

Setning málþings Jarðhitafélags Íslands

Háhitaborholur – hönnun, borun, frágang og rekstur

Ingvar Birgir Friðleifsson
formaður Jarðhitafélags Íslands

Ágætu málþingsgestir!

Það er mér ánægja að setja þetta málþing sem fjallar um háhitaborholur – hönnun, borun, frágang og rekstur. Þetta er tíunda ráðstefnan eða málþingið sem Jarðhitafélag Íslands heldur, en félagið var stofnað í maí árið 2000.

Jarðboranir hófust á Íslandi fyrir rúmum 250 árum, árið 1755, en þá boruðu Eggert Ólafsson og Bjarni Pálsson í Laugarnesi í Reykjavík með jarðnafri Konunglega danska Vísindafélagsins. Fyrstu háhitaholuna boruðu þeir félagar í Krýsuvík og hófst verkið 1. júlí 1756. Þeir boruðu “á bakka stóra hversins, sem fram hafði komið í landskjálfta veturinn áður”. Við höfum því tækifæri í sumar til að halda upp á 250 ára afmæli háhitaborana á Íslandi. Við gætum jafnvel sungið þar lag eftir Mozart, en hann fæddist einmitt árið 1756. Borævintýrið í Krýsuvík varð þó endasleppt, því á níu feta dýpi í holu 2 “fór að koma hreyfing á jarðvegin, og þótt holan kringum nafarinn væri harla þröng tók þunnur grautur að spýta upp með ógnarkrafti”, eins og segir í Ferðabók Eggerts og Bjarna. “Við neyddumst þá til að hætta þarna og drógum nafarinn upp. En þá fékk hitinn fulla útrás og þeytti sjóðandi, leirblöndnu vatni 6-8 fet í loft upp. Eftir skamma stund línnti þó óróa þessum, og héldum við að þá hefði hitinn stílt. En það leið ekki á löngu, áður en honum jukust kraftar á ný, og þá tók hann til muna að gjósa og sjóða án afláts. Við sáum þá, að við höfðum með þessum aðgerðum okkar búið til nýjan hver”, segir í Ferðabók þeirra félaga.

Eftir þetta lágu jarðboranir eftir heitu vatni niðri á Íslandi í 172 ár til 1928. Síðan hefur verið borað meira eða minna árlega eftir jarðhita. Fyrsta gufuborholan var boruð í Fagrahvammi í Hveragerði 1940 og boranir hófust á ný í Krýsuvík 1941. Síðan hefur mikið vatn runnið til sjávar og mikil gufa stigið til himins.

Þorgils Jónasson hefur tekið saman sögu jarðborana á landinu. Hann og Hilmar Sigvaldason hjá Orkustofnun halda utan um borholugagnagrunn landsins. Þar má finna upplýsingar um staðsetningu og dýpi hvernar holu frá 1904 að boranir hófust í Vatnsmýrinni. Á háhitasvæðum landsins voru boraðir um 2 km 1941-1950, 10 km 1951-1960, 18 km 1961-1970, 51 km 1971-1980, 51 km 1981-1990, og 40 km 1991-2000. Á þessum áratug hafa verið boraðir 80 km þó hann sé aðeins hálfnaður. Alls eru þetta 230 holur og um 250 km.

Undanfarinn áratug hefur verið mikill uppgangur í jarðborunum á háhitasvæðum og boraðar háhitaholur í Kröflu, Námaskarði og Þeistareykjum fyrir norðan, við Hágöngulón nær miðju landi, og í Hveragerði, á Nesjavöllum, Hellisheiði, Hverahlíð, Ölkelduhálsi, Höskuldavöllum, Svartsengi og Reykjanesi hér á suðvesturhorninu. Borholurnar eru mikilvægasti en jafnframt einn dýrasti þátturinn í stofnkostnaði og rekstrarkostnaði jarðgufuvirkjana. Á liðnu ári voru boraðar 11 háhitaholur á landinu.

Jarðhitafélag Íslands

Samanlagður kostnaður við þær er væntanlega 2-3 miljarður króna. Á þessu ári verða væntanlega boraðar 15-20 háhitaholur.

Stjórn Jarðhitafélagsins er mjög þakklát þeim sem hafa framsögu á málþinginu og Gesti Gíslasyni, jarðfræðingi hjá Orkuveitu Reykjavíkur, fyrir að taka að sér ráðstefnustjórn. Fyrir hönd stjórnar Jarðhitafélagsins set ég málþingið og bið Stefán Arnórsson, prófessor við Háskóla Íslands, að taka við fundarstjórn.

Þróun í hönnun og frágangi borhola á háhitasvæðum

Sverrir Þórhallsson (s@isor.is)

Íslenskar orkurannsóknir, Grensásvegi 9, IS-108

Úrdráttur

Jarðhitaholur eru talsverð mannvirki en fáir gera sér grein fyrir hve mikil, því aðeins holutopparnir standa upp úr jörðu. Aðgreint er hvort um lág- eða háhita sé að ræða og samkvæmt íslenskri venju er háhiti þegar yfir 200°C hiti er á 1000 m dýpi. Borun eftir háhita á sér 66 ára sögu á Íslandi en fyrsta holan var boruð 1940 í Hveragerði. Jarðhitaholur eru að nokkru leyti ólíkar örðum holum sem t.d. eru boraðar eftir vatni eða olíu, en bortæknin er þaðan ættuð en aðlöguð jarðhitaaðstæðum. Hönnun háhitahola nýtir aðferðir er tíðkast við olíuborholur enda efni og staðlar sóttir þangað. Orka olíu er 20-40 sinnum meiri en í háhitavatni og því þurfa háhitaholurnar að vera miklu víðari og opnar á löngum köflum til að vera samkeppnishæfar. Í erindinu er lýst í hvaða skrefum hönnun háhitaholna fer fram ásamt helstu valkostum um gerð þeirra. Hönnunarforsendurnar taka mið af hita- og þrýstiástandi hvers jarðhitasvæðis, en þær varða einkum ákvörðun fódrunardýpis til varnar skyndigosi við borun holunnar. Í hverja holu eru settir 3-4 fódrestingastrengir sem ná misdjúpt. Fódrestingarnar fara hver inn í aðra með sífellt minna þvermáli og eru steiptar fastar í jörðu. Samanburður sýnir að háhitaholur eru mjög líkar víðast hvar í veröldinni. Nokkur þróun hefur átt sér stað um gerð og frágang slíkra hola hér á landi og verða dæmi nefnd til skýringa. Leitast hefur verið við að staðla háhitaholurnar við tvær gerðir til að halda niðri kostnaði. Þó svo að farið sé að stefnubora holur til að sveigja þær 500-1000 m frá lóðlínu eru fódrestingarnar áfram þær sömu. Sérstakar holur eru núorðið boraðar á háhitasvæðum til að skila heitu skiljuvatni aftur niður í jarðhitakerfið. Reynsla af jarðhitaborunum er mikil hér á landi. Hún hefur fengist við borun 144 háhitaholna, yfir 500 m djúpra. Ekki hefur verið komist hjá óvæntum uppkomum, en lausnir hafa fundist á þeim vandálum sem upp hafa komið og hönnun breytt þegar það átti við. Meginforsendur hönnunar eru að holurnar reynist aflmiklar, öruggar og langlífar, auk þess að viðhald þeirra verði lítið. Til raforkuframleiðslu er aflið gjarna á bilinu 5-10 MW þó dæmi eru um 20 MW holur, en varmaaflið er allt að tífalt þetta. Ending háhitahola var í upphafi miðuð við 20 ár en sýnt er að þær endast a.m.k. helmingi lengur, m.a. vegna þeirra endurbóta sem gerðar hafa verið á hönnun.

Háhitaboranir

Vagga háhitaborana var í Hveragerði en þar var fyrst borað 1940 með litlum kjarnaborum og síðar með höggborum og haglabor en það varð upphaf hitaveitu og gufuveitu í Hveragerði. Einnig var borað allmikið í Krýsuvík fram til 1953 með höggbor og aflað jarðgufu sem hefði nægt til virkjunar. Borað var í allt að 150 m í Námaskarði 1953-1954 á því svæði sem ferðamenn sækja nú mest. Stökk varð í bortækni og getu til háhitaborana við komu “Gufuborsins” 1958 og var fljótlega farið að bora í 1300 m í Ölfusdal, Krýsuvík og á Reykjanesi. Ekkert varð úr virkjun á þessum svæðum á þeim tíma, þrátt fyrir góðan árangur, því Sogsvirkjanir og Búrfell voru teknar fram yfir gufuaflíð. Seinkaði þetta gufuaflsvirkjunum þar til Kísiliðjan tók til starfa í Mývatnssveit 1967. Gufustöðin (3 MW) var reist þar hjá í Bjarnarflagi 1969 til að nýta umframgufu. Nokkrar háhitaholur voru boraðar á Nesjavöllum um 1965 en síðan taka háhitaboranir ekki almennilega við sér fyrr en boranir hefjast í Svartsengi, Kröflu og Nesjavöllum eftir 1974. Gufuborinn sá um þetta að mestu þar til borinn Jötunn bættist við 1976. Á þessum árum voru innleiddar margar nýjungar og var hent í gamni að Krafla hefði verið “dýrasti borskóli í heimi”. Framfarir voru örar á fyrstu árum borana í Kröflu og nutu boranir á örðum háhitasvæðum góðs af síðar. Eftir að jarðgufuvirkjanirnar fjórar komust í rekstur varð næstum tíu ára hlé á háhitaborunum, aðeins 5 holur boraðar 1987-1997. Skriður komst ekki á að nýju fyrr en við stækkanir í Svartsengi, á Nesjavöllum og í Kröflu og hefur sú borvertíð staðið nokkuð óslitið til þessa, nú síðustu árin að viðbættum borframkvæmdum á Hellsheiði og Reykjanesi.

Utan virkjanasvæða hafa háhitaholur verið boraðar í Trölladyngju, Eldvörpum, Ölkelduhálsi, Hágöngum, Þeistareykjum og Öxarfirði. Miklar háhitaboranir eru fyrirhugaðar á næstu árum, enda virðist um stund fremur sátt um gufuaflsvirkjanir en vatnsaflsvirkjanir. Súlurit á mynd 1 sýnir umsvif í háhitaborunum sem lengd einstakra hola og hvaða ár borunin fór fram.

SKREF VIÐ HÖNNUN HÁHITAHOLNA

Hér verður lýst þeim þáttum er árhrif hafa á hönnun hola og nokkrum breytingum lýst sem gerðar hafa verið í ljósi reynslunnar. Algengt er að skipta hönnun háhitahola upp í nokkur skref:

1. Fjöldi fóduringa sem fara í háhitaholu (3-5 strengir) eru ákveðnir ásamt þvermáli og dýpi hvers fódurrörastrengs sem nefnist (mynd 2):

- Leiðirör (“Conductor casing”)
- Yfirborðsfóðring (“Surface casing”)
- Millifóðring (“Intermediate casing”), stundum sleppt
- Öryggisfóðring (“Anchor casing”)
- Vinnslufóðring (“Production casing”)
- Raufaður leiðari (“Slotted liner”), stundum sleppt

2. Hönnunarálag á hvern streng fyrir sig í: a) steypingu, b) lokaðri holu og c) í vinnslu.

- Ytri þrýstingur (“Collapse”)
- Innri þrýstingur (“Burst”)
- Tog eða þrýstingur (“Tension/Compression”)

3. Reiknaður nauðsynlegur styrkur fóduringa fyrir mismunandi álagstifelli efst og neðst í hverjum streng. Valin er sú efnisþykkt hverrar fóduringar fyrir sig sem uppfyllir kröfurnar svo og stáltegund.

4. Valin gerð tengja á fódurrörin:

- “Buttress” gengjur
- “VAM” gengjur eða “Antares MS”
- Aðrar gengjur (t.d. “Hydril”, “GeoConn”)
- Rörin soðin saman (rafsuða), fösuð rör

5. Efnislýsing er gerð í lokin með tilvísun í API og ISO staðla fyrir fódurrör.

Fjöldi og dýpi fóduringa

Til að ákveða hve djúpt þurfi að fódra háhitaholu er miðað við að vinnslufóðringin sé allavega nógu djúp til að skerma af jarðlög kaldari en 200°C. Eitt fyrsta atriðið sem þarf að ákveða er hve djúpt sé stefnt á að bora holuna. Fjölmargir þættir koma þar til álita. Þrátt fyrir að hönnunin miðist við ákveðið dýpi er lokadýpi holna ákveðið þegar þar að kemur. Mat á goshættu kemur næst til og má nefna í því sambandi að “þumalputtaregla” segir að fóðring skuli hylja 1/3 af fyrirhuguðu dýpi næsta áfanga, en þeir eru yfirleitt þrír. Þegar hita- og þrýstiaðstæður í jarðhitakerfinu eru þekktar á mismunandi dýpi er ýmist litið til þess við ákvörðun fódrunardýpis að jarðlagaprýstingurinn við fódurrörsskóinn sé meiri en þrýstingur á því dýpi í gufufyllti holu sem tekur inn gufu í botni. Þessi regla er ættuð frá Nýja Sjálandi en hér á landi er einnig skoðaður þrýstiferill í blásandi holu frá æð í botni, frekar en miða við þrýsting í gufufylltri holu.

Þrýstingurinn í holunni má samkvæmt íslenskri venju ekki vera meiri en hægt er að upphefja með fóðurrörið fullt af þungri borleðju ($1,4 \text{ g/cm}^3$). Hita- og þrýstikröfur eru á nýjum svæðum oft lagðar upp þannig að hæstur hiti fylgi svonefndum suðumarksferli með hverju dýpi ("boiling point depth curve"). Í því tilfalli að þessar "verstu" mögulegu aðstæður séu ekki fyrir hendi, leyfa frávikin frá hámarkshita oft að hægt er að kæfa holu með köldu vatni. Yfirleitt nægir þrýstingur frá kaldri vatnssúlu til að halda háhita-holum frá að gjósa. NZ staðallinn miðast sem sagt við að gufuprýstingurinn nái ekki að lyfta jörðinni og mynda sprengigíg, en íslenska aðferðin miðast að auki við að hægt sé að "kæfa" holu og ná borkrónu upp úr henni verði skyndigos.

Hönnun háhitaholna var tekin til endurskoðunar 1975 eftir skyndigos sem ekki varð hamið. Holan glataðist og skildi eftir síg mikinn gíg sem fékk heitið "sjálfskaparvíti". Ástæða þess að svo fór var að millirennisli komst á sem færði þrýstinginn frá botni holunnar upp undir fóðurrörsskó, svonefnt neðanjarðargos. Kæld hola og leðja náðu ekki að upphefja þennan þrýsting í fylltri vinnslufóðringu. Ekki tókst að loka aðallokanum fyllilega og var gufustreymi mikið, en samt tókst að flytja borinn brott. Takmarkað þrýstipól holulokans olli því svo að flansinn tók einnig að leka og skárust boltarnir í sundur af strolanum á nokkrum mánuðum. Fór holan þá í frítt rennsli sem endaði með því að fóðringin tættist í sundur af súra vökvanum sem lék um hluta jarðhitakerfisins eftir eldsumbrot. Eftir að toppurinn hvarf myndaðist mikill gígur en holan lokaðist af sjálfdáðum á tæpu ári, líklega vegna kalkútfellinga.

Holur hafa einnig náð að brjóta sér leið utan fóðringa og mynda sprengigíga. Tvisvar tók hola að gjósa þegar yfirborðsfóðring hafði verið sett grunnt og náði gufan að brjóta sér leið til yfirborðs. Einu inni slitnaði fóðring á suðusamskeytum og gufa streymdi út sem síðan framkallaði sprengigos. Loks braut gufa sér leið út með látum frá gamalli holu nokkrum vikum eftir að hún féll saman og hætti að gjósa. Sem betur fer tókst að stöðva þessi skyndigos og var það í tvígang gert með því að dæla vatni og gjalli úr kút sem náði að stífla útstreymið þannig að vatn sem dælt var á toppinn náði niður fyrir lekastaðinn í holunum og kæfði. Í tveimur tilfellum var um stutt gos að ræða og breyttust pyttirnir í hverri.

Lærdómurinn af þessu er sá að fyrirbyggja verður skyndigos á bortíma með því að halda holum fullum af vatni eða með stöðugu vatnastreymi til að halda holu kaldri. Einnig þurfa holur að vera búnar nógu síðum fóðringum, eins og lýst var hér að ofan. Aukinn fjöldi fóðringa nú tryggir að þótt gat myndist nái gufan ekki að brjótast út í jarðlögin. Þetta skýrir m.a. af hverju svona tilfalli hefur ekki komið upp í tuttugu ár fyrir utan gömlu holuna sem myndaði sprengigíginn. Framangreind skyndigos ullu ekki slysum en það var fyrir það að enginn var í námunda.

Þvermálsval fóðringa er nánast innbyggt í borstaðla því innan í hverja fóðringu þarf borkrónu til áframhaldandi dýpkunar holunnar og svo fer nokkuð pláss í múffur á fóðringum og steypubil. Algeng samval á utanmáli fóðringa er: 18-5/8", 13-3/8", 9-5/8" og 7". Samsvarandi borkrónustærðir sem komast innan í framangreind fóðurrör eru 17-1/2", 12-1/4", 8-1/2". Tvær mis-víðar holugerðir eru notaðar á háhitasvæðum, ýmist með 13-3/8" vinnslufóðringu, nefnd víð hola, eða með 9-5/8" (mynd 2). Sé lekt jarðlaga góð getur víðari holan afkastað helmingi meir því reynslan sýnir að afköstin eru í réttu hlutfalli við þverskurðarflatarmálið – helmingi víðari hola = fjórföld afköst. Upphafleg ástæða þess að farið var að hanna víðar holu um 1980 voru þó ekki afköstin heldur til að skapa meira pláss fyrir kalkútfellingar sem hreinsa þurfti á eins

árs fresti úr grenni gerðinni. Allar holur á Reykjanesskaga hafa síðan verið með víðum fóðringum, samtals 30 holur, en á örðum svæðum var ekki farið að bora þannig holur fyrr en nýlega.

Ytri og innri þrýstingur

Í háhitakerfum breytist þrýstingur með dýpi miðað við eðlisþyngd heitu vatnssúlunnar í berginu. Margt hefur áhrif á hvað hver þrýstingurinn er í svæðinu en í langlestum tilfellum er um “undirþrýsting” að ræða, algengt vatnsborð í holum er á 50-300 m dýpi. Það nægir því að halda holu fullri af köldu vatni til að halda holunni niðri. Undantekning er yfirþrýst vatnskerfi ofarlega í svæði og einnig getur “gufupúði” með háum gufuprýstingi (t.d. 27 bar) fundist frekar grunnt. Þessi tvö tilfelli valda erfiðleikum í borun, sérstaklega þegar kemur að fóðrun hola. Ein leið hefur verið að skjóta inn aukafóðringu í hönnunina. Í gufupúða hefur þurft að sleppa því að setja leiðara þegar ekki var hægt að halda holunni niðri með köldu vatni. Gufupúði eða suðusvæði getur orsakast af niðurdrætti í jarðhitakerfi af völdum vinnslu. Því þarf að endurmeta hönnunarforsendur þar sem svo háttar til, en ekki ganga út frá því sem gefnu að það sem var í lagi fyrir tíu árum sé svo í dag.

Innri þrýstingurinn ræðst af þrýstingi í blásandi holu. Neðan suðuborðs er vatnssúla sem stýrir þrýstingi en ofan suðuborðs er það eðlisþyngd tvífasa vatns og gufu sem er ráðandi. Þrýstifallið í sjóðandi hluta holunnar samsvarar gróflega 1/3 af eðlisþyngd vatnssúlu. Það fer því mikið eftir hita í svæðinu hver þrýstingur verður á hlotoppi en hann er yfirleitt á bilinu 10-60 bar. Hitastig á toppi holunnar er mettunarhiti ríkjandi þrýstings. Standi hola lokuð getur gas safnast þar fyrir með tíma og náð að þrýsta niður vatnsborðinu þannig að þrýstingur á hlotoppi verði sá sami og í svæðinu við fóðringaskó vinnslufóðringar t.d. 100 bar. Þá er hlotoppurinn aftur á móti kaldur. Oft er lofti frá pressu dælt á holu til að koma í blástur, oft 35-70 bar. Taka verður tillit til allra þessara hita- og þrýstitilfella við hönnun holunnar.

Ytri þrýstingur á fóðurrör er ekki jarðlagaprýstingur, eins og mætti halda, því jarðlögin síga ekki saman. Hann ræðst af þrýstingi frá steypusúlu á meðan verið er að dæla henni í holuna. Eðlisþyngd sementsefju sem blönduð er kísilsalla er á bilinu 1,6-1,7 g/cm³ þegar hún hefur verið létt með þöndum perlusteini en annars 1,8 g/cm³. Þannig er þrýstingur á 1000 m dýpi 166 bar í steypunni en í vatnsfylltri holunni að innanverðu og er 98 bar. Netto þrýstingur sem lagt getur saman fóðringuna er mismunurinn eða 68 bar, að viðbættum þrýstingi fá steypudælunni sem er yfirleitt lítill. Framangreind lýsing á við þegar steyppt er um borstengur, en sé steyppt á hlotoppinn verður áraunin mun minni því þá bætist dæluprýstingurinn í eftirdælingu við innri þrýstinginn. Steyping fóðurröra um borsteng hefur yfirburði því hún tekur skemmri tíma, sem dregur út hættu á að steypa stirðni, og einnig er hægt að halda áfram dælingu þar til eðjan kemur aftur til yfirborðs utan með fóðringunni. Þessi steypuaðferð var innleidd um leið og farið var að bora víðar háhitaholur um 1980. Tilraunir hafa verið gerðar með að dæla steypunni ofanfrá og niður með fóðringunni að utanverðu og lofa þær góðu. Tvívegis hafa fóðringar lagst saman við steypingu vegna of hás ytri þrýstings sem stafaði af djúpum fóðringum og að þrýstimælir var stíflaður þannig að steypudæla varð ekki stöðvuð tímalega. Í nokkrum tilfellum hafa fóðringar lagst saman þar eð vatn var á steypuskilum í bilinu milli fóðringa. Við rúmmálsaukningu innilokaða vatnsins er holan hitnaði skyndilega féll innra rörið saman því það hefur minni styrk fyrir ytri þrýstingi en ytra rörið fyrir innri þrýstingi.

Styrkur fóðurröra

Í stöðlum eru jöfnur til að reikna styrk fóðringa, hvað innra og ytra þrýstipól snertir, og áhrif tognunar og þrýstings. Jafnframt eru töflur sem sýna styrk fyrir hverja staðalstærð. Sömu upplýsingar er að finna í helstu borhandbókum. Tognunin stafar af eigin þunga röranna áður en þau eru steipt. Við upphitun breytist togíð í þrýstispennu og er hitabenslan reyndar það mikil að stálið fer óhjákvæmilega yfir flotmörk því rörin hreyfast ekki til í steypunni. Æskilegt er að hitamunurinn (ΔT) frá kaldri holu og í fullheita holu sé sem minnstur. Engin leið er að stýra þessu að gagni því kæla þarf holuna fyrir steypingu og til að kæfa. Erlendis voru gerðar tilraunir með að forspenna rörin fyrir steypingu til að draga úr þrýstispennunni en það er ekki gert lengur. Verst er að eftir að stálið hefur náð að aðlagast nýju spennuástandi getur komið til þess að kæfa þurfi holuna með köldu vatni. Þá er eins líklegt að togspennan fari yfir flotmörkin í togi. Óæskilegt er því að þetta gerist oft því stálið og gengjur eltast og geta gefið sig. Stundum er við það miðað að holan þoli í allt ekki fleiri en 10 svona hitasveiflur þar til fóðringin bilar. Því er nú við rekstur háhitaholna allt gert til að minnka hitasveiflur í holum. Best er að kæfa holurnar ekki. Þess í stað er hreinsiborun gerð með holur í blæstri og holutopps endurnýjun eða nýr loki á holu gerð með því að setja tappa tímabundið efst í fóðringar. Þegar áraun fóðringa hefur verið ákvörðuð eins og drepið er á í kaflanum hér að ofan og bætt við öryggisstuðlum og valin sú staðalstærð fóðurrörs sem uppfyllir hönnunarskilyrðin. Oftast er það ytra þrýstipolið sem er ákvarðandi um efnisþykktina, en það ræðst að mestu af hlutfalli ytra þvermáls og þykktar rörsins.

Gengjur

Gengjur á fóðurrörum eru staðlaðar við nokkrar gerðir enda mikilvægt að hlutir fá ólíkum framleiðendum passi saman. Einnig eru til gengjur með einkaleyfi sem staðlarnir ná ekki yfir. Fyrstu háhitaholurnar voru með skrúfuðum gengjum en fljótlega var farið að sjóða rörin saman, enda tíðkast það við lághitaboranir hér á landi. Kostir við soðin samskeyti eru lægra efnisverð, engar múffur sem gerir kleyft að setja víðari fóðringar í holuna og að fullur styrkur rörsins næst á samskeytum. Ókostir eru kostnaður og eilítið meiri goshætta vegna meiri tíma við rörasuðuna og einnig gæðamál. Gæðamál við rafsúðu urðu til að þess að um 1980 var hætt að sjóða saman vinnslufóðringuna og lengri fóðrunartími olli því að einnig var hætt að sjóða leiðarann. Komið höfðu fram tvö tilfelli um göt á vinnslufóðringum sem tókst að staðsetja við suðusamskeyti. Var það annars vegar gert með því að slaka niður stálplötu í bilið milli fóðringa og sjá hvar gufustrolinn markaði hana og hins vegar var pakkari með mjúku gúmmí þaninn út í rörið og tekin þrykkimynd af gatinu.

Fóðurröraefni

Sem fyrr segir eru fóðurrör framleidd eftir stöðlum úr olíuðnaði og hafa fóðurrör verið keypt til Íslands eftir útboð frá öllum helstu stálframleiðslulöndum heims. Algengasta stáltegundin er K-55 sem þýðir að flotmörkin eru 55 þúsund psi og er svipuð St 52 sem notuð voru er fóðringar voru soðnar. Einnig hefur L-80 verið notað. Valið ræðst m.a. af því að lágstyrktarstál er síður viðkvæmt fyrir H_2S tæringu og eins er æskilegt að leyfa stálinu að fljóta við fremur lága spennu. Ávallt er miðað við utanmál á fóðurrörum og er efnisþykkt þeirra yfirleitt á bilinu 7-12 mm. Lýsingin á fóðringu sem valin hefur verið er fremur einföld: staðalnúmer (API eða ISO), utanmál (" eða mm), þungi fóðringar á lengdareiningu (lb/ft, eða kg/m), stáltegund (K-55...), tegund tengja (Buttress), lengdarflokkur ("Range" 1, 2, eða 3). Dæmi: API 9-5/8" 47 lb/ft K-55 Buttr.

R3. Þannig merkingu er að finna stenslaða á hverju fóðurröri og litahringir auðkenna stáltegundina einnig.

Til að steypa fóðringar er þremur aðferðum aðallega beitt: a) steyppt um borstreng, b) steyppt á fóðringartopp, c) steypu dælt niður utan með fóðringu. Setja þarf viðeigandi steypustykki niður með fóðringunum og eru þau skrúfuð í milli fóðurröra. Einnig eru grindur til að miðjustilla fóðringar í holu settar á þriðja hvert fóðurrör.

Flestar háhitaholur hafa leiðara, en það eru götuð fóðurrör sem hanga frá botni vinnslufóðringar og ná nærri í botn holunnar. Er leiðaranum ætlað að hleypa gufu inn í holuna og styðja við holuveggina þannig að hrun verði ekki sem stöðvað gæti rennslið og stíflað. Leiðarinn er allur gataður. Í fyrstu holunum var ekki settur leiðari og gekk það vel í Ölfusdal, en holur í Krýsuvík og á Reykjanesi hrundu við upphleyplingu. Lághitaholur eru aftur á móti ekki með leiðara enda eiga þær ekki við hrunvanda að stríða. Ákveðið var að sleppa því að hafa leiðara í vel gæfum holum á Reykjanesi í yfirstandandi borframkvæmdum, en ákveðið að leiðara þyrfti í holur með lágum ádælingarstuðli. Lágur ádælingarstuðull er ávísun á mikið þrýstifall frá svæði og inn í holu og því hrunhættu. Nokkrar holur í Svartsengi eru einnig leiðaralausar. Hefur þetta gengið eftir nema í einni mjög tregri holu á Reykjanesi sem til stóð að dýpka til rannsóknarborunar. Umtalsverður sparnaður er af því að sleppa leiðara, auk þess sem hreinsiborun yrði tryggari og engin hættu á leiðaraskemmdum. Tvær holur á Reykjanesi hafa greinst með skemmda leiðara og nokkrar holur í Kröflu. Einnig urðu miklar fóðurröra- og leiðaraskemmdir á holum í Bjarnarflagi vegna sprungu-hreyfinga samfara Kröflueldum.

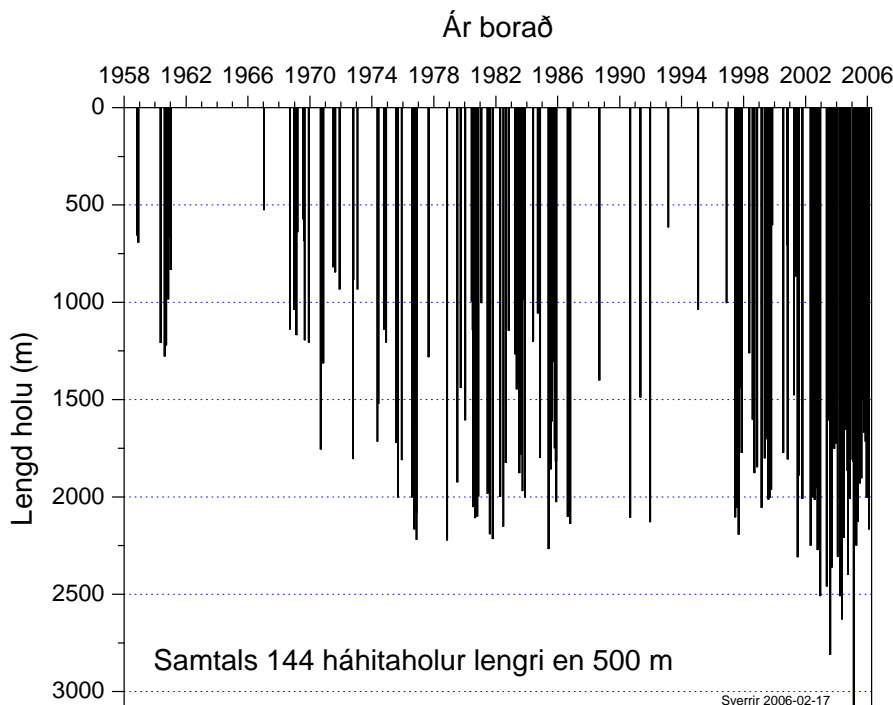
Holutoppar

Það eina sem sést af borholu er toppur hennar og þar er aðalokinn. Nokkur þróun hefur átt sér stað í frágangi holutoppa, einkum hvað þenslustykki snertir. Vel steyppt fóðring gengur aðeins til um örfáa sentimetra og því er færsla á holutoppi sjaldnast vandamál. Dæmi eru þó um fóðringar sem hafa gengið upp um hálfan metra þegar fóðring hitnar. Í upphafi var aðaloki holunnar settur beint á vinnslufóðringuna en nú er hann yfirleitt festur á þenslustykki sem er borið uppi af öryggisfóðringunni. Ákveðið var að setja þenslustykki á fóðringar til að tæring á vinnslufóðringu, t.d. eftir eldsumbrot og skemmdir yllu ekki leka út úr holunni. Þá er fóðringar-flansinn hafður á öryggisfóðringunni og þenslustykkið boltaður á hann. Þá veldur hugsanlegur leki á vinnslufóðringunni ekki leka út fyrir holuna. Nokkrar útfærslur hafa verið á þessum þenslustykkjum. Fyrst var slíf sett niður í holuna og vinnslufóðringin ekki látin ná upp að flansinum. Næsta útfærsla var að setja millistykki (þenslustykki) milli holuflans og aðalloka. Ekki var þétting höfð í bilinu milli fóðringa og því var holan út að öryggisfóðringu einn þrýstikútur. Nýlega var breytt til á Reykjanesi með því að hafa þéttingu í þenslustykkinu en þá er bilið milli fóðringa sérstakt þrýstihólf sem skapar tvöfalt öryggi gagnvart leka. Þessi síðasta breyting var gerð eftir að leki á fóðurröragegjum kom fram í tveimur holum. Voru lekarnir lagfærðir en breytt var yfir í þessa gerð verksmiðjuframleiddra þenslustykkja því þau veita meira öryggi og einnig er hægt að þrýstiprófa bilið milli fóðringanna og fylgjast betur með hugsanlegum lekum. Til þess að kæfa holur og fylgjast með þrýstingi á háhitaholum eru hafðir einn eða tveir litlir lokar undir aðalloka (kæfingarlok). Reynslan sýndi að þessir lokar áttu til að leka bæði með spindlum og á flönsum ásamt því að viðgerðir voru dýrar. Því var víða horfið frá að hafa þessa loka undir aðalokanum og þeir frekar hafðir milli aðalloka holunnar og næsta stóra loka þar rétt fyrir ofan. Ávallt eru

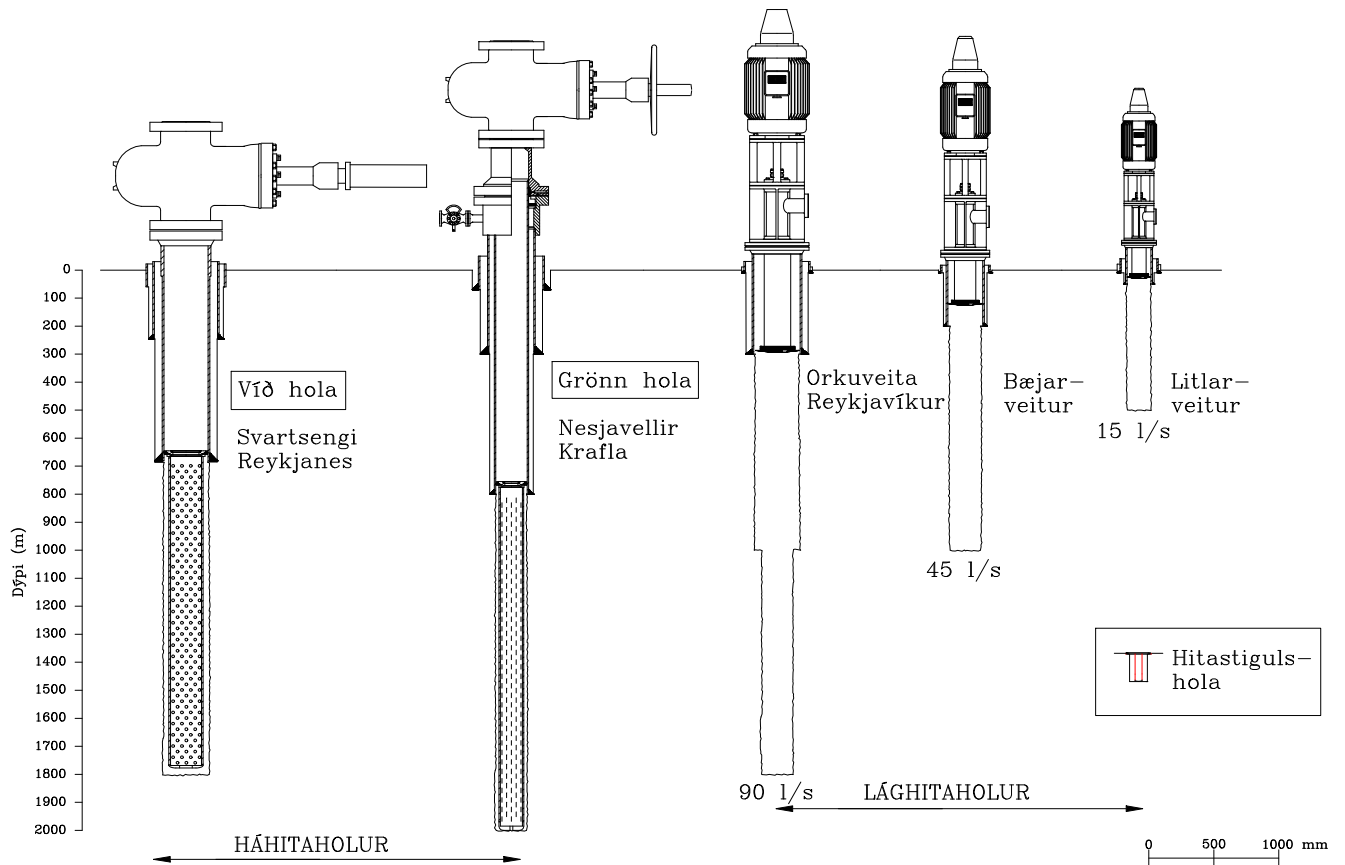
hafðir tveir lokar á háhitaholum þannig að ef einn bregst er annar til staðar. Þetta eru einu tækin sem hreyfast á háhitaholum og mikilvægt að lokarnir nái að þetta vel þá sjaldan þeir eru notaðir. Í upphafi voru notaðir gufulokar með fjaðrandi tungu, til að ná að þetta þrátt fyrir smá útfellingar, en fljótlega var farið að nota sérsmiðaða loka sem eru með sætum sem eru varin þannig að útfelling sest hvorki á þegar lokinn stendur opinn né lokaður. Lokarnir eru ýmist af þrýstiflokki ANSI 600 eða ANSI 900. Í þeim er tungan samsett og dregst saman þegar hún er færð til við lokun. Aðallokarnir eru yfirleitt handstýrðir en Hitaveita Suðurnesja hefur smíðað eigin glussatjakka til að opna og loka þeim. Til að spara er vinnuloki holunnar ekki af sömu gerð og aðallokinn, heldur hefðbundinn gufuloki. Ekki er hægt að nota þessa loka til að stilla rennslið og því eru þrengingar hafðar, ýmist svonefndar blendur sem eru stálplötur með föstu gati eða stjórnlokar. Með stjórnloka á holum er hægt að fínstillast rennslið og mæta nákvæmlega gufupörf virkjunarinnar. Stjórnlokar eru yfirleitt keyptir en Hitaveita Suðurnesja hefur smíðað stjórnloka sem er eins og stór nálarloki.

NIÐURLAG

Við hönnun háhitahola standa menn frammi fyrir nokkrum valkostum. Sumir eru tæknilegs eðlis en aðrir kostnaðarlegs eðlis. Jarðhitasvæðið sem borað í ræður miklu um þær lausnir sem valdar eru. Markmiðið er að holan verði sem aflmest og endist vel, ásamt því að kostnaður við borun og rekstur verði viðráðanlegur. Þetta hefur leitt til þess að tvær gerðir háhitahola eru fyrst og fremst boraðar. Dýpi fóðringa fer eftir jarðfræðilegum skilyrðum og öryggiskröfum. Í greininni eru nefnd nokkur dæmi um örðugleika sem fram hafa komið við hitaborunar hér á landi, en flest tilfelli eru yfir tuttugu ára gömul. Þau höfðu áhrif á þá holuhönnun og boraðferðir sem nú tíðkast.



Mynd 1. Myndin sýnir umsvif háhitaborana frá 1958 er djúpboranir hófust. Frá 1940 höfðu 43 holur grynntri en 250 m verið boraðar í Hveragerði, Krýsuvík, Hengli og Námaskarði. Þá voru nokkrar holur boraðar á Nesjavöllum um 1950. Miðað er við lengd holu því í seinni tíð hafa holur verið skáboraðar og ná því ekki eins djúpt og lengdin gefur til kynna. Háhitaholur grynntri en 500 m eru ekki taldar með. Heimild: Borholuskrá Orkustofnunar og Þorgils Jónasson.



Mynd 2. Helstu gerðir jarðhitahola á Íslandi. Háhitaholur eru ýmist víðar (með 13-3/8" vinnslufóðringu) eða grönn (9-5/8"). Nöfn fóðringa eru: leiðirör er sett í borplanið, yfirborðsfóðring nær í 70 m, öryggisfóðring í 250 m og vinnslufóðring í 700 m og loks er gataður leiðari sem nær frá 670 m í 1800 m. Holutoppar á myndinni eru annars vegar með flans soðinn beint á vinnslufóðringu og hinsvegar með þenslustykki (án þéttinga milli fóðurröra). Þríhyrningsmerki neðst á fóðringum táknar að þær séu steyptar þar fyrir ofan.

Kostnaður við borun og frágang háhitahola

Kristinn Ingason og Matthías Matthíasson, VGK

Inngangur

Fyrir um tíu árum hófst nýtt skeið í virkjun háhita á Íslandi. Fremur rólegt hafði verið í háhitaborunum áratuginn þar á undan en 1996 var byrjað að afla gufu fyrir seinni hverfilsamstæðuna í Kröflu. Á næstu árum var aukið við gufuöflun á Nesjavöllum og í Svartsengi og nýting jarðhita til raforkuframleiðslu margfaldaðist.

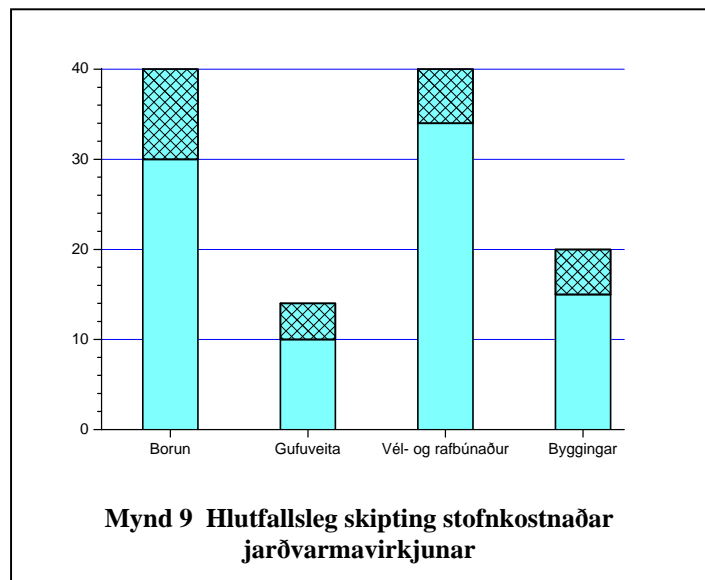
Aðstæður undir lok tíunda áratugarins höfðu breyst nokkuð frá því þegar mest var um að vera í borun á 8. og 9. áratugnum. Jarðboranir, sem voru og eru verktakinn í háhitaborunum, voru ekki lengur ríkisfyrirtæki heldur hlutafélag í almannaeign. Verksamningar áður höfðu oftast miðast við tímagjald fyrir borinn en upp úr 1996 breyttust samningar meira í ákvæðisvinnu þ.e. greitt var fyrir hvern meter holunnar o.s.frv.

Annað sem hafði breyst var að í gildi voru komin lög um mat á umhverfisáhrifum. Lögin höfðu lítil áhrif á boranir til að byrja með þar sem borað var á svæðum, sem þegar höfðu verið ætluð til slíks, en annað gildi þegar sótt var inn á ný jarðhitasvæði. Við undirbúning boranna nú verður því að tryggja öll leyfi í tíma en ekki eingöngu efni eins og áður fyrr.

Í eftirfarandi verður gerð grein fyrir kostnaði við borun og frágang háhitahola. Til grundvallar er lögð reynsla síðustu tíu ára.

Heildarkostnaður virkjunar

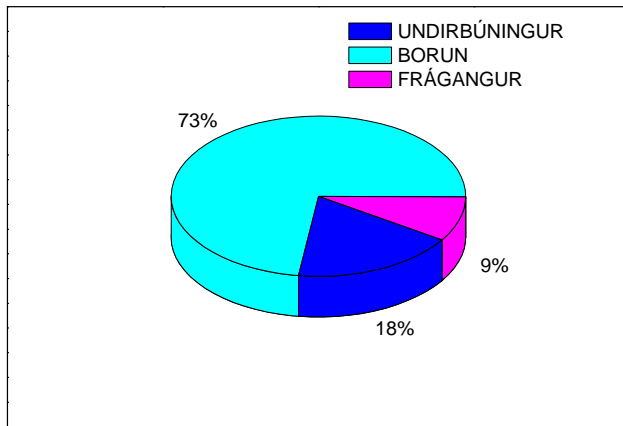
Við virkjun jarðvarma til raforkuframleiðslu getur kostnaður við borun og frágang háhitahola verið 30 – 40% af heildarstofnkostnaði virkjunarinnar sem er heldur hærra en t.d. kostnaður vélasamstæðu og því sem henni tilheyrir. Augljóst er því hve mikilvægt er að vel takist til við borun og helst að hvort tveggja fari saman há afköst borholu og lágur borkostnaður. Á meðfylgjandi mynd 1 er stofnkostnaður dæmigerðrar virkjunar, þar sem jarðvarmi er nýttur til framleiðslu, skipt á fjóra helstu verkþættina. Um grófa skiptingu er að ræða þar sem m.a. hönnunar og umsjónarkostnaður er innifalinn í þessum liðum.



Kostnaður við borun og frágang háhitahola

Kostnaður við borun skiptist í aðalatriðum í þrennt:

- Undirbúningur fyrir borun, m.a. bygging borstæðis, borvatnsveita og forborun
- Borun, þ.m.t. efni í borholu
- Frágangur borholu, m.a. holutoppur, blástursbúnaður, frárennsli og holu-toppshús



Mynd 10 Hlutfallsleg skipting borkostnaðar

Á mynd 2 er hlutföll milli þessara lið sýnd í grófum dráttum. Hlutföllin breytast lítillega eftir því hvorrar gerðar holan er en kostnaður við borunina sjálfa er ávallt langstærstur. Til búnings er hér talin forborun þar sem hagstæðara er að nota minni bora til þess þrátt fyrir að hægt sé að bora holuna alla með nýjustu borum Jarðborana.

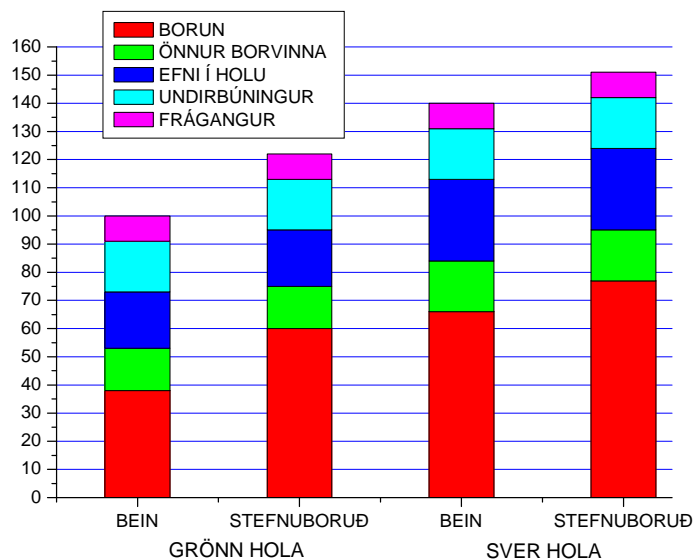
Fyrir 2000 m djúpa borholu, þar sem vinnsluhlutinn hefur verið boraður með $\varnothing 8 \frac{1}{2}$ " borkrónu er borkostnaður áætlaður um 200

MISK. Inni í þeirri upphæð er áætlaður kostnaður við hönnun, umsjón og eftirlit auk þess sem tillit er tekið til ófyrirséðs kostnaðar.

Mismunandi gerðir borhola

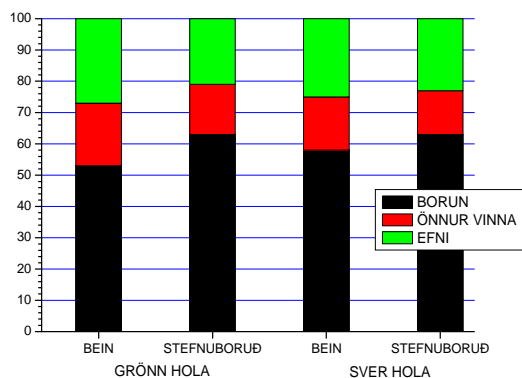
Vinnsluhluti háhitahola, sem boraðar hafa verið héraendis undanfarin ár, hafa ýmist verið boraðar með $\varnothing 8 \frac{1}{2}$ " borkrónu eða með $\varnothing 12 \frac{1}{4}$ " borkrónu. Þar sem búist er við lægra vermi jarðhitavöka er sverari holurnar taldar hagkvæmari en ef vermið er hátt eru hins vegar grennri holurnar taldar hagkvæmari.

Fyrsta holan, sem var stefnuboruð héraendis var hola 20 í Kröflu. Það var árið 1982. Fáar borholur voru stefnuboraðar á árunum þar á eftir en síðustu tíu árin hefur stefnuborun sífellt orðið algengari. Með stefnuborun er t.d. hægt að hafa betri stjórn á hvernig borað er í gegnum sprungur eða misgengi sem álitleg eru talin til að gefa orkuríkan vökva. Með stefnuborun er einnig hægt að bora nokkrar holur frá sameiginlegum borteig og drag þar með úr raski, sem samfara er borun. Loks má nefna að með stefnuborun er hægt að sveigja holur inn á vinnslusvæði, sem vegna landslags er erfitt að vinna úr með öðru móti.

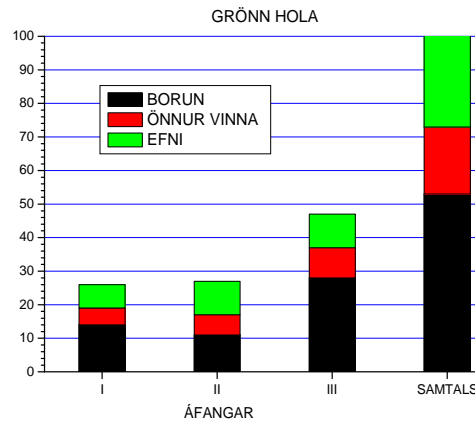


Mynd 11 Stofnkostnaður mismunandi gerða borhola

Á mynd 3 er kostnaður við borun grannra, sverra og stefnuboraðra hola borinn saman. Miðað er við að holurnar séu 2000 m djúpar eða langar þegar um stefnuboraða holu er á ræða. Innifalinn í kostnaðinum er undirbúningur fyrir borun, borun og frágangur borholu. Hins vegar er í samanburðinum ekki litið til heildarkostnaðar við að bora og tengja holur. Sé það gert má búast við að munurinn á stefnuboruðum holum og beinum minnki í samræmi við minni yfirborðsmannvirki svo sem vegi og safnæðar, sem þarf til að tengja þær gufuveitu, auk þess sem stækkun á borteig er ódýrari en bygging nýs borstæðis.



Mynd 4 Skipting borkostnaðar mismunandi holugerða



Mynd 5 Skipting borkostnaðar eftir áföngum

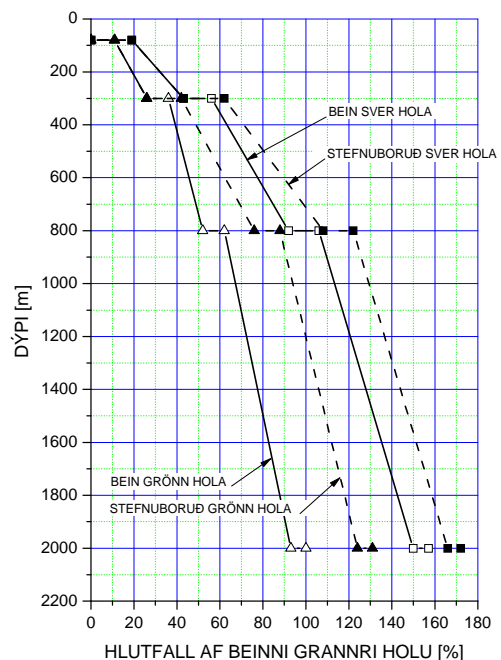
Skipting kostnaðar eftir efni og vinnu

Áhugavert er að skoða skiptingu borkostnaðar eftir efni annars vegar og vinnu hins vegar. Á mynd 4 hefur borkostnaði verið skipt í borun, aðra borvinnu og loks efni. Hér er hvorki tekið tillit til kostnaðar við undirbúning borunar né frágang. Af myndinni má ráða að efniskostnaður er 20 – 30% af borkostnaði en 70 – 80% er kostnaður við bor og því sem honum tilheyrir.

Sjálfrí borun háhitahola er skipt í þrjá áfanga:

- I Borun fyrir öryggisfóðringu
- II Borun fyrir vinnslufóðringu
- III Borun vinnsluhluta

Á mynd 5 er kostnaði í ofangreindum áföngum skipt á sama hátt og á mynd 4 þ.e. í borun, aðra borvinnu og efni.

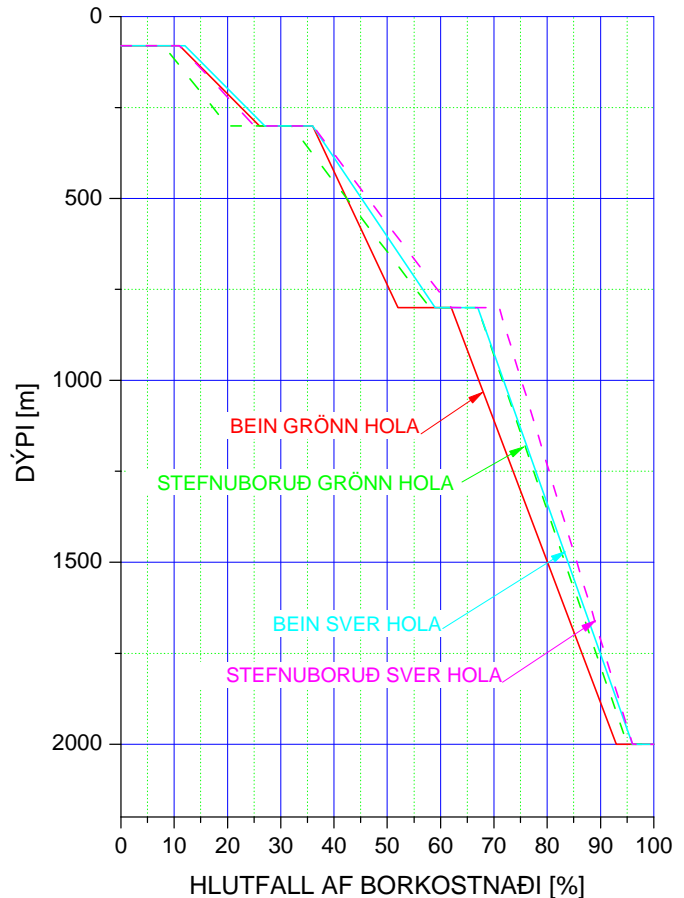


Mynd 6 Borkostnaður, sem fall af dýpi fyrir nokkrar gerði borhola

Borkostnaður með dýpi

Á mynd 6 er sýndur hlutfallslegur kostnaður við borun háhitaholu sem fall af dýpt holunnar. Hér er hvorki tekið tillit til kostnað við undirbúning borunar né frágang að borun lokinni. Til grundvallar er lögð 2000 m djúp bein grönn hola. Af myndinni má lesa fastan kostnað sem er í upphafi hvers áfanga og breytilegan kostnað með hverjum boruðum meter. Tilheyrandi fasta kostnaðinum er ýmiss undirbúningur fyrir borun svo sem samseting á borstreng, uppsetning öryggisloka og annar frágangur á efsta hluta holu. Breytilegi kostnaðurinn felur í sér borun, fóðurrör ásamt kostnaði við að setja þau í holuna og steypa.

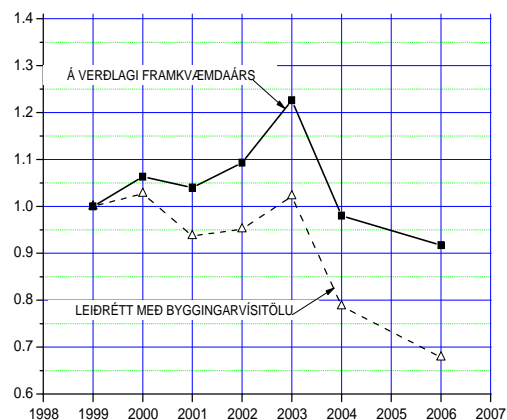
Mynd 7 sýnir hið sama og mynd 6 nema hvað nú er kostnaðurinn sýndur sem hlutfall af borkostnaði hverrar tegundar holu. Af myndinni má m.a. lesa að kostnaður við neðstu 500 m holunnar er um 15% af borkostnaðinum og með því að framlengja línur út af grafinu má ætla að kostnaður aukist um 15% við að dýpka hana niður í 2500 m. Þessi jaðarkostnaður er hæstur fyrir beina granna holu en lægstur fyrir svera stefnuboraða holu.



Mynd 7 Borkostnaður, sem fall af dýpi, fyrir nokkrar gerði borhola

Þróun borkostnaðar

Til að gera sér mynd af þróun borkostnaðar undanfarin ár hefur verið litið á ákveðna þætti í borun og kannað hvernig þeir hafa breyst. Niðurstöðuna er að sjá á mynd 8. Fyrirvari er gerður um hversu vel borþættirnir, sem lagðir eru grundvallar, lýsa þróun heildarborkostnaðar sem og hvort rétt sé að leiðrétta breytingar á þeim með byggingavísitölu. Með þessum fyrirvörum má lesa úr myndinni að verðlag hefur verið stöðugt fram til 2003. Eftir það hefur verið lækkað umtalsvert. Helsta skýringin á því er að borsamningar, sem



Mynd 8 Þróun borkostnaðar

gerðir hafa verið að undanfögnu, eru mun umfangsmeiri en áður þekktust. Borarnir hafa nú verkefni allt árið en ekki aðeins yfir sumarið. Með tillitil til hve borkostnaður vegur þungt í stofnkostnaði jarðvarmavirkjana eins og áður hefur verið vikið að mun þessi þróun gera jarðvarmavirkjanir hagkvæmari.

Jarðfræðilegar upplýsingar sem aflað er við borun

Ásgrímur Guðmundsson, ÍSOR

Ágrip

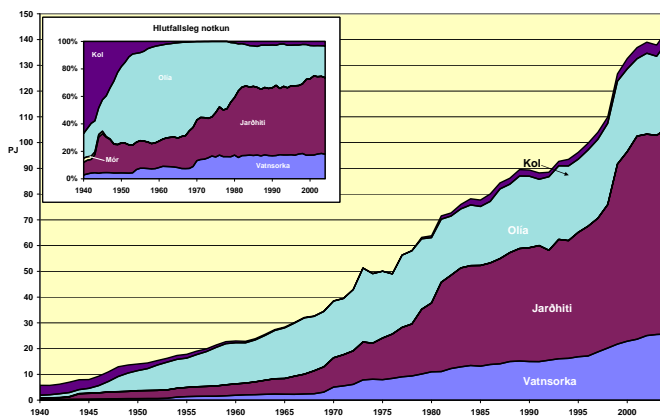
Saga jarðhitarannsóknna á íslenskum háhitasvæðum nær yfir 50 ára tímabil auk þess sem Íslendingar voru þátttakendur í sambærilegum rannsóknum erlendis á sama tímabili. Í byrjun fóru fram víðtækar yfirborðsrannsóknir. Jarðfræðikort voru gerð, þar sem áhersla var lögð á allt sem viðkom jarðhita virkum sem óvirkum. Efnafraeði jarðhitavökvans var mæld, þar sem gæði vökvans voru metin, dreifing uppstreymis metin út frá efnasamsetningu og hiti í jarðhitageyminum metinn út frá efnahitamælum. Jarðeðlisfræðilegum mælingum var beitt til að kortleggja útbreyðslu jarðhitasvæða og meta við hvaða aðstæður jarðhitavökvinn streymir til yfirborðs. Samtúlkaðar niðurstöður voru síðan dregnar saman í frumhugmyndalíkan af viðkomandi svæði. Næsta skref eða fasi rannsókna voru boranir. Áætlun um borholurannsóknir á þessu stigi gerir kröfur til víðtækrar þekkingar á öllum sviðum jarðhitafræða. Mikilvægt er að hafa samhæfðan sérfræðingahóp og góð samskipti við boráhöfn. Hönnun borholna hefur verið nokkuð fastmótuð á undanförunum áratugum og svipaða sögu má segja um borholurannsóknirnar, en ákveðin þróun og endurbætur eru þó stöðugt í gangi. Yrirkomulagið við borholurannsóknir á borstað hefur leitt af sér hóp jarðhita-sérfræðinga bæði hvað varðar borholujarðfræði og borholumælingar, sem hefur nýst vel við ráðgjöf og ákvarðanatöku. Megin verkefni borholujarðfræðings er greining á borsvarfi til að upplýsa hvað borað er í, gera jarðlagasnið og kortleggja dreifingu ummyndunarsteinda. Ennfremur sér borholujarðfræðingurinn um að safna gögnum sem verða til við borunina, þar á meðal eru mælingar á skolvökvanum, tæknilegum þáttum eins og álagi á krónu, borhraða, snúningshraða krónu og snúningsálag. Því til viðbótar er jarðfræðingur ávallt borstjóra til ráðuneytis. Mælingalið sem samanstendur af forðfræðingum og tæknimönnum framkvæma allar borholumælingar með sérhæfðum tæknibúnaði. Algengastar eru hitamælingar við mismunandi aðstæður í borun bæði til að ná sem bestum upplýsingum um hita og vatnsæðar og að veita boráhöfn nauðsynlegar upplýsingar um ástand holunnar. Staðlað mælingarprógram tengt hverjum boráfanga er framkvæmt, sem samanstendur af hita-, viðnáms-, nifteinda, náttúrulegs gamma og víddarmælingum. Að loknum fóðringarsteypingum hefur sú regla komist á að mæla bindingu steypu og fóðringar með CBL-mæli (cement bond log). Það hefur fram til þessa verið helsti mælikvarðinn á hvernig tekist hefur til með steypingu fóðringa. Borlokaþrógram, sem lokaframkvæmdir við holu eftir borun hafa verið nefndar, samanstendur af áðurnefndum jarðlagamælingum, þrepaðælingu og örvunaraðgerðum ef þurfa þykir. Fyrirkomulag við stjórn og ákvarðanir varðandi borverk byggir oftast á samvinnu borholujarðfræðings, mælingamanna, borverkfræðings, borstjóra og fulltrúa verkkaupa. Umfangsmiklar háhita-boranir undanfarna þrjá til fjóra áratugi hafa leitt af sér ákveðnar nýningar í bortækni, skipulagningu á borframkvæmdum og jarðhitarannsóknum.

1. Inngangur

Löggjöfin um náttúruauðlindir landsins hefur þróast í takt við tímenn á undanförunum áratugum. Þar hefur meðal annars verið lög umtalsverð áhersla á öflugan miðlægan gagnagrunn. Orkustofnun hefur gengt margvíslegum skyldum hér á árum áður, sem

kveðið var á um í Orkulögum frá 1967 og síðan tengdum lögum eins og lögum um auðlindir landsins. Gagnagrunnmál skipa þar veigamikinn sess. Í lögum um rannsóknir og nýtingu á auðlindum í jörðu nr.57/1998 segir m.a. í IX. kafla “Við jarðboranir, sem framkvæmdar eru samkvæmt lögum þessum, þar með taldar jarðboranir landeiganda, skal færa dagbók er gefi upplýsingar um staðsetningu holunnar, jarðlög, gerð þeirra og dýpi, hvenær vatn eða gufa kemur í holuna, hitastig og önnur atriði sem nánar skal ákveða í reglum sem ráðherra setur að fengnum tillögum Orkustofnunar. Skylt er að láta Orkustofnun í té afrit af dagbókinni eigi síðar en einum mánuði eftir að borun er lokið. Orkustofnun getur krafist þess að berg- og jarðvegssýnishorn séu varðveitt. Ef Orkustofnun mælir svo fyrir er leyfishafa jarðborunar skylt að tilkynna henni þegar í stað er heitt vatn eða gufa kemur upp eða eykst í borholu. Ef verðmæt jarðefni finnast við jarðborun skal þegar í stað tilkynna það til Orkustofnunar.”.

Fyrir á árum var borsvarfi safnað á tveggja metra fresti úr borholum einungis ef Orkustofnun óskaði sérstaklega eftir, en síðar meir varð það föst regla að safna borsvarfi eins og áður segir úr öllum jarðhitaborholum að minnsta kosti. Síritandi mælir (geograph), sem gekk fyrir klukkaverki var notaður við boranir á djúpum holum og þá fyrst á Gufubor (Dofra) og síðar á Jötni þegar hann bættist í flotann. Þar var skráður borhraði, álag á krónu og dæluþrýstingur. Auk þess var skráð á fjögurra tíma fresti heildardæling skolvökva, skoltap, hiti á skolvökvanum niður og upp. Aðrir borar eins og t.d. Narfi, Glaumur, Ýmir og Ísbor voru með annan hátt á skráningu. Þar var ýmist skráður meðalborhraði á klukkustundar fresti eða borhraði á metra eða tveggjametra fresti. Auk þess voru hámarks og lágmarksgildi skráð fyrir dælingu skolvökva og þrýsting tvisar á sólarhring. Með tilkomu Sleipnis í lok síðustu aldar var

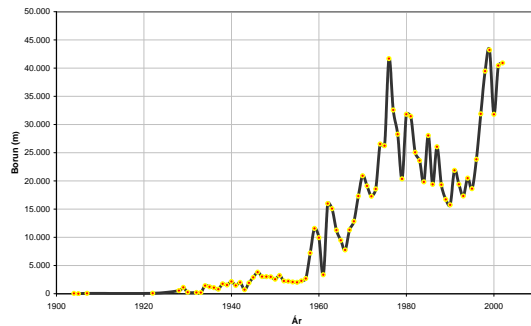


Mynd 2. Frumorkunotkun á Íslandi á árunum 1940-2002.

allt skráningarkerfi endurbætt verulega og því einnig komið upp á Jötni og síðar meir Geysi. Samfeldri skráningu var komið á öllum þeim þáttum sem álitíð var að skiptu máli við borunina og vistað í gagnagrunni hvers bors. Ennfremur var komið upp skjá sem sýndi öll mæligildin bæði tölugildi og grafískt. Nú er boruninni stýrt með hliðsjón af þessum upplýsingum.

Umfang jarðhitaborana jókst umtalsvert í kjölfar olíukreppunar í byrjun áttunda áratugsins. Íslensk stjórnvöld lögðu áherslu á nýtingu innlendra orkuauðlinda, sérstaklega á boranir eftir heitu vatni til húshitunar til að minnka innflutning á eldsneyti. Flokkar voru sendir út til að rannsaka svæði sem voru líkleg til árangurs. Nýting var aukin á svæðum sem þegar voru í vinnslu og þoldu aukið álag. Möguleikarnir voru miklir á aukinni nýtingu. Í lok 20. aldarinnar var 87% af húsnæði hitað með jarðhitaorku og rafmagnsframleiðsla frá jarðhitaorkuverum hafði aukist umtalsvert (mynd 2) (Árni Ragnarsson o.fl. 2004).

Mesta borun á ári síðustu áratuginna var á milli 40-45 km (mynd 3). Það jafnast á við að yfir 20 þúsund svarfsýnum hafi verið safnað árlega til greiningar á mestu borárunum. Jafnframt var safnað tengdum gögnum til túlkunar á sama tíma. Margir borholujarðfræðingar og mælingamenn fengu þjálfun á þessum árum, sem í meginatriðum var tvíþætt. Annars vegar greining borsvarfs og úrvinnsla borholumælinga í þeim tilgangi að endurbæta eða leggja drög að hugmyndalíkani af viðkomandi jarðhitasvæði. Hins vegar almenn jarðhitaráðgjöf á borstað. Ráðgjöfin gerir kröfur til góðrar almennar þekkingar á jarðhitarannsóknum, skilnings á vinnsluferli jarðbora og reynslu manna við greiningu og úrvinnslu gagna á borstað.



Mynd 3. Árleg borun á tímabilinu 1900-2002.

Hér á eftir er fjallað um þá starfsemi sem borholujarðfræðingar og mælingamenn sinna á borstað og hvernig þeirra aðkoma er við mat á gögnum sem safnast við borverk.

2. greining og meðhöndlun borsvarfs

Rannsóknarvinna og vinnsluferli á borstað hefur eðlilega tekið reglulegum breytingum á þeim árum sem starfsemin hefur verið í gangi. Grunnurinn hefur samt sem áður verið greining borsvarfs í þeim tilgangi að gera jarðlaga- og ummyndunarsnið af holunni og fyrir jarðhitakerfið. Viðsjá er notuð við svarfgreiningu á borstað en ef aðstæður krefjast nákvæmari rannsókna þá er hægt að fá XRD-greiningar innan 24 tíma eftir að sýni var tekið til greiningar og aðrar sérhæfðar greiningar. Slík þónusta getur verið einskonar kapphlaup við tímann, þar sem hraði borunar hefur aukist umtalsvert á síðustu árum. Ávallt hefur verið haft að leiðarljósi að vinna samhliða borun við úrvinnslu gagna eins langt og það nær. Önnur þjónustustörf borholujarðfræðings á borstað felast í því að meta hvort hrun úr holuveggjum geti átt sér stað í borun, að meta hvort málmur í svarfinu sé ættaður úr bortækjum eða fóðringum og svo meta útfra úliti borsvarfsins ástand borkrónu. Samt sem áður er megin tilgangurinn með svarfgreiningu að rannsaka berggerðir og ummyndunarsteindir.

Borsvarf er í margra augum ósköp venjulegur sandur. Það var því mikil vinna í upphafi að upplýsa fólk og koma því í skilning um hvað felst í þessum litlu bergbrotum og hvað tilvist fáeinna kristalla getur sagt um ástandið í undirdjúpunum. Með markvissri vinnu og öflugri kynningu í ræðu og riti gekk það eftir og nú er það talinn sjálfsgæður hlutur að sinna þessari starfsemi og er sérstök áhersla lögð á hana við boranir einkum á háhitasvæðum. Við háhitaboranir hefur það verið viðtekin venja að greina borsvarf jafnharðan og það kemur upp úr holum til þess að meta hitaástand og jarðfræðilegar aðstæður. Vissar steindir gefa til kynna hitaástand og aðrar eru upplýsandi um lekt. Til viðbótar er unnið jarðlagasnið af nágrenni holna ásamt yfirliti um dreifingu ummyndunarsteinda. Sum verkefni kalla á frekari úrvinnslu gagna og þá eru gerðar þunnsneiðar, röntgengreiningar, efnagreiningar eða aðrar rannsóknir. Hvert svarfkorn gefur ákveðnar upplýsingar og samanlagt gefur hvert sýni hugmynd um hvernig ástandið er á viðkomandi dýpi niðri í jörðinni. Greining á borsvarfi getur

verið vandasöm en hún veltur á því að geta greint aðalatriði frá aukaatriðum. Upplýsingar sem felast í bergmulningnum eru m.a. berggerð, myndunarhættir bergsins, núverandi og fyrrverandi hitaástand, grop (vatnsrýmd) og lekt (vatnsleiðni). Mikilvægt er að kunna að greina þessa þætti í svarfinu og sjá innbyrðis tengsl þeirra.

Nokkrar hitaháðar ummyndunarsteindir (index minerals) eru sýndar í töflu 1. Hitagildin eru að mestu byggð á reynslu við jarðhitarannsóknir hér á landi frá 1970 og fram til dagsins í dag (Hrefna Kristmannsdóttir, 1979, Hjalti Franzson, 1998). Dreifing ummyndunarsteinda með dýpi má flokka niður í steindasamfélög, sem hvert um sig sýnir ákveðna þróunarsögu hvað hita í jarðhitakerfinu varðar. Einföldust aðstæður eru þegar steindir sýna vaxandi hita með dýpi. Stundum sjást steindir, sem samsvara hita á bilinu 100-200°C, með háhita-steindum sem eru stöðugar á hitabilinu 200-300°C. Slíkar aðstæður geta verið vísbendingar um hitnun eða kælingu, en afstaða ummyndunarsteindanna innbyrðis getur sagt til um hitaástand. Í sumum tilvikum yfirprentar kalsít aðrar steindir, en merkingin á bak við það hugtak er að kalsít myndast síðast þeirra

Tafla 1. Hitaháðar ummyndunarsteindir í háhita - svæðum Íslands..

Steindir	Lágm. hiti °C	Hám. hiti °C
zeolítar	40	120
*laumontít	120	180
kvars	180	>300
*wairakít	200	
smektít		<200
blandlagsleir	200	230
korrensít	200	
klórít	230	>300
kalsít	50-100	280-300
prehnít	240	>300
epidót	230-250	>300
wollastonít	260	>300
aktínólít	280	>300

*Tilheyrir zeólíta samfélaginu.

steinda sem sjást og umlykur þær. Það er sterk vísbending um kælingu í jarðhitakerfi. Gott dæmi um slíka kælingu er efrihluti Leirbotnasvæðisins í Kröflu. Aftur á móti eru þær aðstæður einnig að kalsít sést með háhitasteindum og hverfur að mestu, en það er góð vísbending um hita rétt við suðumarksferil. Dæmi þar um er neðrihluti Leirbotnasvæðisins í Kröflu. Afstætt magn sprungufyllinga er góður mælikvarði á virka og óvirka (steingerða) lekt í bergi. Járnþróunarsambandið pýrít, sem þekkt er undir nafninu glópagull, hefur reynst vel til að meta lekt. Mikið magn pýríts er vísbending um góða lekt. Steindin er algeng í efstu 1000 m á háhitasvæðum þar sem hitinn er á bilinu 100-300°C, en þrátt fyrir minna magn dýpra í jarðhitakerfunum þá er hún áfram góður mælikvarði á lekt (Ásgrímur Guðmundsson, 1993). Ákveðnar steindir eins og kvars og wairakít hafa verið hafðar til viðmiðunar þegar fóðringardýpi vinnslufóðringa í háhitaborunum er ákveðið. Þegar þær birtast saman er góð víska fyrir því að berghiti sé kominn yfir 200°C.

Ummyndunarsteindirnar í töflu 1 má greina með nokkru öryggi í víðsjá vegna sérstaks kristalforms eða auðþekkjanlegra litbrigða. Samt geta kristallarnir birst á breytilega vegu eftir myndunaraðstæðum og spanna dæmigerðan kristal yfir í nánast myndlausan massa. Kalsít er dæmi um kristal sem hefur breytileg kristalform eins og t.d. plötu kalsít, "dog tooth" og silfurberg, en kalsít er alltaf auðgreinanlegt með hjálp saltsýru.

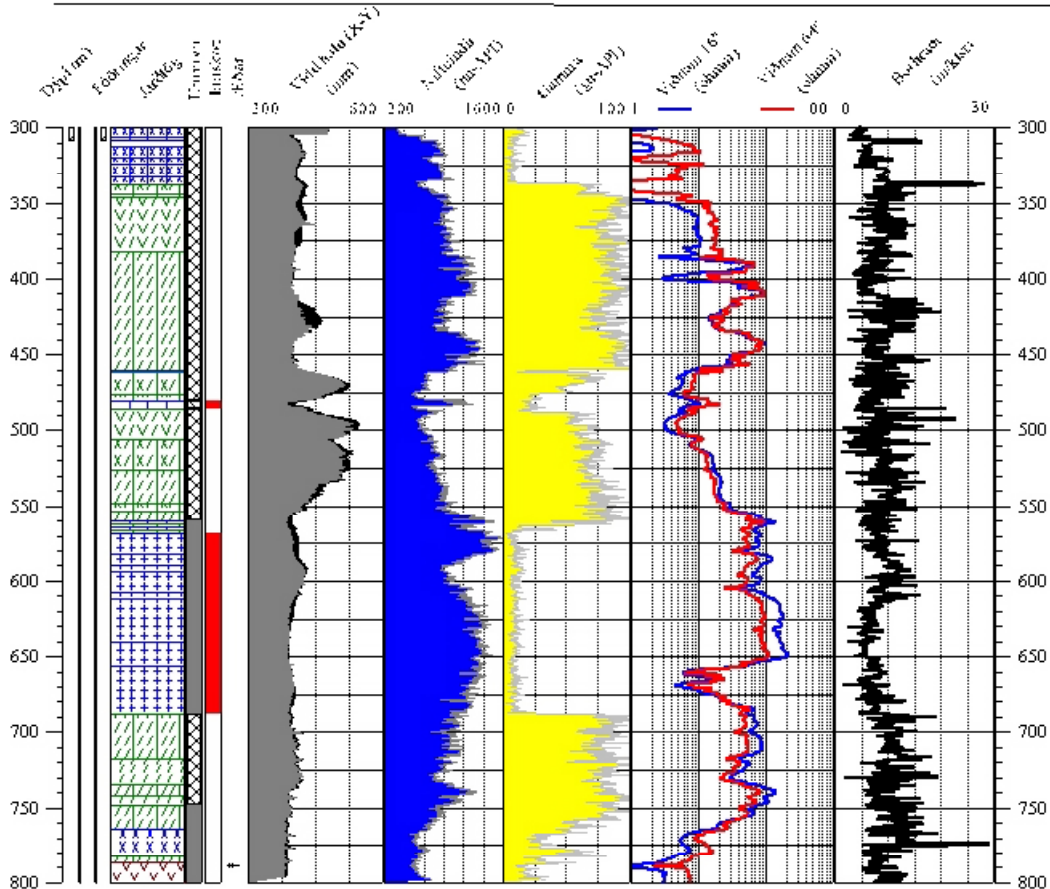
Tenging jarðlagasniða við jarðlög á yfirborði er hluti af jarðfræðikortlagningu. Fyrsta rannsóknarhola sýnir helstu jarðmyndanir eins langt niður og holan nær. Þar með bætast við upplýsingar til líkangerðar, þar sem auk jarðlaga bætast við grop (póruhluti), æðakerfi eða lekt og þökkalegt mat á efnasamsetningu bergsins (mynd 4). Fyrsta hola er oftast staðsett þar sem meginuppstreymi jarðhitavökvans getur

Staður: Hágöngur
Dahlasafl: HK-01

Bor: 16tunn
Dýptarbil: 300 - 800 m

Skotefi: 2. áfangi
Væðingstí: 2. áfangi

Staðarnúmer: 78561
Starfsmær: SSJó/ASG



Skýringar við jarðlagasnið:

	Basalttuff		Surt tuff		Lítill ummyndun
	Basaltbreksia		Súr breksia		Meðal ummyndun
	Glerjóð basalt		Surt dul-méðalkorna berg		Mikil ummyndun
	Fin-méðalkorna basalt		Surt grófkorna berg		Innskot
	Grófkorna basalt		Svartf vantar		Meðal lóð

Mynd 4. Dæmi um jarðlagamælingar og jarðlagagreiningu frá holu HG-1 í Hágöngum.

verið og vænta má góðs árangurs. Samtúlkun svarfgreiningar og jarðlagamælinga leiðir af sér áreiðanlegri gögn en hver einstakur þáttur óstuddur hinum. Þannig má framlengja brotastrúktúra eins og þeir sjást á yfirborði með meira öryggi niður á eitthvað tiltekið dýpi sem holan skynjar auk þess má kortleggja þéttleika innskota með dýpi.

Rannsóknir á íslenskum jarðhitakerfum hafa leitt í ljós að sprungur og innskot stjórna rennsli jarðhitavökvans. Matrixulekt er venjulega mjög lág á meðan grop bergsins sýnir mikla spönn eða á bilinu 5-30%. Við slíkar aðstæður getur verið erfitt að hanna fyrstu borholu á nýju rannsóknarsvæði. Reyndar má segja að megindrættir hönnunar

Þ.e. þeir föstu liggja fyrir, er ná yfir víddir fóðringa og krónustærðir sem notaðar eru, en algjör óvissa er með sídd fóðringa. Það fellur í hlut jarðhitaráðgjafa á borstað, sem oftast er borholujarðfræðingur, að taka endanlega ákvörðun um fóðringasíddir. Þar er mestmegnis byggt á svarfgreiningu eins og áður hefur komið fram. Forborun háhitaholna er eins konar foráfangi borverks og oftast unninn með litlum meðfærilegum bor. Forborun miðast að því að fóðra af hrungjörn og lek yfirborðsjarðlög. Algengt dýpi er á bilinu 40-90 m. Fyrsti áfangi með háhitabornum er borun fyrir öryggisfóðringu, sem gjarnan nær niður á 200-400 m dýpi, síðan tekur við 2. áfangi við borun fyrir vinnslufóðringu niður á 700-1100 m dýpi. 3. áfangi er síðan borun vinnsluhluta. Áhersla hefur verið lögð á það í verkferlinu að borholujarðfræðingur staðsetji fóðringaskó steypu fóðringanna í stöndugum jarðlögum.

Varðveisla borsvarfs hefur gengið í gegnum ýmsar hremmingar í gegnum tíðina en fékk að lokum góða lendingu. Góður skilningur Orkuveitu Reykjavíkur á mikilvægi þess að varðveita svarfsýni frá borunum varð til þess að geymsluhúsnæði fékkst. Þar hefur orðið til völdugur gagnagrunnur sem nær yfir flestar jarðhitaboranir eftir 1960 og einstaka holur þar á undan.

Tilgangur og markmið með uppbyggingu gagngrunns borholugagna er í meginatriðum sem hér segir:

(i) Sinna hlutverki OS í gagnagrunsmálum (ii) Auka aðgengi að gögnum um auðlindir landsins (iii) Safna borsvarfi, borkjörnum og upplýsingum um borverk (iv) Varðveita á skipulagðan hátt borsvarf, borkjarna og rannsóknarniðurstöður sem því tengjast (v) Tölvuvæða gögn að því leyti sem unnt er að koma því við.

Sú skipan var á málum innan Orkustofnunar að Jarðhitadeild sá um að halda utan um borsvarfið enda megin þorri holna boraður vegna jarðhitaleitar og nýtingar. Það heyrði til algjörra undantekninga að borkjarnar voru teknir vegna jarðhitaborana. Vatnsorkudeild sá hins vegar mikið til um rannsóknaboranir, þar sem fyrirhugað var að reisa vatnsorkuver. Við þau verk voru aðallega kjarnaboranir. Það leiddi af sér þá skiptingu að borsvarfið var Jarðhitadeildar megin og kjarnarnir hjá Vatnsorkudeild. Við skipulagsbreytingu á Orkustofnun 1997 var Jarðhitadeild og hluta Vatnsorkudeildar steipt saman í Rannóknasvið Orkustofnunar (ROS). Breytingin kom því til leiðar að ROS var falin umsjón kjarna og svarfs. Veturinn 1999/2000 var allt borsvarf og sá kjarni er Orkustofnun varðveitti flutt úr geymslum í Keldnaholti. Borsvarfið fór í geymslu í Mosfellsdal en hluti svarfsins er geymdur á aðgengilegum stað á Grensásvegi þurkað í litlum ílátum og einnig upplímt á spjöldum. Kjarninn var aftur á móti fluttur í geymsluhúsnæði á Akureyri. Þar var í bígerð samvinna milli Náttúrufræðstofnunar og Akros (útibúi Orkustofnunar á Akureyri) um sameiginlega geymslu undir bergsýni, sem síðar meir gæti orðið vísir að öflugri rannsóknastarfsemi. Með stofnun Íslenskra orkurannsókna voru þessi verkefni ROS flutt yfir á ÍSOR.

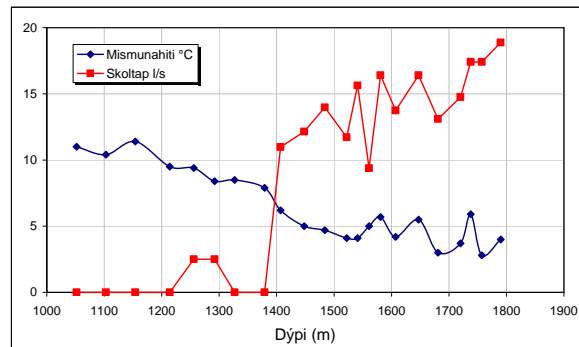
3. Eftirlit og söfnun borgagna

Meginmarkmið borana á jarðhitasvæðum er að skera öflugar æðar þar sem eðlis-eiginleikar eru góðir til nýtingar. Í mörgum tilfellum eru upplýsingar um jarðhitageyminn takmarkaðar og annars staðar eru vel þekkt sprungusvæði til að beina holu í. Eftirlit og söfnun borgagna hefur þann megingilgang að fá allar tiltækar upplýsingar á meðan borun stendur, sem getur nýst við verkið eða næstu borverk á svæðinu. Fyrir utan greiningu á borsvarfi og borhraða má fá sérstakar upplýsingar

með sískráningu á flæði skolvökvans og skyldum þáttum. Sískráningarkerfi borana hf. skráir eftirfarandi þætti með tíma: Dýpi, álag á krónu, snúning krónu (aðskilinn mótór og toppdrif eða snúningsborð), borhraða, snúningsvægi borstrengs, hæð toppdrifs (eða “elvators”) frá borpalli, þrýsting á dælum, magn skolvökva, skolhita niður og upp og mismunahita. Þar fyrir utan eru nokkrir þættir sem snúa beint að bortækinu. Söfnun borgagna hefur verið skipt niður í meginsvið:

- Mæling á aukningu eða tapi tapi skolvökvans.
- Mæling á hita skolvökva niður og upp, þar með mismunahita.
- Mæling á magni skolvökva sem dælt er niður og þrýstingi á bordælum.
- Þegar notuð eru MWD-tæki (measure while drilling) er skráður reglulega hiti frá innbyggðum hitanema sem er fáeina metra ofan við borkónu.

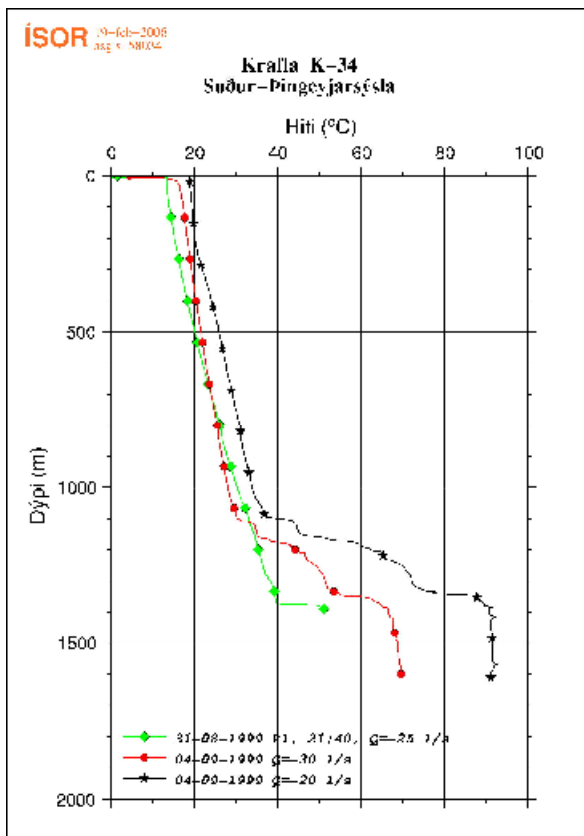
Skoltap, sem er veigamikill þáttur til að fylgjast með í borun, er ekki komið inn í sískráningarkerfið. Því veldur skortur á nothæfum mælitækjum til að nema breytingar í frárennsli borsins. Þess í stað hefur sú regla verið að mæla og skrá á fjögurra tíma fresti mismun á skoli niður og upp. Ef sérstakar ástæður gefa tilefni til tíðari skráninga er það gert.



Mynd 5. Mælingar á skoltapi og mismunahita í holu KJ-34 í Kröflu.

Tveir óháðir þættir sem fylgst var með við borun vinnsluhluta holu KJ-34 í Kröflu eru sýndir á mynd 5. Hæg regluleg breyting mismunahita með dýpi er vísbending um einhverja lekt en ekki mikla.

Snöggglækkun sést síðan á sama tíma og fyrsta greinilega skoltap mældist. Hvoru tveggja staðfestir að góð æð hafi verið skorin. Þessi hitabreyting er vegna aukinnar dælingar vegna skoltapsins til kælingar og skolunar. Stöðug lækkun mismunahita staðfestir lekt en segir ekkert til um berghita, sem í þessu tilfalli er rétt við suðumarksferil eða um eða yfir 300°C. Það var staðfest síðar í hitamælingum eftir borun.

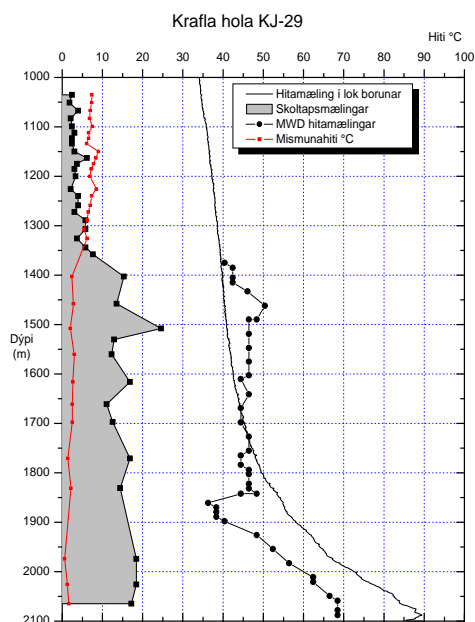


Mynd 6. Hitamælingar við borun vinnsluhluta holu KJ-34 í Kröflu.

Mynd 6 sýnir hitamælingar frá stuttum hléum meðan verið var að bora vinnsluhluta holu KJ-34 í Kröflu. Í hverri mælingu var holan kæld með 25, 30 og 20 l/s dælingu í þessari röð. Dælt var um kæfingarstút á holutoppi. Hitamælingarnar sýna tímabundna kælingu á berginu og mjög sterkar vísbendingar eru um æðar. Lesa má út úr myndinni

og staðsetja æðar niður að meginæðinni í botni holunnar á um 1600 m dýpi. Sú regla var viðhöfð að mæla í hvert skipti sem borstrengur var tekinn úr holu. Tvennt skiptir þar máli. Annars vegar að staðsetja sem best æðar sem skornar höfðu verið og hins vegar að veita bormönnum upplýsingar um hversu djúpt kæling frá holutoppi náði en það auðveldaði þeim næstu niðursetningu borstrengs. Í þessu tilviki þá sýndu upphitunarmælingar eftir borun berghita yfir 300°C sem var í góðu samræmi við dreifingu ummynduarsteinda eins og þær sáust í borsvarfi.

Gott tækifæri gafst til að fylgjast með MWD-hita mældum rétt ofan við borkrónu við borun vinnsluhluta holu KJ-29 í Kröflu. Auk þess sem fylgst var með öðrum þáttum borverksins. Upplausn hitamælis í tækinu var mjög lítil, þ.e. hún hljóp á gráðum, en



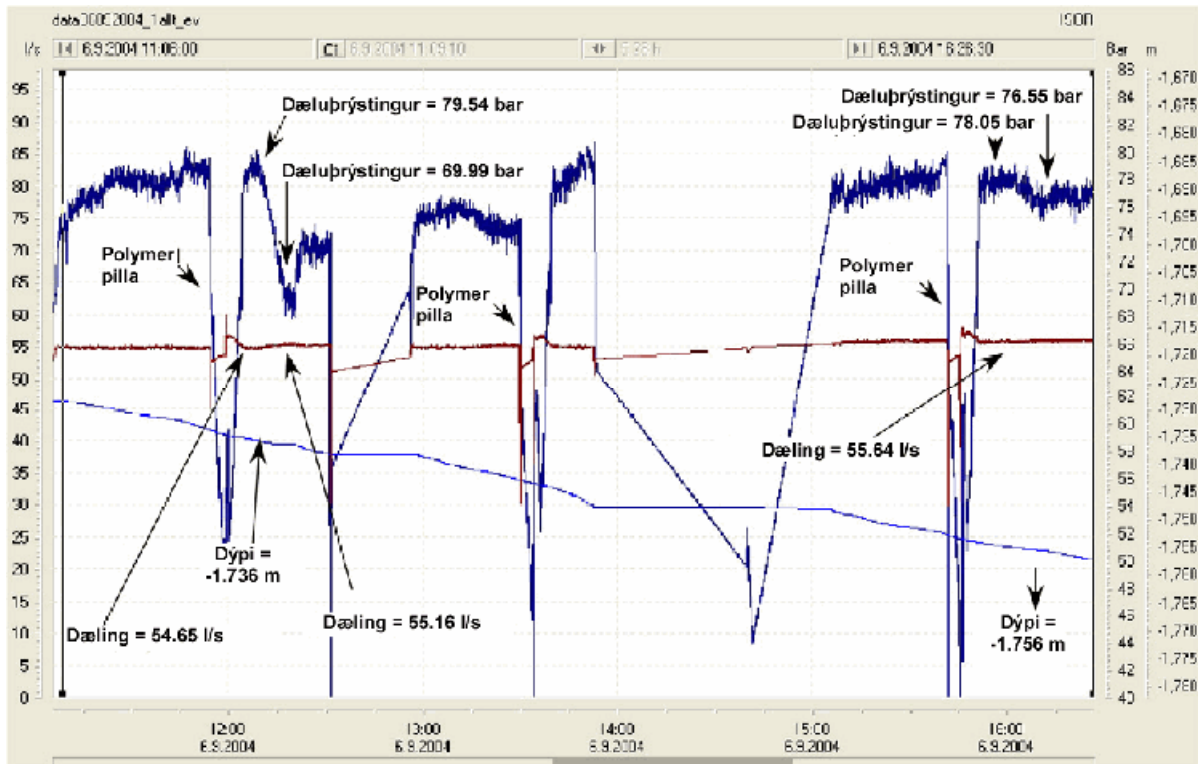
Mynd 7. Gögn úr holu KJ-29 í Kröflu meðan vinnsluhlutinn var boraður.

undir þessum kringumstæðum skipti það ekki stóru máli. Lögun MWD-hitaferilsins á mynd 7 sýnir litlar hitabreytingar niður undir 1900 m dýpi, þar sem samfelld hitaaukning sést til botns. Út frá þessum upplýsingum var grundvölluð sú tilgáta að hitanemi nærri krónu gæfi mikilvægar upplýsingar um lekt meðan á borun stendur. Það vill segja að stöðug hækkun eins og neðan 1900 m gefur sterklega til kynna að holan sé þétt á þeim kafla. Niðurstöður hitamælinga við borlokin sýna hitaferil með svipaða lögun og styðja þessa hugmynd. Þegar mismunahiti og skoltapsmælingar eru felldar inn í sömu mynd sést að ef aðeins væri stuðst við þær mælingar má túlka leka holu langleiðina niður til botns. Mæliaflesturinn frá MWD-tækinu barst upp til yfirborðs með skolvökvanum meðan á borun stóð, en gögnin voru einnig varðveitt í minniskubb í tækinu.

Dæluþrýsting er nauðsynlegt að skrá ásamt dælingu meðan á borun stendur. Þrýstifall getur orðið án þess að breyting hafi verið gerð á dælingu. Það gæti merkt, (i) tímabundið algjört skoltap (ii) allt skol tapast (iii) gat eða skemmd á borstreng. Fyrst er kannað hvort eitthvað sé athuganarvert við borstrenginn. Ef hann reynist í lagi þá er næsta víst að æð hefur verið skorin á því dýpi sem þrýstifallið varð.

Áður fyrr var borun gjarnan hætt fljótlega eftir að komið var í algjört skoltap. Í seinni tíð hefur borun hins vegar verið haldið áfram og jafnvel borað fleiri hundruð metra án þess að skol skilaði sér til yfirborðs, sem kallað hefur verið “blind borun”. Í slíkum tilvikum eru magn skolvökva og dæluþrýstingur áreiðanlegustu þættirnir til að fylgjast með hvað er að gerast í holunni. Sérhver þrýstibreyting við óbreytta dælingu er vísbending um breyttar aðstæður í holunni og líklega að ný æð hafi verið skorin. Einnig er sá möguleiki að æðar opnast enn frekar þar sem skolvökvin og svarfið flæða út úr holunni. Ef þrýstifall reynist viðvarandi eða helst tímabundið þrátt fyrir að holan dýpki er það áreiðanleg vísbending um að ný æð hafi verið skorin. Ferlarnir á mynd 8 sýna dæluþrýsting, dælingu og dýpkun með tíma. Gögnin eru fengin úr síritandi gagnaskráningarkerfi Jarðborana hf.. Skráningin er á þeim tíma þegar borað var með algjöru skoltapi í holu HE-12 á Hellisheiði. 30 m dýptarbil neðan 1730 m var valið til skoðunar. “Polymer-pillur”, sem dælt er niður til að hreinsa holuna lækka

þrýstinginn umtalsvert, þar sem viðnám í stöngum og allri skolrásinni minnkar. Það sést mjög greinilega á þrýstiferlunum á mynd 8. Þegar borað er í algjöru skoltapi eru “polymer-pillur” sendar niður með reglulegu millibili til að hreinsa svarf úr holunni og lágmarka hættu á festu. Á mynd 7 sést 9,5 bar þrýstifall við stöðugt flæði á 1736 m dýpi, sem er sterk vísbending um að æð hafi verið skorin. Áframhaldandi lágur dæluþrýstingur niður styður ennfrekar þessa túlkun. Annað þrýstifall á 1756 m dýpi, minna í sniðum, er einnig vísbending um aukinn leka, sem er annað hvort ný æð eða opning á áður skorinni æð eða æðum. Í báðum tilfellum voru fyrstu viðbrögð að kanna hvort borstrengurinn væri örugglrga heill.



Mynd 8. Skráning á skolvökva og þrýsting á dælum í “blind borun” þegar æðar voru skornar.

4. Borholumælingar á bortíma

Í rannsóknaráætlun um mælingar í borholum á háhitasvæðum er alltaf gert ráð fyrir að mæla holur eins oft og tækifæri gefst í borverki í þeim tilgangi að fá eins miklar upplýsingar og mögulegt er um ástand viðkomandi holu og jarðhitakerfið. Venjulega er mælingabíll til reiðu 24 tíma á sólarhring meðan á háhitaborun stendur. Ef borun er stöðvuð einhverra hluta vegna og borstrengur tekinn úr holu, er hitamælt í flestum tilfellum. Eins og áður hefur komið fram þá er mælingin gerð vegna upplýsingaöflunar sem lýtur að þekkingu á jarðhitakerfinu, ástandi holunnar og öryggi við borun. Þótt hola sé stöðug kæld getur millirennslí í holunni takmarkað áhrif kælingar og skapað viðsjárverðar aðstæður. Ekki má vanmeta upplýsingar, sem fást með hitamælingum, varðandi öryggisþáttinn fyrir boráhöfn. Varðandi holuna sjálfa þá er hægt að staðsetja æðar, meta lekt og upphitunarhraða. Fyrir niðurstetningu á borstreng sést hve ádælingarvatnið um kæfingarstút kæli holuna langt niður. Það kemur sér vel fyrir bora eins og Jötunn sem getur slakað niður tæplega 30 m lengju í einu en án kælingar. Við niðurstetningu er gjarnan miðað við að borkrónan fari ekki í hærri hita en 100°C. Þar sem holuhiti er kominn yfir 100°C þarf að ávallt að kæla á undan krónunni (mynd 6). Í sumum tilfellum getur verið upplýsandi að þrýstimæla til að

kanna vatnsborðsstöðu eða taka stutta ádælingaprófun til að meta lekt holunnar á þeim tímapunkti. Víddarmælingar hafa stundum verið gerðar þegar einhver hrun eða skolunarvandráði hafa verið í borun. Hallamælingar hafa verið fastur liður við boranir síðustu 25 ár. Með tilkomu stefnuborana hafa halli og stefna verið mæld í þeim holum. Gýrósmælingar hafa sýnt sig að vera einu áreiðanlegu stefnumælingarnar hvað það varðar, þar sem reynsla er kominn fyrir því að tæki með seguláttavita verða fyrir truflunum í íslensku bergi.

Eins og áður hefur komið fram er það fastbundin regla að gera jarðlagamælingar í opinni holu eftir hvern áfanga áður en fóðringum er komið fyrir. Mælingarprógramið felur í sér hita-, víddar-, 16" viðnáms-, 64" viðnáms-, nifteindar- og náttúrlega gamma-mælingu. Síðustu fjórar mælingarnar eru almennt nefndar jarðlagamælingar. Samsett snið af öllum mælingum er síðan útbúin ásamt jarðlagagreiningu (mynd 4). Þróun á þessum mælingum hefur að mestu verið í olíuönaðinum og síðan yfirferð í jarðhitann með góðum árangri. Aðlögun úr setlagajarðlögum olíuönaðarins yfir í eldfjallaumhverfi jarðhitans hefur tekist ágætlega. Ýmsar aðferðir við túlkun mælinganna hér á landi hafa verið þróaðar af íslenskum jarðhitamönnum eins og að yfirfæra náttúrlegt gamma yfir í í kísilsýruinnihald (SiO_2) í bergi (Valgarður Stefánsson o.fl., 2000) og breyta gildum nifteindardreifingar yfir í grop (Geirfinnur Jónsson & Valgarður Stefánsson, 1982, Valgarður Stefánsson o.fl. 1997 og Valgarður Stefánsson 1998)

5. Borlok.

Þegar borun holu er lokið, holan hefur verið skoluð og borstrengur verið tekinn upp, þá hefjast mælingar eins og lýst hefur verið hér á undan. Metið er hvort lekt holunnar uppfyllir væntingar eða hvort nauðsynlegt sé að örva hana til að bæta lektina. Í þessu sambandi ber að hafa í huga að borunin er ekki einungis hugsuð til að búa til gat í jörðina heldur er nauðsynlegt að þar streymi upp sú orka sem verið er að sækjast eftir. Þess vegna hefur verið lögð rík áhersla á aðferðir til að auka lekt holunnar eftir að borun hennar er lokið. Svarf leitar út í æðar og stíflar þær í borun en með örvun í lokin er reynt að opna æðarnar á ný. Hver hola hefur sín einkenni og miðast borlokaprómið við það. Í sumum tilfellum getur þurft að hita og kæla holuna á víxl til að ná árangri. Þannig geta myndast kælispungur í berginu sem geta náð inn í virk sprungukerfi rétt utan holuveggja eða opnast tímabundið og lokast svo. Árangur er venjulega metinn útfrá skoltapsbreytingum meðan örvunaraðgerðir standa yfir og síðan ádælingastuðli, sem fenginn er með þrepaprófun í lokin. Í sumum tilfellum hefur lektin margfaldast við örvunaraðgerðir en viðmiðunargildið er venjulega gefið upp í einingunni l/s á bar. Aðgerðirnar geta tekið marga sólarhringa og reynir oft á þolrifin hjá þeim sem stjórna. Þess vegna er gott að hafa í huga að megintilgangur borunar er að holan skili árangir sem vinnsluhæf hola en er ekki bara gat í jörðina.

6. Varðveisla gagna og útgáfa

Borholujarðfræðingur sinnir ekki aðeins rannsóknum, vísindum og jarðhitaráðgjöf heldur þarf hann að upplýsa samstarfsaðila um framgang verksins reglulega. Eitt af skylduverkunum er að senda út dagskýrslur þar sem tíundað er hvernig borun hefur gengið sólarhringinn á undan og hvað er nýtt að fréttu úr undirdjúpunum. Dagskýrslan er birt á heimasvæði ÍSOR á netinu og þarf aðgangsorð til að komast inn. Þetta fyrirkomulag auðveldar öllum sem að verkinu koma að afla sér upplýsinga og að fylgjast með. Þetta sparar fjölda símtala þó ekki þannig að það verði einmanalegt

á borstað. Auk þess er borholujarðfæðingur ábyrgur fyrir útgáfu á áfangaskýrslum. Þar eru öll gögn varðandi borunina birt, sem á annað borð er áhugavert leyfilegt að birta. Þar er tekið saman forsendur borunar, yfirlit um gang borunar, lýsing jarðlaga, ummyndunar og vatnsæða, fjallað um borholumælingar og þrepaprófun og í viðauka eru birtar allar dagskýrslur sem áfangaskýrslan nær yfir.

7. Samantekt

Hér á undan hefur verið lögð áhersla á nauðsyn þess að nýta bestu fánlegu þekkingu, reynslu og skilning til þess að ná sem bestum árangri úr hverju borverki. Það hefur sýnt sig að samhæfður hópur sérfræðinga nær bestum árangri í slíkum verkum. Hópskipan getur verið með margvíslegum hætti en góð reynsla er fyrir að hópinn skipi fulltrúi verkkaupa, fulltrúi borfyrirtækis, jarðfræðingur, mælingamaður og borverkfræðingur. Stundum gegnir einn maður tveimur af áðurgreindum hlutverkum sem er í góðu lagi. Ef einn maður ætlar að gegna mikið fleiri hlutverkum dregur úr tjáskiptum og einstaka verkþættir geta þurft að líða fyrir það.

Gildi þess að leita eftir þekkingu og leiða til að nota hana skal aldrei vanmeta.

Þakkarorð

Benedikt Steinari Steingrímssyni eðlisfræðing á ÍSOR færi ég bestu þakkir fyrir yfirlestur og gagnlegar ábendingar.

Heimildir

- Árni Ragnarsson, Þorkell Helgason & Helga Barðadóttir, 2004: Energy in Iceland, historical perspective, future outlook. National Energy Authority and Minister of Industry and Commerce, february 2004, 45p.
- Ásgrímur Guðmundsson, 1993: Jarðlagasnið um holur BJ-11 og BJ-12 í Bjarnarflagi. OS-93071/JHD-35 B 46.
- Geirfinnur Jónsson & Valgarður Stefánsson, 1982: Density and Porosity Logging in the IRDP Hole, Iceland, *Journal of Geophysical Research* 87, B8 6619-6630
- Hjalti Franzson, 1998: Reservoir Geology of the Nesjavellir High-Temperature Field in SW-Iceland, *Proceedings 19th Annual PNOC-EDC Geothermal Conference*, Manila, Philippines, March 5-6th 1998 13-20
- Hrefna Kristmannsdóttir, 1979: Alteration of basaltic rocks by hydrothermal activity at 100-300°C. In: *Development of sedimentology* (eds Mortland, M & Farmer, V.), pp. 359-367. Elsevier, Amsterdam.
- Valgarður Stefánsson, Steinar Þór Guðlaugsson & Ásgrímur Guðmundsson, 2000: Silica Content and Gamma Ray Logs in Volcanic Rocks, *World Geothermal Congress*, Japan May 29 - June 10, 2000 5
- Valgarður Stefánsson, Ómar Sigurðsson, Ásgrímur Guðmundsson, Hjalti Franzson, Guðmundur Ómar Friðleifsson & Helga Tuliníus 1997: Core Measurements and Geothermal Modelling, *Second Nordic Symposium on Petrophysics. Fractured Reservoirs*. Nordic Petroleum Technology Series: One 199-220
- Valgarður Stefánsson, 1998: The Relationship between Thermal Conductivity and Porosity of Rocks, *Nordic Petroleum Technology III* 201-219.

Rekstur og viðhald háhitahola

Geir Þórólfsson, Hitaveitu Suðurnesja

Borholutoppar þurfa að vera afskaplega öruggur búnaður. Megin hlutverkið er að geta lokað fyrir borholuna, nánast sama hvað gengur á í jarðhitakerfinu. Þar að auki þarf að vera hægt að stilla rennsli borholunnar vegna virkjunar, koma niður mælum til þess að mæla hita og þrýsting niðri í holunni, taka efnasýni og einnig þarf að vera auðvelt að fjarlægja hluta af toppnum til þess að hægt sé að setja upp jarðbor til hreinsunar á holunni. Hér á eftir verður fjallað um ýmsa hluta holutopps og sagt frá reynslu Hitaveitu Suðurnesja.

Blenduloki

Fyrstu árin var rennsli úr borholum í Svartsengi stillt með blendum. Í blendunum var holutoppsþrýstingur lækkaður niður í skiljuþrýsting, úr 14 til 25 bar niður í 6,5 bar. Þá var ekkert hægt að vera að hringla með rennslið eftir álagi á hitaveituna heldur voru holunnar reknar á tveimur stillingum, sumarstilling og vetrarstilling. Við í rekstrinum, sáum alltaf fyrir okkur, í hyllingum, stjórnloka, sem réði við þetta rennsli, en slíkur var þá ekki til á markaðinum.. Slit er aðal óvinurinn þegar þrýstifall er svona mikið. Buna vatns og gufu á hljóðhraða og hátt í 200 gráðu hita, étur stál með góðri lyst í morgunmat. Streymið út úr loka þarf því að vera symmetrískt og mesti hraðinn eftir miðju rörs. Blenda er bara gat í stálplötu. Stillanleg blenda er því alveg gráupplögð sem stjórnloki. Svokallaður Ellaloki er einmitt það, kólfur gengur í gatið og breytir þverskurðarflatarmálinu. Ellalokinn heitir eftir höfundu sínum, Erlendi Guðmundssyni vélvirkja hjá HS.



Mynd 1: Horft blendumegin inn í Ellaloka, eftir prófanir á REY H010.

Aðalloki

Aðalloki á borholu þarf að vera ákaflega öruggt tæki. Því miður hefur reynslan verið svona upp og ofan. Aðalholulokinn hefur alla tíð verið “expanding gate valve”, þ.e.

loki með rennisþjaldi, sem er útbúið með fleygum, sem pressa spjaldið að þéttflötum í húsi lokans. Einnig er hann gegnumboranlegur með 12 ¼" krónu. Upphaflega komu þessir lokar frá WKM (nú Cameron), síðan fengum við loka frá Barton, en nú eru þeir frá TIX í Japan.

Fyrir 15-16 árum fórum við að mixa glussatjakka á þessa loka og eru nú allar borholur með þessháttar drifbúnaði. Ýmist er notuð færanleg díseldrifin glussadæla, eða staðbundin, rafdrifin, til þess að knýja lokana. Það fyrsta sem bilaði á aðaloka áður fyrr var að þrýstilegan í hálsinum fór í köku. Nú þurfum við engar áhyggjur að hafa af því, því að með glussatjakki þarf ekki að snúa neinu.

Þá var það pyttatæring á spindli á pakkdósarsvæðinu. Upphaflegu spindlarnir voru úr krómuðu öxulstáli. Brennisteinsvetnið sá um að brjóta upp krómhúðina og síðan átti jarðsjór að innan og súrefni loftsins auðvelt með að klára málið. Við keyptum okkur SAF 2205 duplex ryðfrítt stál og smíðuðum nýja spindla úr því. Það hefur dugað. Lokaframleiðendur eiga oft erfitt með að skaffa þetta efni í spindla, en 17- 4 PH ryðfrítt skv. ASTM staðli hefur dugað ágætlega í staðinn.

Tappinn

Skipta þurfti um holuloka og flans á fóðringarenda á holu 10 í Svartsengi. En hún er með þeim ágætum að vera hrein gufuhola og ekki hægt að drepa hana með því að dæla á hana. vatni. Var því leigður pakkari, þetta var ca. um 1987, hann var settur í holuna og skipt um það sem þurfti. Þar með var hægt að stela hugmyndinni og Elli smíðaði pakkara fyrir okkur.



2. mynd: Hreinsiboranur í blæstri í Svartsengi. Myndin er frá seinni hluta síðustu aldar.

Hreinsiboranir

Á fyrstu árum starfseminnar í Svartsengi myndaðist kalktappi í borholunum á suðusvæðinu á 500 til 600 m dýpi. Útfellinguna varð að hreinsa á tveggja ára fresti. Hitaveita Suðurnesja ásamt Jarðhitadeild Orkustofnunar (nú ÍSOR) og Jarðborunum þróðu aðferð við að hreinsa borholurnar í blæstri. Með þeirri aðferð nást útfellingarnar upp á yfirborðið og borholan kólnar ekki niður. Búnaðurinn sést ámyndum

2og 3. Borinn þarf aðvera útbúinn með toppdrifi, borstangirnar þurfa að vera sléttar og borað er gegnum vatnskælda pakkdós og hliðarveitistykki (side outlet spool).



3. Mynd: Hreinsiborunarbúnaður HS og Jarðborana. lengst til hægri sést í borkrónuna, þá kemur "spúlpísið" sveri stúturinn er hliðarúttakið en sá granni kælivatnsinntak. Blái hlunkturinn er öryggislokinn og við hann er pakkdósin fest. Út úr pakkdósinni stendur loks kalli.

Vegna lítilsháttar breytinga á kolsýruinnihaldi jarðhitavökvans á síðustu arum hefur kalkútfelling horfið. Þ.e. afgangur hefur breytt efnajafnvæginu (Sjá skýrslu JÖB). Þess vegna hefur ekki þurft að hreinsa borholu í áratug, en í byrjun þurfti þess allt að annað hvert ár.

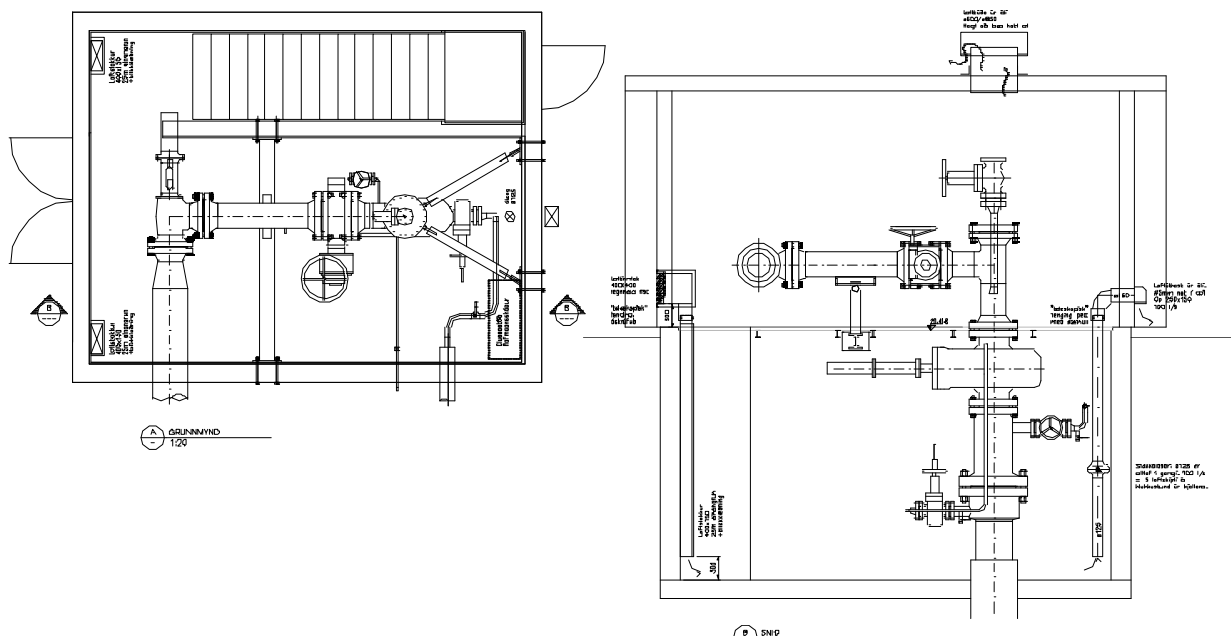


4. mynd: Holutoppur H- 16 í Svartsengi. Aðalloki er með glussatjakk. Hvíta efnið er ásprautuð einangrun.

Hönnun holutoppa

Í Svartsengi höfum við hannað holutoppa samkvæmt ANSI staðli Class 600 lb. Hæsti mældi hiti í borholu í Svartsengi er 242 °C, en það samsvarar 33,6 bar yfirþrýsting. Á Reykjanesi hefur botnhiti hins vegar mælst allt að 315°C í holu 10 en það samsvarar 104,5 bar yfirþrýsting. Þar höfum við valið að nota búnað fyrir Class 900 lb. Þar er hönnunaráraun miðuð við 300 °C og 110 bar. Röraefni er St. 35.8 heildregin rör, stærð Ø323,9 x 20 mm

Á Reykjanesi verður ný gerð af holukjöllurum og húsum yfir. Þar verður hægt að opna og loka aðalloka fjarstýrt, ekki þarf að fara til þess ofan í kjallara. Af því leiðir minni slyshætta ef lekar eru.



Mynd 5: Hér getur að líta grunnmynd og snið af holutopp, kjallara og skýli.

Holuloki 2 svokallaður hefur oftast verið einu númeri léttari en aðallokinn, nema á Reykjanesi þar sem við höfum haldið 900 punda klassa að Ellaloka, sem er eftir DIN staðli PN160.

Hliðarlokar voru áður fyrr rennilokar. Fyrir nokkrum árum komu á markað svokallaðir “triple excentric” spjaldlokar með málsætum. Byrjað var á að prófa þá í Svartsengi fyrir upp. 8 árum síðan og þá í 300 punda klassa. Reynslan er það góð að fyrir holur á Reykjanesi voru keyptir þesskonar lokar frá Vanessa, class 900 lb, með RTJ flönsum. Veláminnst, RTJ flansapéttingar á 600 og 900 punda flönsum hafa verið notaðar árum saman í Svartsengi með góðum árangri. Þessi gerð af flansapéttingu varð einkum mikilvæg eftir að asbestrefjastyrktar pakkningar hættu að fást og eru nú notaðar á flönsum niður í class 300 pund. Þetta þýðir að neðan PN 40 þrýstiklassa notum við DIN flansa, en ANSI fyrir ofan.



Mynd 6: Hér sést þensluslíf á holu REY H017. Að neðan er soðið við 18 5/8” öryggisfóðringuna, endinn á 13 3/8” er laus inní, en pakk á milli.

Nú erum við meira segja orðnir svo flottir að við erum farnir að nota þensluslíf á holutoppna. Það kemur reyndar ekki til af góðu, því að við prófanir á holu 10 fór að leka milli fóðringa, þ.e. leki kom upp utan með vinnslufóðringunni. Í ljós kom að gengjur á efstu múffunni höfðu gefið sig. Gripið var til þess ráðs að grafa niður fyrir múffuna á um 10 m dýpi. og skipta um hana og efsta hluta fóðurrörsins.



Mynd 7: Hér er verið að fleyga klöpp við holu REY H010.

Nýjungar í tækjabúnaði jarðbora

Þór Gíslason, Jarðboranir hf

Gríðarlegar framfarir hafa orðið í tækjabúnaði bora á síðasta áratug eða svo. Tölvutæknin hefur komið til sögunnar í þessum iðnaði eins og öðrum og sífellt eru gerðar strangari kröfur til öryggismála og almennt vandaðs vinnuumhverfis. Mikil áhersla hefur verið lögð á umhverfismál, þar sem leitast er við að lágmarka umhverfisáhrif við framkvæmd borverka með tæknilegum útfærslum.

Við framkvæmd hinna umfangsmiklu og á tíðum flóknu borframkvæmda hefur þróun í borbúnaði og bortækni leitt til styttri verktíma, lækkun kostnaðar, fækkun vinnuslysa, færri “uppákomur” í borverkum, auknir möguleikar til úrlausna við “uppákomum” í borverkum og þrátt fyrir aukinn búnað og aflmeiri hafa borplön minnkað.

Vinnuumhverfið:

- Viðvera starfsmanna í námunda við þunga hluti á hreyfingu og í snúningi orðin nánast engin.
- Viðvera starfsmanna í nágrenni við holutopp í lágmarki.
- Vinna í mikilli hæð, ekki lengur til staðar.
- Vinna við að lyfta eða færa til þunga hluti, ekki til staðar.
- Þess í stað sjálfvirk meðhöndlun borstrengs, sem stjórnað er frá stjórnhúsi.
- Í flutningi eru flest æki á eigin hjólum eða gámalyftu tæk. Hífingar á þungum einingum, oft í misjöfnum veðrum, í lágmarki.
- Vinnustaðurinn hefur breyst frá því að vera fyrst og fremst líkamlega erfiður, þar sem vinna fer fram utandyra, oft við mjög erfiðar aðstæður vegna veðurs og hávaða, í að vinnustaðurinn krefst þekkingar, nákvæmni í vinnubrögðum og er því áskorun sem laðar að hæfari einstaklinga.

Umhverfismál:

- Sífellt minni borplön.
- Borplön með olíudúk og gildrum í tilfelli leka.
- Dieselolíutankar skv. ströngustu kröfum, m.a. tvöfaldir.
- Vatn sem notað er til borunar er hreinsað og magnið takmarkað, áður en það fer frá bornum.
- Hljóðmengun undir mörkum.
- Öll efni sem notuð eru til borunar s.s. borleðja og borsápa umhverfisvæn.
- Öll notkun á diesel olíu, olíuvörum og efnum til borunar, vöktuð þannig að nákvæmlega er vitað hvað fór til verksins, hvað var notað og hvað fór til baka. Olíuskiljur vaktaðar reglulega, allan sólarhringinn.

Gæðamál:

- Unnið skv. fyrirfram ákveðnum ferlum sem verkkaupi samþykkir.
- Borstrengur allur merktur og skoðaður reglulega, þannig að góð yfirsýn er yfir ástand alls búnaðar sem fer í holu. Niðurstöður notaðar til að endurmeta verkferli, efnis- og búnaðarval.
- Ný bortækni s.s. stefnu borun og loftblönduð borun.
- Aukinn og betri búnaður, bæði á yfirborði og niður í holu gerir það að verkum að gæði verkframkvæmdar hefur aukist, auknir möguleikar í tilfelli vandræða í borun, og lækkun kostnaðar.

Verkhraði og kostnaður:

- Á þessu ári er gert ráð fyrir að ná því marki að borun 2000 m djúprar háhita holu taki u.þ.b. 35 daga að meðaltali, en áður hefur verið miðað við u.þ.b. 45 daga.
- Stytting verktíma felst aðallega í eftirfarandi þáttum:
 - Flutningar taka styttri tíma, þar sem einingar borsins eru sérhannaðar fyrir íslenskar aðstæður.
 - Aukinn borhraði (m/klst), með notkun bormótors, sérhönnuðum borkrónum, markvissari vinnuferlum og aflmeiri búnaði.
 - Hraðari meðhöndlun fóðringa.
 - Minni veðurtafir, þar sem tækin eru sérhönnuð fyrir íslenskar aðstæður.
 - Auðveldari meðhöndlun öryggisbúnaðar.

Upplýsingatækni:

- Sjálfvirkt skráningarkerfi.
- Verkfræðistofan Vista hefur sérhannað sjálfvirkt upplýsingakerfi fyrir Jarðboranir. Skynjarar mæla helstu breytur við framkvæmd borverks og notar kerfið þær upplýsingar ýmist beint eða til útreikningar á kennistærðum sem notaðar eru til að "lesa" holuna og hámarka afköst og öryggi við borun.
- Unnið er frekar úr upplýsingum frá sjálfvirku upplýsingakerfi.
- Upplýsingar frá sjálfvirku upplýsingakerfi eru "on line" aðgengilegar fyrir tæknimenn Jarðborana sem frá skrifstofu eða heimili sínu hafa aðgang að sömu upplýsingum og bormenn og geta því betur en áður stutt verkstjóra á verkstað, þegar álitamál koma upp.
- Verkkaupi og ráðgjafar hafa jafnframt beinan aðgang að upplýsingakerfi.

Búðnaður í holu:

- Gífulegar framfarir hafa jafnframt sért stað í þróun búnaðar sem settur er í borstreng í borun (while drilling). Hér má nefna:
 - Mælitæki og búnaður til stefnuborunar "MWD".
 - Mælitæki og búnaður til 100% beinnar borunar.
 - Mælitæki er mæla ástand og helstu breytur í borun örfáa metra frá borkrónu.
 - Mælitæki til jarðlagamælinga í borun.
 - Vökva hamrar.
 - Öfug skolun, til notkunar í víðum holum.

Ímynd:

Gestir, innlendir sem erlendir, er heimsækja nýjustu jarðbora á Íslandi eiga vart orð af hrifningu. Nýjustu tækni má sjá hvert sem litið er og starfsmenn og aðrir sem að verki koma, sýna tæki, tækni og vinnubrögð af miklu stolti.

Viðbrögðin eru helst þau að hvergi í heiminum séu jafn tæknilega fullkomnir borar, hreinir og hljóðlátir litlir borar, öruggt vinnu umhverfi, jafn lítið pláss tekið undir verksvæði, jákvætt viðhorf og góður aðbúnaður.

Glögg er gests augað.





Borfloti Jarðborana hf

