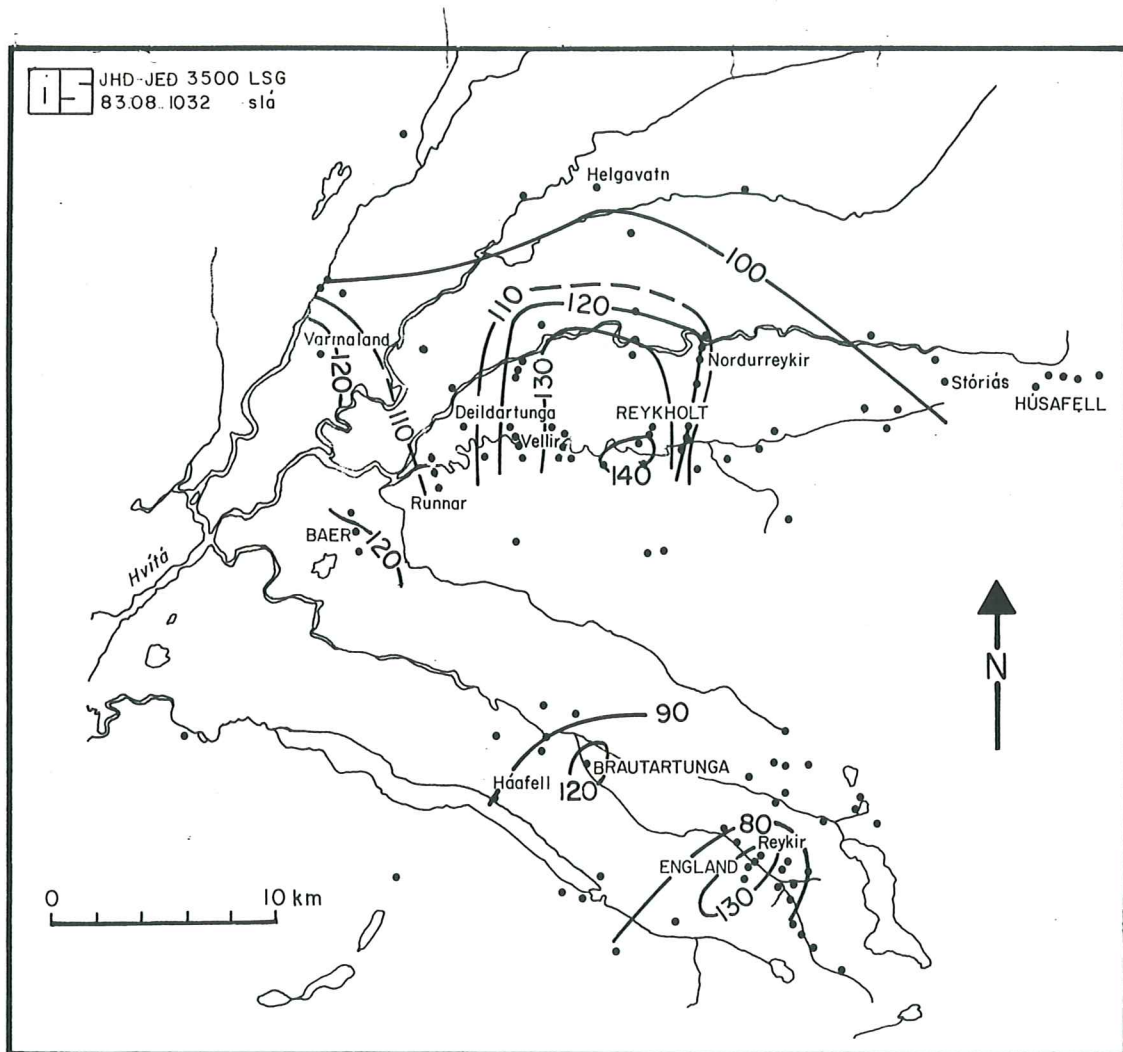
Efnafræði og forrannsóknir

Eitt meginhlutverk efnafræði í forrannsóknum er að meta hitastig í jarðhitakerfum með hjálp **efnahitamæla**. Þeir byggjast á því að efnajafnvægi og styrkur uppleystra efna er háður hitastigi. Algengasti efnahitamælirinn er svo kallaður kísilhitamælir, en styrkur kísils vex ört með hitastigi. Með því að mæla styrk kísils í vatninu má því áætla hitastig djúpt í jörðu. Jarðhitavatnið kólnar að sjálfsögðu á leið sinni til yfirborðs en það tekur einhvern tíma fyrir kísil að falla út þegar vatn kólnar og þess vegna gefur efnagreining vatns í laugum á yfirborði mat á djúphita.

Annað meginhlutverk efnafræði í forrannsóknum er að afmarka og greina í sundur einstök jarðhitakerfi, sem geta legið nálægt hvert öðru eða jafnvel á sama stað en á mismunandi dýpi. Þetta er oft mögulegt bæði vegna mismunandi hitastigs og vegna mismunandi bergtegunda í kerfunum sem hvort tveggja endurspeglast í ólíku efnainnihaldi vatns úr kerfunum.

Þekking á hegðun mismunandi efna í vatni getur einnig hjálpað til við að afmarka aðaluppstreymi innan jarðhitasvæðis og til þess að komast að því hvort um afrennsli blandað grunnvatni er að ræða eða meginuppstreymi jarðhitasvæðis.

Reynt er að meta notagildi vatnsins á forrannsóknarstigi. Má þar einkum nefna hvort hætta sé á tæringu eða útfellingum. Raunhæft mat á þessu er þó oft ekki mögulegt fyrr en boraðar hafa verið holur á og sýni tekin af djúpvatninu.



10. mynd: Kísilhiti í hveravatni í Borgarfirði. Hiti er hæstur eða 140 °C í jarðhitakerfi með miðju nálægt Reykholti. Hiti lækkar til vesturs en fer aftur hækkandi við Bæ og Varmaland. Við England í mynni Skorradals neðst á myndinni er jarðhitakerfi með 130 °C kísilhita. Myndin er úr grein eftir Lúðvík Georgsson o.fl. sem birtist í Jökli, 1984.

2.3 JARÐEÐLISFRÆÐILEG KÖNNUN

Í jarðeðlisfræðilegri könnun er beitt aðferðum eðlisfræðinnar til þess að mæla ýmsar stærðir, sem lýsa eiginleikum jarðlaga á jarðhitasvæðum. Þessar stærðir geta verið beint tengdar grundvallareiginleikum jarðhitakerfisins eins og til dæmis hitastig í jarðvegi. Er þá talað um beinar aðferðir. Oftast er þó um óbeinar aðferðir að ræða, þar sem aflað er ýmissa upplýsinga um jarðlögin eins og til dæmis segulmögnun, rafleiðni eða eðlisþyngd og síðan reynt að tengja þær grunneiginleikum jarðhitakerfisins.

Þær eðlisfræðilegu stærðir sem gefið hafa einna besta raun í könnun jarðhitasvæða eru hitastig, rafleiðni (eðlisviðnám) og segulmögnun. Verður hér lýst stuttlega helstu aðferðum á þessu sviði.

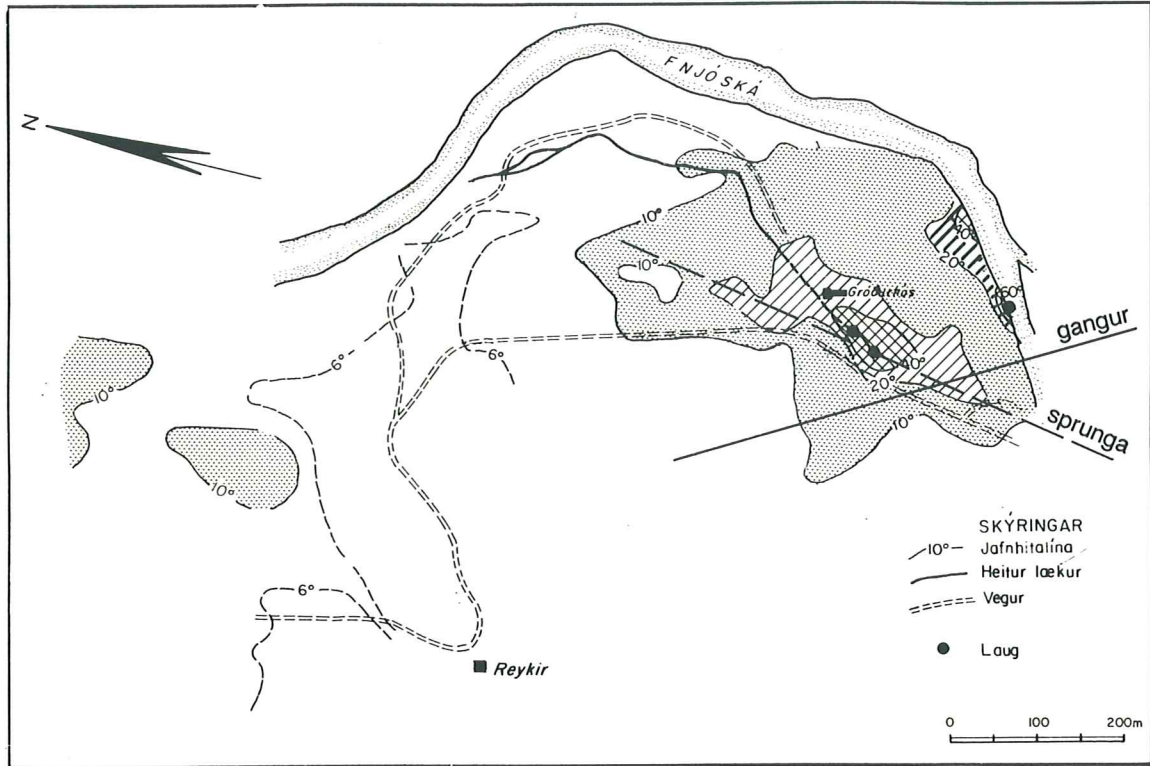
Hitastig í jarðvegi

Hitastig er sú eðlisfræðilega stærð sem er nátengdust jarðhitakerfum. Til þess að kanna útbreiðslu jarðhitasvæðis og legu helstu uppstreymisrása jarðhitavatns má mæla hitastig í jarðvegi á um það bil 0,5 m dýpi á því svæði sem kanna skal. Stungin er hola með járnstöng og mælistafur með hitaskynjara á endanum rekinn í holuna. Eftir að jafnvægi hefur komist á er unnt að lesa hitastig af mæli, sem er á efri enda stafsins. Oft eru mæld nokkuð stór landsvæði (0,5 km²) og hafðir 5-10 m á milli mælistaða. Þetta er einföld og fljótleg aðferð og getur gefið mikilvægar upplýsingar um megin uppstreymi jarðhitavatns upp úr berggrunninum þar sem hann er hulinn þunnum jarðvegi.

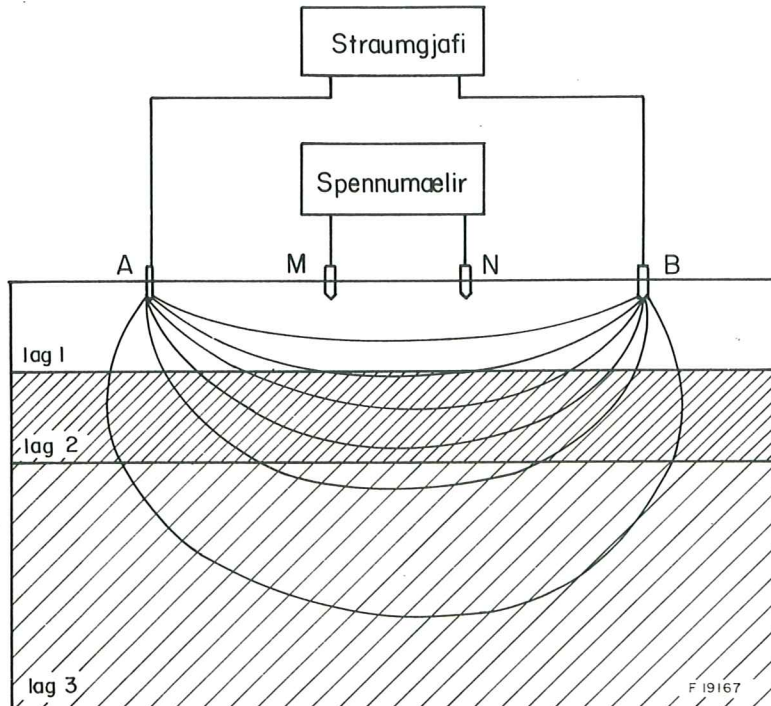
Viðnámsmælingar

Undir samheitið viðnámsmælingar falla nokkrar aðferðir, sem hafa gefið mjög góða raun við jarðhitarannsóknir hér á landi síðustu fjóra áratugin. Með viðnámsmælingum er mælt **eðlisviðnám** berglaga, þ.e. hversu vel eða illa jarðjög leiða rafstraum. Það sem einkum ræður eðlisviðnámi jarðlaga er vatnsinnihald í glufum í berginu, selta vatnsins (magn uppleystra efna), hitastig svo og gerð bergsins sjálfs, þ.e. lögun og gerð sprungna og ummyndun. Jarðhitakerfi einkennast af brotnu og vatnsgengu bergi, hærra hitastigi en í umhverfinu, og oft meiri seltu vatnsins. Öll þessi atriði auka rafleiðni bergsins og þess vegna eru flest jarðhitakerfi á Íslandi tengd lágu eðlisviðnámi.

Í hefðbundnum viðnámsmælingum, eins og þær hafa lengst af verið gerðar hér á landi, er eðlisviðnám jarðlaga mælt með því að senda rafstraum niður í jörðina gegnum tvö straumskaut, sem eru rekin um hálfan metra niður í svörðinn. Spennufallið, sem við það myndast á yfirborði jarðar, er mælt á milli tveggja spennuskauta. Rafleiðnina er unnt að reikna út frá mældu stærðunum. Með því að breyta innbyrðis afstöðu skautanna á kerfisbundinn hátt og mæla straum og spennu í hvert skipti er unnt að afla upplýsinga um eðlisviðnám jarðlaga á mismunandi dýpi.



11. mynd: Hitastig í jarðvegi á 50 sm dýpi við Reyki í Fnjóskadal. Hiti er hæstur eða 40 °C næst laugunum og á bökkum Fnjóskár austan laugasvæðisins. Hitafrávikidið við laugarnar er aflangt í norður suður stefnu, og bendir það til þess að uppstreymi heita vatnsins sé tengt sprungu með þeirri stefnu. Inn á myndina er einnig teiknaður gangur sem kom fram í mælingum. Myndin er úr skýrslu Orkustofnunar eftir Ólaf Flóvenz frá 1980 (OS-80009/JHD-05).



12. mynd: Fyrirkomulag straum- og spennuskauta í viðnámsmælingu, straumskautamælingu. A og B eru straumskautin. Eftir því sem lengra er á milli þeirra ná straumlínurnar til dýpri jarðлага. M og N eru spennuskaut. Unnt er að reikna eðlisviðnám jarðлага út frá mældum straum og spennu. Myndin er úr grein eftir Axel Björnsson í Náttúrufræðingnum 1980.

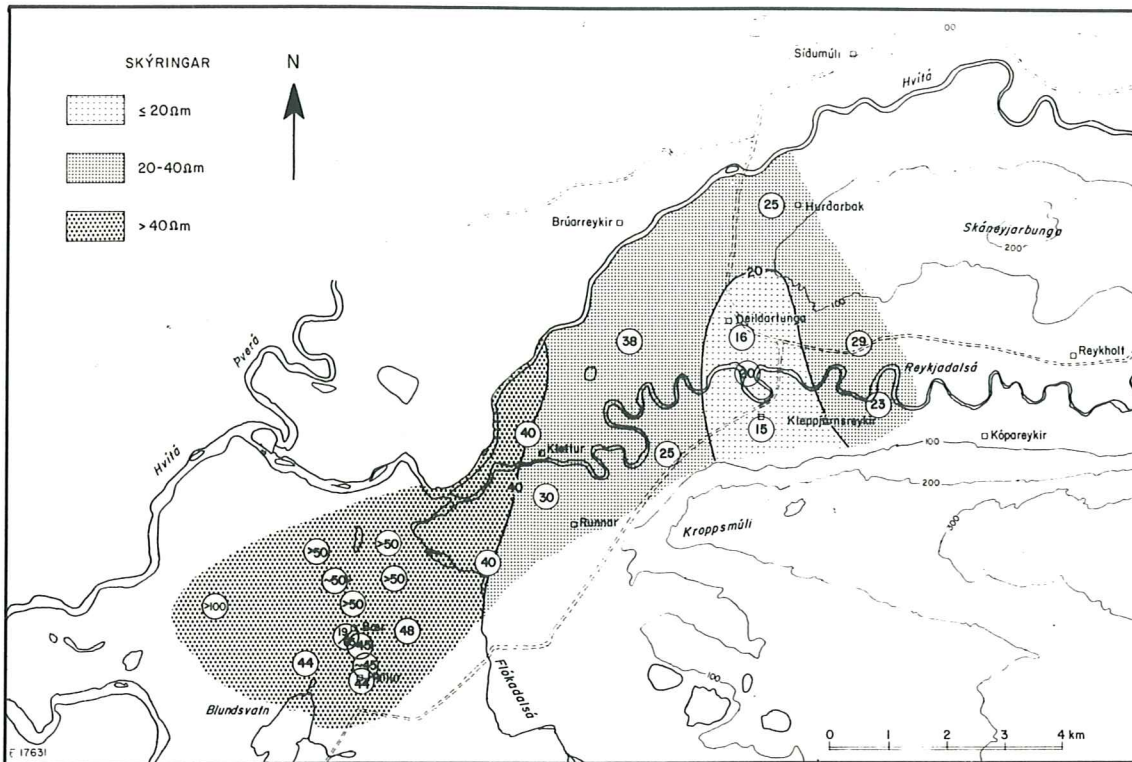
Á mynd 12 er sýnd algengasta uppsetning straum- og spennuskauta í viðnámsmælingum. Spennuskautunum M og N er haldið föstum í miðjunni en straumskautin A og B eru yst. Eftir því sem lengra er á milli þeirra ná straumlínurnar til dýpri jarðlaga og mælingin skynjar eðlisviðnám á meira dýpi. Þessi uppsetning skauta er oft kennd við Schlumberger frumkvöðul aðferðarinnar en mætti kalla **straumskautamælingu**. Einnig er oft talað um viðnámsdýptarmælingu þar sem eðlisviðnám er mælt á mismunandi dýpi á ákveðnum stað.

Einnig er unnt að færa öll skautin um set eftir hverja mælingu og mæla þannig eftir ákveðinni línu. Er þá talað um **viðnámsstriðmælingar**. Þeim er einkum beitt þegar leitað er að nær lóðréttum sprungum með heitu vatni í og hafa því lágt eðlisviðnám.

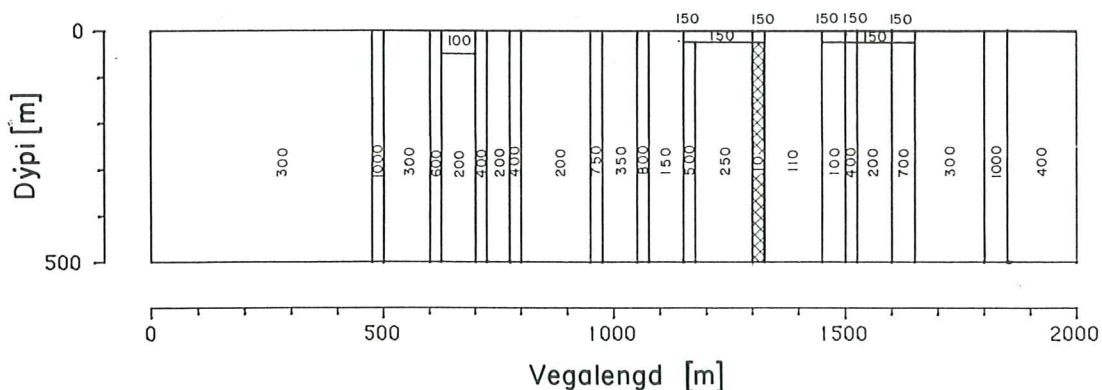
Að mælingum loknum fer fram umfangsmikil tölvuúrvinnsla og getur hún tekið nokkrar vikur. Niðurstöðum er oftast lýst á kortum, er sýna eðlisviðnám á ákveðnu dýpi, eða í sniðum eftir ákveðinni línu í gegnum jarðhitasvæðið. Sniðin ná gjarnan frá yfirborði og niður á nokkur hundruð metra dýpi. Myndir 13 og 14 sýna niðurstöður viðnámsdýptarmælinga og viðnámsstriðmælinga.

Þessar hefðbundnu viðnámsmælingar eru alltímafrekar. Fjóra menn þarf til að gera dýptarmælingu og komast þeir aðeins yfir 1-2 mælingar á dag. Í sniðsmælingar þarf sex menn. Auk þessa er úrvinnslan tímafrek, einkum sniðsmælinganna. Þetta veldur því að mælingarnar verða nokkuð dýrar og ekki réttlætanlegt að beita þeim nema í stærri verkum.

Á síðustu árum hefur ný mæliaðferð skilað góðum árangri á jarðhitasvæðum. Í stað straumskauta er vírlykkja, um 300 m í þvermál, lögð á jörðina og straumur sendur eftir henni í stuttan tíma. Við það spanast straumur í jörðinni og er styrkur hans mældur með annarri minni lykkju, sem er innan í sendilykkjunni. Þessar **straumlykkjumælingar** (á ensku TEM-mælingar) hafa þann kost að ekki þarf að reka straumskaut niður í jörðina. Þess vegna er unnt að mæla á vetrum þegar jörð er frosin og jafnvel þó jörð sé snævi þakin. Mælingarnar taka mun skemmri tíma en eldri mæliaðferðir og auðvelt er að tölvuvinna niðurstöður samdægurs. Þetta leiðir til þess að kostnaður verður mun minni en við straumskautamælingar.



13. mynd: Eðlisviðnám jarðlaga á 800 m dýpi í vestanverðum Reykholtstalur í Borgarfirði. Hringirnir sýna staðsetningu viðnámsmælinga og tölurnar eðlisviðnám á 800 m dýpi. Áberandi lágvíðnámssvæði er umhverfis jarðhitastaðina við Deildartunga og Kleppjárnreyki. Orsök þess er vatnsgengt berg og hár hiti. Myndin er úr skýrslu Orkustofnunar eftir Lúðvík Georgsson o.fl. frá 1978 (OS-JHD-7856).



14. mynd: Líkan er sýnir eðlisviðnám í jarðlögum á sniði sem liggur austur vestur í gegn um jarðhitasvæðið í Urriðavatni. Líkanið einkennist af lóðréttum bergmyndunum (berggöngum), sem hafa hátt viðnám. Ein myndun, sem er skyggð á myndinni, hefur áberandi lágt viðnám. Það er líklegast sprunga, sem er meginleiðari heita vatnsins. Sniðið er unnið upp úr viðnámsmælingum og voru niðurstöðurnar notaðar til þess að staðsetja aðal vinnsluhölu hitaveitunnar á staðnum. Myndin er úr skýrslu Orkustofnunar eftir Sigmund Einarsson o.fl. frá 1983 (OS-83005/JHD-03).

Segulmælingar

Berg á Íslandi myndast er bráðin kvika storknar á yfirborði og myndar hraunlag, eða þegar kvikan ryðst inn í jarðskorpuna og myndar innskot. Kvika sem storknar í nær lóðréttri sprungu myndar berggang.

Bráðin kvika er ekki segulmögnuð, en þegar hún storknar myndast varanleg segulmögnun í storkuberginu, sem hefur sömu stefnu og segulsvið jarðar hafði þegar kvikan storknaði. Segulsvið jarðar hefur margoft breytt um stefnu og styrk á síðustu milljónum ára. Markverðasta breytingin er sú að segulsviðið snýst alveg við á um það bil hálftrar milljón ára fresti þannig að segulnorður verður segulsuður og öfugt. Í þessu samhengi er því talað um rétt og öfugt segulmagnað berg allt eftir því hvaða stefnu segulsvið jarðar hafði þegar bergið varð til.

Í segulmælingum er mældur styrkur og stefna segulmögnunar í bergi, þannig að unnt er að nota þessar mælingar til þess að greina í sundur jarðmyndanir, er ekki verða auðveldlega aðgreindar á annan hátt. Þær nýtast vel til að kortleggja ganga og misgengi svo og hraunlög, sem hulin eru lausum yfirborðslögum.

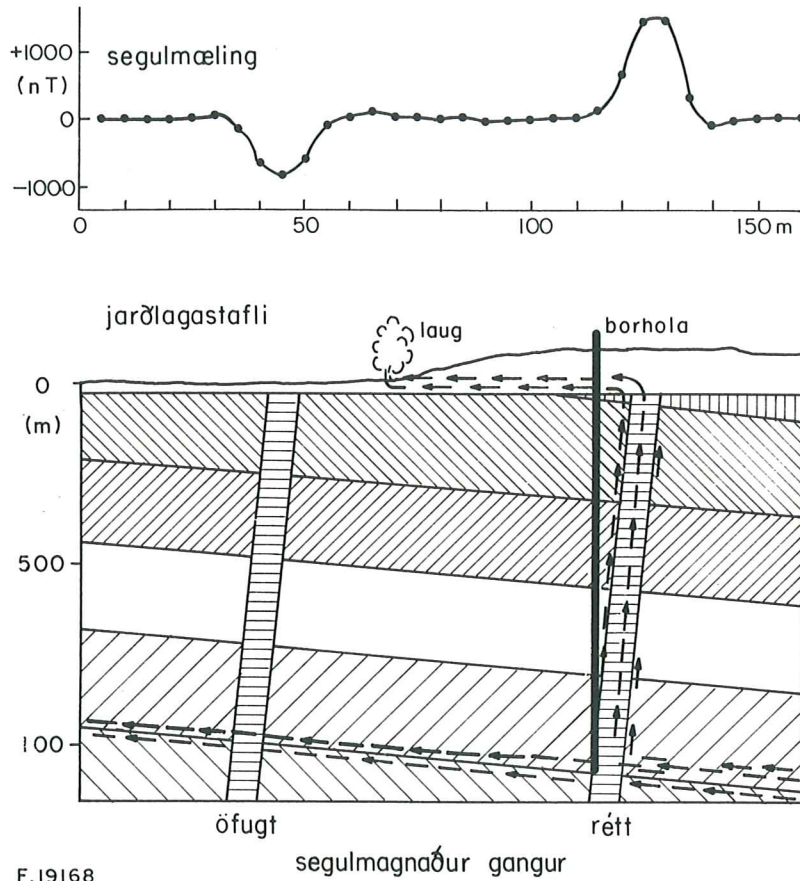
Heita vatnið á lág hitasvæðum kemur oft upp til yfirborðs meðfram göngum og er þá reynt að staðsetja borholur þannig að þær skeri vatnsleiðarann á tilteknu dýpi. Ein besta aðferðin til þess að kanna nákvæmlega legu ganga á blágrýtissvæðum landsins eru einmitt segulmælingar.

Segulmælingar eru oftast gerðar með segulmæli á jörðu niðri, þar sem gengið er eftir beinni línu og mælt á 5-10 m fresti. Mælirinn er hafður á stöng í 2-4 m hæð. Niðurstöðurnar eru teiknaðar á kort sem sýnir segulfrávik á svipaðan hátt og fjöll og dalir eru sýnd með hæðarlínum á landakorti.

Við segulmælingar þarf aðeins tvo menn og komast þeir yfir nokkra hektara á dag. Álíka mikill tími fer í úrvinnsluna eins og útvinnu. Hafa ber í huga að segulmælingar eru dæmigerð óbein aðferð, sem kortleggur jarðmyndanir en ekki jarðhitann beint. Oftast koma fram mörg segulfrávik og oft ekki ljóst hverju þeirra jarðhitinn er tengdur. Eru þá boraðar grunnar holur til að kanna vatnsgengd og hitastig við einstök frávik eða gerðar viðnámsmælingar til þess að leita að lágu viðnámi sem bendir til jarðhita.

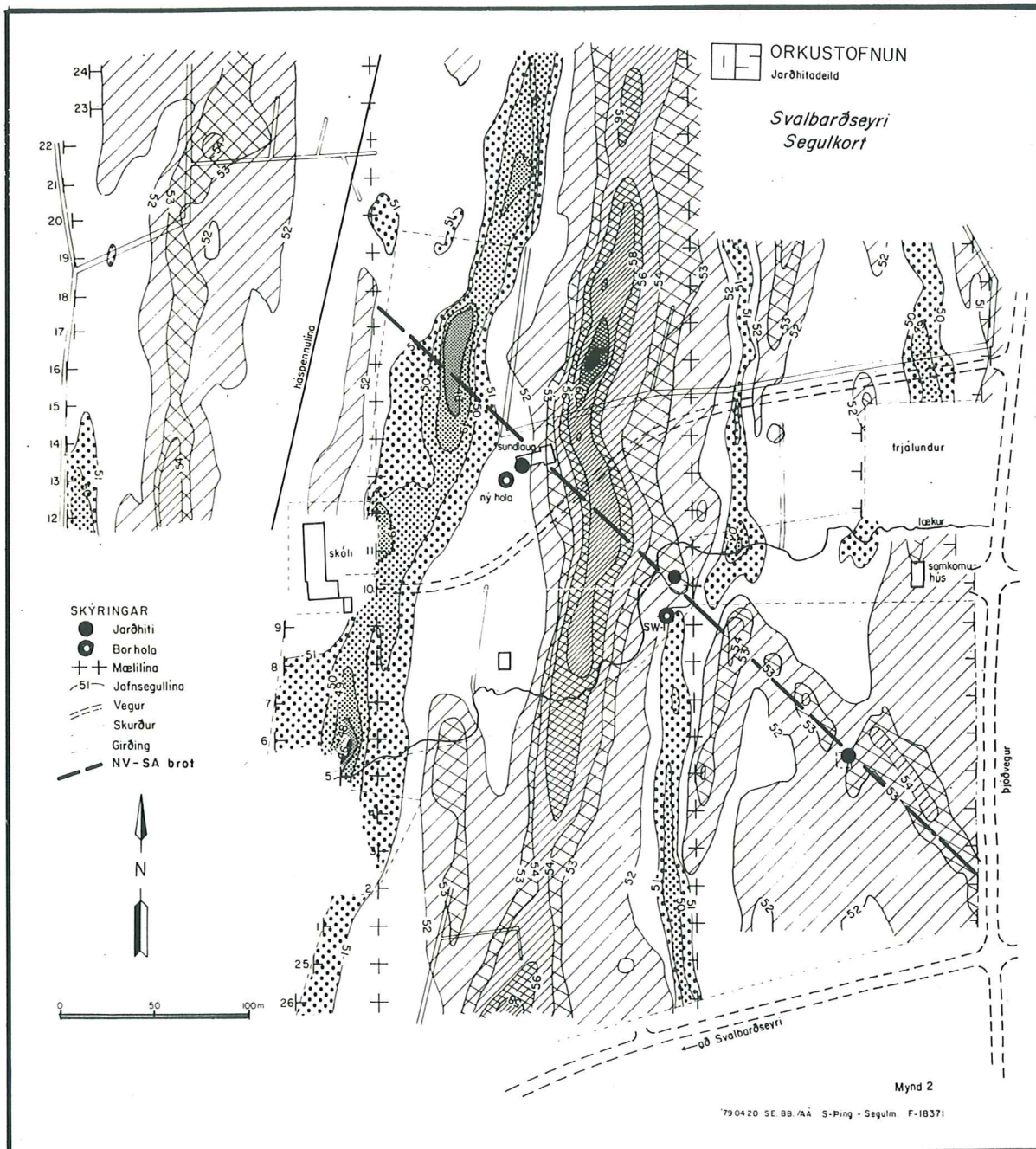
Aðrar jarðeðlisfræðilegar mælingar

Viðnámsmælingar, segulmælingar og hitamælingar í jörðu hafa skilað bestum árangri við jarðhitaleit fyrir hitaveitur. Engu að síður hefur mörgum öðrum aðferðum verið beitt við jarðhitaleit hér á landi einkum á há hitasvæðum og við rannsókn jarðskorpunnar undir landinu. Þessar aðferðir hafa nýst minna við rannsókn lág hitasvæða og verður því ekki fjallað um þær hér.



F.19168

15. mynd: Einfölduð mynd af lagskiptum jarðlagastafli og tveimur göngum með mismunandi segulstefnu. Heitt vatn kemur upp með öðrum ganginum. Efri hluti myndarinnar sýnir niðurstöður segulmælinga. Yfir rétt segulmagnaða ganginum kemur fram jákvætt frávik en neikvætt yfir hinum. Niðurstöður mælinganna eru notaðar til þess að staðsetja borholu, sem sker vatnsæðar á nokkru dýpi. Myndin er úr grein eftir Axel Björnsson í Náttúrufræðingnum 1980.



16. mynd: Segulkort af nágrenni jarðhitasvæðisins við Svalbarðseyri. Greinileg línuleg frávik með stefnu norður- suður sjást á kortinu. Einnig má sjá línulegt frávik sem stefnir norðvestur. Þessi frávik stafa frá berggöngum, sem ekki sjást á yfirborði. Jarðhitastaðirnir þrjár raða sér eftir norðvesturganginum og er uppstreymi heita vatnsins sennilega tengt skurðlínu ganga með mismunandi stefnur. Myndin er úr skýrslu Orkustofnunar eftir Axel Björnsson o.fl. frá 1980 (OS-80007/JHD-13).

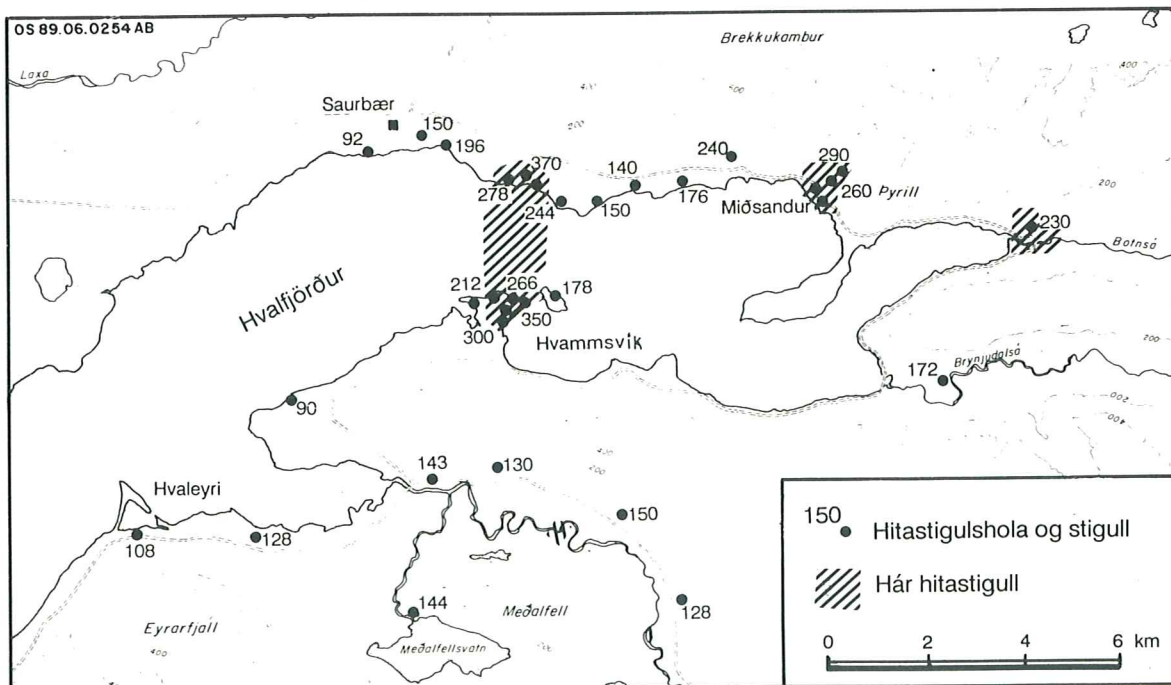
2.4 HITASTIGULSBORANIR

Hitastigull er hækkun hita með dýpi í borholum. Hann er oftast sýndur í °C/km. Eins og fram kemur í kafla 1.2. hér að framan er eðlilegur hitastigull á Íslandi um 50°C/km á blágrýtissvæðum, en hækkar í átt að gosbeltunum í 120-150°C/km. Frávik frá þessum stigli eru víða, þar sem heitt vatn rennur ofarlega í jarðlögum (hár hitastigull) og þar sem kalt vatn rennur niður í sprungukerfi (lágur hitastigull).

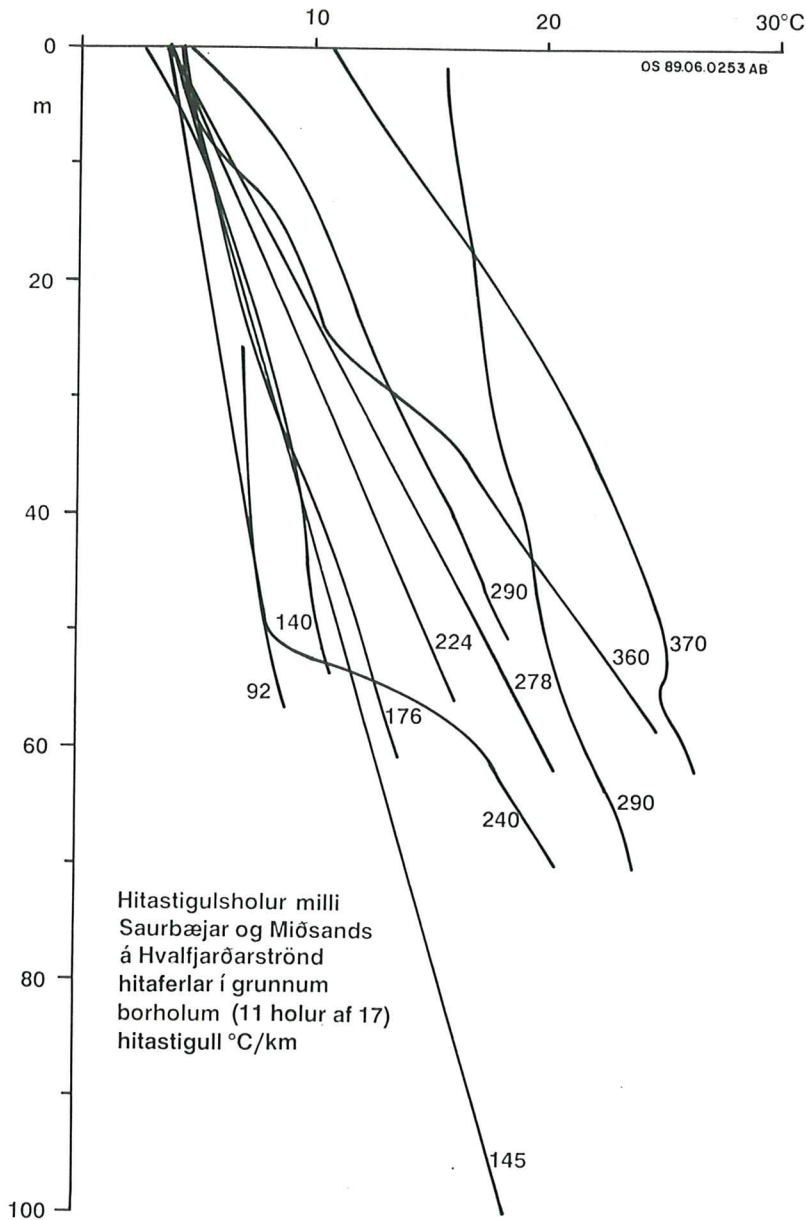
Á undanförunum áratugum hafa verið boraðar hitastigulsholur til þess að leita að og afmarka jarðhitasvæði, t.d. Laugarnessvæðið í Reykjavík. Þessari aðferð hefur þó ekki verið beitt víða vegna þess hve boranir hafa kostað mikið.

Á síðustu árum hefur borkostnaður lækkað mikið með notkun lofts í stað vatns við borun. Í ljós hefur komið að oft þarf ekki að bora dýpra en 30-50 m til þess að geta mælt hitastigul. Slík hola kostar 1989 um 100 þús. kr. Þessi aðferð við jarðhitaleit er því orðin aðgengileg fyrir sveitarfélög og einstaklinga og hefur þegar skilað góðum árangri á nokkrum stöðum við leit að heitavatnsrásum og staðsetningu djúpra vinnsluhola eins og til dæmis á Hvalfjarðarströnd austan Ferstiklu.

Þess ber að gæta að hitastigull einn sér í grunnri holu segir okkur ekkert um hita í djúpvatnskerfinu. Hár hitastigull til dæmis 20°C/100 m gæti orsakast af 20°C vatni sem rynnir í láréttu lagi á 100 m dýpi en gæti eins orsakast af 100°C vatni á 500 m dýpi. Þess vegna er nauðsynlegt að túlka frávik í hitastigli samhliða öðrum niðurstöðum eins og til dæmis efnahitastigi eða niðurstöðum viðnámsmælinga.



17. mynd: Hitastigull í grunnnum borholum á Hvalfjarðarströnd og við sunnanverðan Hvalfjörð. Svæðisbundinn hitastigull er um eða yfir 100 °C á kílómetra. Övenju hár hitastigull mældist á nokkrum stöðum. Athyglisverðast er frávik, sem virðist teygja sig undir fjörðinn á mótis við Hvammsvík. Niðurstöðurnar voru notaðar til þess að staðsetja djúpa borholu austan Saurbæjar og gaf hún góðan árangur eða yfir 20 l/sek af 80 °C heitu vatni. Þetta er á svæði, þar sem enginn jarðhiti er á yfirborði. Myndin er úr erindi Kristjáns Sæmundssonar á ársfundri Orkustofnunar 1989.



18. mynd: Hitastigull úr nokkrum borholum á Hvalfjarðarströnd. Stigullinn liggur á milli 90 og 370 °C á kílómetra. Auðsætt er að 30-50 m djúpar holur geta gefið mikilvægar upplýsingar um rennsli heits vatns neðanjarðar. Úr erindi Kristjáns Sæmundssonar á ársfundi Orkustofnunar 1989.

3. BORANIR OG BORHOLURANNSÓKNIR

3.1 JARÐBORANIR

Borholur á jarðhitasvæðum eru mikil fjárfesting og geta kostað frá andvirði einnar íbúðar til andvirðis tuga íbúða. Þess vegna er mikilvægt að skipuleggja borverk vel og einnig verða allir aðilar sem tengjast verkinu að viti hvaða skyldum þeir hafa að gegna við framkvæmd þess.

Við jarðboranir gilda svipuð lögmal og við aðrar verklegar framkvæmdir þar sem verkaupi gerir samninga við verktaka og sérfræðinga. Ýtarleg **verklýsing** þarf því að liggja fyrir með upplýsingum um jarðfræðilegar aðstæður, hönnun holunnar, hvaða athuganir þarf að gera á bortíma, hvernig bregðast skuli við óvæntum uppákomum og margt fleira. Greitt er fyrir borverk ýmist samkvæmt daggjaldi, einingarverði eða hvoru tveggja. Eftir að fleiri en eitt borfyrirtæki hófu starfsemi sína hefur færst í vöxt að borverk séu boðin út.

Reynslan af jarðhitaborunum hér á landi sýnir, að kostnaður við einstakar holur skiptist í stórum dráttum í þrennt. Um 50-60 prósent kostnaðar fara til borverktaka (borleiga, vinnulaun áhafnar o.fl.), 30-40 prósent í borholuefni (fóðurrör, steypu, loka o.fl.) og 10-20 prósent í mælingar, ráðgjöf og eftirlit sérfræðinga.

Lýsing á borun

Margar aðferðir eru til við jarðboranir. Við borun eftir jarðhita er algengast að nota snúningsbor með tannhjólakrónu, sem mylur bergið undir sér. Borkrónan er skrúfuð neðan á röralengju (borstreng), sem nær upp til yfirborðs. Til þess að fá þunga (álag) á borkrónuna, eru neðstu borstengurnar hafðar efnismiklar. Þær eru kallaðar álagsstengur og hvíla oft með margra tonna þunga á krónunni. Borvélin sjálf stendur yfir holunni og í gólfi borsins er drifborð sem snýr allri lengjunni.

Samspil álags og snúnings gerir það að verkum að borkrónan mylur bergið undan sér í borsvarf, sem flutt er jafnóðum til yfirborðs á þann hátt að vatni, borleðju eða lofti er dælt niður borstengurnar, í gegnum borkrónuna og upp til yfirborðs utan með stöngunum. Skolvökvinn flytur með sér borsvarfið upp til yfirborðsins og heldur holunni þannig hreinni á meðan dælt er. Við borun er borstöngum bætt í eftir því sem holan dýpkar.

Þess er gætt að hafa þann þunga á borkrónunni, sem talinn er hentugastur hverju sinni. Megnið af þunga álagsstanganna hvílir á krónunni, en að öðru leyti hangir borstangalengjan í mastri borsins. Á dráttarlínunni er vog, sem sýnir þungann og þar með álagið á krónuna. Í borun stýrir bormaður álaginu og gefur eftir á dráttarlínunni, eftir því sem borinn gengur niður. Til þess að halda holu sem næst lóðréttri er álag á krónu aukið í hörðu bergi en dregið úr því þegar berg er linara. Verði hola skökk núast borstangirnar, stöðugt utan í vegg hennar og hætta er á að borinn festist eða stangirnar brotni.

Gangur borverks er skráður jafnóðum. Algengur borhraði er 4-8 metrar á klukkustund. Sumar upplýsingar eru skráðar á sírita, og aðrar í dagbók (borskýrslu). Er það gert til að fylgjast með breytingum við borun holunnar og verkinu almennt. Bormenn skrá meðal annars dýpi, borhraða, skoltap, álag og snúning krónu, þrýsting á dælum, skolmagn og hitastig skolvatnsins. Skráð er nákvæmlega hvers konar fódurrör eru sett í holuna, hvernig þau eru steipt og hve mikið sement er notað. Sýni af borsvarfi eru tekin reglulega, með 2 metra dýptarbili.

Við jarðhitaboranir er áriðandi að skrá nákvæmlega rennsli skolvökva niður í holu og það magn sem upp kemur. Mismunur á rennsli skolvökva niður í holuna innan í borstöngum og þess sem kemur upp úr holunni utan með stöngunum gefur til kynna hvort og hvar borinn hefur skorið vatnsæðar.

Þegar notað er loft í stað vatns eða leðju til að hreinsa svarf upp úr holunni er talað um loftborun. Þá er stundum notaður svokallaður lofthamar í stað tannhjólakrónu. Loftborun er einkum notuð við grunnar rannsóknarholur og getur verið mun hraðvirkari og þar með ódýrari en snúningsborun með vatni.

Höggborar eru sérstök gerð bora sem notaðir eru til að bora grunnar, víðar holur. Þeir eru mikið notaðir til að forbora fyrir stærri jarðbora.

Gerð borholu

Markmiðið með jarðhitaborun er að finna heitt vatn í jörðu. Til þess að ná heitu vatni upp úr borholu, þarf oft að loka af kaldar vatnsæðar eða hrungjörn jarðlög í efri hluta holunnar. Af þessu sökum, meðal annars, eru borholur fódraðar með stálrörum sem ná frá yfirborði og niður á ákveðið dýpi.

Borholur eru boraðar í nokkrum áföngum, efst með sverum borkrónum og síðan grennri er neðar dregur. Eftir hvern boráfangi er sett stálrör í holuna og það steipt fast. Steypan er á milli bergs og fódurrörs. Síðan er borun haldið áfram með grennri borkrónu. Auk bortæknilegra atriða ræðst dýpi og vídd fódringa á lágheitsvæðum af sverleika þeirrar dælu sem væntanlega verður sett í holuna og því hversu djúpt þarf að setja dæluna.

Raufuð rör (svokallaður leiðari) eru sett í sumar borholur fyrir neðan steiptu fódurrörin. Leiðari hefur raufar til að hleypa vatni inn í holuna. Tilgangurinn með leiðara er að koma í veg fyrir hrun, sem getur stíflað rennsli upp holuna. Óalgengt er að nota leiðara í lághitaholum, en þeir eru notaðir í allflestum háhitaholum.

Borar

Sjö jarðborar eru nú hér á landi, einkum notaðir til að bora eftir jarðhita: Jötunn, Dofri, Narfi, Glaumur, Baldur, Ýmir og Ísbor. Þessir borar eru allir snúningsborar. Bordýpi ræðst fyrst og fremst af burðarþoli masturs og lyftigetu spils, með öðrum orðum sagt hvað borinn getur lyft þungum/löngum borstreng. Jötunn og Dofri eru stærstu borarnir og eru almennt notaðir til borunar á dýpri holum en 1200 m.

Minni borarnir eru almennt notaðir til að bora niður á 200 til 1000 m dýpi. Fyrir kemur að þessir borar eru notaðir til að bora dýpra, en þá er verið að reyna á getu

borsins til hins ýtrasta. Þetta getur gengið sæmilega ef engin óhöpp verða í.

Jötunn og Dofri hafa 6 bormenn á vakt, en minni borarnir, Narfi, Glaumur, Baldur, Ýmir og Ísbor hafa 3-4 bormenn á vakt. Borarnir eru auk þess misöflugir og þeim fylgir mismikið af tækjum og búnaði, enda mikill munur á þeim tíma og fyrirhöfn, sem fer í að flytja þá á milli borstaða.

Af þeim 600 km, sem boraðir hafa verið á Íslandi frá upphafi, hafa 200 km verið boraðir með jarðbornum Dofra (Gufubor), sem kom til landsins 1958. Af samanlögðu bordýpi eru um 90 prósent borað vegna jarðhita. Aðrar holur eru kaldvatns- og sjótökuholur (5 prósent) og kjarnaholur vegna mannvirkja (5 prósent).

Í meðfylgjandi töflu er listi yfir helstu bora sem notaðir hafa verið við jarðhitaborun hér á landi (tekið saman af Sverri Þórhallssyni).

LÝSING	JÖTUNN	DOFRI	NARFI	GLAUMUR	BALDUR	ÝMIR	ÍSBOR
Framleiðandi	Gardner Denver	Oilwell	Failing	Wabco	Mayhew	Ingersoll Rand	Ingersoll Rand
Árgerð	1972	1957	1975	1970	1953	1988	1986
Lyftiget(tn)	179	87	45	29	9	13	49
Hönnunard.	3657	1828	914	726	305	500	1000
Mesta dýpi	3084	2312	1830	1250	670	x	1430
Lágm.þverm.cm	21,6	21,6	20	20	14,9	15,9	16,5
Hám.þvermál	55,9	44,4	44,4	21,6	x	40,6	64,8
Menn á vakt	6	6	4	3-4	3	3	3-4
Flutningabílar	21	16	1-4	1-3	1	1	3-5

3.2 BORHOLUJARÐFRÆÐI

Meginverkefni borholujarðfræðinga er í fyrsta lagi að hafa jarðfræðilegt eftirlit með borverkum og veita ráðgjöf þar að lútandi og í öðru lagi að safna öllum tiltækum upplýsingum og jarðfræðigögnum meðan á borun stendur og vinna úr þeim.

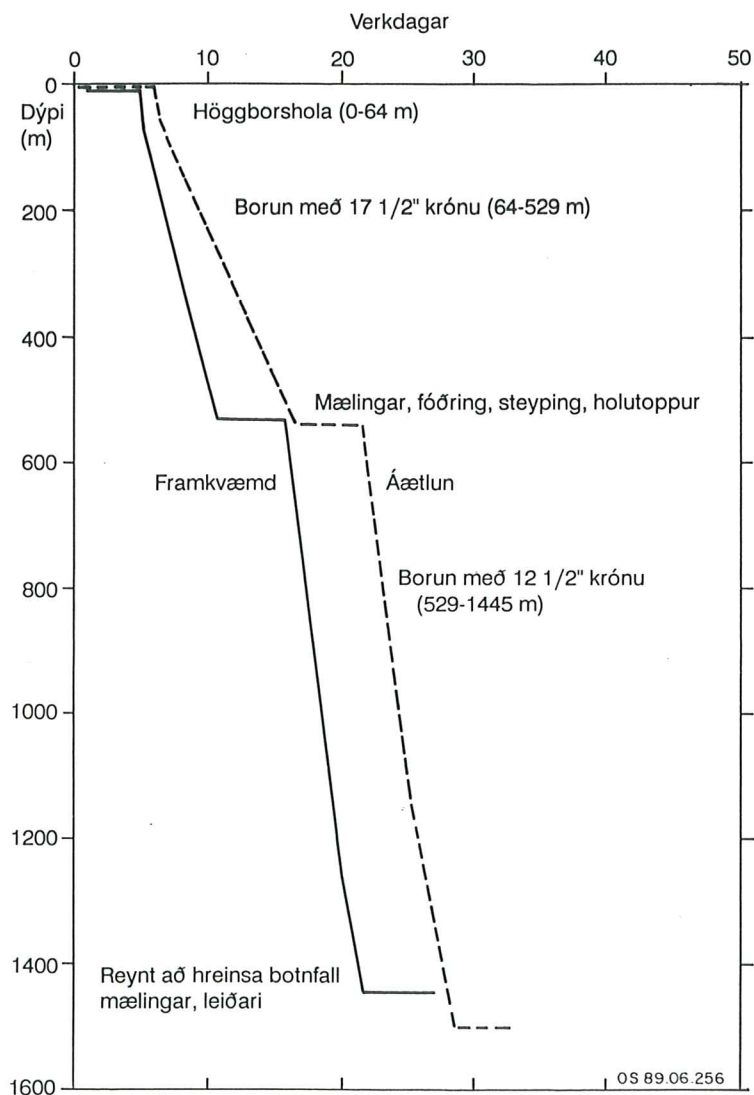
Eftirlit og ráðgjöf

Hvort sem um er að ræða rannsóknarholu eða vinnsluholu þurfa borholujarðfræðingar að fylgjast með framvindu og árangri verksins út frá verklýsingu og markmiðum borunnar. Við stærri borverk er æskilegt að jarðfræðingur sé á staðnum og vinni störf sín samhliða borun. Við minni borverk þarf að meta fyrirkomulag eftirlits og ráðgjafar hverju sinni. Oft er því sinnt með stuttum ferðum á borstað eða í gegnum síma frá degi til dags.

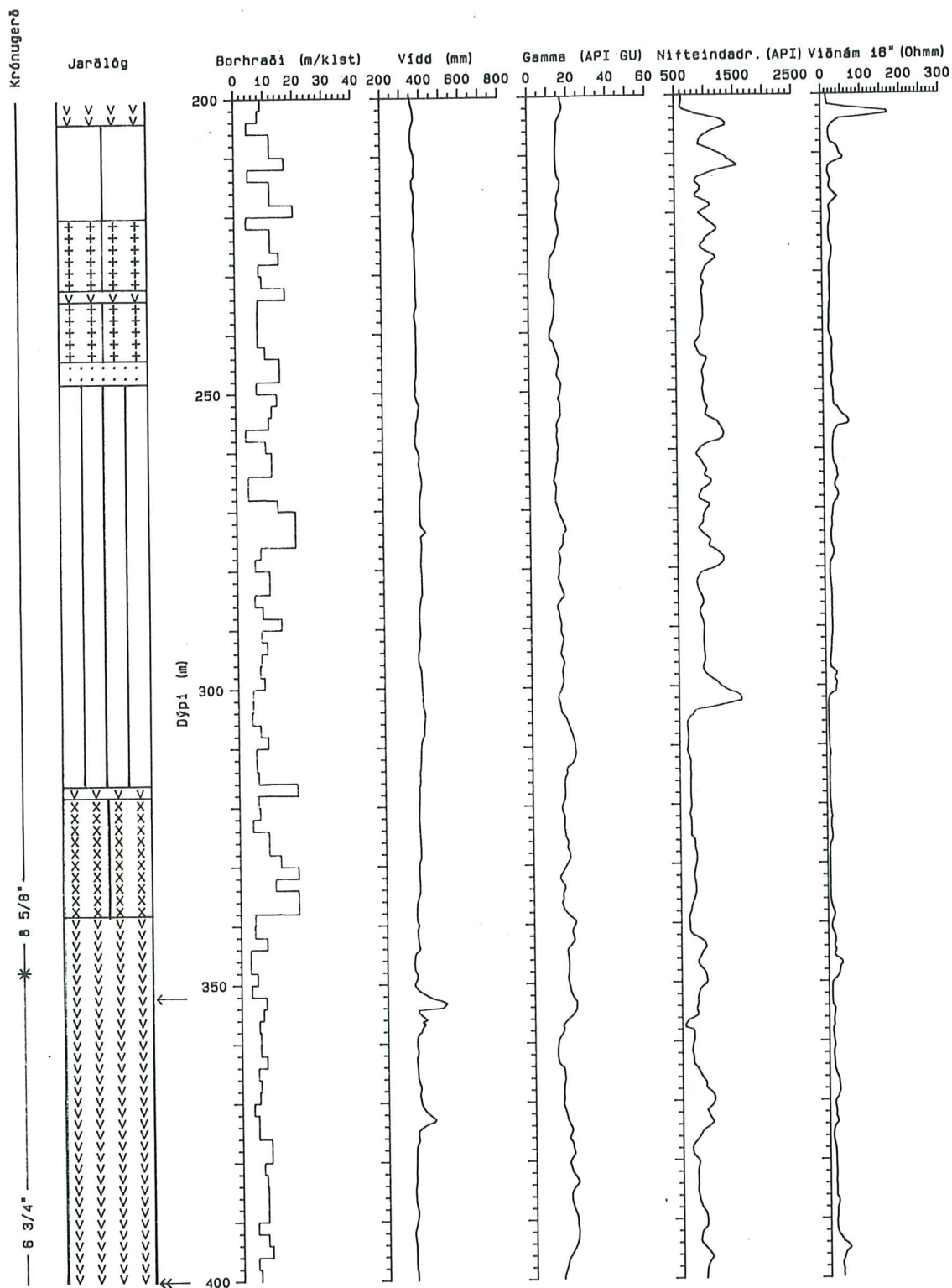
Ráðgjöf um endanlegt dýpi fóðringa er í verkahring borholujarðfræðinga. Áætlað dýpi fóðringa í verklýsingu byggir meðal annars á styrkleika bergs og almennri þekkingu á jarðfræði svæðisins. Endanlegt dýpi fóðringa ræðst hins vegar af þeim jarðlögum, sem finnast við borun. Helst þarf að hafa gætur á tveimur atriðum þegar ákveða þarf dýpi fóðringa í jarðhitaholum. Í fyrsta lagi verður fóðurrör að ná niður fyrir kaldar vatnsæðar og í öðru lagi verður það að ná niður fyrir hrungjörn jarðlög. Lögð er áhersla á að fóðurrör endi í traustu bergi, svo ekki skolist frá endanum og rörið losni.

Úrvinnsla á svarfi

Bormenn taka sýni af borsvarfi á tveggja metra fresti meðan á borun stendur. Borholujarðfræðingur greinir síðan svarfið í smásjá. Í stærri borverkum er sérfræðingur á staðnum með útbúnað til greiningar, en í smærri verkum er svarfið sent á rannsóknastofu Orkustofnunar, þar sem það er greint. Það fer eftir umfangi verksins hversu ýtarlega er unnið úr borholusvarfi.



19. mynd: Borsaga jarðhitaholu. Framgangur borverksins er sýndur á línuriti þar sem verk dagar eru teiknaðir upp á móti dýpi holunnar. Brattur ferill einkennir hraða og áfallalaus borun. Láréttur ferill táknar hlé á borun vegna fóðringa, mælinga eða tafa. Sjá má að við borun þessarar holu, sem er á Reykjanesi (RnG-9), hefur framkvæmdin gengið mun betur en áætlað var. Myndin er eftir Sverri Þórhallsson.



20. mynd: Jarðlög og borholumælingar á 200 - 400 m dýpi úr holu númer 1 á Bakka í Ölfusi. Lengst til vinstri á myndinni er sýnd krónustærð og jarðlög samkvæmt svarfgræiningu. Mismunandi jarðlög eru einkennd hvert með sínu tákni. Þá kemur dýptarskali og borhraði, mældur í metrum á klukkustund. Borhraðinn ræðst einkum af hörku bergsins. Næst er sýnd vidd holunnar, þá gammageislun úr berginu, en með henni má greina súr berglög (líparít). Lengst til hægri er nifteindamæling og viðnám í holunni, en hvort tveggja er mælikvarði á vatnsinnihald bergsins.

Við gerð jarðlagasniðs notar borholujarðfræðingur allar tiltækar upplýsingar, sem fást við borunina. Auk greiningar á borsvarfi er stuðst við borhraða, álag á krónu, krónugerð, snúningshraða á krónu, skolhraða, skoltap eða skolaukningu og hitastigsbreytingar á skolvatni.

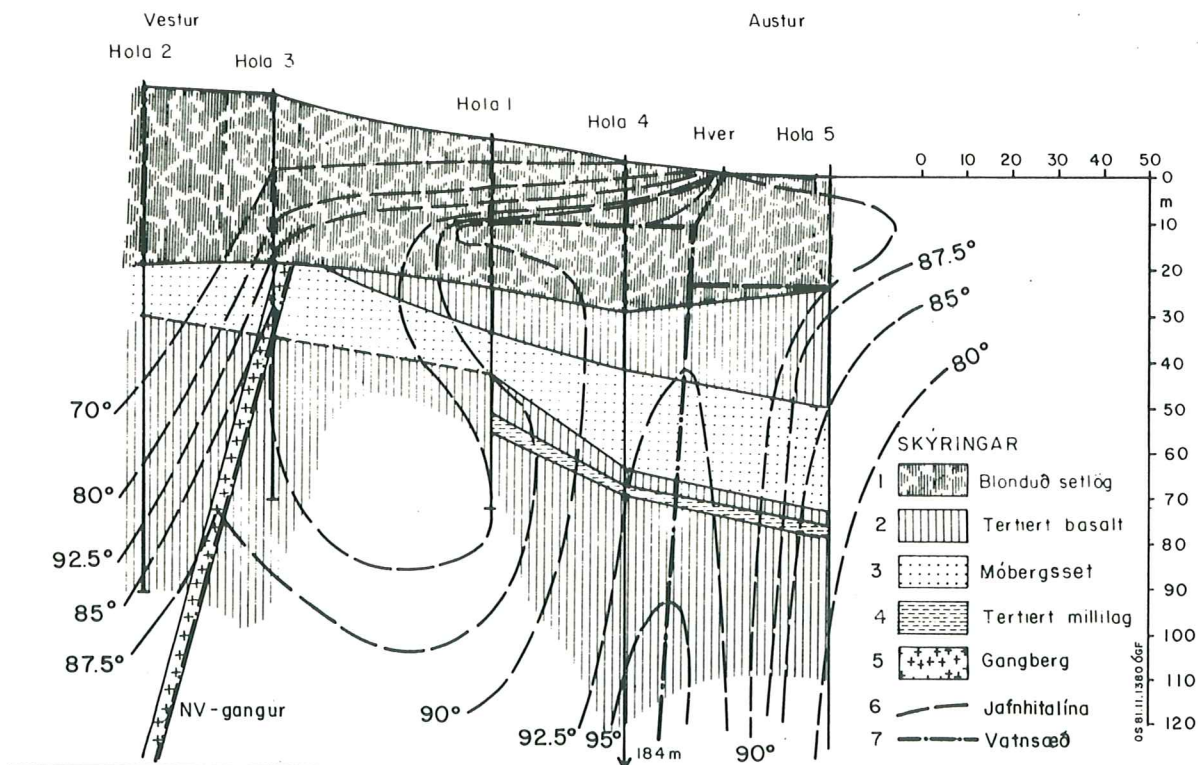
Ennfremur er stuðst við jarðlagamælingar (sjá kafla um borholumælingar), sem venjulega eru gerðar við lok borunar. Þar er meðal annars mæld holuvídd, vatnsinnihald bergsins og rafleiðni. Jarðlagamælingar sýna breytingar á eðliseiginleikum jarðlaga með dýpi.

Svarfgreiningu má skipta í þrjú stig, þ.e. frumgreiningu án nokkurra hjálpargagna, greiningu byggða á öllum nauðsynlegum upplýsingum, sem fengust við borunina og að síðustu fullnaðar úrvinnslu, sem innifelur nákvæma rannsókn á bergi og steindum.

Snið og þversnið

Að úrvinnslu lokinni eru jarðlög sem holan sker teiknuð upp í svokallað jarðlagasnið. Jarðlagasniðin sýna einnig sérhæfðar upplýsingar, sem skipta máli fyrir vinnslu jarðhitans, til dæmis vatnsæðar í borholum.

Þegar fleiri en ein hola hafa verið boraðar í sama svæði, þá er reynt að tengja jarðlög milli þeirra. Út frá slíkum tengingum er hægt að meta uppbyggingu og brotasögu viðkomandi svæðis. Þetta eru mjög mikilvægar upplýsingar, því þær nýtast síðar við nákvæma staðsetningu fleiri borhola og við að setja fram raunhæft líkan af jarðhitakerfinu.



21. mynd: Jarðlagasnið af jarðhitasvæðinu að Reykjum í Fnjóskadal. Sýnd eru jarðlög samkvæmt svarfgreiningu, hitadreifing samkvæmt hitamælingum í borholum svo og berggangar og vatnsleiðandi sprungur. Myndin er úr skýrslu Orkustofnunar eftir Ólaf Flóvenz o.fl. frá 1982 (OS-82050/JHD-08).

3.3 BORHOLUMÆLINGAR

Borholumælingar eru ýmsar mælingar, sem gerðar eru í borholum, annað hvort meðan á borun stendur eða síðar. Markmið þeirra er margþætt. Í fyrsta lagi er aflað upplýsinga um eiginleika og ástand borholunnar sjálfar, eins og til dæmis vídd hennar og halla. Vatnsæðar eru staðsettar og kannað hvort vatn streymir á milli æða, en slíkt kemur iðulega fyrir í holum sem hafa margar æðar á mismunandi dýpi. Þessar upplýsingar eru oft nauðsynlegar meðan á borun stendur til þess að meta árangur borunar og til þess að geta tekið réttar ákvarðanir um framhald verksins. Í öðru lagi er reynt að afla eins víðtækra upplýsinga og mögulegt er um eiginleika jarðhitavökvans, það er hitastig og þrýsting í vatnsæðum í holunni og hversu greiðlega vatnið rennur inn í holuna. Þessar mælingar eru gerðar strax að borun lokinni og síðar til að fylgjast með breytingum sem verða við vatnsvinnslu úr holunni. Í þriðja lagi er aflað upplýsinga um gerð berglaga, sem holan sker og upplýsingar um jarðhitakerfið í heild. Þessar mælingar eru kallaðar jarðlagamælingar.

Meginverkefni borholumælingamanna er ráðgjöf um mælingar, framkvæmd þeirra og úrvinnsla. Þeir leggja síðan á ráðin um framkvæmd borverksins og tilhögun vinnslu úr holum.

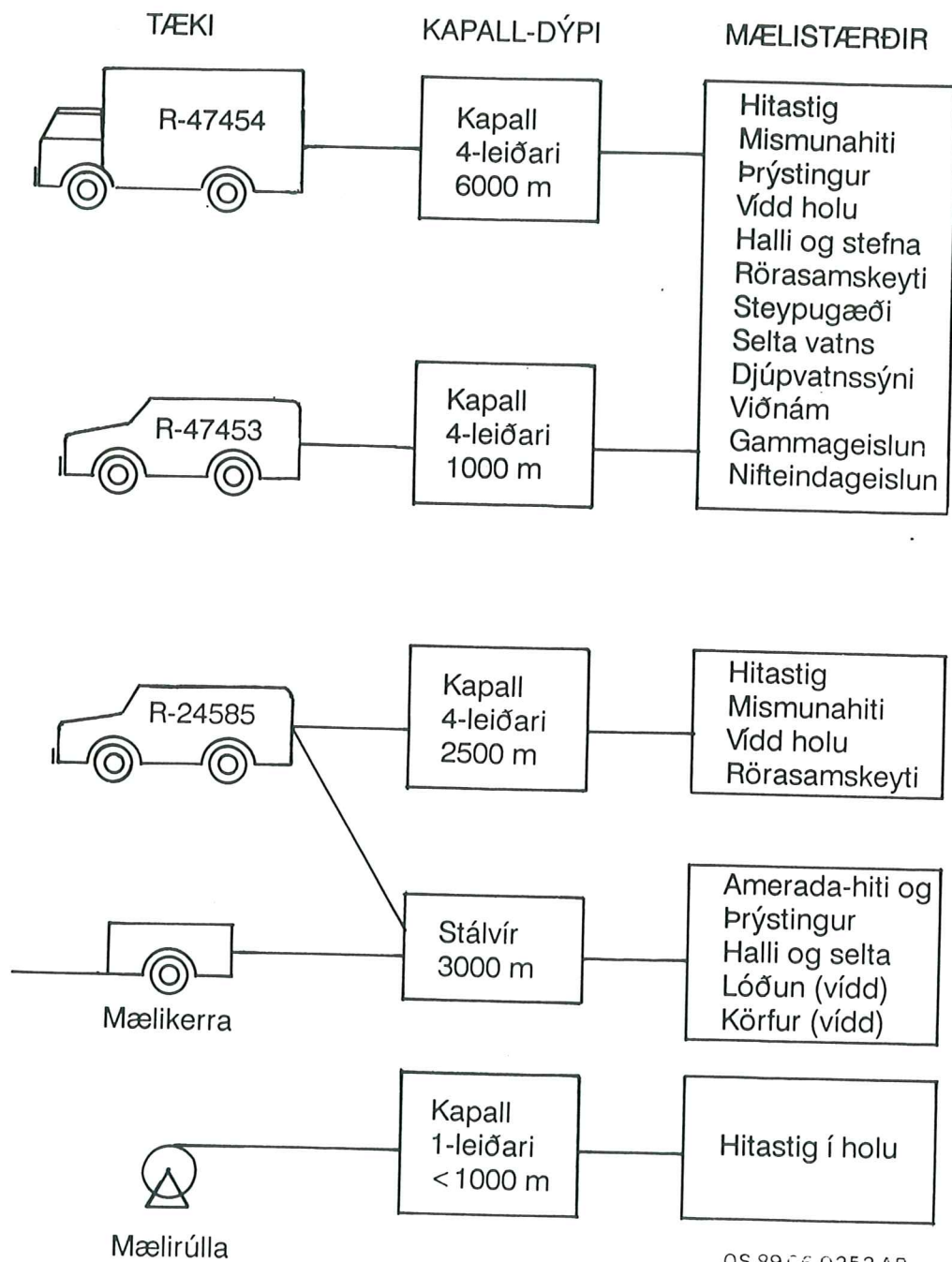
Borholumælingar fara þannig fram að skynjara er rennt niður í holuna á kapli og niðurstöðurnar skráðar á yfirborði. Í mjög háum hita eru notuð tæki, sem hanga í stálvír og eru niðurstöður skráðar á sírita niðri í holunni (Ameradataeki). Þessi tækni er ekki notuð að ráði á lághitasvæðum.

Tæki til borholumælinga eru til af ýmsum gerðum og stærðum. Skynjarinn getur verið einfaldur viðnámshitamælir, eða flókið mælitæki. Kapallinn hefur 1-4 rafleiðara og er hafður á spili eða rúllu. Skráningartækin geta verið einfaldur spennumælir og vasabók, síritandi skrifari eða tölvukerfi sem tekur við gögnunum. Yfirleitt er mælikapallinn hafður á spili, sem fest er á bíl eða kerru. Orkustofnun hefur til umráða þrjá borholumælingabíla og eina kerru með mótordrífnu spili til mælinga í djúpum holum. Hitamælingar í grunnum holum eru hins vegar oft gerðar með litlum handrúllum, annað hvort af bormönnum meðan á borun stendur eða borholumælingamönnum Orkustofnunar.

Á mynd 22 er sýnt yfirlit yfir borholumælitæki í eigu Orkustofnunar. Hér á eftir verður gerð stuttlega grein fyrir þeim mælingum er að mestu gagni hafa komið við jarðhitaboranir á lághitasvæðum hér á landi.

Hitastig

Hitastig er lang mikilvægasta stærðin sem mæld er í borholum á jarðhitasvæðum. Við borun kælir skolvatnið holuveggina og eins getur skolvatnið streymt inn í vatnsæðar í jarðhitakerfinu og kælt þær. Þegar skolun er hætt fer holan að hitna upp á ný. Með hitamælingum meðan á borun stendur er því unnt að staðsetja vatnsæðar í holunni, áætla hita í þeim og sjá hvort og hversu mikið rennur úr einstökum æðum. Einnig er unnt að áætla berghita í holubotni, því þar hefur kæling orðið minnst.



OS 89.06.0252 AB

22. mynd: Yfirlit um borholumælitæki í eigu Orkustofnunar. Stofnunin á þrjá sérbúna bíla til borholumælinga og eina kerru með mótordrífnu spili. Auk þess eru til allmargar handrúllur notaðar til hitamælinga. Myndin er eftir Benedikt Steingrímsson.

Stundum er hitaskynjara rennt í botn holu í borhléum og upphitun holunnar skráð, til dæmis yfir eina nótt eða helgi. Út frá slíkum upphitunarferli er unnt að áætla nokkuð nákvæmlega berghita við botn holunnar. Ekki er unnt að mæla endanlegan hitaferil holu, fyrr en mörgum mánuðum eftir borun, þegar kælingar vegna skolvatnsins er hætt að gæta. Ekki er sjálfgefið að mældur hitaferill í holu endurspegli hita bergsins umhverfis holuna. Rennsli í holunni breytir til dæmis hitaferlinum og felur raunverulegan hita bergsins.

Í grunnnum rannsóknarholum eru nákvæmar hitamælingar notaðar til þess að ákveða hitastigul (sjá kafla 2.4 um hitastigulsboranir).

Holuvídd

Þegar borað er í gegnum laus jarðlög getur skolast úr þeim og verður þá holan víðari á þeim stað. Slíkar útvíkkarir í holum eru kallaðar skápar. Ef skápar verða mjög stórir næst ekki að skola öllu svarfi upp úr holunni. Það safnast í skápana og fellur síðan niður að borstrengnum, þegar dælingu er hætt, og getur fest hann. Ef stórir skápar myndast í holu er oft nauðsynlegt að fylla þá með steypu áður en borun er haldið áfram. Með víddarmæli er unnt að finna og meta stærð skápa.

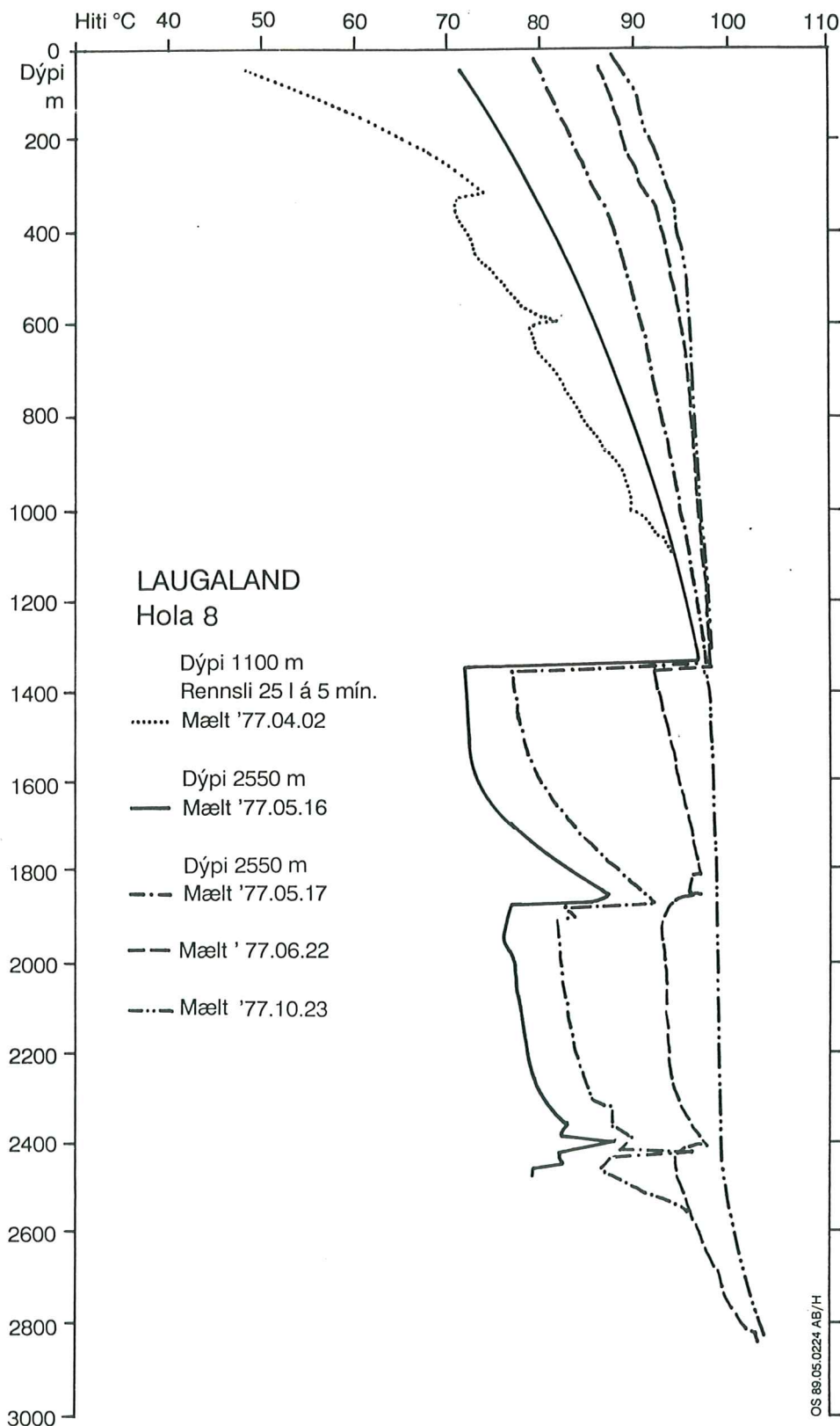
Við borun í blágrýtisstafla verða holur oft víðari þar sem borinn sker millilög. Með mælingu á vídd er þá unnt að fá einhverjar upplýsingar um jarðlagaskipan í holunni.

Útfellingar í holum, til dæmis kalkútfellingar, þrengja holuna og geta því minnkað afköst hennar. Áður en slíkar þrengingar eru hreinsaðar með bor eru þær kannaðar með víddarmæli. Einnig má nota einfalda vírgrind (körfu) eða lóð, sem hengt er í stálvír, til þess að kanna vídd holu, sé víddarmælir ekki tiltækur.

Halli holu

Yfirleitt er reynt að hafa holur því sem næst lóðréttar. Ávallt er nokkur hætta á að borstrengurinn leiti til hliðar og hola skekkist í borun. Er þá hætta á að holan hitti ekki þær æðar sem henni var ætlað að skera. Einnig eykst hætta á að borstrengurinn nagi sig inn í holuveggina og borinn festist. Til þess að koma í veg fyrir að hola skekkist er komið fyrir stýringum á milli álagsstanga og eins er álag minnkað þegar borað er í gegnum lín jarðlög.

Bormenn hallamæla holur reglulega til þess að fylgjast með gangi borunar. Þessir mælar sýna einungis hallann, en ekki stefnuna, sem holunni hallar í. Orkustofnun hefur hins vegar yfir að ráða hallamælum, sem einnig skrá stefnu holu með seguláttavita. Þessir mælar hafa reynst sæmilega, en dæmi eru um að segulmögnun bergsins trufla mælinn. Til eru hallamælar sem ákvarða stefnu með gýróáttavita, en þeir eru dýrir og hafa þess vegna ekki verið keyptir til landsins.



23. mynd: Hitaferlar úr borholu númer 8 að Laugalandi í Eyjafirði. Fyrsti ferillinn er mældur þegar holan var 1100 m djúp og sjást á honum vatnsæðar á 320 og 590 m dýpi. Næstu tveir ferlar eru mældir þegar holan var orðin 2550 m djúp og þar sjást æðar á 1340 m, 1860 m og 2400 m dýpi, en efti æðarnar sjást ekki vegna rennslis að neðan. Ferillinn lengst til hægri er mældur þegar holan hefur hitnað upp eftir borun. Mælingarnar sýna að hiti í vatnsæðum í holunni er á bilinu 75-100 °C. Fyrir neðan 2400 m vex hitastig ört, sem gæti bent til þess að hringrás jarðhitakerfisins nái ekki neðar. Svæðisbundinn hitastigull í Eyjafirði utan jarðhitasvæða er 60 °C/km. Þetta sýnir að hræring vatns í jarðhitakerfinu hefur hitað upp bergið ofan við 1600 m dýpi en kælt berg þar fyrir neðan. Myndin er úr skýrslu Orkustofnunar eftir Axel Björnsson o.fl. frá 1979 (OS-JHD-7827).

Jarðlagamælingar

Undir jarðlagamælingar má fella nokkrar aðferðir, sem mæla eiginleika bergsins í holuveggjunum. Á svipaðan hátt og í forrannsóknnum á yfirborði er unnt að mæla **eðlisviðnám** í borholum. Þessar mælingar gefa upplýsingar um poruhluta bergsins. Það er þó nokkrum erfiðleikum bundið að greina í sundur áhrif bergsins og áhrif borholuvökvans á mælingarnar. Með því að taka sýni af vatninu með sérstökum búnaði, **djúpsýnataka**, er þó unnt að greina hér í sundur að vissu marki. Efnainnihald í djúpsýnum, sem tekin eru á mismunandi dýpi í holum, gefur upplýsingar um einstakar vatnsæðar, eins og til dæmis hvort þær eru tengdar sama vatnskerfinu eða hvort þær eru af ólíkum uppruna. Efnainnihaldið gefur einnig upplýsingar um vinnsluhæfni vatnsins, sem nota má við frumhönnun virkjunar.

Berg inniheldur nokkuð af geislavirkum efnum og sendir meðal annars frá sér gammageisla. Þessi geislun er yfirleitt mjög lítil en hana er þó unnt að mæla. Líparít (súrt berg) inniheldur mun meira af geislavirkum efnum heldur en blágrýti (basalt) og er því unnt að finna súr berglög í borholum með mælingu á **gammageislum**.

Einnig er unnt að kanna eiginleika jarðlaga með því að senda niður í borholu geislavirkt efni sem gefur frá sér **nifteindir** eða **gammageisla** og mæla hvernig þeir endurvarpast frá berginu. Þessi aðferð gefur upplýsingar um poruhluta eins og viðnámsmælingar, en einnig um þéttleika bergsins.

Aðrar mæliaðferðir

Hér að framan hefur einungis verið fjallað um mikilvægustu mælingar, sem gerðar eru í jarðhitaholum á Íslandi. Mæliaðferðir eru mun fleiri. Má þar til dæmis nefna skynjara til þess að kanna **steypugæði** bak við fóðurrör, skynjara til þess að staðsetja nákvæmlega **samskeyti** á fóðurrörum, mæli til að kanna **seltu** (viðnám) holuvökvans og **rennsli** í holum.

3.4 VARSLA BORHOLUGAGNA

Boranir geta gefið mjög mikilvægar upplýsingar um hitastig, vatnsæðar, berggerð, jarðsögu og margt fleira ef vel er að borun og borholurannsóknum staðið. Þessar upplýsingar geta nýst síðar við margvíslegar rannsóknir og framkvæmdir. Til dæmis getur svarf úr holu, sem boruð er til að kanna hitastigul, nýst áratugum seinna við hönnun mannvirkja, til dæmis jarðgangnagerð. Komið hefur fyrir að gamlar holur á jarðhitasvæðum hafa týnst eftir að notkun þeirra var hætt og nýjar boraðar. Þegar niðurdráttur vex í jarðhitageyminum við vinnslu geta slíkar holur veitt köldu vatni niður í jarðhitakerfið og valdið miklu tjóni.

Af þessum ástæðum er einkar mikilvægt að öllum tiltækum gögnum um nákvæma staðsetningu og eiginleika borhola sé safnað meðan á borun stendur. Í lok borunar þarf að koma þessm gögnum á aðgengilegt form og varðveita um ókomin ár. Til þess að stuðla að virku eftirliti með borunum og vörslu gagna hefur löggjafarvaldið sett í orkulög ákvæði um þessi atriði, en 52. grein þeirra hljóðar svo:

Við allar jarðboranir dýpri en 10 metra skal halda dagbækur, er gefi upplýsingar um jarðlög, gerð þeirra og dýpi, hvenær vatn eða gufa kemur í holuna, hitastig og hvað annað, sem reglugerð ákveður eða Orkustofnun mælir fyrir um að færa í dagbók. Skylt er að láta Orkustofnun í té afrit af dagbók, þegar hún óskar þess. Hún getur einnig krafist þess, að borkjarnar og berg- og jarðvegssýnishorn séu varðveitt. Ef Orkustofnun mælir svo fyrir, er þeim, sem lætur bora, skylt að tilkynna henni þegar í stað, er heitt vatn eða gufa kemur eða vex í borholu.

Á árum áður þegar aðeins var einn borverktaki í landinu og hann í nánnum tengslum við Orkustofnun var ákvæði þessarar lagagreinar nokkuð vel uppfyllt. Á síðustu árum hefur borverktökum fjölgað og mun fleiri einstaklingar og félög láta bora fyrir sig. Þetta hefur leitt til þess að ekki hefur tekist að halda öllum upplýsingum saman sem skyldi. Hér ræður kostnaður einnig nokkru því ekki er kveðið á í lögum um það hver skuli greiða kostnað af öflum og vörslu borholugagna.

Orkustofnun hefur nýverið haft samband við alla borverktaka í landinu og leitað eftir samvinnu þeirra við að koma þessum málum í fastar skorður. Undirtektir hafa verið góðar og var í fyrstu gert eyðublað, sem borverktaki fyllir út fyrir hvert verk. Þar koma fram helstu upplýsingar um borholuna og mun Orkustofnun í samvinnu við borfyrirtæki og verkkaupa nota upplýsingarnar sem grunn í borholuskrá, sem verður öllum aðgengileg. Eintak af eyðblaðinu er sýnt á mynd 24. Unnið er að uppsetning öflugsgagnagrunns á Orkustofnun, þar sem geymd verða öll mikilvæg gögn er falla til við borun, rannsóknir á borholum og rekstur jarðhitasvæða.

Auk þess að fylla út eyðblaðið taka bormenn sýni af svarfi á borholum með um 2 m dýptarbili. Svarfið er sent Orkustofnun þar sem það er þvegið og greint í berggerðir, misnákvæmlega eftir eðli borverksins og þörfum verkkaupa. Síðan verða bergsýnin geymd í vörslu Orkustofnunar.

<p style="font-size: 1.2em; margin: 0;">JARÐBORANIR hf.</p>	<p style="font-size: 1.2em; margin: 0;">BORHOLUSKRÁ ORKUSTOFNUNAR OG VERKTAKA</p> <p style="margin: 0;">NR. _____</p>																																																						
<p>Sýsla, kaupstaður: _____</p> <p>Hreppur: _____</p> <p>Staður: _____ Holuheiti: _____ M.y.s. _____</p>																																																							
<p>Staðarlýsing: _____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; min-height: 100px;"> <p style="font-size: 0.8em; margin: 0;">Afstöðumynd holu</p> </div>																																																						
<p>Verkkaupi: _____ Heimilisfang: _____</p> <p>Verknúmer: _____ Bortæki: _____</p> <p>Hvenær borað. Upphaf: _____ Lok: _____</p> <p>Dýpi holu (m): _____ Vatnsborð/rennsli: _____</p> <p>Vatnsæðar/skoltöp (l/s): _____</p>																																																							
<p>Tegund borframkvæmdar</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td><input type="checkbox"/> Bora beina holu</td> <td><input type="checkbox"/> Skábora holu</td> <td><input type="checkbox"/> Viðgerð</td> <td><input type="checkbox"/> Hreinsun</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Dýpkun</td> <td><input type="checkbox"/> Örvun</td> <td><input type="checkbox"/> Rýming</td> <td><input type="checkbox"/> Hóla fyllt - ónýt</td> </tr> </table> <p>Frágangur á holutoppi: _____</p>		<input type="checkbox"/> Bora beina holu	<input type="checkbox"/> Skábora holu	<input type="checkbox"/> Viðgerð	<input type="checkbox"/> Hreinsun	<input type="checkbox"/> Dýpkun	<input type="checkbox"/> Örvun	<input type="checkbox"/> Rýming	<input type="checkbox"/> Hóla fyllt - ónýt																																														
<input type="checkbox"/> Bora beina holu	<input type="checkbox"/> Skábora holu	<input type="checkbox"/> Viðgerð	<input type="checkbox"/> Hreinsun																																																				
<input type="checkbox"/> Dýpkun	<input type="checkbox"/> Örvun	<input type="checkbox"/> Rýming	<input type="checkbox"/> Hóla fyllt - ónýt																																																				
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th colspan="3">Krónustærð</th> <th colspan="5">Fóðring</th> <th>Frágangur fóðringar</th> </tr> <tr> <th>Þvermál</th> <th>frá (m)</th> <th>til (m)</th> <th>Þvermál</th> <th>Þykkt</th> <th>Gerð</th> <th>frá (m)</th> <th>til (m)</th> <th>laus/steypt/raufuð/o.s.frv.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table>		Krónustærð			Fóðring					Frágangur fóðringar	Þvermál	frá (m)	til (m)	Þvermál	Þykkt	Gerð	frá (m)	til (m)	laus/steypt/raufuð/o.s.frv.																																				
Krónustærð			Fóðring					Frágangur fóðringar																																															
Þvermál	frá (m)	til (m)	Þvermál	Þykkt	Gerð	frá (m)	til (m)	laus/steypt/raufuð/o.s.frv.																																															
<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="vertical-align: top;"> <p>Fyrirhuguð notkun</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr><td><input type="checkbox"/> Gufuöflun</td><td><input type="checkbox"/> Sjótaka</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> Heitavatnsöflun</td><td><input type="checkbox"/> Mannvirkjagerð</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> Hitastigulshola</td><td><input type="checkbox"/> Kaldavatnshola</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> Rannsóknarhola</td><td><input type="checkbox"/> Niðurdælingarhola</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> Annað</td><td><input type="checkbox"/> Píshola</td></tr> </table> </td> <td style="vertical-align: top;"> <p>Boraðferð</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr><td><input type="checkbox"/> vatn</td><td>frá _____ til _____ m dýpi</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> loft</td><td>frá _____ til _____ m dýpi</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> gel</td><td>frá _____ til _____ m dýpi</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> polymer</td><td>frá _____ til _____ m dýpi</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> loft + vatn</td><td>frá _____ til _____ m dýpi</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> kjarnaborun</td><td>frá _____ til _____ m dýpi</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> höggborun</td><td>frá _____ til _____ m dýpi</td></tr> </table> </td> </tr> </table>		<p>Fyrirhuguð notkun</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr><td><input type="checkbox"/> Gufuöflun</td><td><input type="checkbox"/> Sjótaka</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> Heitavatnsöflun</td><td><input type="checkbox"/> Mannvirkjagerð</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> Hitastigulshola</td><td><input type="checkbox"/> Kaldavatnshola</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> Rannsóknarhola</td><td><input type="checkbox"/> Niðurdælingarhola</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> Annað</td><td><input type="checkbox"/> Píshola</td></tr> </table>	<input type="checkbox"/> Gufuöflun	<input type="checkbox"/> Sjótaka	<input type="checkbox"/> Heitavatnsöflun	<input type="checkbox"/> Mannvirkjagerð	<input type="checkbox"/> Hitastigulshola	<input type="checkbox"/> Kaldavatnshola	<input type="checkbox"/> Rannsóknarhola	<input type="checkbox"/> Niðurdælingarhola	<input type="checkbox"/> Annað	<input type="checkbox"/> Píshola	<p>Boraðferð</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr><td><input type="checkbox"/> vatn</td><td>frá _____ til _____ m dýpi</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> loft</td><td>frá _____ til _____ m dýpi</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> gel</td><td>frá _____ til _____ m dýpi</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> polymer</td><td>frá _____ til _____ m dýpi</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> loft + vatn</td><td>frá _____ til _____ m dýpi</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> kjarnaborun</td><td>frá _____ til _____ m dýpi</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> höggborun</td><td>frá _____ til _____ m dýpi</td></tr> </table>	<input type="checkbox"/> vatn	frá _____ til _____ m dýpi	<input type="checkbox"/> loft	frá _____ til _____ m dýpi	<input type="checkbox"/> gel	frá _____ til _____ m dýpi	<input type="checkbox"/> polymer	frá _____ til _____ m dýpi	<input type="checkbox"/> loft + vatn	frá _____ til _____ m dýpi	<input type="checkbox"/> kjarnaborun	frá _____ til _____ m dýpi	<input type="checkbox"/> höggborun	frá _____ til _____ m dýpi																												
<p>Fyrirhuguð notkun</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr><td><input type="checkbox"/> Gufuöflun</td><td><input type="checkbox"/> Sjótaka</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> Heitavatnsöflun</td><td><input type="checkbox"/> Mannvirkjagerð</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> Hitastigulshola</td><td><input type="checkbox"/> Kaldavatnshola</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> Rannsóknarhola</td><td><input type="checkbox"/> Niðurdælingarhola</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> Annað</td><td><input type="checkbox"/> Píshola</td></tr> </table>	<input type="checkbox"/> Gufuöflun	<input type="checkbox"/> Sjótaka	<input type="checkbox"/> Heitavatnsöflun	<input type="checkbox"/> Mannvirkjagerð	<input type="checkbox"/> Hitastigulshola	<input type="checkbox"/> Kaldavatnshola	<input type="checkbox"/> Rannsóknarhola	<input type="checkbox"/> Niðurdælingarhola	<input type="checkbox"/> Annað	<input type="checkbox"/> Píshola	<p>Boraðferð</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr><td><input type="checkbox"/> vatn</td><td>frá _____ til _____ m dýpi</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> loft</td><td>frá _____ til _____ m dýpi</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> gel</td><td>frá _____ til _____ m dýpi</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> polymer</td><td>frá _____ til _____ m dýpi</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> loft + vatn</td><td>frá _____ til _____ m dýpi</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> kjarnaborun</td><td>frá _____ til _____ m dýpi</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> höggborun</td><td>frá _____ til _____ m dýpi</td></tr> </table>	<input type="checkbox"/> vatn	frá _____ til _____ m dýpi	<input type="checkbox"/> loft	frá _____ til _____ m dýpi	<input type="checkbox"/> gel	frá _____ til _____ m dýpi	<input type="checkbox"/> polymer	frá _____ til _____ m dýpi	<input type="checkbox"/> loft + vatn	frá _____ til _____ m dýpi	<input type="checkbox"/> kjarnaborun	frá _____ til _____ m dýpi	<input type="checkbox"/> höggborun	frá _____ til _____ m dýpi																														
<input type="checkbox"/> Gufuöflun	<input type="checkbox"/> Sjótaka																																																						
<input type="checkbox"/> Heitavatnsöflun	<input type="checkbox"/> Mannvirkjagerð																																																						
<input type="checkbox"/> Hitastigulshola	<input type="checkbox"/> Kaldavatnshola																																																						
<input type="checkbox"/> Rannsóknarhola	<input type="checkbox"/> Niðurdælingarhola																																																						
<input type="checkbox"/> Annað	<input type="checkbox"/> Píshola																																																						
<input type="checkbox"/> vatn	frá _____ til _____ m dýpi																																																						
<input type="checkbox"/> loft	frá _____ til _____ m dýpi																																																						
<input type="checkbox"/> gel	frá _____ til _____ m dýpi																																																						
<input type="checkbox"/> polymer	frá _____ til _____ m dýpi																																																						
<input type="checkbox"/> loft + vatn	frá _____ til _____ m dýpi																																																						
<input type="checkbox"/> kjarnaborun	frá _____ til _____ m dýpi																																																						
<input type="checkbox"/> höggborun	frá _____ til _____ m dýpi																																																						
<p>Athugasemdir: _____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>Hvar er fyrirhugað að bora næst með þessum bor ? _____</p>																																																							

24. mynd: Eyðublað notað til skráningar gagna um borholur. Gert er ráð fyrir að borstjóri fylli út eyðublað af þessu tagi fyrir hverja holu. Eintak af útfylltu blaðinu er sent til Orkustofnunar, sem notar upplýsingarnar í gagnagrunn um borholur á landinu.

4. VINNSLURANNSÓKNIR

Undir samheitið vinnslurannsóknir falla ýmsar athuganir á jarðhitakerfum, sem komin eru í vinnslu. Þessar rannsóknir beinast einkum að því að afla upplýsinga um viðbrögð kerfanna við álagi. Gögnin eru síðan notuð til að meta orkuforða viðkomandi kerfis. Einnig er metið hvernig vinnslu verði best hagað þannig að orkan nýtist sem best og sneitt verði hjá tæknilegum vandamálum, eins og miklum niðurdrætti vatnborðs, kælingu, útfellingum og tæringu.

Fyrsta skrefið, strax að borun lokinni, eru vinnsluprófanir, sem felast í fyrsta mati á afköstum og eiginleikum einstakra hola. Síðan hefst reglubundið eftirlit með jarðhitasvæðinu, svokallað vinnslueftirlit en það er tvíþætt.

Í fyrsta lagi er fylgst með vatnsnámi úr kerfinu, bæði rennsli eða dælingu úr einstökum holum og heildarvinnslu. Jafnframt eru viðbrögð kerfisins könnuð með mælingum á þrýstingi og/eða vatnsborði í vinnslu- og athugunarholum. Þessi gögn eru skráð í svokallaða vinnslusögu jarðhitakerfisins. Með vinnslusögu í höndunum má gera spár um viðbrögð jarðhitakerfisins við frekari vatnstöku og meta afkastagetu þess í framtíðinni. Slíkar spár eru þeim mun áreiðanlegri sem mælingar eru samfelldari og ná yfir lengra tímabil.

Í öðru lagi er fylgst náið með breytingum á efnainnihaldi og hitastigi jarðhitavatnsins. Breytingar á efnasamsetningu vatnsins stafa oftast af innstreymi kalds grunnvatns eða sjávar sem blandast við jarðhitavatnið. Breytingar í efnasamsetningu sjást yfirleitt áður en mælanleg hitabreyting verður. Þannig getur reglubundið efnaeftirlit gefið viðvörðun, til dæmis um yfirvofandi kælingu og gefið svigrúm til að bregðast við vandanum fyrr en ella. Einnig geta vinnslueiginleikar og neysluhæfni breyst með tíma og þarf því að fylgjast með efnainnihaldi vatnsins af þeim sökum.

Þegar vinnslusaga jarðhitasvæðisins er orðin þekkt yfir nokkurn tíma er unnt að setja fram reiknilíkön er lýsa eða herma eftir viðbrögðum jarðhitakerfisins svo kölluð hermílikön. Þau eru notuð til að velja hagkvæmustu leiðir til vinnslu jarðhitans í framtíðinni.

4.1 VINNSLUPRÓFANIR

Dæluprófanir

Rennsli og hitastig einstakra borhola ræður miklu um það hvort nýting jarðhitakerfis sé hagkvæm eða ekki. Því meira rennsli sem fæst úr hverri holu og hærra hitastig því meiri orku skilar holan og því færri holur þarf að bora til að anna viðkomandi virkjun. Það er brennandi spurning við lok hvers borverks, hvað holan gefur. Vinnsluprófanir eru mælingar á rennsli, hitastigi og vatnsborði (þrýstingi), sem gerðar eru á holum, strax að lokinni borun. Þær sýna ástand og stöðu á þeim tíma sem mælingar eru gerðar en ekki langtíma hegðun holunnar. Til þess þarf endurteknar mælingar yfir langan tíma.

Í **dæluprófun** er mælt rennsli, vatnsborð og hitastigi, í nokkra daga eða vikur. Einnig eru tekin sýni af vatninu til efnagreiningar, til að meta vinnsluhæfni þess. Samband er milli rennslis úr borholu og vatnsborðs eða þrýstings í holunni. Tilgangur dæluprófana er að finna þetta samband og meta vatnsgæfni holunnar út frá því.

Í dæluprófun er oft notuð djúpdæla sem sett er niður í holuna. Þrýstiskynjara er rennt vel niður fyrir vatnsborð. Þrýstimælirinn sýnir í reynd hæð vatnssúlunnar fyrir ofan skynjarann. Vatnsborð er stöðugt þegar ekki er dælt. Um leið og dæling hefst, byrjar vatnsborð að falla og mælist þá lægri þrýstingur. Sé dæling jöfn og stöðug, hægir á breytingum á vatnsborði og þrýstingur verður svo til stöðugur. Best er að gera dæluprófanir í nokkrum þrepum. Í hverju þrepi er dælt stöðugt sama vatnsmagni úr holunni í nokkrar klukkustundir eða daga.

Niðurstöður dæluprófana eru yfirleitt sýndar sem ferill á mynd og er kallaður vinnsluferill. Á slíkum ferlum koma fram tengsl rennslis og vatnsborðs í hverju þrepi, þegar nær stöðugu vatnsborði er náð. Lögun vinnsluferla lághitahola, stjórnast af eiginleikum rennslis (hlutfalli lagstreymis og ólgusteymis) vatns úr jarðhitakerfinu inn í holuna, og upp til yfirborðsins. Af ferlunum má lesa hversu mikið holan gefur við ákveðinn niðurdrátt og velja djúpdælu í holuna í samræmi við afköst hennar.

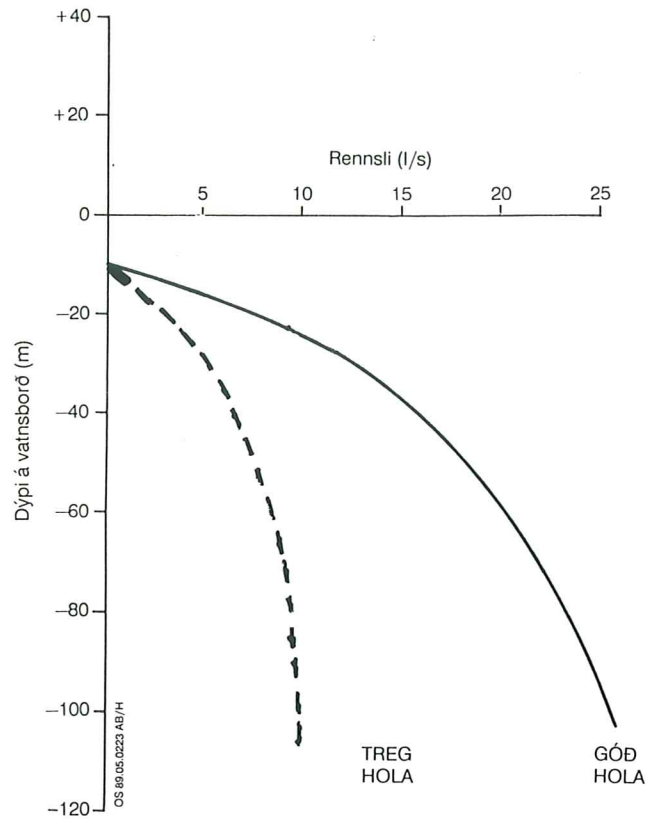
Lághitaholur eru oft prófaðar í nokkrar klukkustundir strax og borun lýkur, með svokallaðri **loftdælingu**. Loftdæling fer þannig fram að bormenn setja slöngu eða rör niður í holuna og tengja við loftpressu. Slangan þarf að ná vel niður fyrir vatnsborð holunnar. Þrýstiloftið ryður frá sér vatninu og lyftir því með sér upp til yfirborðsins. Vatnið bullar upp úr holunni og er síðan leitt um mælibúnað, til dæmis svokallað v-yfirfall, þar sem rennslið er mælt.

Vatnsborð í holunni er yfirleitt ekki mælt beint meðan á loftdælingu stendur og mælingar á hitastigi við þessar aðstæður eru heldur ekki nákvæmar, vegna þess að loftið kælir vatnið. Tilgangur loftdælinga er að fá gróft mat á afköstum og til að hreinsa borsvarf úr holunni. Niðurstaða loftdælinga er oftast einungis vísbending um hvað holan getur gefið í venjulegri dælingu.

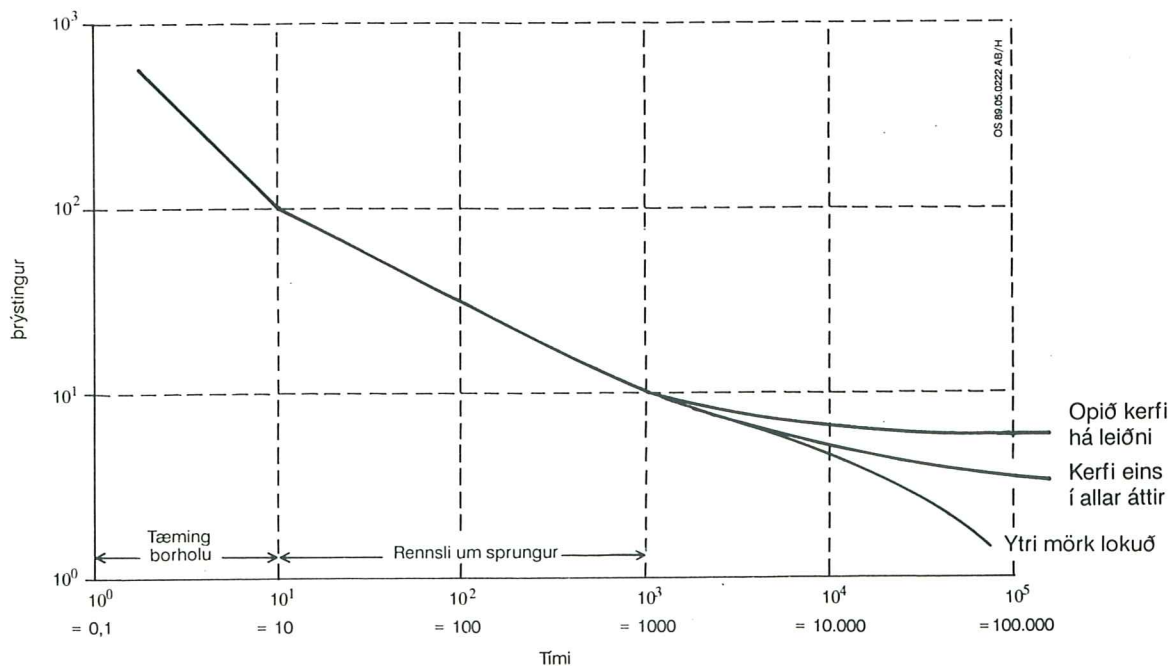
Þrýstiprófanir

Þegar byrjað er að vinna vatn úr borholu með dælingu, fellur þrýstingur í holunni og þar með vatnsborð, fyrst hratt en síðan hægar. Talað er um niðurdráttarkeilu umhverfis holuna. Því vatnsborð í jarðhitageyminum fellur mest næst holunni en minna er fjær dregur. Þegar hætt er að dæla, hækkar þrýstingurinn í holunni, þar til þrýstingi jarðhitakerfisins er náð.

Í **niðurdráttarprófun** er borhola sett í vinnslu (dæla sett í gang, til dæmis) og rennsli haldið stöðugu. Þrýstingurinn undir vatnsborði í holunni er mældur reglulega, fyrst oft meðan breytingar eru örastar en síðan sjaldnar þegar hægir á niðurdrætti. Einnig eru mældar breytingar á vatnsborði (þrýstingi) í nærliggjandi holum, til þess að fylgjast með lögun og stærð niðurdráttarkeilunnar. Þannig fást upplýsingar um breytingar á þrýstingi með tíma í jarðhitakerfinu. Þessar breytingar segja sögu, sem er nokkurs konar ferðasaga þrýstibylgju. Bylgjan breiðir úr sér út frá borholunni og inn í jarðhitakerfið og endurspeglar það umhverfi, sem hún fer um.



25. mynd: Vinnsluferlar úr tveimur lághitaholum. Þegar dælt er úr holum lækkar vatnsborð (þrýstingur fellur) í hlutfalli við vatnsmagnið, sem dælt er. Í gjöfylli holu fellur vatnsborð lítið þó dæling sé aukin. Í tregri holu verður mikill niðurdráttur þó lítið sé dælt.



26. mynd: Þrýstibreyting í jarðhitakerfi við niðurdráttarpröfun. Þegar vinnsla hefst á jarðhitasvæði fellur vatnsborð (þrýstingur) fyrst hratt meðan holur eru að tæmast, en síðan hægar þegar vatn fer að streyma úr æðum inn í holuna. Þegar til lengri tíma er lítið ræðst þrýstifallið af stærð jarðhitakerfisins og jöðrum þess, það er hvernig það er tengt við næsta umhverfi sitt.

Breytingar á þrýstingi með tíma eru teiknaðar á sérstakan pappír, sem hefur svokallaða logaritmíska ása. Á slíkum pappír, eykst þrýstingur og tími ekki jafnt, heldur tífalt frá einu bili til annars. Á þennan hátt er unnt að sýna á einu blaði skammtíma og langtímabreytingar með jafngóðri upplausn. Úr lögun þrýstiferilsins og breytingum á honum með tíma má lesa mikilvægar upplýsingar um eiginleika rennslis í jarðhitakerfinu og afl þess.

Leiðni, rýmd og ytri mörk

Í greiningu á niðurdráttarprófun, koma hin ýmsu áhrif umhverfisins á þrýstibylgjana, misjafnlega fljótt fram. Eftir að þrýstibylgjan hefur farið um þær sprungur og ganga (vatnsæðar), sem leiða vatn inn í borholu, dreifist bylgn um jarðhitakerfið. Gerð hafa verið stærðfræðileg líkön sem sýna breytingar með tíma og breytingar með fjarlægð umhverfis borholur.

Þrýstigreining, sem byggir á samanburði stærðfræðilíkans og mældra breytinga á þrýstingi í borholu, gerir kleift að meta leiðni og geymslu í jarðhitakerfum. **Leiðni** er eiginleiki bergs til að leiða vatn um jarðlögin og **rýmd** er eiginleiki bergs til að geyma vatn. Sprungur leiða vatn greiðar en þétt berg, þess vegna hefur sprungið berg háa leiðni. Gropið berg hefur mikið holrúm og þess vegna mikla rýmd, svo dæmi séu nefnd. Gropa (stundum kölluð poruhluti) er hlufall holrýmis af heildarrúmmáli bergs.

Ytri mörk jarðhitasvæða geta verið með ýmsu móti. Þau geta verið þétt, svo ekkert vatn rennur frá aðliggjandi grunnvatni inn í kerfið. Niðurdráttur byrjar þá að aukast örar þegar þrýstibylgjan hefur náð ytri mörkum svæðisins. Þau geta verið opin og virkað þannig að þrýstibylgjan heldur áfram að breiðast út fyrir jarðhitakerfið. Þau geta einnig opnað leið út á svæði, sem hefur hærri leiðni en sjálft jarðhitasvæðið. Niðurdrátturinn dregur þá grunnvatn inn í jarðhitakerfið. Ef aðstreymi grunnvatns er mikið hægir á niðurdrætti í jarðhitakerfinu.

Niðurstöður þrýstigreiningar eru meðal annars notaðar í forðafræði jarðhitasvæða við hermun og til þess að spá um niðurdrátt í framtíðinni.

4.2 VATNSGÆÐI OG EFNAEFTIRLIT

Efnainnihald í hitaveituvatni

Jarðhitavatn á Íslandi skiptist í tvo meginflokka: háhitavatn og lághitavatn. Í hitaveitum er víðast hvar notað lághitavatn. Þar sem háhitavatn er notað til upphitunar eru hafðir varmaskiptar til að hita upp ferskvatn, sem síðan er nýtt í veitunum.

Lághitavatnið er yfirleitt ferskt, enda regn að uppruna og saltinnihald þess er mjög lágt. Klóríðmagn í lághitavatni er yfirleitt minna en 50 milligrömm í kílógrammi (50 mg/kg). Sumt lághitavatn er þó saltmengað vegna þess að sjór nær að streyma inn í jarðhitakerfið eða vegna þess að vatnið hefur runnið um forn sjávarset. Klóríðmagn í vatni sem notað er beint í hitaveitur er þó sjaldnast hærra en fá hundruð mg/kg en í sjó eru um 20 þúsund mg/kg af klóríði.

Vatn sem rennur um jarðlög leysir upp efni úr berginu og önnur efni falla út. Vatnið leitast við að ná efnajafnvægi við bergið og ræðst magn uppleystra efna af hitastigi. Allt jarðhitavatn er til dæmis kalkmettað, í jafnvægi við kísil, og fleiri steintegundir. Einnig eru í jarðhitavatni uppleystar gastegundir eins og t.d. brennisteinsvetni. Þegar vatn hitnar í jörðinni falla sum efni út sem eru í köldu grunnvatni. Má þar einkum nefna magnesíumsambönd svo og súrefni sem eyðist úr vatninu. Jarðhitavatn, sem hitnað hefur yfir 80°C er því laust við súrefni. Hins vegar getur kaldara jarðhitavatn sem unnið er af minna dýpi innihaldið súrefni. Súrefni og brennisteinsvetni geta ekki verið samtímis til staðar í vatni þar sem brennisteinsvetnið eyðir súrefninu.

Í meðfylgjandi töflu er sýnt dæmigert efnainnihald vatns í hitaveitum á Íslandi. Vatninu er skipt upp í þrjá meginflokkka: ferskt vatn, saltmengað vatn og upphitað grunnvatn. Tölur um efnainnihald sýna magn uppleystra efna í milligrömmum í kílógrammi (mg/kg). Í töflunni eru dæmi um ferskt lághitavatn, sem inniheldur súrefni (Siglufjörður), vatn sem inniheldur brennisteinsvetni (Blönduós) og vatn, sem er snautt af hvoru tveggja (Eyjafjörður). Þá eru dæmi um saltmengað vatn (Selfoss og Seltjarnarnes) svo og efnainnihald í upphituðu grunnvatni, sem notað er í Hitaveitu Suðurnesja.

Staður	Ferskt vatn			Saltmengað vatn		Upphitað vatn
	Siglufj. H-11	Blönduós H-6	Eyjafj. LJ-7	Selfoss (Þorleifs- kot) H-10	Seltj. nes Sn-6	Hitaveita Suðurnesja
Dagsetn. sýnatöku	26.02.86	13.10.87	05.02.85	15.01.85	18.01.88	18.11.87
Hiti °C	74	75	95	84	117	100
Sýrustig (pH/°C)	10,02/22	9,70/20	9,80/21	8,55/22	8,44/22	9,09/22
Kísill (SiO ₂)	93	108	97	76	123	12,5
Natríum (Na)	43	67	52	158	597	30
Kalíum (K)	0,9	1,8	1,4	5,6	14	1,7
Kalsíum (Ca)	1,5	3,2	2,9	24	523	7,1
Magnesíum (Mg)	0,013	0,02	<0,05	0,092	0,38	6,3
Heildar karbónat sem (CO ₂)	19	29	18	24	10	9,6
Súlfat (SO ₄)	9,3	60	41	57	305	9,7
Brennisteinsvetni (H ₂ S)	<0,05	1,4	<0,03	<0,05	0,10	<0,03
Súrefni (O ₂)	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Klóríð (Cl)	8,4	10	11	226	1617	64
Flúoríð (F)	0,38	5,5	0,39	0,27	0,67	0,06
Járn (Fe)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,025	-
Uppleyst efni alls	204	291	240	586	3484	154

Lághitavatn sem notað er í hitaveitur hér á landi er yfirleitt neysluhæft. Jarðhitavatn stenst þó sjaldan ítrustu kröfur um drykkjarvatn ef mið er tekið af stöðlum heilbrigðisyrivalda. Það sem einkum veldur því að þetta vatn stenst ekki ítrustu kröfur er hátt sýrustig og mikið magn uppleystra efna. Óhætt er þó að nota það til

drykkjar og í mat. Á nokkrum stöðum á landinu er notað lághitavatn sem getur verið varasamt heilsu manna og ætti því ekki að notast sem neysluvatn. Dæmi um slíkt er vatn sem inniheldur mikið magn af flúoríði, eins og til dæmis hitaveituvatn á Blönduósi og á Hvammstanga.

Tæring

Uppleyst súrefni í vatni tærir járnhluti, sem vatnið fer um svo sem leiðslur og ofna. Súrefni er einkum í fremur köldu jarðhitavatni, sem tekið er úr grunnum æðum. Eins getur kalt yfirborðsvatn náð að blandast við jarðhitavatn og mengað það súrefni. Öllu algengara er að jarðhitavatnið komi súrefnissnautt upp úr jörðinni en taki í sig súrefni í rangt hönnuðum miðlunargeymum, óþéttum samskeytum á rörum eða síist gegnum veggj plaströra í dreifikerfi hitaveitna.

Aukin **selta** vatns örvar öll efnahvörf og þar með tæringu og er súrefnistæring hröðust í söltu, efnaríku vatni. Súrefnistæring verður einnig í efnasnaudu vatni en hún er mun hægari en í saltmenguðu vatni. Almennt má segja að veruleg hætta sé á tæringu og útfellingum í vatni, sem hefur klóríðstyrk yfir 100 mg/kg. Nær ómögulegt er að halda hitaveitukerfum alveg lausum við súrefni og sé vatnið saltmengað er hætt við tæringu þótt súrefnisstyrkur sé mjög lágur. Í sumum hitaveitum er því blandað súrefniseyðandi efni, natríumsúlfíti, í vatnið til að koma í veg fyrir tæringu.

Lághitavatn á Íslandi hefur yfirleitt mjög hátt sýrustig en **lágt sýrustig** (pH) gerir vatn tærandi. **Brennisteinsvetni** tærir kopar mjög hratt og er óráðlegt að nota koparhluti þar sem hitaveituvatn inniheldur það efni. **Kolsýruríkt** jarðhitavatn er til á Íslandi og er mjög tærandi á járn, en slíkt vatn hefur ekki verið nýtt í stærri hitaveitur.

Tæring getur ýmist komið fram sem jöfn **yfirborðstæring** eða sem **pyttatæring**. Það kallast pyttatæring þegar fínar holur borast inn í málminn á víð og dreif. Pyttir myndast helst efst og neðst í járnofnum og gjarnan undir óhreinindum, sem þar sitja. Yfirborðstæring er hins vegar jöfn ryðmyndun á öllu yfirborði málsins. Hlutir eins og varmaskiptar úr ryðfríu stáli geta orðið fyrir **spennutæringu** einkum við pakkningar.

Útfellingar

Jarðhitavatn er mettað af ýmsum efnasamböndum. Við eðlisbreytingar á vatninu svo sem kælingu, afloftun við suðu eða jafnvel upphitun, getur vatnið orðið yfirmettað og þá er hætta á að efni falli út uns jafnvægi er náð að nýju við hinar breyttu aðstæður.

Lághitavatn, sem inniheldur brennisteinsvetni getur myndað **járnsúlfíðhúð** innan á stálrörum. Í hitaveitum sem nota lághitavatn er húðin yfirleitt það þunn að hún veldur engum vandræðum. Þvert á móti verndar húðin rörið gegn tæringu.

Í galvaniseruðum járnörum og í messinghnjám í koparrörum hafa fundist útfellingar af **zinksilikati**. Þær myndast við upplausn zinks úr rörunum, sem síðan binst kísli í vatninu og fellur út sem torleyst zinksilikat. Slíkar útfellingar hafa ekki verið til boga að ráði, en rétt er að sneiða hjá þeim málmum, sem valda þeim.

Þær útfellingar, sem valda mestum erfiðleikum við nýtingu lághitavatns eru **kalkútfellingar**. Allt jarðhitavatn á Íslandi er kalkmettað við náttúrulegar aðstæður. Þar sem uppleysanleyki kalksins hækkar með lækkuðu hitastigi veldur kæling vatnsins við nýtingu ekki útfellingu. Sýrustig hefur hins vegar mikil áhrif á uppleysanleikann og getur afloftun, sem hækkar sýrustigið (pH) eða suða valdið yfirmettun. Blöndun misheits vatns leiðir einnig oft til yfirmettunar á blöndunni. Þannig verða sums staðar miklar kalkútfellingar í djúpdælum í borholum, sem hafa misheitar æðar. Miklar kalkútfellingar verða einnig við nýtingu kolsýruríks vatns, sem reyndar er oft líka saltmengað, en slíkt vatn er hvergi notað í stærri hitaveitum. Þar sem notað er asbest í aðveituaðar geta orðið alvarlegar kalkútfellingar einkum ef skerpt er á vatninu.

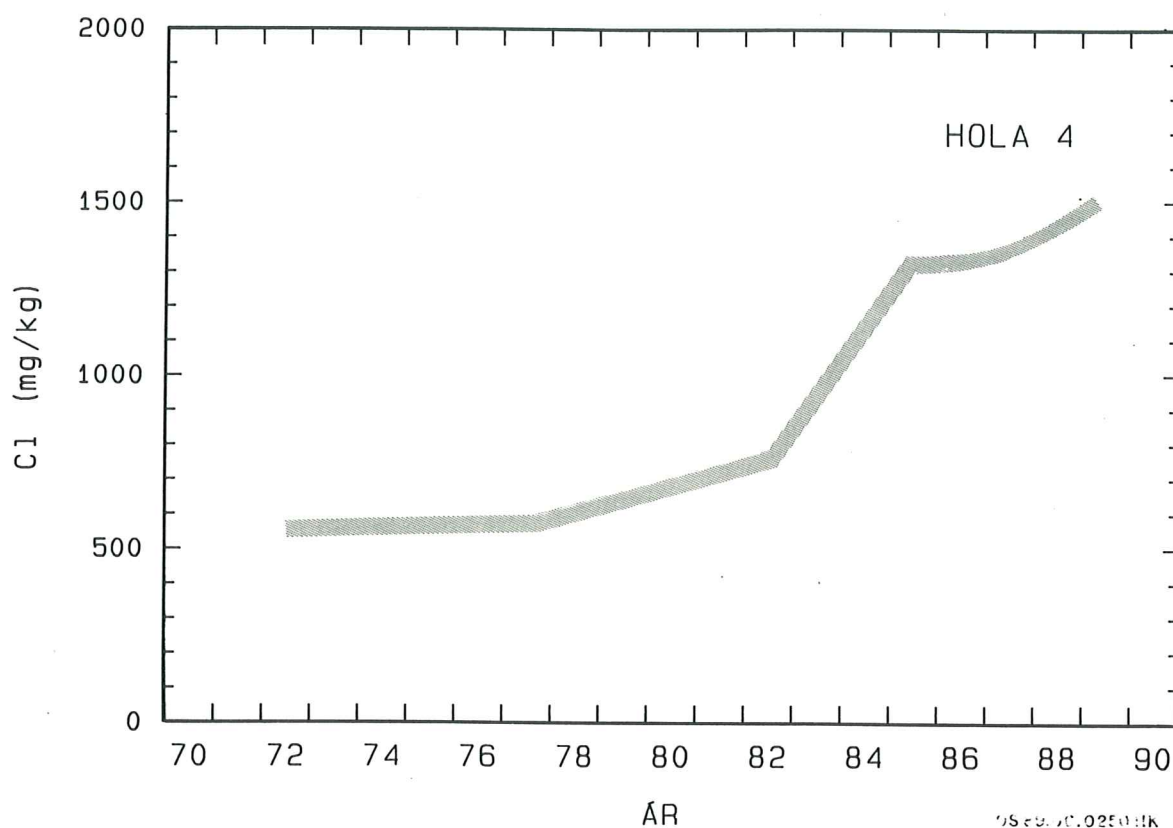
Kalkútfellingar eru óverulegar í hitaveitum þar sem vatnið er ferskt en flestar hitaveitur, þar sem verulegar útfellingar hafa orðið, nýta saltmengað vatn. Í mörgum veitum, sem nýta saltmengað vatn hefur þó tekist að sneiða hjá vandræðum vegna kalkútfellinga með rétttri hönnun veitunnar og góðu tæknilegu eftirliti með rekstri hennar.

Í hitaveitum sem nota upphitað ferskvatn hefur orðið vart við útfellingar af **magnesíumsilikati** en kalda vatnið inniheldur töluvert af magnesíum. Orsökina er sú að magnesíumsiliköt eru torleystari í heitu vatni en köldu og falla því út þegar kalda vatnið er hitað. Þótt styrkur kísils í köldu vatni sé lágur nægir hann til að yfirmetta upphitaða vatnið af magnesíumsilikati. Auk hitastigs hefur sýrustig mikil áhrif á það hvort magnesíumsiliköt falla út eða ekki. Tilraunir sýna að í vatni, sem hitað er í allt að 105°C og sýrustigi (pH) haldið undir 9, verða útfellingar ekki fyrr en eftir 4-6 klukkustundir. Í mörgum hitaveitum dvelur vatnið skemur í dreifikerfi veitunnar og valda þessar útfellingar því engum vandkvæðum þar. Til að lækka sýrustig í upphituðu vatni og draga úr hættu á útfellingum er gjarnan bætt í það þéttri gufu. Þá hækkar einnig styrkur brennisteinsvetnis, sem er jafnframt vörn gegn tæringu, komist súrefni í vatnið. Magnesíumsiliköt geta einnig fallið út ef kalt grunnvatn kemst inn í dreifikerfi hitaveitu til dæmis í borholu, þró eða lekum leiðslum. Þessar útfellingar myndast hratt og gera vatnið mjólkurlitað. Besta leiðin til að koma í veg fyrir þær er að útiloka innrennsli kalda vatnsins.

Efnaeftirlit með hitaveitum

Haft er eftirlit með efnainnihaldi jarðhitavatns í þrennum tilgangi. Í fyrsta lagi er fylgst með því hvort breytingar verða á jarðhitakerfinu, í öðru lagi hvort vinnslueiginleikar breytast og í þriðja lagi hvort neysluhæfni vatnsins breytist.

Þegar niðurdráttar fer að gæta í jarðhitasvæði getur kalt vatn farið að renna inn í það. Kalda vatnið hitnar upp í jarðhitasvæðinu, en kæling kemur yfirleitt ekki fram alveg strax. Hins vegar sjást hennar oft fljótlega merki í breyttri efnasamsetningu vatnsins. Það fer bæði eftir efnasamsetningu jarðhitavatnsins og efnasamsetningu þess kalda vatns, sem inn í kerfið rennur, hversu auðvelt er að sjá slíkar breytingar. Sjór sem streymir inn í jarðhitakerfi þar sem ferskt vatn er fyrir, sést mjög fljótt eins og greinilega kemur fram á mynd 27 frá Seltjarnarnesi. Mun torveldara er að sjá kælingu af völdum ferskvatns í jarðhitakerfi með efnasnauðu vatni. Til þess þarf tíðar og nákvæmar greiningar á mörgum þáttum.



27. mynd: Breytingar á seltu í jarðhitakerfinu á Seltjarnarnesi. Myndin sýnir hvernig selta hefur aukist í jarðhitavatni á Seltjarnarnesi, fyrstu 8-10 árin hægt, en síðustu árin hraðar. Með aukinni seltu jókst tæring á ofnum til muna. Tiltölulega fljótt var brugðist við þessum breytingum. Ný vinnsluhola var fóðruð dýpra, en áður hafði verið gert, og hætt var að nota grunnar holur sem drógu inn salt vatn úr grunnum vatnsæðum. Notkun forhitara var sett í byggingarreglugerð. Óveruleg kæling hefur orðið á vatninu, enn sem komið er, þrátt fyrir aukningu í seltu. Myndin er eftir Hrefnu Kristmannsdóttur.

Þegar farið er að dæla úr jarðhitakerfi geta vinnslueiginleikar vatnsins breyst í tímans rás. Kalt vatn getur tekið að streyma inn í kerfið og breytingar geta orðið í hlutfalli vatns úr mismunandi æðum. Til dæmis getur komist súrefni í vatn og valdið tæringu og kalkútfellingar geta orðið í veitu, þar sem þeirra varð lítið vart áður.

Vatn getur einnig orðið óneysluhæft við nýtingu. Algengt er að hitaveiturör séu úr asbesti. Jarðhitavatn tærir gjarnan sementsbindimassann í þessum rörum og við það losna asbestþræðir, sem berast um hitaveitukerfið. Lítið er vitað með vissu um hættu af völdum asbests í vatni en af heilbrigðisástæðum hefur notkun þessa efnis í vatnslagnir nú verið bönnuð. Aukaefnum er sums staðar blandað í vatnið til að eyða súrefni eða til að hefta kalkútfellingar. Þessi efni eru flest ekki verulega hættuleg, en geta valdið kvillum sé styrkur þeirra of hár um lengri tíma.

Virkt eftirlit með breytingum á efnainnihaldi hitaveituvatns getur þannig gefið viðvörðun áður en vandamál verða óviðráðanleg og skapað þannig möguleika á að bregðast við vandanum fyrr en ella. Það fer eftir aðstæðum á hverjum stað hversu nákvæmlega þarf að fylgjast með efnasamsetningu jarðhitavatns. Mjög mikilvægt er að sett sé upp áætlun um slíkt reglubundið efnaeftirlit, sem sniðið er að aðstæðum viðkomandi hitaveitu.

4.3 FORÐAFRÆÐI

Forðafræði jarðhita fjallar um rannsóknir á vinnslugetu og endingu jarðhitakerfa. Orðið forðafræði vísar til þess að jarðhiti er takmörkuð orkulind, ekki ósvipuð heyforða í hlöðu. Að þessu leyti eru jarðhiti og vatnsorka ólík, því svo lengi sem rignir verða til vatnsföll. Forðafræði jarðhita byggir á aðferðum sem þróast hafa í grunnvatnsfræði og olíuverkfræði. Þær eru þó ólíkar að því leyti, að breytingar á hitastigi eru meiri og örari við vinnslu jarðhita en við vinnslu grunnvatns og olíu.

Vinnsluhæfni

Leiðni og rýmd bergs eru helstu eiginleikar jarðhitakerfa sem kannaðir eru í forðafræði. Þegar leiðni er lág, streymir vatn treglega um innviði viðkomandi jarðhitakerfis. Við slíkar aðstæður verður rennsli í borholum lítið, svo bora þarf margar holur til að ná nauðsynlegu vatnsmagni. Rýmdin er tengd stærð jarðhitakerfisins og þeim orkuforða sem það geymir.

Í þessu samhengi er rétt að leggja áherslu á mun afls og orku jarðhitakerfa. Orkan er varmaforði þess bergs og vatns, sem er innan kerfisins, en aflið er mælikvarði á hversu hratt unnt er að taka orku úr kerfinu. Vinnsluhæfni tengir saman þrýsting í jarðhitakerfi við rennsli úr borholum. Hún er háð þremur helstu hlutum jarðhitakerfisins sem eru: aðliggjandi grunnvatnskerfi, jarðhitaforði (jarðhitageymir) og vatnsæðar, sem tengjast borholum.

Vinnslusaga

Leggja ber ríka áherslu á að hitaveitur skrái nákvæmlega og reglulega vatnstöku, hitastig og þrýsting (vatnsborð) í öllum holum. Slík skráning er kölluð vinnslusaga og er hluti af almennu vinnslueftirliti. Nákvæm vinnslusaga er grunnforsenda þess að unnt sé að meta jarðhitakerfið, forða þess og afl og spá fyrir um hegðun þess í framtíðinni. Mikilvægt er að þessi skráning sé rækileg frá upphafi vatnsvinnslu því breytingar eru oftast örur fyrst eftir að jafnvægi er raskað.

Vatnsvinnsla úr einni borholu, hefur áhrif á þrýsting í öðrum holum á sama svæði, hvort sem þær eru í vinnslu eða ekki. Af þessu leiðir að mælingar á vatnsborði í ónotuðum holum, þurfa að vera hluti af reglulegu vinnslueftirliti hitaveitna. Þessar holur kallast yfirleitt eftirlitsholur.

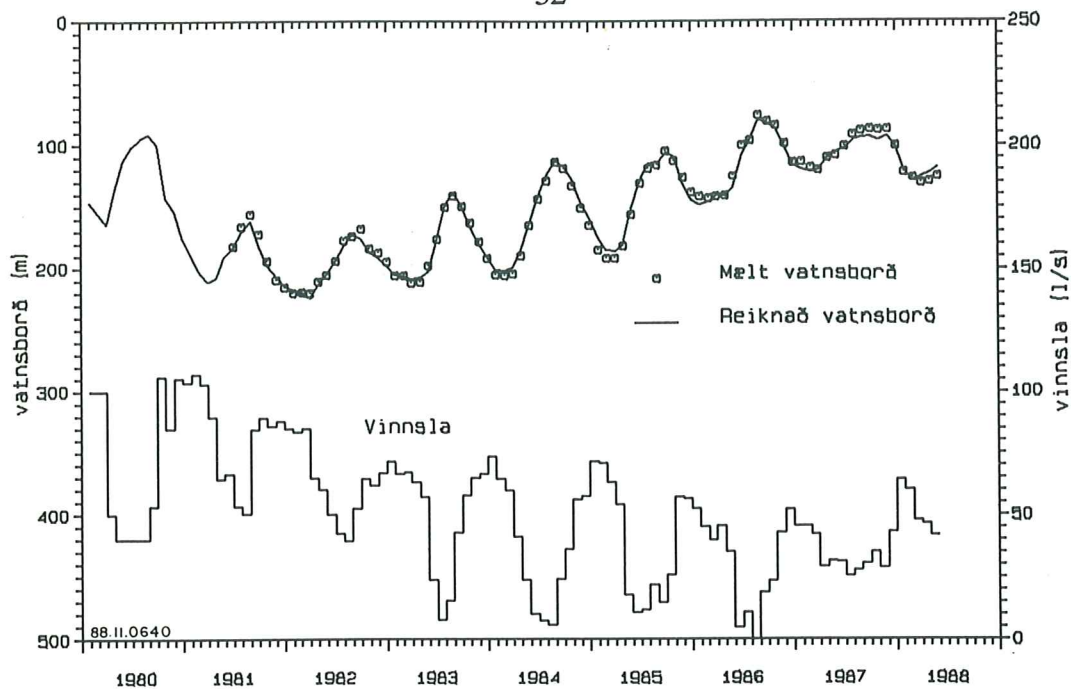
Einnig er áriðandi að skráning upplýsinga sé rækileg þegar fyrirkomulagi vinnslu er breytt, til dæmis þegar dælingu er breytt eða ný hola tekin í notkun. Mikilvægt er að breytingar á vatnsvinnslu séu ekki gerðar af handahófi sí og æ. Það tekur alltaf einhvern tíma fyrir áhrif þrýstibreytingar að dreifast um jarðhitakerfi og mikilvægt er að fá upplýsingar um viðbrögð kerfisins við hverri breytingu.

Hermilíkon

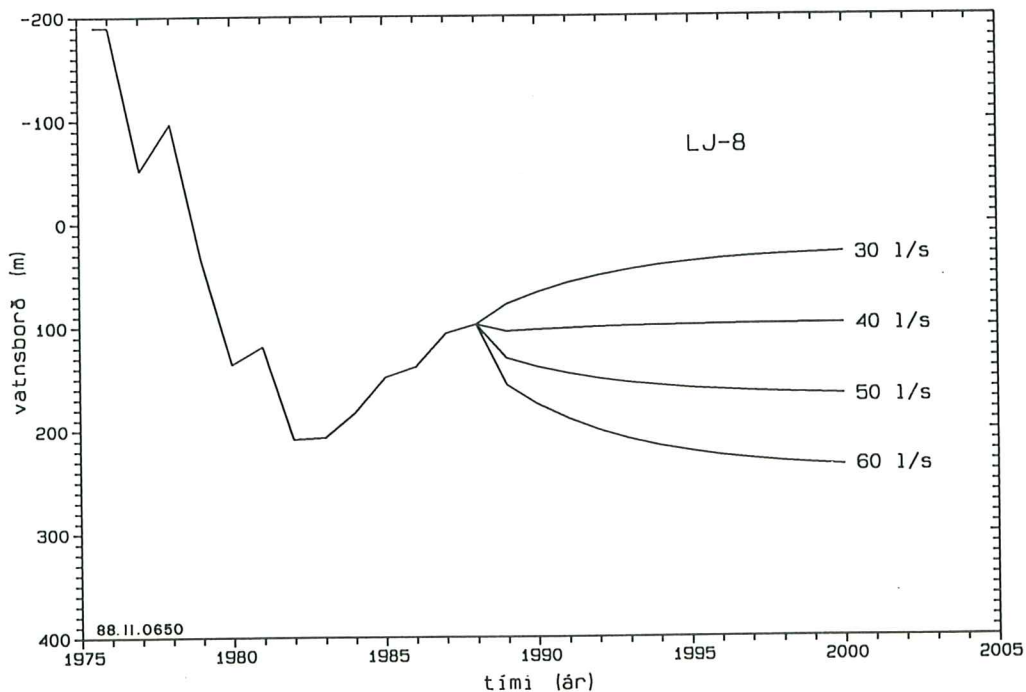
Unnt er að lýsa stærðfræðilega helstu eiginleikum jarðhitakerfa og hegðun þeirra í tíma og rúmi. Slíku stærðfræðilíkani er unnt að breyta og laga, þannig að það lýsi eða hermi eiginleika jarðhitakerfis nokkuð nákvæmlega. Þess vegna eru reiknilíkon af þessu tagi kölluð hermilíkon. Margs konar reiknilíkon eru notuð til að herma eftir eiginleikum og viðbrögðum jarðhitakerfa.

Líkon geta verið **heilstæð** eða **margstæð**. Í heilstæðum líkönum er litið á jarðhitakerfið sem eina heild, og notuð eru meðaltals gildi fyrir leiðni, rýmd og aðra eiginleika kerfisins. Heilstæð líkon eru stundum kölluð þjöppuð líkon. Í margstæðum líkönum er jarðhitakerfinu skipt í marga hluta, sem hver og einn getur haft sérstaka leiðni, rýmd, hitastig og efnainnihald í jarðhitavökva. Margstæð líkon geta hermt eftir og sýnt breytingar á öllum forðastærðum á ýmsan hátt. Unnt er að skoða og líkja eftir hluta jarðhitakerfis, allt eftir þörfum. Þau eru einu líkönin, sem geta hermt breytingar á hitastigi, og efnasamsetningu vatnsins.

Líkon sem einungis sýna þrýsting umhverfis borholur í þrýstiprófunum geta líka verið notuð sem hermilíkon. Um er að ræða líkon er herma niðurdrátt og eru þau kölluð þrýstigreiningalíkon. Sé niðurdráttur einstakara borhola á jarðhitasvæði þekkur, má áætla heildarniðurdráttinn á viðkomandi svæði, með því að leggja saman öll niðurdráttargildin.



28. mynd: Vinnslusaga jarðhitasvæðisins að Laugalandi í Eyjafirði. Neðri hluti myndarinnar sýnir vatnsvinnslu úr jarðhitakerfinu á árunum 1980 til 1988, mælt í lítrum á sekúndu. Punktarnir á efri hlutanum sýna mælt vatnsborð, sem sveiflast í takt við vinnsluna. Heildregna línan í gegnum mældu punktana sýnir vatnsborð, reiknað með hermílkani, sem lagað hefur verið að mældu gögnunum. Myndin er úr skýrslu Orkustofnunar eftir Guðna Axelsson o.fl. frá 1988 (OS-88052/JHD-10).



29. mynd: Hermun og spá um niðurdrátt í jarðhitasvæðinu að Laugalandi í Eyjafirði. Ferillinn frá 1975 til 1988 sýnir mælt vatnsborð í jarðhitakerfinu. Ferlarnir frá 1988 til ársins 2000 sýna hver niðurdrátturinn yrði fyrir mismikla vatnsvinnslu. Slíkar spár eru notaðar til þess að velja hagkvæmstu vinnsluleið í framtíðinni. Myndin er úr skýrslu Orkustofnunar eftir Guðna Axelsson o.fl. frá 1988 (OS-88052/JHD-10).

Forðafræðileg úttekt - Hermun og spár

Kjarninn í starfi forðafræðinga er að fella vinnslusögu jarðhitakerfa að ákveðnu hermilíkani, sem síðan er notað til að áætla niðurdrátt og hegðun kerfisins í framtíðinni. Fyrst þarf að taka saman vinnslugögn og aðrar upplýsingar um viðkomandi jarðhitasvæði. Mikill tími getur farið í samantekt á forðafræðilegum gögnum og öðrum upplýsingum, sérstaklega ef vinnslusaga er slitrótt.

Næsta skrefið er að setja upp hermilíkan, sem þjónar tilgangi viðfangsefnisins best og fella það að þekktri vinnslusögu. Almenna reglan er sú, að velja einfaldasta líkanið, sem fellur vel að vinnslusögunni. Við hermun á vinnslusögu jarðhitakerfa, er reynt að finna þær stærðir, sem einkenna svörun kerfisins við vatnstöku. Helstu kennistærðir eru leiðni og rýmd. Einnig fást upplýsingar um stærð jarðhitakerfis og vatnsgæfni ytri marka þess.

Eftir samantekt á gögnum og eftir að hermun þekkrar vinnslusögu jarðhitakerfis er lokið, er hermilíkanið notað til þess að framreikna niðurdrátt og aðrar stærðir, sem máli skipta. Í niðurdráttarspám er yfirleitt notuð sú regla, að framreikna ekki mikið lengra fram í tímann, en sem nemur vinnslusögu jarðhitakerfisins.

Ef niðurdráttur er reiknaður lengra fram í tímann, er það yfirleitt gert með þeim fyrirvara, að spáin sé einungis vísbending um seinni tíma niðurdrátt og að endurtaka þurfi útreikningana þegar vinnslusagan er orðin lengri. Ráðlegt er að endurnýja hermun og niðurdráttarspá fyrir jarðhitakerfi á nokkurra ára fresti.