



ORKUSTOFNUN

Rannsóknasvið

Hönnun háhitaholu við Bakkahlaup í Öxarfirði og rannsóknaráætlun

**Guðmundur Ómar Friðleifsson
Sverrir Þórhallsson
Steinar Þór Guðlaugsson
Halldór Ármannsson
Jón Eiríksson**

Unnið fyrir "Öxar við ána" hópinn

1998

OS-98010



ORKUSTOFNUN
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verknr. 630 671

Guðmundur Ómar Friðleifsson, OS
Sverrir Þórhallsson, OS
Steinar Þór Guðlaugsson, OS
Halldór Ármannsson, OS
Jón Eiríksson, RH

Hönnun háhitahola við Bakkahlaup í Öxarfirði og rannsóknaráætlun

Unnið fyrir "Öxar við ána" hópinn

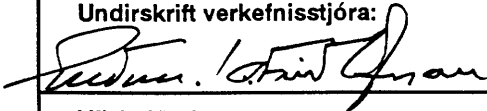
OS-98010

Mars 1998

ISBN 9979-68-010-5

ORKUSTOFNUN: Kennitala 500269-5379 - Sími 569 6000 - Fax 5688 896
Netfang os@os.is - Heimasíða <http://www.os.is>



Skýrsla nr.: OS-98010	Dags.: Mars 1998	Dreifing: Opin <input checked="" type="checkbox"/> Lokuð til ^{30/4 2003} <i>Gf</i>
Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill: HÖNNUN HÁHITA HOLU VIÐ BAKKAHLAUP Í ÖXARFIRÐI OG RANNSÓKNARÁÆTLUN	Upplag: 40	
	Fjöldi síðna: 66	
Höfundar: Guðmundur Ó. Friðleifsson (OS), Sverrir Þórhallsson (OS), Steinar Þór Guðlaugsson (OS), Halldór Ármannsson (OS), Jón Eiríksson (RH)	Verkefnisstjóri: Guðmundur Ómar Friðleifsson	
Gerð skýrslu / Verkstig: Hönnun háhitaholu, rannsóknaráætlun	Verknúmer: 630 671	
Unnið fyrir: 'Öxar við ána' hópinn		
Samvinnuaðilar: 'Öxar við ána' hópurinn: Öxarfjarðarhreppur, Kelduneshreppur, Orkuveita Húsavíkur, Rafveita Akureyrar, Hitaveita Akureyrar, Landsvirkjun, Jarðboranir hf. og Rafmagnsveitur ríkisins		
Útdráttur: Skýrsla þessi fjallar um hönnun fyrstu djúpu háhitaholunnar við Bakkahlaup í Öxarfirði. Gert er ráð fyrir að holan verði 2000 m djúp. Af öryggisástæðum þarf að hafa fjórar steyptrar fóðringar (90 m, 200 m, 365 m, 775 m) í holunni í stað þriggja eins og venja er. Með því að bora grunna könnunarholu í um 365 m dýpi mætti hugsanlega sleppa við 200 m yfirborðsfóðringu í aðalholuna. Háhitaholunni er fyrst og fremst ætlað að kanna tilvist háhitasvæðis og vinnslueiginleika þess með raforkuframléiðslu í huga. Hún er þó einnig ætluð til að kanna hvort jarðgas og olía kunní að hafa myndast í setlagastaflanum í Öxarfirði. Gert er ráð fyrir sérstökum tækjabúnaði, sýnatöku og rannsóknum vegna gass og olíu, en að öðru leyti er rannsóknaráætlunin svipuð og við boranir í önnur háhitasvæði landsins.		
Lykilorð: Háhitahola, hönnun, rannsóknaráætlun, Öxarfjörður, Bakkahlaup	ISBN-númer: 9979-68-010-5	
	Undirskrift verkefnisstjóra: 	
	Yfirfarið af: HÁ	

Efnisyfirlit

1. Inngangur.....	5
2. Markmið með rannsóknarholu og bakgrunnsþekking.....	6
3.1 Markmið.....	6
3.2 Bakgrunnsþekking.....	7
3. Staðsetning borholu.....	14
4. Jarðfræðilegar aðstæður með tilliti til borunar.....	17
5. Fóðringar og dýpi.....	20
5.1 Kröfur um lágmarksdýpi fóðringa.....	20
5.1.1 Vinnslufóðring (9 5/8").....	22
5.1.2 Öryggisfóðring (13 3/8").....	22
5.1.3 Yfirborðsfóðring (18 5/8").....	22
5.1.4 Leiðirör (22").....	22
5.2 Fóðringar í holunni.....	24
6. Borplan og aðkoma.....	24
7. Lýsing á borverkinu.....	29
7.1 Leiðirör (0-90 m) - áfangi 1.....	29
7.2 Yfirborðsfóðring (0-200 m) - áfangi 2.....	29
7.3 Öryggisfóðring (200-365 m) - áfangi 3.....	30
7.4 Vinnslufóðring (365-775 m) - áfangi 4.....	31
7.5 Borun vinnsluhluta (775-2000 m) - áfangi 5.....	33
7.6 Kjarnataka.....	34
8. Öryggiskröfur.....	35
8.1 Skyndigos.....	36
8.2 Mönnun.....	36
8.3 Öryggislokar.....	36
8.4 Fyrirbyggjandi aðgerðir.....	37
9. Skolvökvi.....	37
10. Steyping fóðringa.....	38
11. Suðuvinna.....	39
12. Skráning upplýsinga og afhending gagna.....	39
13. Rannsóknir meðan á borun stendur.....	41
13.1 Borholujarðfræði.....	41
13.1.1 Markmið jarðlagagreininga.....	41
13.1.2 Mat á myndunarumhverfi setlaga í Öxarfirði.....	42
13.1.3 Rannsóknir á borsvarfi og borkjörnum í borun.....	44
13.1.4 Rannsóknir á borsvarfi og kjörnum að lokinni borun.....	47
13.2 Borholumælingar.....	50
13.2.1 Mælingar í borun.....	51
13.2.2 Mælingar við borlok.....	56

13.2.3 Mælingar í upphitun.....	57
13.2.4 Mælingar í upphleypingu og blæstri.....	57
13.3 Efnafraeði jarðhitavökva.....	58
13.3.1 Markmið með efnagreiningum.....	58
13.3.2 Sýnataka í borun.....	58
13.3.3 Sýnataka eftir borun.....	59
13.4 Rannsóknaskýrsla.....	59
13.5 Kostnaðaráætlun.....	60
14. Heimildir.....	61
Viðauki: Ritaskrá.....	62

Myndaskrá

Mynd 1. Yfirlitskort af Öxarfirði.....	6
Mynd 2. Jarðfræðikort og jarðlagasnið yfir Tjörnes og Öxarfjörð.....	11
Mynd 3. Kort yfir eðlisviðnám í Öxarfirði og Kelduhverfi á 750 m dýpi u.s.m.....	12
Mynd 4. Viðnámssnið A-A' frá vestri til austurs yfir jarðhitasvæðið við Bakkahlaup.....	12
Mynd 5. Jarðlagasnið yfir sigdalinn í Öxarfirði byggt á bylgjubrotsmælingum.....	13
Mynd 6. Jarðlagalíkan fyrir sigdalinn í Öxarfirði byggt á þyngdar-, bylgjubrots- og endurkastsmælingum.....	14
Mynd 7. Tillaga að staðsetningu háhitaholu við Bakkahlaup í Öxarfirði.....	15
Mynd 8. Niðurstöður mælinga á samfeldri útgeislun jarðskjálftaorku á 1800 m dýpi.....	15
Mynd 9. Jarðlagasnið og hitamælingar úr holu BA-1 við Bakkahlaup.....	19
Mynd 10. Lágmarksdýpis fóðring í 2000 m háhitaholu við Bakkahlaup í Öxarfirði.....	23
Mynd 11. Snið 2000 m háhitaholu við Bakkahlaup, fóðringar og holutoppur.....	25
Mynd 12. Þenslustykki með stýrshlíf fyrir 2000 m háhitaholu.....	26
Mynd 13. Öryggisbúnaður við borun 2000 m háhitaholu við Bakkahlaup.....	27
Mynd 14. Borplan Jötuns við borun háhitaholu við Bakkahlaup.....	28
Mynd 15. Hreinsun holu með ruslakörfu áður en kjarnatökutæki er sett í holuna.....	34
Mynd 16. Mynd af kjarnatökutæki og helstu þrep við kjarnatökuna.....	35

Töfluskrá

Tafla 1. Eðlisþyngd jarðlaga á fyrirhuguðu borsvæði.....	21
Tafla 2. Dýpi og tegund fóðringa.....	24
Tafla 3. Blöndunarhlutföll þurrefnis í sementseðju sem þolir háhita.....	38
Tafla 4. Helstu upplýsingar sem verkaki afhendir verkkaupa.....	40
Tafla 5. Sundurliðun jarðfræðirannsóknna í borun.....	45
Tafla 6. Helstu rannsóknnaðgerðir á borkjörnum meðan á borun stendur.....	47
Tafla 7. Helstu rannsóknir á borsvarfi og borkjörnum að lokinni borun.....	48
Tafla 8. Yfirlit yfir borholumælingar og tilgang þeirra.....	52
Tafla 9. Áætlun um borholumælingar.....	55
Tafla 10. Áætlun um efnagreiningar.....	59
Tafla 11. Kostnaðaráætlun fyrir ráðgjöf og mælingar vegna borunar 2000 m djúprar háhitaholu í Öxarfirði.....	60

1. INNGANGUR

Á síðasta ári sendi Sveitarstjóri Öxarfjarðarhrepps, Ingunn St. Svavarsdóttir, nokkrum fyrirtækjum bréf þess efnis hvort áhugi væri á stofnun eignarhaldsfélags um framhaldsrannsóknir á háhitasvæðinu í Öxarfirði, með gufuaflsvirkjun og hugsanlega olíuvinnslu í huga. Ingunn stakk upp á vinnuheitinu "Öxar við ána". Fyrsti fundur hópsins var haldinn á Hótel Borg, 25.11.1997, þar sem mættir voru auk sveitarstjóra Öxarfjarðarhrepps, fulltrúar Kelduneshrepps, Orkuveitu Húsavíkur, Rafveitu Akureyrar (talaði og fyrir Hitaveitu Akureyrar), Landsvirkjunar og Jarðborana hf. Fulltrúi Rafmagnsveitna ríkisins var boðaður en komst ekki á fundinn. Ofangreindir hreppar og fyrirtæki ákváðu að taka þátt í verkefninu og styðja það með fjárframlagi. Á fundinn mættu að auki samkvæmt beiðni fundarboðenda tveir sérfræðingar frá Orkustofnun sem greindu frá stöðu rannsókna og hugmyndum um hugsanlegar auðlindir í Öxarfirði í formi háhita, gass og olíu.

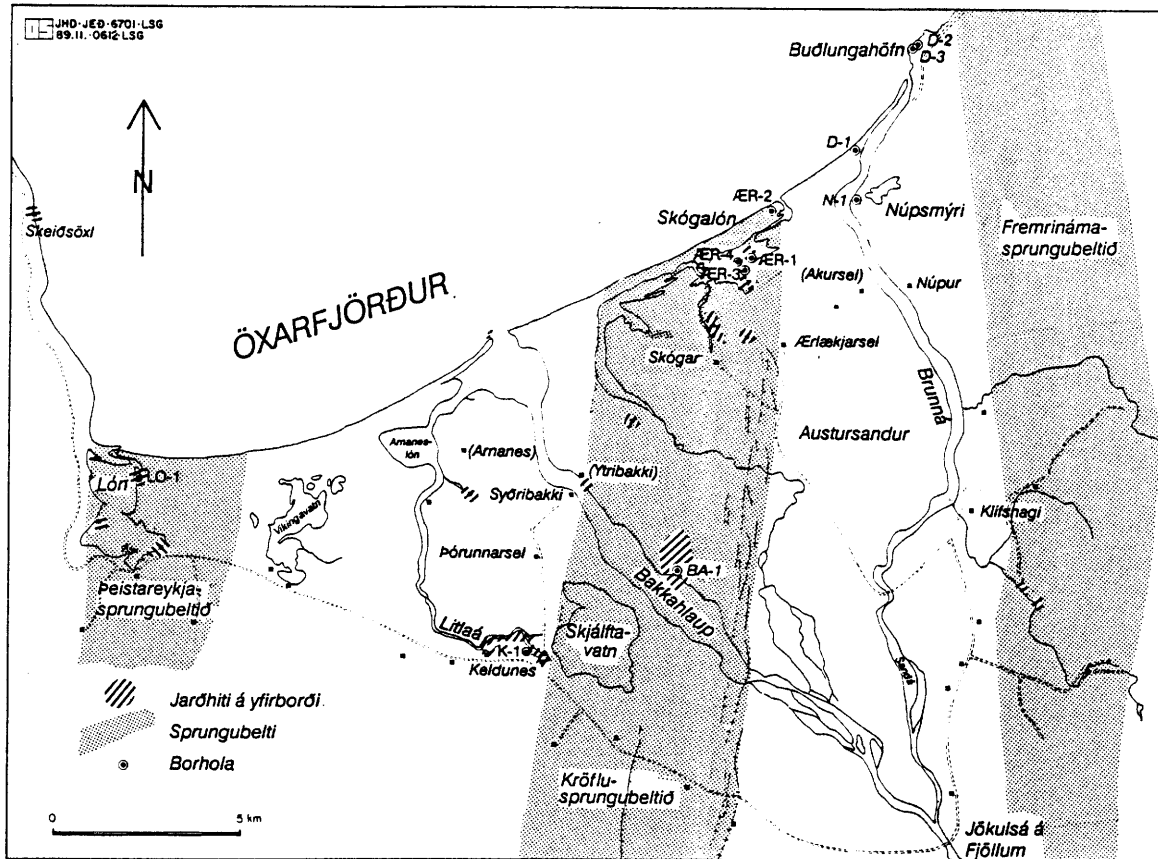
Fundurinn ályktaði að miða framhald rannsókna á svæðinu við leit að gufu til raforkuframleiðslu og annarrar hagkvæmrar nýtingar. Orkustofnun yrði falið að hanna 2000 m djúpa rannsóknarholu sem staðsett yrði næst miðju háhitasvæðisins en jafnframt gæti holan nýst sem vinnsluhola. Niðurstöður skyldu lagðar fram á fundi í lok mars 1998. Hönnun holunnar skyldi miða við það að við borunina yrði mannskapur og tæki er sinnt gæti alhliða rannsókn á jarðhita, gasi og olíu. Auk þess var Orkustofnun falið að kanna hvort verkefnið gæti fengið stuðning úr Orkusjóði.

Fundurinn ákvað jafnframt að Jarðboranir hf. myndu afla upplýsinga um mat á umhverfisáhrifum sem Hitaveita Reykjavíkur lét gera vegna rannsóknarholna á Ölkelduhálsi, og að Landsvirkjun myndi fela lögfræðingi sínum í samvinnu við aðila málsins að semja greinargerð um öflun lands- og jarðhitaréttinda til handa Öxarfjarðarhreppi eða hugsanlegu eignarhaldsfélagi. Jafnframt skyldi Landsvirkjun sjá um, fyrir hönd hópsins, að senda Orkustofnun formlega beiðni um hönnun holunnar.

Formlegt bréf um hönnun háhitaholu og gerð áætlunar vegna jarðhitarannsókna í Öxarfirði, með tilvísun í bréf Orkustofnunar dagsetts 2.1.1998 ásamt tilheyrandi rannsóknaráætlun dagsettrar 19.12.1997, kom síðan 23.1.1998. Þar var Orkustofnun falið að taka að sér verkið fyrir Öxarfjarðarhrepp, sem yrði formlegur verkkaupi. Agnar Olsen, framkvæmdastjóri á Landsvirkjun, yrði tengiliður "Öxar við ána" hópsins varðandi tæknileg mál verkefnisins.

Í samræmi við ofangreint, og áætlun Orkustofnunar frá 19.12.1997, skiptist verkefnið í tvo meginliði. Annars vegar hönnun holunnar sjálfar og hins vegar rannsóknir tengdar boruninni. Hönnun holunnar skiptist í nokkra verkþætti: a) staðsetningu holu, b) mati á jarðfræðilegum aðstæðum á borstað, c) hönnun holunnar, málsetningu borplans, kjallara, föðringa, dýpi o.fl., d) kjarnatöku, e) öryggisbúnað vegna hugsanlegs olíugass og e) kröfufylsingu á borverkinu. Rannsóknarliðnum var jafnframt skipt í nokkra þætti: g) hefðbundnar rannsóknir við borun háhitaholu, h) sértæka rannsókn vegna setlaganna í Öxarfirði, i) sérrannsókn vegna hugsanlegs móðurbergs gass og olíu, j) sérrannsókn um viðbrögð á borstað vegna hugsanlegs gasstreymis, k) sértækar borholumælingar vegna setlaganna, l) mælingar og vökvasýnatöku í borun, upphitun og prófun í blæstri, m) aðrar sértækar rannsóknir, t.d. vegna forðafræðistuðla o.fl.

Hönnun holunnar og rannsóknaráætlun eru hér steyptar saman í eina heildstæða skýrslu. Byrjað er á því að lýsa öllum helstu markmiðum og forsendum fyrir staðsetningu rannsóknarholunnar og fyrirliggjandi gögnum sem nýtast borverkinu. Yfirlitskort af Öxarfirði er sýnt á mynd 1. Þar eru sýndar sprungureinarnar þrjár, þekktir jarðhitastaðir, staðsetningar flestra borholna á svæðinu ásamt helstu staðarnöfnum. Fyrirhuguð staðsetning háhitaholu er rétt við holu BA-1 við Bakkahlaup.



Mynd 1. Yfirlitskort af Öxarfirði. Kortið sýnir sprungureinar Fremri Náma-, Kröflu-, Þeistareykjaeldstöðvakerfanna (skyggðu svæðin). Þekktir jarðhitastaðir, staðsetningar flestra borholna á svæðinu og helstu staðarnöfn eru einnig merkt á kortið.

2. MARKMIÐ MEÐ RANNSÓKNARHOLU OG BAKGRUNNSÞEKING

2.1 Markmið

Aðaltilgangurinn með borun rannsóknarholunnar er að kanna vinnslueiginleika háhitasvæðis við Bakkahlaup (Jökulsá á Fjöllum) í Öxarfirði, sem afmarkað hefur verið með viðnámsmælingum. Með vinnslueiginleikum er einkum átt við hitastig, þrýsting, afköst og efnasamsetningu. Meginmarkmið með rannsókninni er kanna grundvöll fyrir virkjun háhita til raforkuframleiðslu. Borholan er staðsett með tilliti til þess. Auk þess kemur til álita nýting á heitu vatni til húshitunar, ylræktar eða iðnaðarnota.

Könnun á uppruna lífræns jarðgass er hliðarmarkmið með borun rannsóknarholunnar. Þess þarf að gæta að gögnum um myndun og/eða samsöfnun hugsanlegs jarðgass og jarðolíu verði aflað samhliða boruninni.

2.2 Bakgrunnsþekking

Um 80 til 100 skýrslur, greinar og greinargerðir hafa verið skrifaðar á Orkustofnun um auðlindir í formi heits og kalds vatns í Öxarfirði, svo og um boranir og nýtingu þeirra til húshitunar, fiskeldis og annarra nota. Þessi heimildalisti er birtur í viðauka með þessari skýrslu. Hitaveita Öxarfjarðar er afrakstur viðamikillar rannsóknar í Öxarfirði í lok síðasta áratugar. Hitaveitan nýtir holu ÆR-03 við Skógalón sem gefur 45 l/s af 96°C heitu sjálfrennandi vatni. Aðalmarkmiðið með rannsókninni var þó að kanna skilyrði til fiskeldis í Öxarfjarðarhreppi, og leiddi hún til byggingar Silfurstjörnnunnar hf. í Núpsmýri sem nú framleiðir yfir 1000 tonn af matfiski á ári. Í tengslum við sömu rannsókn fannst lífrænt gas í tveimur borholum (ÆR-1 og ÆR-3) við Skógalón. Sá fundur leiddi til þess að sérstök rannsóknarhola (ÆR-4) var boruð þar 1991 til að kanna uppruna lífræna gassins, og var henni ætlað að ná u.þ.b. 700 m dýpi, eða niður úr setlagastaflanum. Holan misheppnaðist að ýmsu leyti og náði einungis 452 m dýpi, þar af náðust um 120 m af borkjörnum neðan til úr holunni. Spurningunni um uppruna gassins er ennþá ósvarað, en holan er engu að síður dýpsta holan í Öxarfirði og gefur mikilsverðar upplýsingar um gerð setlagastaflans og aldur, sem tekið er tillit til við hönnun nýju rannsóknarholunnar.

Gasið sem kemur úr holunum við Skógalón er að mestu (85-95 %) köfnunarefni (N_2), sem er lághitagas. Auk þess er nokkuð af kolsýrugasi (CO_2) í dýpstu holunni, og er það rakið til háhitaháhrifa. Lífræni hluti gassins er einungis um 2,0-6,5 % af heildarrúmmáli gassins. Þar af nemur þyngra kolvetnisgas 0,2-0,5 %. Samkvæmt því er mest af lífræna gasinu úr metani (87-96 %) en hlutfall þyngrri kolvetnisgasa (etans, própans, bütans, pentans, hexans og benzens) nemur frá 4-17 %. Það sem er hins vegar merkilegast við þenna gasfund er að slíkt olíugas hefur ekki fundist áður á Íslandi. Ekki hefur enn tekist að ákvarða hvort lífræna gasið er úr lífrænum leifum ættuðum af landi eða úr sjó, en til þess þarf að ná sýni af fljótandi eða seigfljótandi olíu eða tjöru og efnagreina nákvæmlega. Slíkur vökvi gæti varðveist í geymslubergi eða á upptakastað olíugassins (móðurbergi). Það er hins vegar ljóst að olíugasið er hitamyndað (thermogenic). Ekki er vitað hvort sambærilegt olíugas finnst víðar í Öxarfirði, það hefur einfaldlega ekki verið kannað. Það er þó vel hugsanlegt og því er full ástæða til að vera á varðbergi þegar borað er annars staðar í Öxarfirði, og freista þess að ná sýnum af hitaummynduðu lífrænu efni í föstu, fljótandi eða loftkenndu formi, hvort heldur er í móðurbergi, geymslubergi eða vatnsæðum, og greina uppruna olíuefnanna. Uppruninn gefur vísbendingu um hvort vænta megi að umtalsverð gas- eða olíumyndun hafi átt sér stað, einkum ef upprunabergið (móðurbergið) sjálft finnst. Þótt líklegast sé að hugsanleg jarðolía, sem kann að hafa myndast í setlögum við Bakkahlaup, sé löngu niðurbrotin í gas, þá er ekki loku fyrir það skotið að tjöruleifar finnist í jarðlögunum, og brennanlegt jarðgas gæti hafa lokast inni í geymslubergi. Ástæða er því að gera viðeigandi ráðstafanir til að mæta því, svo sem lýst er nánar í síðari köflum.

Tvær greinargerðir (Valgarður Stefánsson, 1997, Guðmundur Ó. Friðleifsson, 1997) voru teknar saman í tengslum við myndun "Öxar við ána"-hópsins á síðasta ári, og kynntar á fyrsta fundi hans. Í þeim er gerð grein fyrir helstu þekkingu og hugmyndum um háhitasvæðið í Öxarfirði og jarðlagagerð þar. Greinargerðirnar byggja að mestu á fyrri rannsóknum þar sem fjórar samatektarskýrslur standa upp úr (Lúðvík Georgsson o.fl. 1989, 1993, Magnús Ólafsson o.fl. 1992, 1993, og Karl Gunnarsson o.fl. 1996). Hugmyndir um setlagagerð neðan til í berggrunni Öxarfjarðar og tengsl við gömul setlög á Tjörnesi og á hafsbotni úti fyrir Norðurlandi tengjast þó frekar vangaveltum um hugsanlega myndun gass og olíu í landgrunni Íslands (Guðmundur Ó. Friðleifsson, 1993, o.fl. 1994, 1998). Um samsetningu

berggrunns neðan 1 km dýpis í Öxarfirði ríkir talsverð óvissa sem gerð er nánari grein fyrir hér. Rannsóknarholunni við Bakkahlaup er ætlað að draga úr þeirri óvissu og mun hún gera það svo fremi að borholan lendi ekki í innskotaflækju, sem algengar eru á öðrum háhitasvæðum landsins neðan 1000-1500 m dýpis. Slík innskot eru hitagjafar háhitasvæðanna. Gera verður ráð fyrir að rannsóknarhola, sem beint er inn að miðju háhitasvæðis, skeri talsvert af innskotum neðan við 1 km dýpi. Það dregur að sjálfsögðu úr gildi holunnar til rannsókna á berggerð með tilliti til olíu og gasmyndunar, auk þess sem háhiti brýtur niður jarðolíu og breytir í gas. Af þessum sökum er erfitt að sameina í einni holu rannsókn á vinnslueiginleikum háhitans og hugsanlegri myndun gass og olíu úr jarðlögum. Þetta er rétt að hafa í huga.

Í kafla 3 er gerð nánari grein fyrir líklegum jarðlögum og jarðfræðilegum aðstæðum á borstað við Bakkahlaup. Þar er hins vegar einungis ein grunn borhola, BA-1, rétt um 80 m djúp. Forsendurnar, sem rannsóknarholan er hönnuð eftir, eru því fengnar frá jarðeðlisfræðilegum mælingum af ýmsu tagi, og svo nokkrum borholum við Skógalón (einkum ÆR-3 og ÆR-4). Þær eru utan háhitasvæðisins í um 8-10 km fjarlægð til norðnorðausturs, og auk þess er ein 350 m djúp borhola (K-1) við Lindarbrekku í Kelduhverfi sem er í um 5 km fjarlægð til suðvesturs. Hún var boruð til jarðhitaleitar árið 1971 og er köld vatnsæð nærri botni (um 20°). Borun hennar gekk illa vegna hruns jarðlaga og annara vandræða.

Svo að byrjað sé á lýsingu á jarðlögum í Öxarfirði, þá benda fyrirliggjandi gögn, einkum mælingar, til þess að nokkur hundruð metra þykkur setlagastafli liggja yfir berggrunni úr basalhraunum og trúlega einhverju móbergi. Setlöggin eru talin þykkust næst ströndinni, 700-1000 m þykk, en þynnri inn til landsins. Í borholunni við Lindarbrekku (K-1, sem er 350 m djúp) virðist setlagabykkt a.m.k. 160 m, og hugsanlega um 250 m. Þar neðan við virðist komið í hraunlagastafla. Dýpsta borholan við Skógalón, ÆR-4 (452 m djúp), var öll boruð í setlög. Efstu 350 m virðast vera úr setlögum frá nútíma, þ.e. yngri en 10.000 ára, en þar fyrir neðan skiptast á jökulbergslög og sjávarset. Svo sem sést á mynd 1 er holan við Lindarbrekku (K-1) í vesturjaðri sprungubeltis sem kennt er við Kröflu, en jarðhitinn við Bakkahlaup og Skógalón er innan þess. Sig og aukin setmyndun í kjölfarið kann að vera heldur meiri í miðju sigbeltinu en á jöðrum þess. Hér er því gert ráð fyrir að setlög yfir berggrunni við Bakkahlaup séu a.m.k. 500 m þykk, trúlega nær 600 m þykk og hugsanlega allt að 800-1000 m þykk. Reiknað er með að þessi setlög séu fódruð af með vinnslufóðringu og að vinnsluhluti holunnar sé allur neðan þeirra. Við ákvörðun á sídd vinnslufóðringar þarf jafnframt að taka tillit til hitans, sem þarf helst að vera hærri en 200°C til þess að holan nýtist sem háhitahola. Þetta þýðir jafnframt að fóðringin gæti lokað af jarðhitakerfi sem nýta mætti úr lághitavatn.

Neðan væntanlegs fóðringardýpis er lítið sem ekkert vitað um berggerð, umfram það sem túlkað er í jarðeðlisfræðimælingum. Út frá almennri jarðfræði og jarðsögu svæðisins og reyndar jarðsögu gosbeltisins á Norðausturlandi og setlagastafans úti fyrir Norðurlandi má hins vegar leiða líkur að því að sigsvæðið í Öxarfirði sjálfum sé einungis um 1-2 milljón ára gamalt. Jarðlög af þeim aldri finnast á Tjörnesi, sem er mikil risspilda vestan gosbeltisins. Á Tjörnesi finnast 1-5 milljón ára gömul sjávarsetlög, ásamt jökulbergi, móbergi og hraunlögum, og svo berggrunnur sem er eldri en 10 milljón ára gamall. Hugsanlega eru 5-10 milljón ára gömul setlög undir sjávarsetlögum sem sjást á yfirborði. Ef Öxarfjarðarsigspildan (sem er a.m.k. 25 km breið) er jafn ung og talið er, þá er næsta líklegt að sambærileg jarðlög og finnast yfirborði á Tjörnesi, finnast neðan 700-1000 m dýpis undir setlögum í Öxarfirði. Þessi hugmynd er sýnd á mynd 2, sem sýnir einfaldað jarðlagasnið frá

Skjálfandaflóa austur yfir Tjörnes og Öxarfjörð. Dýpsta borholan í Öxarfirði er sýnd í þessu sniði. Jarðlagalíkan þetta gerir ráð fyrir að gömlu sjávarsetlögin á Tjörnesi finnst neðan 1 km dýpis í berggrunni Öxarfjarðar. Rétt er að vekja athygli á að nokkur 3-5 milljón ára gömul surtarbrandslög finnast í Tjörnessetlögum. Slik surtarbrandslög myndu við rétt skilyrði vera ágætis hráefni (móðurberg) til myndunar gass og olíu. Því þarf að fylgjast vel með jarðlagagerð í vinnsluhluta holunnar neðan 800 m dýpis. Gert er ráð fyrir þeim möguleika að teknir séu allt að 2-3 borkjarnar úr vinnsluhlutanum. Auk þess er gert ráð fyrir að 1-2 borkjarnar verði teknar ofan vinnsluhlutans, neðan til í setlagastaflanum. Í kafla 13.1.2 er farið nánar út í myndunarumhverfi setlaganna.

Viðamiklar viðnámsmælingar voru framkvæmdar á söndum Öxarfjarðar í byrjun áttunda áratugarins og bentu þær til að háhitasvæði kynni að leynast undir söndum Öxarfjarðar (Valgarður Stefánsson 1977). Mælingunum var síðan fjölgað tíu árum síðar og niðurstöðurnar birtar í heild 1993 (Lúðvík S. Georgsson o.fl. 1993). Í sömu skýrslu voru birtar niðurstöður bylgjubrotsmælinga sem Rússar höfðu staðið fyrir í samvinnu við Orkustofnun 1987. Bylgjubrotsmælingar eru önnur af tveim aðferðum jarðsveiflumælinga (seismískra mælinga) við könnun jarðlaga. Þær nýta sér lögmálið um ljósbrot í stað endurkasts. Bylgjubrotsmælingar gefa grófari upplýsingar um jarðlög en endurkastsmælingar en eru ódýrari.

Á mynd 3 er sýnt viðnámskort af Öxarfirði á 750 m dýpi frá árinu 1993 byggt á mælingum frá 1973-87 (Lúðvík S. Georgsson o.fl. 1993). Á myndinni er líka sýnd lega viðnámsniðs A-A' frá vestri til austurs yfir Bakkahlaup (mynd 4) og lega tveggja þversniða bylgjubrotsmælinga, línu 1 og 2 (mynd 5).

Viðnámskortið á mynd 3 sýnir útlínur háhitasvæðisins í Öxarfirði. Svæðið má afmarka gróflega með 10 Ω m-línunni, en heitasti hluti þess er innan svæðis þar sem hátt viðnám kemur fram undir lágu viðnámi (svokallaður háviðnámskjarni). Það svæði er ílangt í N-S stefnu, og er einna breiðast syðst, við Bakkahlaup. Það nær ekki suður fyrir Bakkahlaup á 750 m dýpi. Annað lágviðnámsvæði sést svo norður við Skógalón, en þar er ekki háviðnám undir því lága.

Hátt viðnám undir lágviðnámi er þekkt frá öllum rannsökuðum háhitasvæðum landsins. Viðnámshækkunin er talin tengjast breytingu leirsteinda úr blandlögum í klórít, sem verður við 240-250°C hita. Viðnámshækkun af þessu tagi bendir því til að berghiti hafi einhvern tímann náð 250°C hita á viðkomandi svæði, en þýðir ekki endilega að hitastig sé svo hátt nú. Rannsóknarholuna á að staðsetja rétt norðan við Bakkahlaup, innan háviðnámskjarnans, og innan 5 Ω m línunnar ofan hans.

Á mynd 4 er sýnt þversnið frá vestri til austurs, og verður rannsóknarholan staðsett á heppilegum stað milli mælipunkta OX-31 og OX-40 við kartöflugarðana, sem þar hafa verið til skamms tíma vegna yls í jörðu á útbreiddu svæði. Árið 1987 mældist hæstur hiti 81°C á 2 m dýpi í gömlum árfarvegi austan við garðana. Þar var boruð grunn borhola sama ár (BA-1) og mældist hiti í henni um 107°C á 70 m dýpi. Vikið er að þessari holu síðar í kafla 4.

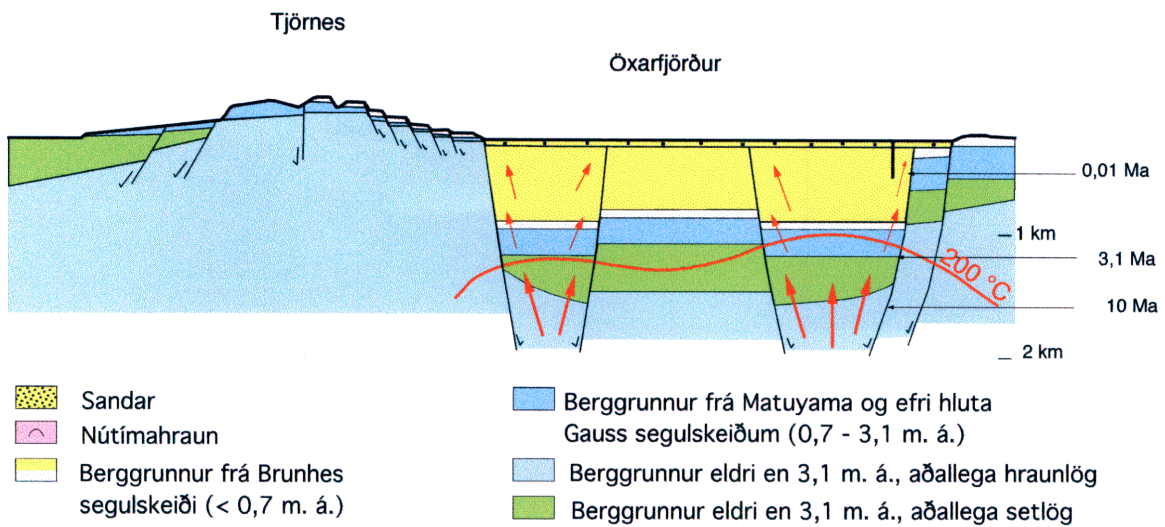
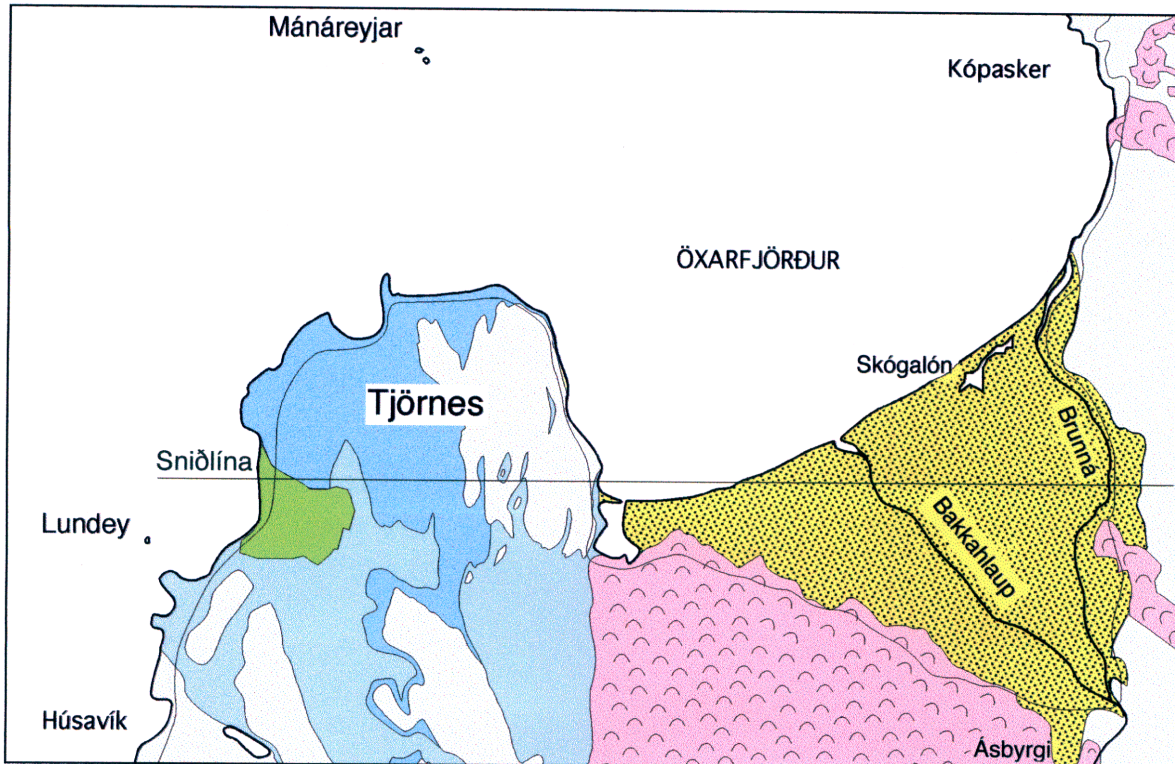
Fyrirhugað er að bora niður í háviðnámskjarnann sem sýndur er á mynd 4. Minnst dýpi á hann er við mælistað OX-31, um 200 m, en um 350 m dýpi þar austan við. Ganga þarf út frá að hámarkshiti á þessum mörkum gæti verið 250°C, en líklegra er þó að slíkum hita verði ekki náð fyrr en neðan við 500-800 m dýpi. Er þá m.a. tekið mið af borholunni við Skógalón

(ÆR-4) sem sýndi að bergið hafði náð um 50-100°C hærri hita áður fyrr, en nú ríkir um 150°C hiti á 450 m dýpi þar.

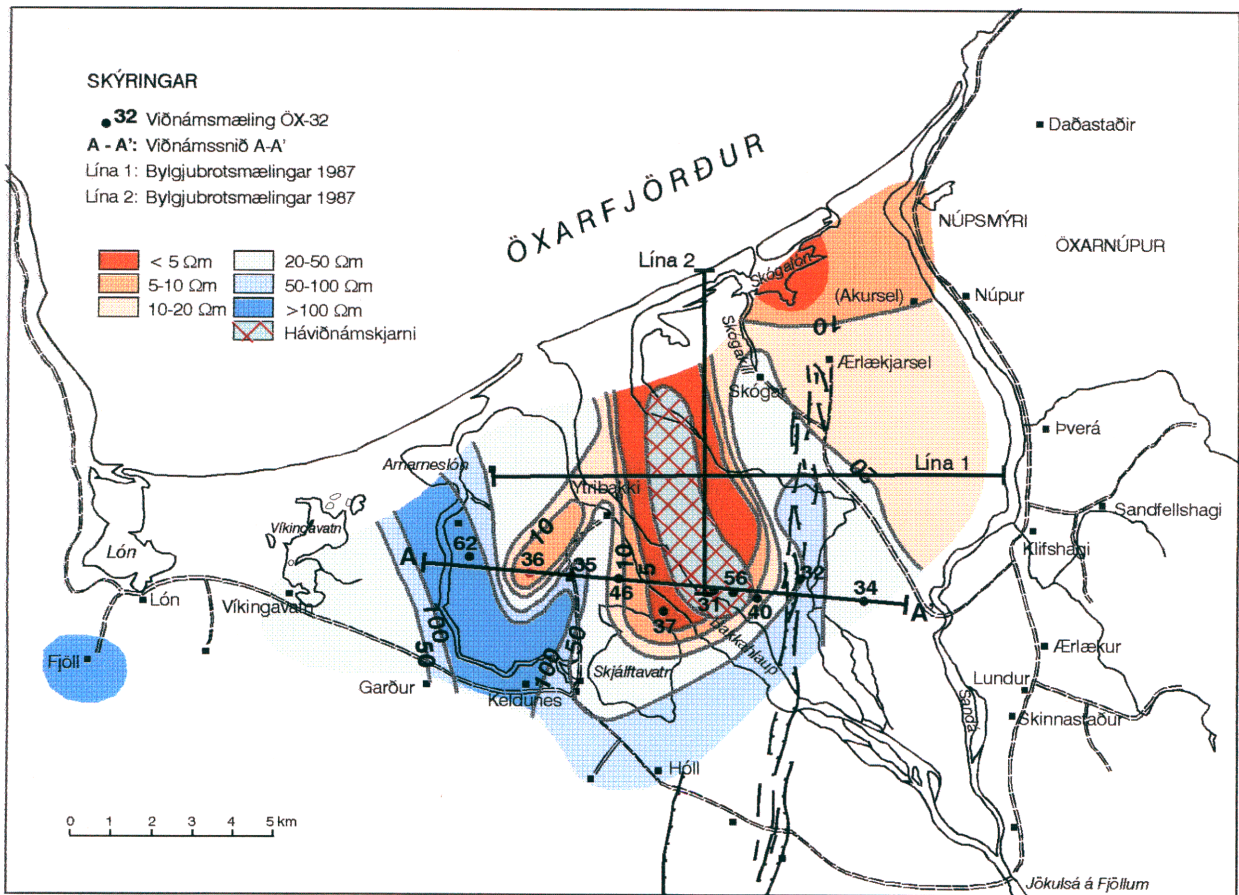
Viðnámsmælingarnar segja ekki til um jarðlagagerð, en hana má m.a. áætla út frá þyngdar- og bylgjubrotsmælingum, eins og sýnt er á mynd 5. Þar sést að ætla má að setlög nái allt niður á 600-800 m dýpi. Þar neðan við áætla jarðeðlisfræðingar að hraunlög taki við, hugsanlega með setlögum inn á milli, og neðan u.þ.b. 1 km dýpis telja þeir að komið sé í hraunlagastafla með a.m.k. 250°C ummyndunarhita.

Á mynd 6 eru tekin saman gögn um þyngdar-, bylgjubrots- og endurkastsmælingar, og jarðlagalíkan sýnt af svæðinu, vestur um Tjörnes. Þar eru m.a. sett inn misgengi út frá endurkastsmælingunum.

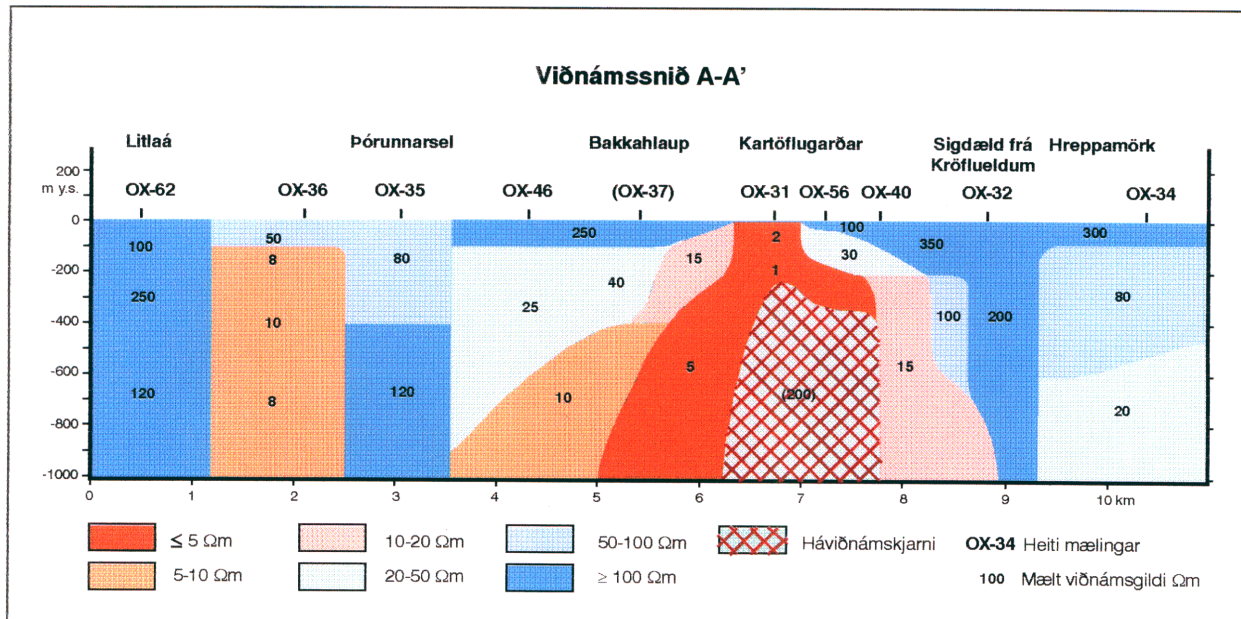
Í samantekt, þá virðist einsýnt að reikna þurfi með setlögum niður á allt að 800 m dýpi. Þar fyrir neðan er búist við hraunlögum, móbergslögum og hugsanlega talsverðu af gömlum setlögum. Er neðar dregur í holunni má búast við að aukning verði á innskotabergi.



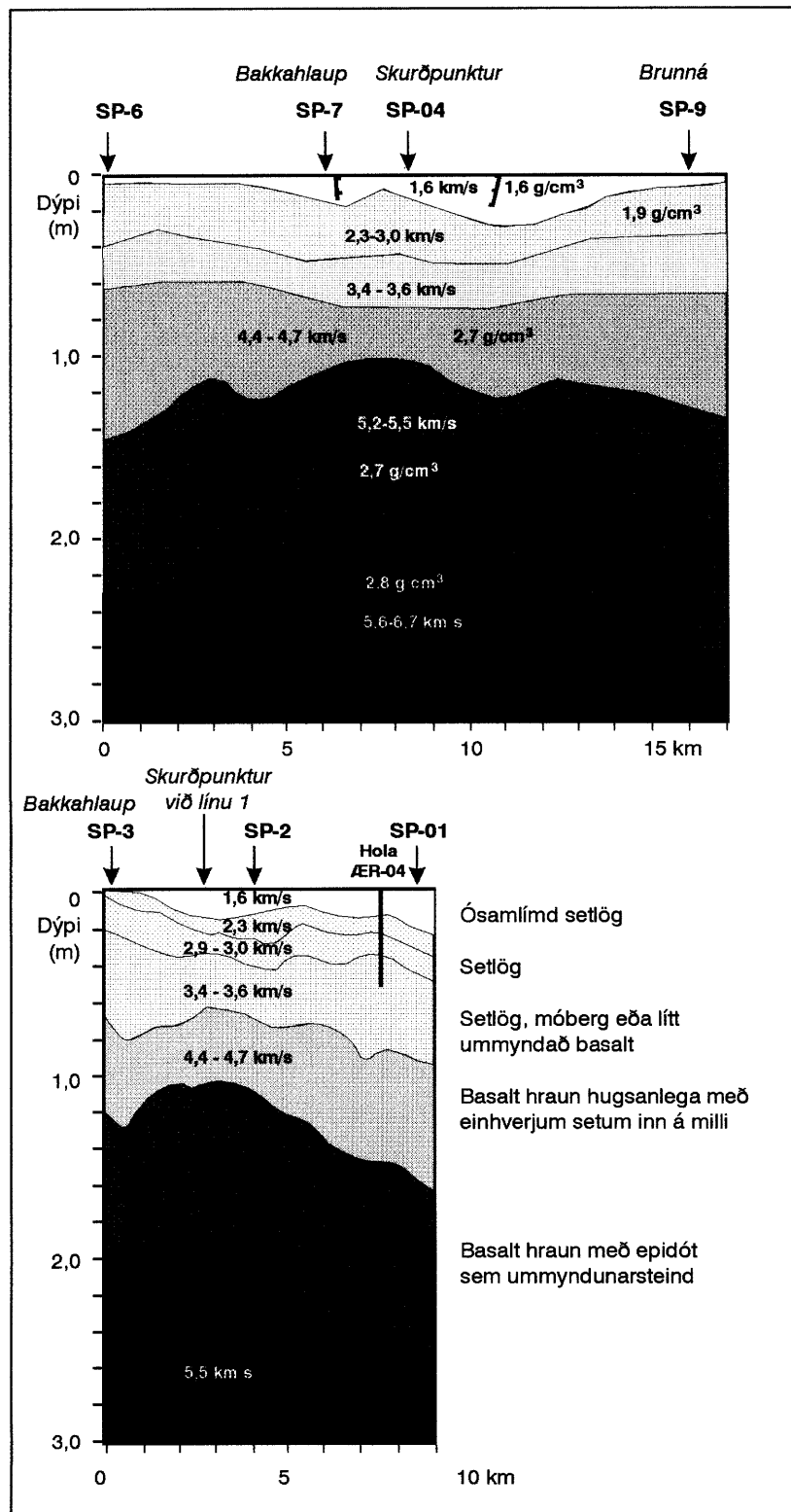
Mynd 2. Einfaldað jarðfræðikort og hugmynd að jarðlagasniði frá Skjálfaflóa austur yfir Tjörnes og Öxarfjörð. Borholu við Skógalón er varpað inn í sniðið. Háhitakerfi eru þar sem $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ jafnhitalínan (í rauðu) ris hæst. Uppstreymi jarðhitavatns í sigspildum er sýnt með rauðum örvum. Sniðið er um 50 km langt.



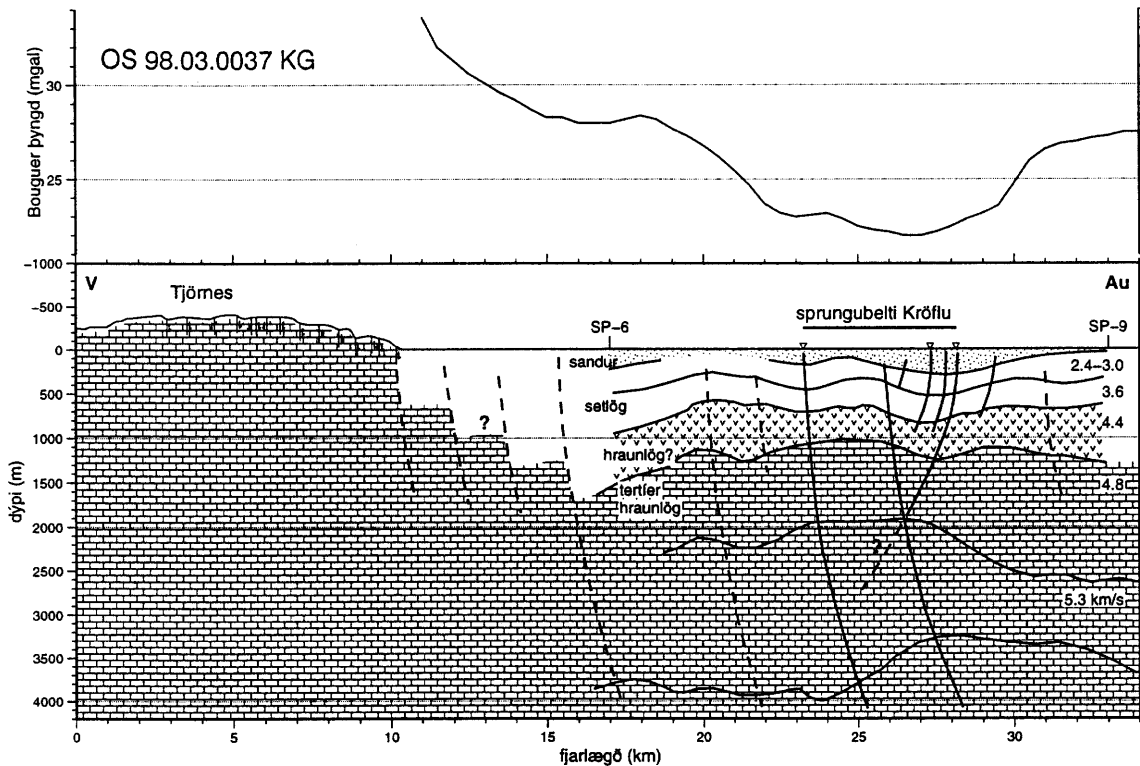
Mynd 3. Eðlisviðnám í Öxarfirði og Kelduhverfi á 750 m dýpi undir sjávarmáli.



Mynd 4. Viðnámssníð A-A' frá vestri til austurs yfir jarðhitasvæðið við Bakkahlaup. Staðsetning sniðsins er sýnd á mynd 3.



Mynd 5. Jarðlagasnið í Öxarfirði byggð á bylgjubrotsmælingum. Efri myndin er eftir línu 1, en sú neðri eftir línu 2, (staðsetning sýnd á mynd 3).

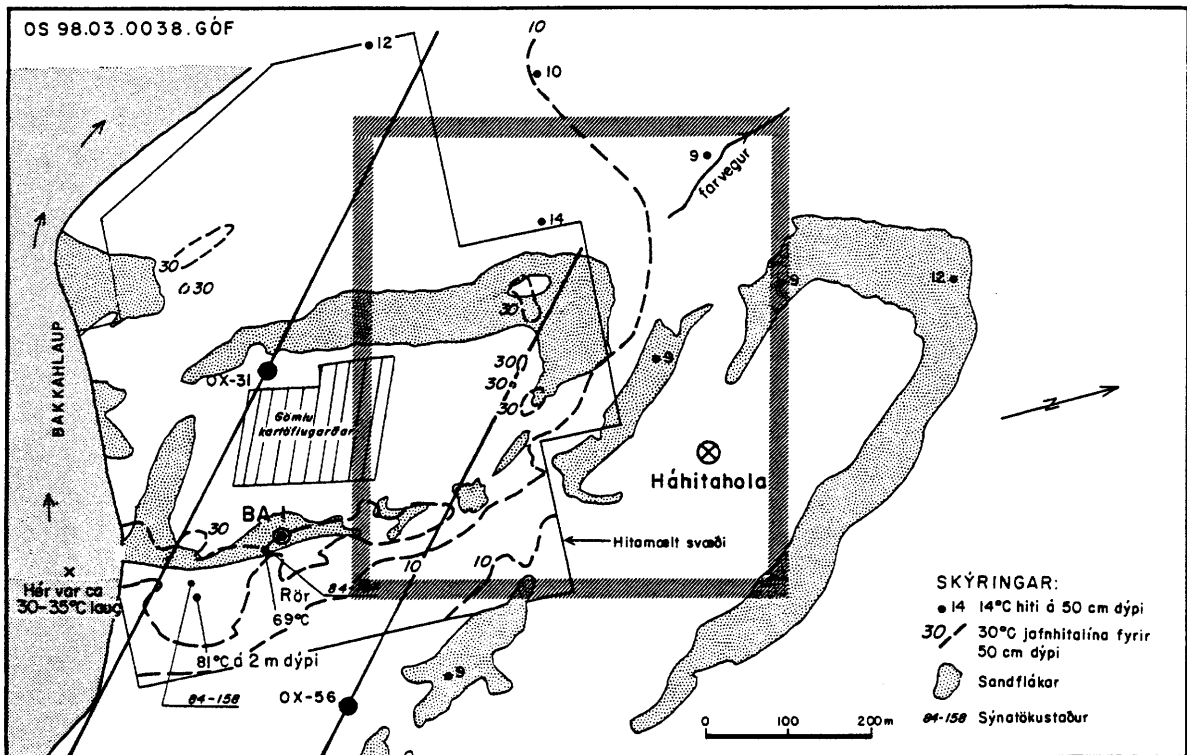


Mynd 6. Jarðlagalíkan fyrir sigdalinn í Öxarfirði byggt á þyngdar-, bylgjubrots- og endurkastsmælingum

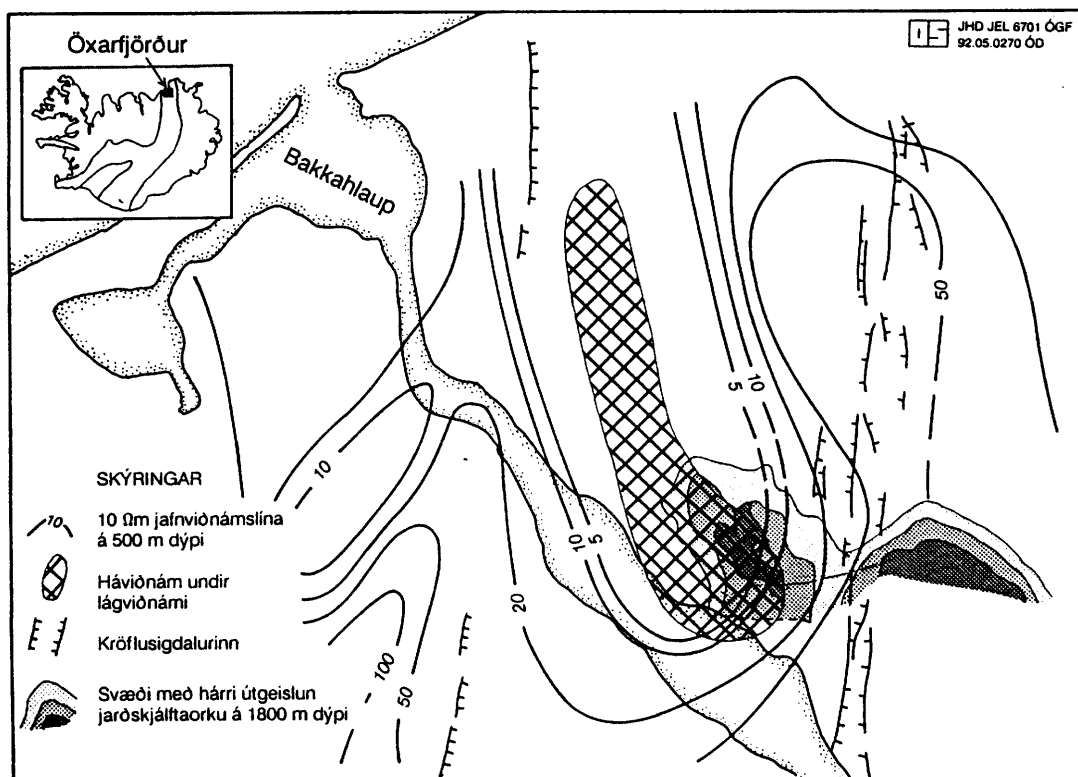
3. STAÐSETNING BORHOLU

Í ljósi þeirra hugmynda sem lýst er í kafla 2 er rannsóknarholunni valinn staður út frá a) viðnámsmælingum, b) jarðhita á yfirborði og c) mælingum á samfelldri útgeislun jarðskjálftaorku.

Tillaga að heppilegri staðsetningu háhitaholunar er sýnd á mynd 7. Henni er valin staður um 500 m NNV við viðnámsmælingu OX-56 (sem sést á myndum 3, 4 og 7). Miðað við gefnar forsendur, þá afmarkar skyggði ramminn á myndinni nokkurn veginn það svæði sem holan má vera innan.



Mynd 7. Tillaga að staðsetningu 2000 m djúprar háhitaholu við Bakkahlaup í Öxarfirði. Holunni er ætlaður staður um 500 m NNV við viðnámsmælingu OX-56 (sjá myndir 3 og 4), en skyggði ramminn afmarkar það svæði sem holan má vera innan. Staðsetning holu BA-1 er sýnd ásamt útbreiðslu hitasvæðisins við gömlu kartöflugarðana.



Mynd 8. Niðurstaða mælinga á samfelldri útgeislun jarðskjálftaorku á 1800 m dýpi á væntanlegu borsvæði. Lega háviðnámskjarnans sýnd til samanburðar.

Fyrirhugað er að bora niður í háviðnámskjarnann sem sést á mynd 4. Mínsta dýpi á hann er við mælistað OX-31, um 200 m, en er um 350 m þar austan við undir mælistað OX-56. Báðir þessir mælisstaðir eru sýndir á mynd 7. Ganga þarf út frá að hiti við efri brún háviðnámskjarnans gæti verið 250°C. Líklegra er þó að svo hár hiti náist ekki fyrr en neðan við 500-800 m dýpi. Er þá m.a. tekið mið af borholunni við Skógarlón (ÆR-4). Þar er nú um 150°C hiti á 450 m dýpi, en vökvabólumælingar sýndu að hitinn í berginu hafði áður verið um 50-100°C hærrí.

Jarðhiti er á yfirborði við kartöflugarðana og mældist hæstur hiti 81°C á 2 m dýpi í gömlum árfarvegi austan við garðana árið 1987. Þar var boruð grunn borhola sama ár (BA-1) og mældist hiti í henni um 107°C á 70 m dýpi. Allstórt svæði var hitamælt á 50 cm dýpi í jarðvegi 1984 og eru útlínur þess sýndar á mynd 7.

Á mynd 8 er sýnd niðurstaða mælinga á samfelldri útgeislun jarðskjálftaorku á 1800 m dýpi á væntanlegu borsvæði, og hún felld saman við legu háviðnámskjarnans. Samfelld útgeislun jarðskjálftaorku kann að stafa af sprungumyndun vegna varmanáms úr bergi eða suðu í jarðhitakerfinu. Varmanám vatns úr heitu bergi gæti hugsanlega tengst kólnandi innskotí. Hér er þó um tilgátu að ræða því að ástæða útgeislunar jarðskjálftaorku (suðs) af þessu tagi er ekki þekkt, en sambærilegt "suð" hefur verið greint á öðrum háhitasvæðum (t.d. Nesjavöllum). Líklegt er að hola sem boruð yrði í slíkt svæði gæti heppnast vel. Það er því mat okkar að skynsamlegt sé að velja holunni heldur stað nær þessu svæði en fjær, innan umrædds viðnámsvæðis, og nærri yfirborðsjarðhitanum. Þar með eru tilgreindar allar forsendur fyrir staðsetningu borholunnar.

Gert er ráð fyrir að sérfræðingar Orkustofnunar, Jarðborana hf. og verkkaupa velji holunni endanlegan stað á vettvangi með hliðsjón af öllum ofangreindum atriðum.

Samkvæmt mynd 3 er útbreiðsla háviðnámskjarnans mikil og afmarkar hann tiltölulega stórt svæði sem hefur áþekka jarðhitaeiginleika. Holunni má í sjálfu sér velja heppilegasta stað innan þess, t.d. þar sem auðveldast er að komast með bortæki og búnað, og kostnaðarminnst er að gera borplan og vegi. Borholan þarf þó að vera tiltölulega nálægt vatnsbóli, sem er Jökulsáin sjálf, og holan þarf að standa það hátt að greiðlega renni frá henni. Þótt landbrot hafi ekki verið metið við bakka Jökulsár undanfarin ár er ljóst að það getur verið talsvert og því er rétt að staðsetja holuna svo fjarri ánni að ekki þurfi að verjast henni sérstaklega á næstu árum eða áratugum. Það er hins vegar eðli jökuláa að flæmast um sanda sína og breyta farvegi í tímans rás. Skyndileg breyting á farvegi jökulvatna tengist helst jökulhlaupum og krapahlaupum, en í Öxarfirði jafnframt landsigi svipuðu og því sem varð í umbrotunum í Kröflusprungukerfinu 1975-1984. Þá myndaðist t.d. Skjálftavatn. Jökulsá flutti sig hins vegar í núverandi farveg árið 1907 (Landið þitt Ísland, 1981; Haraldur Þórarinnsson, Kvistási, munnl. uppl. 1998), vegna krapastíflu í Stórá, en þar rann hún áður upp við við Keldunes í svokölluðum Stórárfarvegi þar vestur af. Við farvegsbreytinguna 1907 varð Ytri Bakki einn bæja í Kelduneshreppi austan Jökulsár en áður voru þeir 5 til 6. Landsigið á söndunum innan Kröflusprungukerfisins, sem nam um 2 m (Oddur Sigurðsson, 1980), náði hins vegar ekki að breyta farvegi jökulsár austan við Kartöflugarðana, en olli farvegsbreytingum vestan þeirra, milli hitasvæðisins og Ytri Bakka (sjá mynd 1), þannig að áin fór að renna eftir sprungustykkinu í átt til Skóga og Skógalóns. Við því var brugðist með því að opna gamla ósinn með jarðýtu og stytta þannig leið Jökulsárinnar til sjávar og dugði það til að halda henni í farvegi sínum frá 1907.

Með nútíma tækni þykir ekki tiltökumál að stjórna rennsli jökulvatna með varnargörðum og verja mannvirki með einum eða öðrum hætti. Að því þarf vafalaust að huga í framtíðinni ef margar holur verða boraðar við Bakkahlaup og raforkuver reist. Fyrstu djúpu rannsóknarholunni þarf hins vegar að finna stað hæfilega fjarri ánni þannig að góðar líkur séu á að bæði vegur að henni og borplanið verði í friði fyrir ánni. Í þessu sambandi er rétt að geta þess að tíðni landsigs og eldsumbrota í Kröflusprungukerfinu er álitin vera um 250 ár, og hætta á farvegsbreytingum af völdum landsigs er því óveruleg næstu áratugina a.m.k. Flytji Jökulsá sig í nýjan farveg á næstunni er líklegast að það verði í kjölfar jökulhlaups, sem gæti t.d. orðið vegna eldsumbrota í Kverkfjöllum eða undir Dyngjujökli, sem engin leið er að spá fyrir um hvenær gæti orðið. Hugsanlegt er þá að hún hlypi eftir sigspildunni austan við fyrirhugað borsvæði og héldi sig þar næstu áratugina. Háhitavæðið við Bakkahlaup yrði þá vestan ár en ekki austan eins og nú er.

Ef skyggst er aðeins aftur í söguna, þá voru stórhlaup í Jökulsá á Fjöllum mjög tíð á fyrri hluta 18. aldar. Þá urðu hlaup 1707, 1711-12, 1716-1717, 1719-1720, 1725-1726 og 1729-1730 og landspjöll á byggðu bóli tíð. Í ágætri grein Sigurjóns Páls Ísakssonar (1985) þar um, fer hann m.a. yfir óbirtar samtímaheimildir um lýsingar á jarðaspjöllum. Ályktun Sigurjóns er sú, í ljósi Kröfluelda og landsigs í Kelduhverfi og Öxarfirði, að trúlega megi tengja a.m.k. hluta þessara hlaupa við gos í Vatnajökli 1719-1720, og svo við Mývatnselda 1724-1729. Það gefur etv. tilefni til að ekki þurfi að óttast landspjöll af völdum umbrota í Kröflusprungukerfinu a.m.k. næstu áratugina eins og fyrr er sagt. Hins vegar er ljóst að farvegur Jökulsár á Fjöllum á söndum Öxarfjarðar er í viðkvæmu jafnvægi, sem hugsanlegir virkjunaraðilar þurfa að leggja mat á.

4. JARÐFRÆÐILEGAR AÐSTÆÐUR MEÐ TILLITI TIL BORUNAR

Jarðfræðilegar aðstæður á borstað eru einfaldlega þannig að yfirborðið er allt úr tiltölulega þéttum og sæmilega samlímdu sandi og finni möl. Samlímingin stafar af því að sandurinn er að stórum hluta úr glerríku móbergstúffi sem oxast og bindst saman við veðrun. Árbakkar Bakkahlaups geta verið allt að mannhæðarháir þar sem rofs gætir. Jarðhiti á yfirborði eykur samlímingu sandsins þar sem hans gætir, svo sem á fyrirhuguðum borstað. Misgengisstallar austan við fyrirhugað borsvæði standa uppi og hafa verið greinilegir í landslagi um margra ára skeið. Bendir það til samlímingar. Sandarnir eru auk þess uppgrónir á stórum svæðum, vaxnir lyngi, grösnum og víði. Af þessum ástæðum eru aðstæður til borunar frábrugðnar þeim sem voru við Skógalón þar sem laus sandur og bleytur ollu miklum erfiðleikum við boranir.

Fyrirsjáanlegt er að gera þarf nýjan veg að borstað frá þjóðvegi. Eldri slóðar eru of nærri ánni og hafa sumir týnst í hana. Vegagerð á svæðinu ætti vera auðveld sem og borplansgerð, þó að grófkorna burðarlagsefni vanti algjörlega. Vegagerð og borplansgerð þurfa að taka mið af því. Hér verður þó ekki farið nánar út í efnisgerð á yfirborði, heldur reiknað með að vegagerð og plangerð verði tiltölulega auðveld, og kröfulýsing um stærð borplans einfaldlega miðuð við þarfir borsins.

Jarðlagagerð á yfirborði er breytileg á svæðinu. Þar sem jarðhiti nær upp undir yfirborð má reikna með að sandurinn sé sæmilega samlímdu, en utan þess svæðis getur verið allt að 50 m dýpi niður á svo samlímdu berg að það standist borun. Er hér dæmt út frá borholu BA-1

við Bakkahlaup, annars vegar, og svo holunum við Skógalón, í 10 km fjarlægð hins vegar. Reiknað er með að forborað verði fyrir leiðiröri í aðalholuna með minna bortæki en því sem notað verður við aðalborunina. Ljóst er út frá reynslunni að höggborar koma ekki til greina til forborunar. Nota þarf tæki sem getur borað fyrir 22" fõðringu með borleðju niður á 90 m dýpi. Þar neðan við verður trúlega einnig að nota borleðju við borun fyrir 18 5/8" yfirborðsfõðringu niður á 200 m dýpi.

Reiknað er með setlögum niður á 500-800 m dýpi, en hugsanlega ná þau allt niður á 1000 m dýpi. Einungis hefur verið borað í efstu 80 m þessa setstafla við Bakkahlaup (hola BA-1) svo sem komið er að síðar. Setlagagerð þar neðan við er einfaldlega óþekkt umfram það sem mælingar gefa til kynna. Víkja má að borun í neðri hluta setstaflans fyrst, þ.e. borun fyrir vinnslufõðringu milli 365 m og 775 m dýpis. Samkvæmt túlkun á viðnámsmælingum þá gæti hiti verið kominn í 250°C á þessu dýptarbili, þó að við reiknum með lægri hita. Hérlendis er engin reynsla af borun í háhitaummyndaðan setlagastafla, en trúlegast er að setbergið standi sæmilega í borun. Í holu ÆR-4 ná setlög frá nútíma (yngri en 10.000 ára gömul) niður í 350 m dýpi, þar sem fyrstu jökulbergslögin fundust. Setmyndunarhraði í Öxarfirði er því gríðarlega mikill, eða um 3,5 cm/ár á nútíma, og er ástæðan landrek og landsig ásamt miklum framburði Jökulsár á Fjöllum. Nútímasetið er að stórum hluta gert úr glerríku móbergsgleri, með misháu hlutfalli af basaltsandi og dílum úr frumsteindum (einkum feldspati).

Líklegt er að sandstabbinn frá nútíma nái ekki eins djúpt niður við Bakkahlaup og við Skógalón, og að komið verði í eldra og harðara berg áður en öryggisfõðringu sleppir. Samsetning setbergsins hvað hátt glerinnhald varðar helst þó svipuð. Reikna þarf með að setlögin milli 300-800 m dýpis séu algjörlega ummynduð, og að leirinnihald geti verið óvenju hátt sums staðar. Um þetta ríkir þó óvissa sem ekkert er við að gera, en bregðast mætti við óvenju leirríku bergi með því að stjórna eiginleikum borleðjunnar (einkum vatnstapi) til að fyrirbyggja vandræði, og á það sama við um borun fyrir öryggisfõðringu.

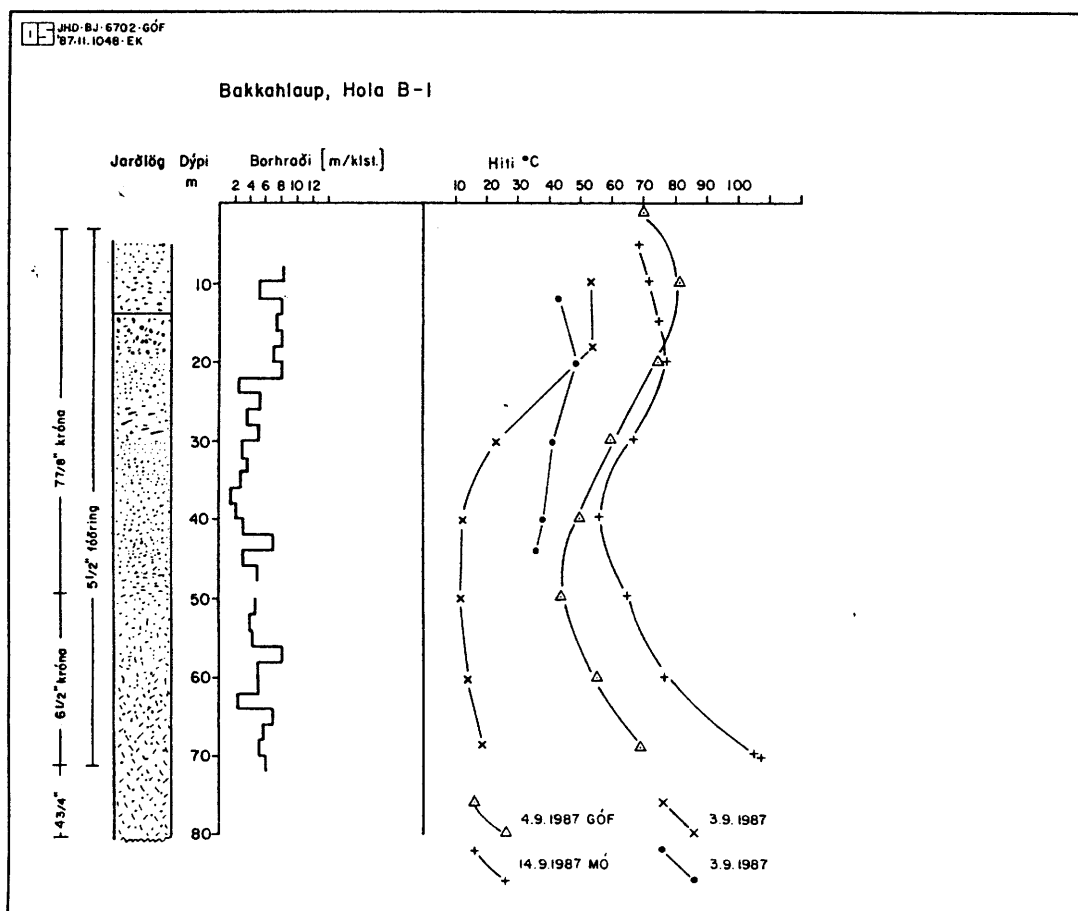
Þar sem við reiknum með að efstu 100-200 m holunnar geti orðið einna erfiðastir bortæknilega, er rétt að lýsa efstu jarðlögum og hitastigi í holu BA-1 sem er mjög nálægt fyrirhuguðum borstað. Hola BA-1 var boruð árið 1987 af Jarðborunum hf. með jarðbornum Hrímní, sem er lítill rannsóknabor. Jarðlagasnið og hitamælingar úr holunni eru sýnd á mynd 9. Fjárskortur réði því á sínum tíma að holan var einungis forboruð. Þessa holu mætti trúlega dýpka um 100-200 m í könnunarskyni, í tengslum við forborun fyrir djúpu rannsóknarholuna. Könnunarholan BA-1 var boruð niður í 72 m dýpi og 5 1/2" fõðring steyp t í botn. Síðan var steypa boruð út úr holunni og hún dýpkuð í 81 m dýpi. Borunin gekk vel og tók aðeins 5 verkdaga. Rétt er að vekja athygli á að opni hluti holunar seig saman eða lokaðist fljótlega eftir borun, og segir það nokkuð til um styrk holuveggja.

Holan var öll boruð í ummyndaðan, glerríkan og finkornóttan sand. Borhraði með litlu álagi var 3-8 m/klst. Holuveggir stóðu það vel í borun að ekki þurfti að nota borleðju. Aðeins var þó sett í hana blautgel öðru hvoru í borun. Ummyndun er mikil og samanstendur af leir, kabasíti, analsími og e.t.v. fleiri tegundum geislasteinda sem myndast við tiltölulega lágan hita. Svipaðar steindir finnast ofan til í öðrum íslenskum háhitasvæðum við hita undir 120°C. Talsvert magn af leir er í setinu, og var skolvökvinn misgrænleittur eftir því hve leirinnihald sandsins var hátt. Á 50 m dýpi var leirinnihald það hátt að krónan stíflaðist af leir. Hann var það þéttur að leirafsteypa fékkst af krónunni þegar hún var tekin upp og athuguð. Borað var áfram með sömu krónu, og vatn og þrýstiloft notað samtímis við

skolunina, og gekk það í fódningardýpi. Vatnshiti var hins vegar nærri suðumarki þegar hætt var. Hitamælingar sýna að heitt vatnskerfi er í sandinum rétt við yfirborð með hámarkshita nærri 90°C á 10 m dýpi. Holan var hrein í botn að lokinni upptekt borstanga, og stóð hún meðan fódningu var komið fyrir og hún steipt föst, en það var gert á sama verkdegi.

Holan var síðan boruð með lofthamri neðan fódningar í 81 m dýpi. Bergið var lint og leirrikt, en stóð, og var holan hitamæld í botn 2 tímum eftir að borun lauk og mældust þá 97°C á botni (þessi hitamæling er ekki sýnd á mynd 9). Tíu dögum síðar náðist ekki að mæla holuna nema innan fódningar og hefur opni hlutinn trúlega sigið saman. Sú vitneskja gefur hugmynd um styrk setsins neðan 70 m dýpis, sem er ekki ýkja mikill. Þá vitneskju mætti nýta á ýmsan hátt.

Ein leið til að hindra að holan lokist, er að hafa snör handtök við fódrun leiðirörs, yfirborðs- og öryggisfódninga. Borun með góðri borleðju virðist óhjákvæmileg. Með því að kanna fyrst boreiginleika jarðлага niður á 365 m dýpi með litlum bor í holu BA-1 áður en forborað verður fyrir aðalholunni, mætti fá nákvæmari upplýsingar um berggerð neðan 70 m dýpis, og hugsanlega sleppa yfirborðsfódningunni í aðalholunni í ljósi þeirrar vitneskju. Í könnunarholuna mætti síðan steypa 2" rör og fylgjast með breytingum á vatnsborði þegar djúpa rannsóknarholan verður prófuð í blæstri. Því er vel athugandi að dýpka holu BA-1 í allt að 300 m dýpi í þeim tilgangi að sjá við hugsanlegum vandamálum sem upp gætu komið í borun fyrir öryggisfódningunni í aðalholunni, og gæti það borgað sig í styttingu bortíma Jötuns.



Mynd 9. Jarðlagasnið og hitamælingar úr holu BA-1 á jarðhitasvæðinu við Bakkahlaup.

5. FÓÐRINGAR OG DÝPI

Holan er hönnuð með tilliti til fjölmargra atriða sem tilheyra borun í óþekkt háhitasvæði en einnig er höfð hliðsjón af kröfum sem gerðar eru til borana þar sem olúgas er að finna. Jafnframt er tekið tillit til þeirra bortækja sem fyrirhugað er að nota til verksins.

5.1 Kröfur um lágmarksdýpi fóðringa

Heildardýpi holu ræður mestu um lágmarksdýpi fóðringa. Fyrir hvern áfanga þarf steyppt fóðring að vera nógu djúp til að:

- a. Þrýstingur innan í holunni við fóðurrörsendann verði aldrei hærri en jarðlagaprýstingurinn. Ella getur holuvökvinn brotið sér leið til yfirborðs t.d. með sprengigosi. Þetta hefur tvívegis gerst hér á landi af litlu dýpi.
- b. Unnt sé að kæfa holuna hvort heldur er í borun eða rekstri. Með þungri borleðju sem fyllir fóðringuna þarf að vera hægt að upphefja þrýsting holunnar í blæstri við fóðurrörsendann. Ef fóðringin er of stutt verður ekki hægt að mynda nógu háan þrýsting því leðjan getur lekið út í jarðlögin. Þetta var m.a. ástæða þess að “sjálfskaparvíti” varð úr holu KG-4 í Kröflu.

Til þess að ákvarða hugsanlega þrýstiferla í holum við öll skilyrði við borun og í rekstri þurfa upplýsingar um berghita og þrýsting í jarðhitakerfi að liggja fyrir sem fall af dýpi, eða sem spá fyrir umræddan borstað. Liggi upplýsingarnar ekki fyrir skal af varfærissástæðum nota svonefndan suðumarksferil. Þegar þrýstingur í jarðhitakerfinu hefur verið ákvarðaður er hægt að draga upp þrýstiferla annars vegar ef holan fer í blástur og hinsvegar í holunni lokaðri og fullri af gasi eða gufu.

Jarðlagaskipan á svæðinu skiptir miklu máli og að endi fóðringar sé í heillegu bergi. Lek og hrungjörn jarðlög geta einnig haft áhrif á dýpi fóðringa. Því er það staðarjarðfræðings að ákveða nákvæmlega hversu djúpt fóðringin skuli ná. Hún má þó ekki víkja frá ákvörðun um lágmarksdýpi fóðringar vegna öryggis sem hér er lýst.

Helstu upplýsingar sem máli skipta eru eftirfarandi:

1. Einu upplýsingarnar um berghita á fyrirhuguðu borsvæði er að í holu BA-1 mældist 107°C á 70 m dýpi skömmu eftir borun. Þetta sýnir að nærri yfirborði er jarðhitinn talsvert frá suðumarksferlinum. Í ljósi þess að hér er um fyrstu djúpborun á svæðinu að ræða, er samt sem áður miðað við suðumarksferil sem hönnunarforsendu. Til dæmis gæti ummyndunarkápan verið það þétt nærri yfirborði að skyndilega verði komið í sjóðandi vatnskerfi undir henni.

2. Jarðlagaprýstingurinn er reiknaður út frá upplýsingum um eðlisþyngd jarðlaga við Bakkahlaup sem fall af dýpi eins og það var ákvarðað út frá þyngdar- og jarðsveiflumælingum á mynd 5 og fram kemur í töflu 1.

Tafla 1. Eðlisþyngd jarðlaga á fyrirhuguðu borsvæði.

Dýptarbil (m)	Eðlisþyngd (g/cm ³)
0-300	1,9
300-700	2,0
700-2000	2,7

3. Þýstingur í háhitasvæðinu markast af þrýstingi sjóðandi vatnssúlu sem nær til yfirborðs (suðumarksferill). Á flestum háhitasvæðum er vatnsborð í holum á 100-300 m dýpi sem veitir viss “forskot” við að hemja svæðisþrýstinginn. Við Bakkahlaup þarf að gera ráð fyrir að vatnsborðið sé við holutopp. Þetta hefur þær afleiðingar að fódunardýpi eykst nokkuð umfram það sem venja er á háhitasvæðum.
4. Ekki er gert ráð fyrir að finna þykka gas- eða gufupúða á svæðinu sem valdi yfirþrýstingi vegna þess að háhitakerfið er í virkri sprungurein. Jafnvel þó gas hafi náð að safnast fyrir í þykkum gasgildrum, skapa þær ekki hættulegan yfirþrýsting, svo fremi gassúlan sé ekki hærri en 100 m, enda er miðað við að suðuferilsþrýstingur ríki neðan við hugsanlegt gas í gildrum.
5. Þrýstifall í blásandi holum er til einföldunar haft 0,3 bör á hverja 10 m upp alla holuna, sem er svipað því sem beinar mælingar og reiknilíkön sýna. Þrýstiferill í staðinni holu fullri af gasi er reiknaður út frá eðlisþyngd metangass í holunni miðað við botnþrýsting.
6. Við ákvörðun á fódungadýpi er stuðst við aðferðafræði í nýsjálenskum staðli (Code of Practice for Deep Geothermal Wells, New Zealand Standard 2403, 1991) og bókina Blow Out Prevention and Well Control (Technip, 1981).

Síðd fódungar þarf að reikna frá botni hvers áfanga eins og sýnt er á mynd 10 og fjallað er um hér að neðan.

5.1.1 Vinnslufóðring (9 5/8")

Fyrirhugað er að bora í 2000 m og þar getur hiti hæstur orðið 339°C og mestur gufuprýstingur 145 bar-a, sé miðað við suðumarksferil eins og gert er í þessu tilfelli. Ferlar fyrir gasfyllta holu og fyrir tvífasa rennsli vatns og gufu eru sýndir á mynd 10. Þar sem ferlarnir skera jarðlagaprýstinginn er komið lágmarksdýpi fóðringa sem tryggir að jarðlögin gefi sig ekki. Það er á 510 m dýpi fyrir tvífasa streymi (háhita) og 675 m dýpi í gasfylltri holu. Skurðpunktar þrýstiferlanna við þunga borleðju með eðlisþyngd 1,4 gefa lágmarksdýpi fóðringa sem þarf til að kæfa holuna. Það næst við 775 m í tvífasa holu og 965 m í gasfylltri holu. Meginatriði er að jarðlagabekjan haldi gasfylltri holu og að unnt sé að kæfa blásandi tvífasa holu með þungri borleðju. Því telst nóg að vinnslufóðringin sé að lágmarki 775 m djúp.

5.1.2 Öryggisfóðring (13 3/8")

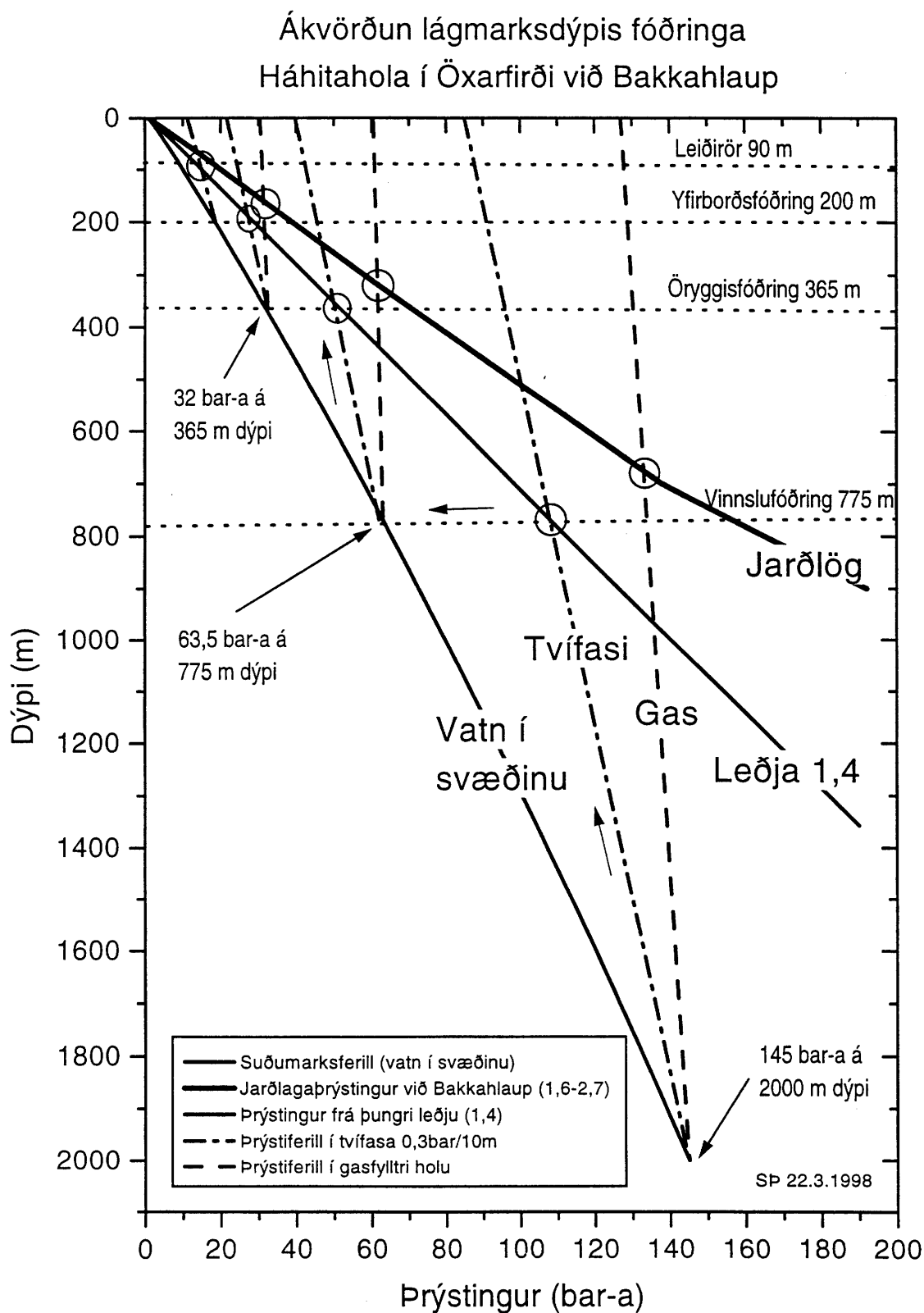
Til þess að hafa nægjanlegt öryggi við borun fyrir vinnslufóðringu í 775 m þarf öryggisfóðringin að standast umræddar kröfur þar sem þýstingurinn gæti hæst orðið 63,5 bar-a og hitinn 280°C. Með tilvísunar til myndar 10 má sjá að öryggisfóðringin þarf að vera a.m.k. 365 m djúp til að unnt sé að hemja jarðhitann með þungri leðju en heldur styttri (320 m) til að tryggja öryggi í gasfylltri holu miðað við jarðlagaprýsting.

5.1.3 Yfirborðsfóðring (18 5/8")

Prýstingur í botni öryggisfóðringar á 365 m dýpi er áætlaður 32 bar-a og hiti 237°C, samkvæmt suðumarksferli. Líklegt má telja að hitinn verði ekki svo hár, en þrýstingurinn ræðst af vatnssúlunni og þar er um óveruleg frávik að ræða. Til að hemja gufugos þarf að hafa 200 m yfirborðsfóðringu og 160 m ef gas kæmi í holuna. Ef til væru mælingar sem sýndu hita- og þrýstiástand niður á 365 m dýpi, mætti endurskoða hversu djúpt yfirborðsfóðringin þyrfti að ná og jafnvel mætti sleppa henni. Til þess þarf hitinn að vera vel undir suðumarksferli og ekkert gas í jarðlögunum. Borun könnunarholu í þessu skyni kemur til álita eins og fyrr er nefnt.

5.1.4 Leiðirör (22")

Fyrst er borað fyrir leiðiröri og mun líklega vera hagkvæmast að gera það með minni bor allnokkru áður en djúpborinn er fluttur á staðinn. Dýpi þess þarf að vera um 90 m, til að tryggja öryggi holunnar við borun fyrir næsta áfanga, með sömu rökum og áður. Auk þess er æskilegt að fódra efsta hluta holunnar af í stuttum áföngum þar sem jarðlögin eru úr óstöðugum sandi og leir.



Mynd 10. Lágmarksdýpi fóðringa í 2000 m háhitaholu við Bakkahlaup í Öxarfirði. Jarðlagaprýstingur í vatnsfylltu jarðhitakerfi á suðumarksferli, leðjuþrýstingur ásamt þrýstiferlum í holu (gas eða tvífasa rennsli) sem ákvarða lágmarksdýpið.

5.2 Fóðringar í holunni

Fóðringar í holunni eru sömu gerðar og áður hafa verið notaðar við boranir á háhitasvæðum (tafla 2 og mynd 11), nema hvað nú bætist við svokallað leiðirör. Leiðirörið er 22" vítt, þarf að ná niður í 90 m dýpi, og steypast þar fast. Þar með verða steyptar fóðringar í holunni fjórar. Holutoppur er hannaður fyrir ANSI 900 þrýstiflokk og með þenslustykki (mynd 12). Öryggislokar verða hafðir á holunni við borun (mynd 13).

Tafla 2. Dýpi og tegund fóðringa

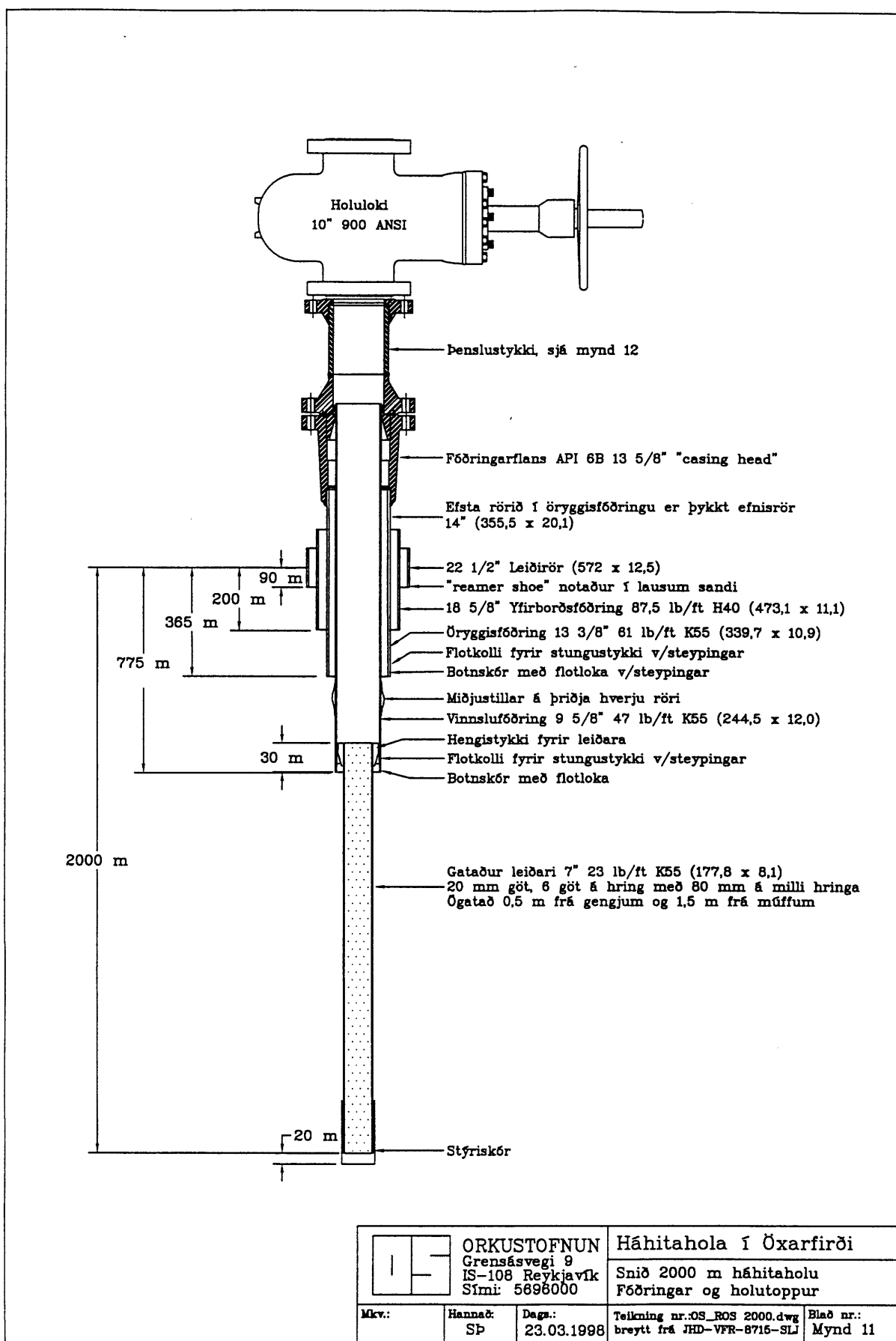
Heiti fóðringar	Utannál (")	Þykkt fóðurrörs	Stál. API	Gengjur API	Röralengd (m)	Heildarlengd
Leiðirör	22,5"	572x12,5		fösun		90 m
Yfirborðsfóðring	API 18 5/8"	87,5 lb/ft	H-40	fösun	7,62-10,36	200 m
Öryggisfóðring	API 13 3/8"	61 lb/ft	K-55	buttress	10,36-14,63	365 m
Vinnslufóðring	API 9 5/8"	47 lb/ft	K-55	buttress	10,36-14,63	775 m
Raufaður leiðari	API 7"	23 lb/ft	K-55	buttress	10,36-14,63	1250 m

6. BORPLAN OG AÐKOMA

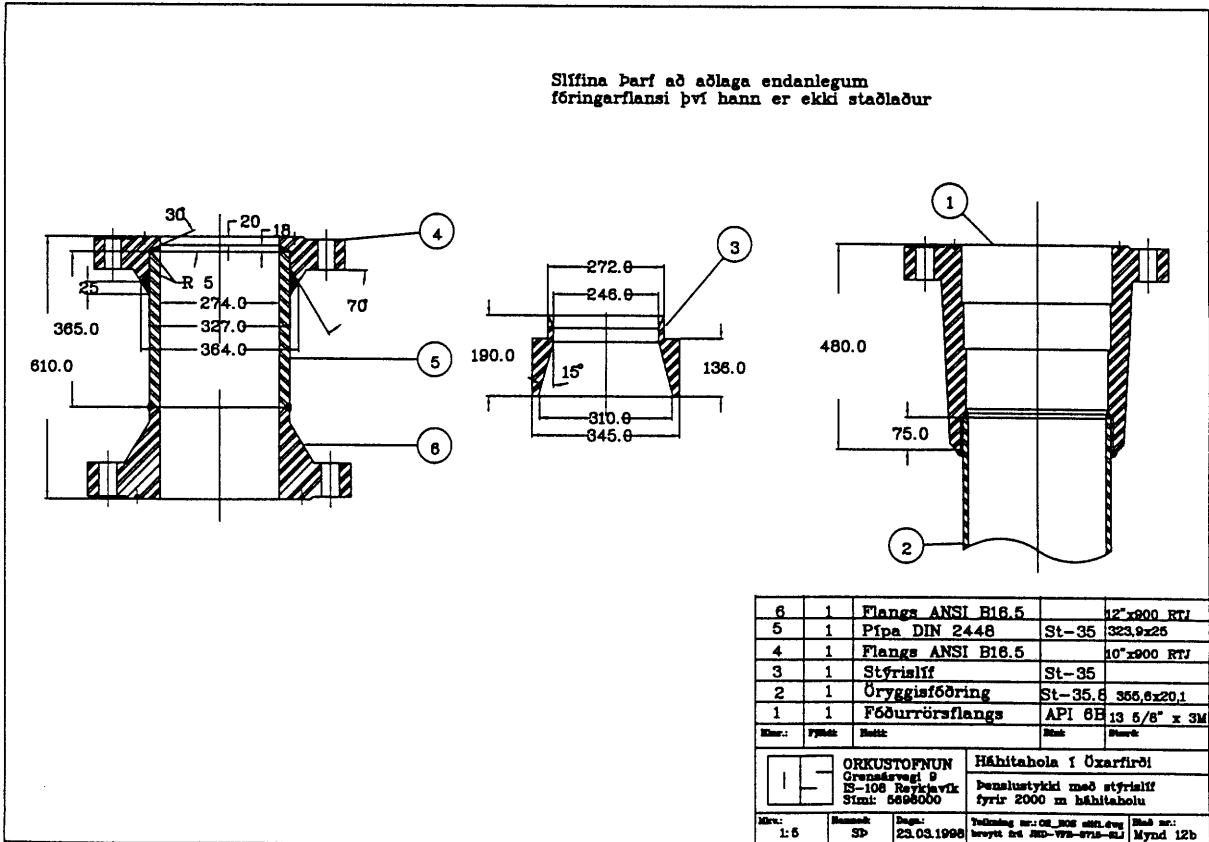
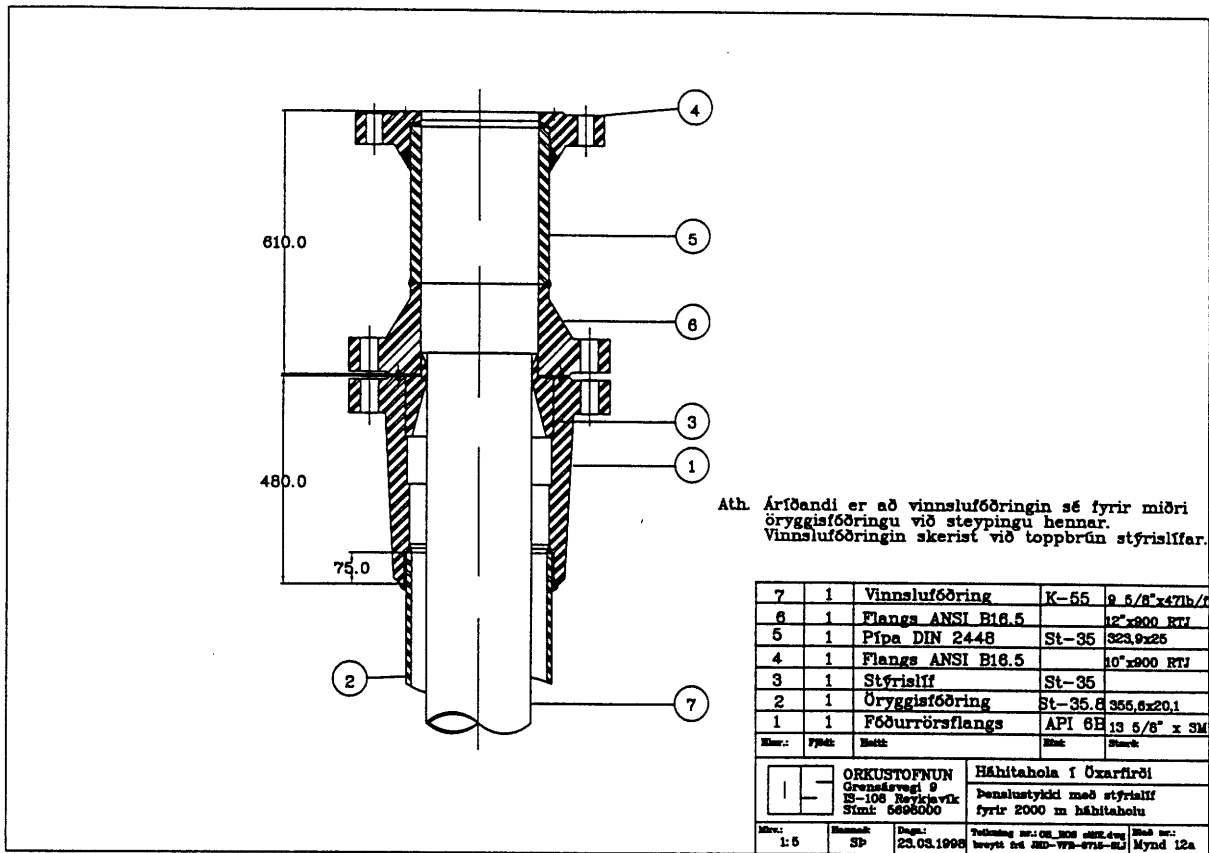
Fyrst verður forborað með hentugu bortæki og er ekki reiknað með miklum vegabótum eða borplani fyrir hann. Áður en jarðborinn Jötunn er fluttur á staðinn þarf að leggja veg sem þolir þungaflutning með dráttarbíl og aftanívagni sem vegur um 40 tonn. Borinn er samtals um 400 tonn á þyngd og er hann fluttur á 24 vögnum. Auk þess þarf að flytja 170 tonn af fóðurrörum á staðinn, 100 tonn af sementi, 25 tonn af borleðju og 30 tonn af díselolíu.

Borplan fyrir Jötunn er sýnt á mynd 14. Mikilvægt er að vanda til fyllingar og þjöppunar á skyggða svæðinu umhverfis holuna því að bormastrið með fylgihlutum vegur um 190 tonn þegar borað er í 2000 m dýpi. Til álita kemur að steypa plan undir bormastrið. Forsteyptur kjallari sem er 1 m að dýpt er settur í planið um leiðirörið (sjá mynd 14). Frárennislögn er lögð frá kjallaranum út í leðjuþróna. Við gerð borplansins og alla borframkvæmd verður að gæta þess að valda sem minnstu jarðraski. Gera þarf vegarslóða að árbakkanum til að þjóna dælum sem sjá bornum fyrir skolvatni. Vatnslögnin að bornum er úr áli og hægt að leggja hana án nokkurs jarðrasks.

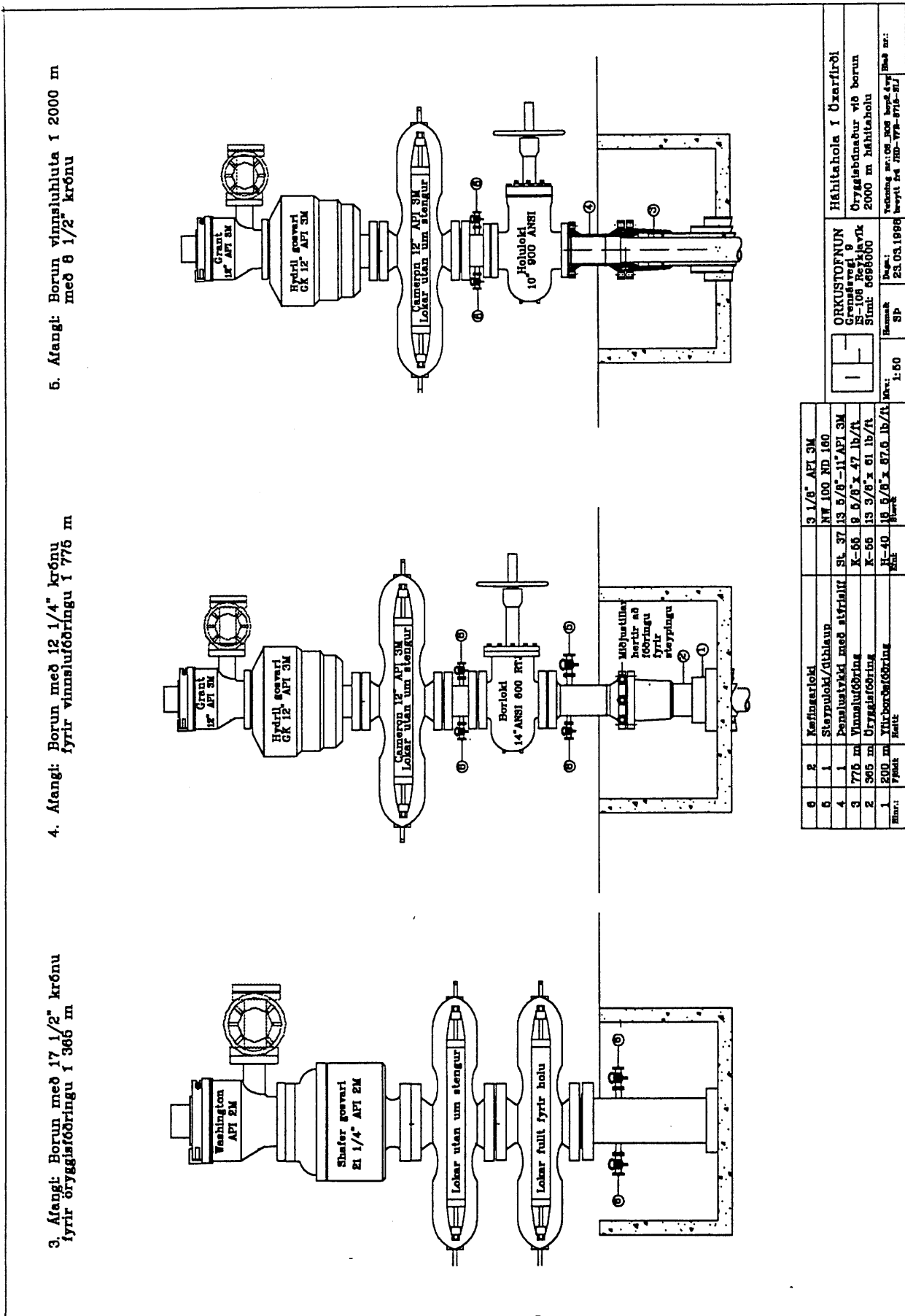
Við borplanið verður safnþró fyrir borsvarf og leðju og fellur þar til svarf (140 m³) og megnið af þeirri borleðju og sementi sem berst frá holunni. Vatni, sem ekki er dælt aftur niður í holu, er fleytt um yfirfall úr leðjuþrónni.



Mynd 11. Snið 2000 m háhitaholu við Bakkalaup í Öxarfirði



Mynd 12. Penslustykki með stýrislíff fyrir 2000 m háhitaholu



5. Afangl: Borun vinnsluhluta í 2000 m með 8 1/2" krönu

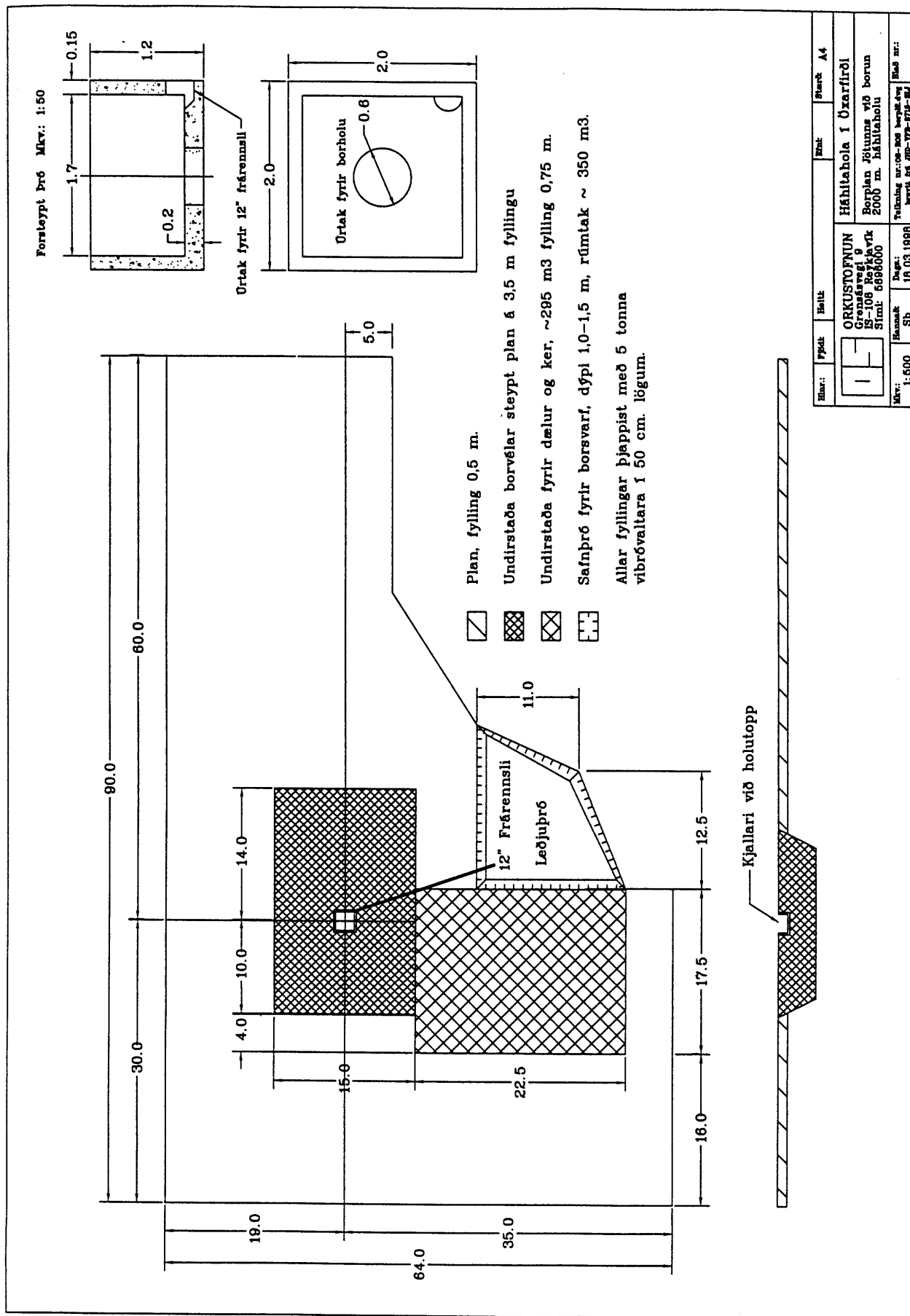
4. Afangl: Borun með 12 1/4" krönu fyrir vinnsluföringu í 776 m

3. Afangl: Borun með 17 1/2" krönu fyrir öryggisföðringu í 366 m

6	2	Kerfisstofli	3 1/8" API 3M
6	1	Stærpulki/úthlaup	NY 100 RD 160
4	1	Penalutviki með aftrifur	St. 37 IS 5/8"-11" API 3M
3	776 m	Vinnsluföring	K-66 8 5/8" x 47 lb/ft
2	366 m	Öryggisföðring	K-66 IS 3/8" x 61 lb/ft
1	200 m	Virkborðsföðring	H-40 10 5/8" x 87.6 lb/ft
		Stett	
		Skil	

ORKUSTOPUN	Háhitahola í Öxarfirði
Grensárei 9	Öryggisbúnaður við borun
St.-08	2000 m háhitahola
Stimr. 0898000	
Draga:	Draga: nr. 06_jod_bopd.4.mj
Samtak	Breytt frá JSD-WP-8716-01
1:60	
SP	
23.03.1988	

Mynd 13. Öryggisbúnaður við borun 2000 m háhitaholu við Bakkahlaup í Öxarfirði



Mynd 14. Borplan Jötuns við borun 2000 m háhitaholu við Bakkahlaup

7. LÝSING Á BORVERKINU

Verklýsingin nær ekki til allra verkþátta, heldur er henni ætlað að lýsa holunni og þeim atriðum sem talið er að geti stuðlað að öruggu og góðu verki.

Umfram hefðbundna háhitaborun einkennist verkið af eftirfarandi atriðum:

1. Nauðsynlegum viðbúnaði vegna hugsanlegs olúgass
2. Borun í setlög ofan við 1 km dýpi
3. Kjarnatöku á 2-5 stöðum í holunni
4. Fjórum steypum fóðringum

7.1 Leiðirör (0-90 m) - áfangi 1

Leiðirör nær niður á 90 m dýpi og verður leðjuborað fyrir því með hentugum bor og það steyp fast. Við steypinguna þarf að fergja fóðringuna til að fyrirbyggja að hún gangi upp. Jarðlög á þessu dýptarbili eru leirrík sandlög sem gætu lagst að fóðringunni og því er mikilvægt að steypa hana sem fyrst.

7.2 Yfirborðsfóðring (0-200m) - áfangi 2

Leðjubora þarf fyrir yfirborðsfóðringu með 21" borkrónu niður á 200 m dýpi. Holan verður fóðruð með 18 5/8" fóðurröri og það síðan steyp fast.

Engu er hægt að spá fyrir um lekastaði í berginu og stærð þeirra. Komi fram mikill leki (meiri en 10-15 l/s) verður borun stöðvuð og steyp í lekann, en minni töp verður reynt að þétta með sagi og spónum eftir því sem kostur er.

Áfanga 2 má skipta í eftirfarandi þætti:

- a. Holuflans er soðinn á leiðirörið fyrir gosvarana og þeir þrýstiprófaðir.
- b. Borkrónu, 21", slakað niður að steypu og hún boruð út með vatni. Síðan verður borað áfram með borleðju niður í 200 m dýpi.
- c. Áður en borstrengurinn er hífður upp er holan kæld og hitamæld til að ganga úr skugga um að goshætta sé ekki yfirvofandi.
- d. Holan er síðan hita-, víddar- og jarðlagamæld eftir að borstrengurinn hefur verið tekinn upp.
- e. Mikilvægt er að láta renna á holuna og halda henni fullri þannig að hún nái ekki að hitna upp meðan á mælingum og fóðrun stendur.
- f. Fóðrað er með 18 5/8" fóðringu og hún steyp föst.
- g. Fóðringin er hita- og steypugæðamæld eftir að steypingum er lokið.

7.3 Öryggisfóðring (200-365 m) – áfangi 3

Öryggisfóðring er áætluð niður í 365 m dýpi. Engu er hægt að spá fyrir um lekastaði í berginu og stærð þeirra. Komi fram mikill leki (meiri en 10-15 l/s) verður borun stöðvuð og steypt í lekann, en minni töp verður reynt að þétta með sagi og spónum eftir því sem kostur er. Þessi hluti holunnar er boraður með borleðju. Eiginleikum borleðju er lýst í kafla 9 um skolvökva.

Áfangi 3 má skipta í eftirfarandi þætti:

- a. Holuflans er soðinn á yfirborðsfóðringuna fyrir öryggislokann og tveir stútar fyrir kæfingar- og úthlaupsloka (mynd 13).
- b. Öryggislokarnir eru prófaðir með því að loka að stöng og síðan er þrýstiprófað áður en steypan er boruð út. Holan er fyllt af vatni og 10 bar-y þrýstingur látinn standa á holunni í 15 mínútur. Lokunartími öryggislokans er skráður og þrýstingur á holunni í upphafi og í lok þrýstiprófunar.
- c. Borkrónu, 17 1/2", slakað niður að steypu og hún boruð út með vatni. Síðan þarf að bora 2-3 m niður í berg. Borkróna er þá tekin upp í fóðringu, lokað að stöngum og holan fyllt af borvökva og dælt þar til 10 bar-y þrýstingi er náð. Síðan eru jarðlögin þrýstiprófuð (leak-off test) með steypudælu borsins. Dælt er um 1 l/s í mínútulutum og þrýstingur skráður sem fall af dældu heildarmagni. Prófuninni er lokið þegar þrýstifall verður (eða fyrr samkvæmt ákvörðun). Þar með er vitneskja fengin um brotþrýstinginn, sem ræður því hámarksdýpi sem óhætt er að bora í við þennan áfanga.
- d. Borað er niður á a.m.k. 365 m dýpi. Borleðja verður notuð við borunina. Holan er hallamæld á 100 m fresti. Í borstreng er hafður krónurýmari og ein stýring milli fyrstu og annarrar álagsstangar. Einstefnuloki er hafður við krónu.
- e. Ákvörðun um lokadýpi er tekin af staðarjarðfræðingi út frá gerð jarðlaga milli 365 m og þess hámarksdýpis sem þrýstiprófunin leyfir.
- f. Áður en borstrengurinn er hífður upp úr holunni verður hún kæld og hitamæling gerð til að ganga úr skugga um að goshætta sé ekki til staðar.
- g. Holan er hita-, víddar- og jarðlagamæld eftir að borstrengurinn hefur verið tekinn upp.
- h. Mikilvægt er að láta renna á holuna samfellt og halda henni fullri þannig að hún nái ekki að hitna upp meðan á mælingum og fóðrun stendur. Ef holan er yfirþrýst, getur þurft að loka af stöngum eða fóðringu og dæla á hana.
- i. Fóðrað er með 13 3/8" fóðurrörum og er botnskór með einstefnuloka hafður neðst ("float-shoe"), síðan tvö heil fóðurrör og því næst svonefndur flotkollli ("float-collar" - stykki með einstefnuloka og tengingu fyrir stangir til steypingar). Efsta fóðurrörið er auðsjóðanlegt efnisrör úr auðsjóðanlegu stáli. Er það gert til þess að auka tæringarþol holutoppins. Á fóðringuna eru settar 9 grindur til miðjustillingar, tvær á neðsta rörið,

og síðan ein á þriðja hvert rör. Endanleg staðsetning miðjustilla tekur mið af niðurstöðum víddarmælinga, þannig að þeir lendi ekki við skápa í holunni.

- j. Næst eru borstangirnar tengdar flotkollanum og vatni dælt til að kæla holuna fyrir steypingu og meta skoltap. Ef skoltap er meira en 5-10 l/s verður reynt að stífla það með því að skola sandi niður milli fóðringar og holuveggjar samtímis því að vatni er dælt hægt um borstrenginn. Áður en steyping hefst er öryggisfóðringin miðjustillt.
- k. Fóðringin er steypd með tækjum borsins (sjá kafla 10 um steypingu fóðringa). Sérstakt eftirlit er haft með framkvæmdinni. Ef sementseðjan kemur ekki upp er steypugæðamælt og ákvörðun tekin um frekari aðgerðir. Þeim verður ekki lýst frekar í verklýsingunni, enda þarf að taka ákvörðun þar um á staðnum. Nauðsynlegt er að steypan fái a.m.k. 8 klst. hörðnunartíma.
- l. Öryggislokinn er tekinn af yfirborðsfóðringunni og hún skorin í sundur. Síðan er öryggisfóðringin (13 3/8") skorin í sundur og endanlegur holuflangs er soðinn á öryggisfóðringuna, 13 5/8" x API 3000. Í kafla 11 um suðuvinnu er að finna lýsingu á flangساسuðunni, hitameðferð og þrýstiprófun.
- m. Fóðringin er hita- og steypugæðamæld eftir að öllum steypingum er lokið.

7.4 Vinnslufóðring (365-775 m) - áfangi 4

Áfanga 4 má skipta í eftirfarandi þætti:

- a. Holutopps- og öryggislokabúnaði er komið fyrir á holunni.
- b. Áður en steypan, flotkollinn og flotskórinn eru boruð út eru öryggislokarnir þrýstiprófaðir. Lokað er að stöng og þrýstiprófað þannig að hver loki fyrir sig er reyndur sérstaklega. Holan er fyllt af vatni og 30 bar-y þrýstingur látinn standa á holunni í 15 mínútur. Athugað er hvort leki kemur fram og einnig er opunar- og lokunartími lokanna skráður ásamt þrýstingi í holu við upphaf og lok þrýstiprófunar.
- c. Þegar búið er bora niður úr steypunni er holan þrýstiprófuð með sömu aðferð og lýst er í kaflanum um öryggisfóðringuna.
- d. Holan er boruð með 12 1/4" borkrónu með krónurýmara. Stýringar eru hafðar milli fyrstu og annarrar og milli annarrar og þriðju álagsstangar. Einstefnuloki er hafður við krónuna. Vatn eða borleðja er notuð sem skolvökvi við borunina.
- e. Borun er stöðvuð og holan hallamæld með tækjum borsins á u.þ.b. 100 m fresti. Bora á holuna sem næst lóðrétt og fari hallinn yfir 3° er athugað hvort beita beri aðgerðum til að rétta stefnuna af.
- f. Ákvörðun um hugsanlega kjarnatöku á 1-2 kjörnum verður tekin samkvæmt tillögu staðarjarðfræðings. Þvermál kjarna verður 100 mm og lengdin um 2-3 m, þ.e. 4-6 m verða boraðir. Um leið verður metið hvort ástæða sé til gassýnatöku eða djúpsýnatöku

af vatninu. Miðjustilla þarf álagsstrenginn fyrir kjarnaborunina þar sem kjarnatökutækið er gert fyrir 8 1/2" holu en ekki 12 1/4" holu.

- g. Ákvörðun um fódrunardýpi verður tekin á staðnum, samkvæmt tillögu staðarjarðfræðings og eftir sömu viðmiðunum og fyrir hvað varðar öryggi vegna jarðlagaprýstings, en jafnframt tekið tillit til áætlaðs hitastigs út frá ummyndun.
 - h. Áður en borstrengurinn er hífður upp úr holunni verður hún kæld rækilega og hitamælingar gerðar til að ganga úr skugga um að goshætta sé ekki til staðar.
 - i. Holan er hita-, víddar- og jarðlagamæld eftir að borstrengurinn hefur verið tekinn upp.
 - j. Mikilvægt er að vatn sé látið renna samfelld á holuna, þannig að hún nái ekki að hitna á meðan á mælingum og fódrun stendur.
 - k. Vinnslufóðringin, 9 5/8", er sett í holuna. Neðst á fóðringuna er fóðringarskór með einstefnuloka, þá tvö heil fódurrör og því næst flotkoll. Mikilvægt er að gengjur fóðringanna séu hreinsaðar og endursmurðar með háhitafeiti áður en til fódrunar kemur. Þær eru síðan skrúfaðar í botn, þ.e. þar til múffan nemur við þríhyrnt merki sem er á efra rörinu hið minnsta en fer heldur ekki upp fyrir merkið. Komi í ljós að ekki takist að ná tilskilinni herslu eða að sýnilega sé eitthvað að gengjunum er rörið tekið frá sem gallað.
- Á fóðringuna eru settar 28 grindur til miðjustillingar, tvær á neðsta rörið, og síðan ein á þriðja hvert rör. Endanleg staðsetning miðjustilla tekur mið af niðurstöðum víddarmælinga, þannig að þeir lendi ekki við skápa í holunni. Því næst eru borstangirnar tengdar flotkollanum og vatni dælt til að kæla holuna fyrir steypingu og til að meta skoltap. Ef skoltap er meira en 5-10 l/s verður reynt að stífla það með því að skola sandi niður milli fóðringar og holuveggjar samtímis því að vatni er dælt hægt um borstrenginn. Stilliskrúfur eru á millistykki og eru þær hertar að 9 5/8" fóðringunni eftir að vinnslufóðringin er komin í lokadýpi. Þetta er gert til að miðustilla fóðringuna fyrir steypingu vegna þenslustykkis sem kemur síðar á holuna.
- l. Fóðringin er steypd með tækjum borsins. Sérstakt eftirlit er haft með framkvæmdinni. Ef sementseðjan kemur ekki upp er steypugæðamælt og ákvörðun tekin um frekari aðgerðir. Þeim verður ekki lýst frekar í verklýsingunni, enda þarf að taka ákvörðun þar um á staðnum. Nauðsynlegt er að steypan fái a.m.k. 8 klst hörðunartíma.
 - m. Öryggislokarnir eru teknir af holunni. Síðan tekur við nákvæmnisverk við að setja þenslustykkið á holuna.
 - n. Fóðringin er hita- og steypugæðamæld eftir að öllum steypingum er lokið.

7.5 Borun vinnsluhluta (775-2000 m) - áfangi 5

Borun áfanga 5 má skipta í eftirfarandi þætti:

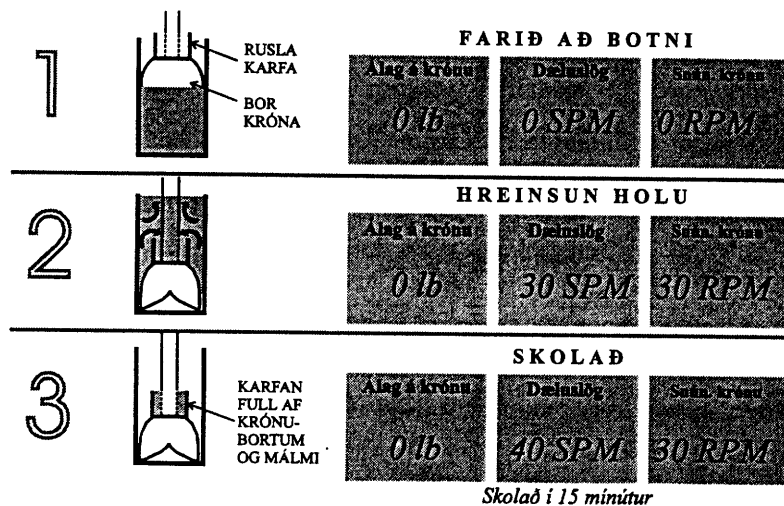
- a. Holutopps- og öryggislokabúnaði fyrir áfanga 5 er komið fyrir.
- b. Áður en steypan, flotkollinn og flotskórinn eru boruð út er hver öryggisloki þrýstiprófaður sérstaklega. Lokað er að stöng og holan fyllt af vatni. Þá er 30 bar-y þrýstingur settur á og látinn haldast í 15 mínútur. Athugað er hvort leki kemur fram og einnig er opunar- og lokunartími lokanna skráður ásamt þrýstingi í holu við upphaf og lok þrýstiprófunar.
- c. Holan er boruð með 8 1/2" borkrónu með krónurýmara. Stýringar eru hafðar milli fyrstu og annarrar álagsstangar og milli annarrar og þriðju álagsstangar. Einstefnuloki er hafður við krónuna. Vatn er notað sem skolvökvi við borunina.
- d. Kjarnar teknir úr holunni á 2-3 stöðum, samkvæmt frekari ákvörðun verkkaupa að fenginni tillögu staðarjarðfræðings.
- e. Borun er stöðvuð og holan hallamæld með tækjum borsins á u.þ.b. 100 m fresti. Holan er boruð sem næst lóðrétt og fari hallinn yfir 5° er athugað hvort beita beri aðgerðum til að rétta stefnuna af.
- f. Ákvörðun um lokadýpi verður tekin af verkkaupa.
- g. Áður en borstrengurinn verður hífður upp úr holunni verður holan kæld og hitamælingar gerðar til að ganga úr skugga um að goshætta sé ekki til staðar.
- h. Holan er hita-, víddar- og jarðlagamæld eftir að borstrengurinn hefur verið tekinn upp.
- i. Mikilvægt er að vatn sé látið renna samfelt á holuna, þannig að hún nái ekki að hitna á meðan á mælingum og fóðrun stendur.
- j. Gataður 7" leiðari er settur í holuna. Miðað er við að leiðarinn sé hengdur um 20 m frá botni holunnar og að hengistykkið sé um 30 m uppi í vinnslufóðringunni. Efst á leiðaranum er hengistykki með 7" buttress pinna og gripklossum fyrir 9 5/8" fóðringu. Þegar leiðarinn hefur verið hengdur, er sleppistykkið aftengt og tekið upp.
- k. Áður en borinn er tekinn af holunni er holan þrepaprófuð. Þetta er gert til mats á gæfni holunnar og einstakra vatnsæða ásamt því að meta hvort ástæða sé til örvunaraðgerða meðan borinn er á staðnum. Áætlað að þetta verk taki a.m.k. hálfan sólarhring.

7.6 Kjarnataka

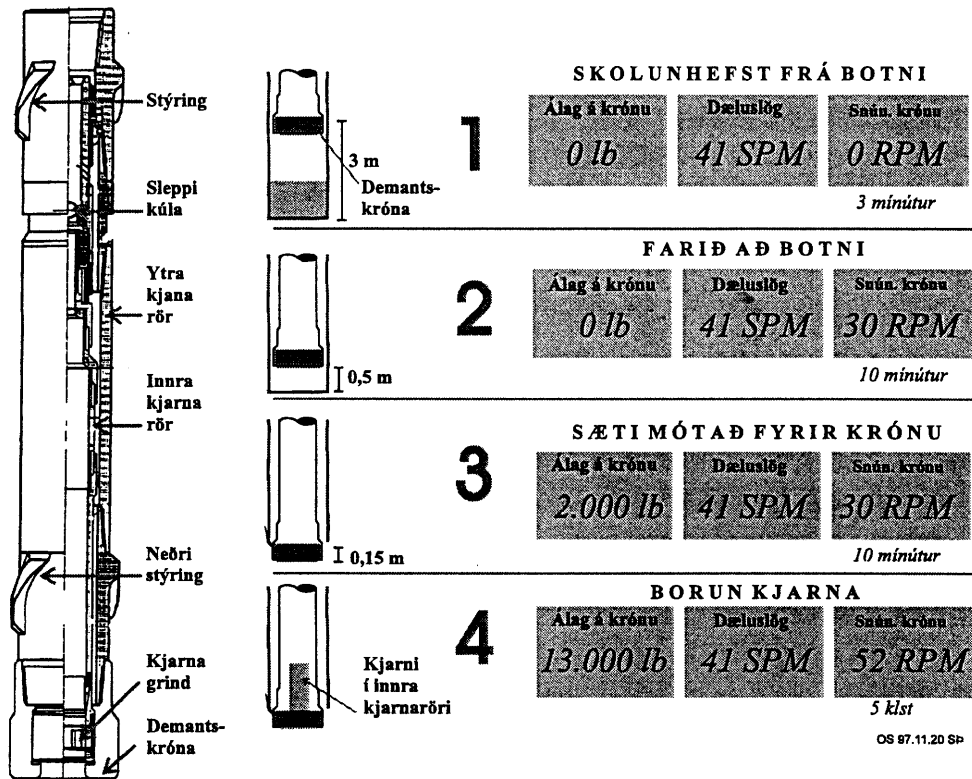
Ástæður fyrir kjarnatöku eru ræddar annars staðar í skýrslunni (kafla 13.1.3). Við kjarnatökuna er notaður kjarnatökubúnaður fyrir 8 1/2" holu sem getur tekið 4-6 m langan kjarna í einni ferð. Við kjarnatöku í 12 1/4" holu þarf því að nota miðjustilla í álagsstreng. Val á borkrónu og kjarnagrind fer eftir jarðlögum. Demantskróna og gripgrind verður notuð við kjarnaborun í gosberg, en hjólakróna eða karbíthnallur, ásamt lokuspjaldi ef jarðlögin eru laus.

Á myndum 15 og 16 er lýst aðgerðaröð við hreinsun holu og aðalatriðum kjarnatöku. Gert er ráð fyrir að borverkfærðingur stýri aðgerðum við kjarnatökuna.

Hver kjarnataka mun taka u.þ.b. 2 sólarhringa og er kostnaður við hverja kjarnatöku því vart undir 2 milljónum króna. Kostnaður við rannsókn hvers kjarna nemur 5-10% í viðbót.



Mynd 15. Hreinsun holu með ruslakörfu áður en kjarnatökutæki er sett í holuna.



Mynd 16. Mynd af kjarnatökutæki og helstu þrep við kjarnatökuna.

8. ÖRYGGISKRÖFUR

Við borunina verður að viðhafa ítrustu varkárni þar sem hér er um að ræða fyrstu holu á þessu háhitasvæði. Kröfur um öryggisloka, styrk efnis o.fl. eru við það miðaðar að hættuástand myndist ekki þótt holan taki upp á því að gjósa. Þá skipta rétt viðbrögð boráhafnar til að kæfa gos og fást við önnur ófyrirséð atvik höfuðmáli. Mikilvægasta öryggisatriðið til að fyrirbyggja skyndigos er að sífellt sé dælt á holuna, helst þannig að hún haldist full af vatni. Mælt er til að kynningarfundur verði haldinn með allri áhöfn borsins og þeim sem nærri borverkinu koma. Þar verði fyrirhuguðu borverki lýst og farið yfir helstu viðbrögð við óvæntum atburðum, skyndigosum og olúgasi.

8.1 Skyndigos

Mikilvægt er að boráhöfn á vakt fylgist með ástandi holunnar og vísbendingum um óeðlilegar aðstæður. Fyrirboði skyndigoss er m.a.:

- Mikil aukning í borvökva sem streymir úr holunni og hækkun í leðjukari af þeim sökum.
- Hækkaður hiti á borvökva.
- Aukið loft eða gas í borvökva sem berst úr holu.
- Stórt skoltap þannig að vatnsborð fellur í holunni.
- Breyting á snúnigsátaki eða álagi á krónu.

Borinn þarf að hafa mælitæki til að vara við skyndigosi umfram það sem hefur tíðkast. Mælarnir þurfa að sýna vatnsborð í körum, hitastig, þrýsting á úthlaupslögn og dæluslög. Auk þess þarf að hafa sérstakan gasnema við leðjukassann vegna olíu og lífræns gass. Jafnframt er gert ráð fyrir sérstökum gasgreini á borstað til að tegundagreina gasið.

8.2 Mönnun

Holuhönnunin og val öryggisbúnaðar miðast við að fullnægja kröfum um öryggi í borun og rekstri. Miðað er við að öryggi sé ávallt tvöfalt við borunina, þannig að ef önnur vörnin bregst sé hin til staðar. Þessar kröfur eru almennar kröfur við djúpboranir. Vegna hugsanlegs olúgass er nú gerð krafa um að á borstað sé ávallt einn starfsmaður borverktaka sem hlotið hefur þjálfun í að hemja gos og í notkun öryggisbúnaðarins. Vottorð US-MMS, UK-HSE eða frá International Well Control Forum (IWCF) fullnægja kröfum um hæfni og þjálfun starfsmanns. Áður en verk hefst þarf að funda með öllum starfsmönnum sem að borverkinu koma, þar sem verkinu er lýst og sérstaklega farið yfir öryggismál. Einnig þarf að kalla saman starfsmenn borsins vikulega til að æfa viðbrögð við gosi. Vegna eldhættu er óheimilt að reykja í námunda við borinn og hafa verður vindpoka á bornum til að menn geti forðast gasleka. Í öllu verður að fara eftir góðum starfsvenjum við borun og viðurkenndum handbókum við prófanir og beitingu öryggisbúnaðar. Verktakinn skal útbúa sérstök eyðublað til útreikninga á viðbrögðum við gosi (t.d. “kick sheet for BOP, volumetric method kill sheet, kick drill log sheet”) og hengja upp leiðbeiningar til starfsmanna um röð aðgerða sem grípa skal til.

8.3 Öryggislokar

Meginforsenda við val á öryggislokum (BOP) er að ávallt sé tvöfalt öryggi, bæði hvað öryggislokana snertir og stýribúnað þeirra. Stjórnborð fyrir lokana þarf að vera á tveimur stöðum, annað þeirra á borpalli. Uppstilling öryggisloka fyrir hvern áfanga verksins fyrir sig er sýnd á mynd 13. Bæta þarf við fjarstýrðum hemillokum á úthlaupið frá holunni (flow choke manifold) til að blæða gas af henni eftir að öryggislokunum hefur verið lokað. Á því þurfa að vera tveir fjarstýrðir hemillokar og einn handstýrður (flow choke). Frá hemillokunum þarf að leiða lög्न fyrir gas a.m.k. 30 m frá bornum. Gaslöggnin og

kæfingarlögnin þurfa helst að vera úr stáli. Ef gúmmúbarki er notaður í kæfingar- eða úthlaupslagnir þarf að hafa tvo loka við hvorn enda barkans. Þrýstimælar fyrir borstreng og úthlaupið (choke manifold) þurfa að vera þar sem lokunum er fjarstýrt af borpalli, ásamt slagateljara fyrir dælur borsins. Krafa er gerð um að þrýsti- og virkniprófa öryggislokana hvern fyrir sig í 15 mínútur áður en steypa er boruð út í hverjum áfanga. Einnig ber að þrýstiprófa lagnir að og frá holunni í 5 mínútur við hönnunarþrýsting.

8.4 Fyrirbyggjandi aðgerðir

Leitast skal við að halda holunni ávallt fullri af borvökva. Þetta á við í borun, þegar bætt er í stöng, við upptekt borstrengs, í mælingum, og þegar borinn er stopp. Sé goshætta talin fyrir hendi skal draga úr hífingarhraða til að fyrirbyggja strokkun holunnar ("swabbing").

9. SKOLVÖKVI

Vatn er notað til skolunar og mun verktaki leggja til vatnslögn að bornum og annast rekstur vatnsveitu. Verði algert skoltap þarf 40 l/s af vatni að staðaldri á borinn, því að annars geta komið til tafir meðan vatni er safnað í karið.

Við borun með 21" og 17 1/2" borkrónum er gert ráð fyrir að borleðja verði notuð. Bentonít leir er blandað í vatnið (um 5%) og seigju leðjunnar haldið á bilinu 45-55 sek (trektartíma). Leðjan er hreinsuð á hristisigti og í sandskiljum. Leðjunotkun getur orðið 12 til 26 tonn en það fer því hversu miki tap verður í holunni. Seigja leðjunnar er skráð á tveggja stunda fresti ásamt bentonítotkun.

Ef gos verður í holunni, getur þurft að laga borleðju með hárrí eðlisþyngd. Er þá fyrst löguð venjuleg borleðja, en þar sem hún hefur aðeins eðlisþyngd um 1,05 þarf að bæta eðlisþyngu efni í hana. Til þess er notað baríumsúlfat (barít) og þarf 500-600 kg af baríti í hvern rúmmetra leðju til að ná eðlisþyngdinni 1,4. Ákvörðun um notkun þungrar leðju verður aðeins tekin á staðnum og eðlisþyngdin ákvörðuð út frá þeim þrýstingi sem þarf að yfirvinna (sjá Drilling Data Handbook, bls. 273). Ein af hönnunarforsendum fyrir lengd fóðringa er að hægt sé að laga leðju með eðlisþyngna 1,4 til að kæfa gos í holunni. Til að fylla vinnslufóðringuna af þungrri leðju þarf $(800 \text{ m} \times 39 \text{ l/m}) = 31.200$ lítra eða um 17 tonn af baríti. Þetta lágmarksmagn þarf að vera tiltækt þannig að hægt sé að grípa til þess með stuttum fyrirvara. Komi til notkunnar þungrar leðju þyrfti auka leðjukar (með hræru) helst að vera á borstað.

10. STEYPING FÓÐRINGA

Fóðringarnar eru steypar með sementseðju sem þolir háhita. Þurrefnið er portlandsement frá Sementsverksmiðjunni hf., auk innflutts kísilsalla, perlusteins og bentoníts. Er því blandað saman á borstað áður en til steypingar kemur. Blöndunarhlutföll þurrefnis eru sýnd í töflu 3.

Tafla 3. Blöndunarhlutföll þurrefnis í sementseðju sem þolir háhita

Portlandsement frá SR	100 kg
Kísilsalli -325 mesh (SikronM-300 eða sambærilegur)	40 kg
Perlusteinn (Harborlite 20x30)	2 kg
Bentonít (Wyoming)	2 kg
Tafefni (eftir þörfum, ca. 0,5%)	0,5 kg

Framangreind efni eru sett á sementskúlu borsins og blásið í réttum hlutföllum í einn sementsgeymi sem tekur um 35 tonn. Efninu er síðan blásið milli tveggja geyma a.m.k. þrisvar sinnum til að það nái að blandast. Verktakinn leggur til framangreind bætiefni í sementið auk tækja og mannskaps við að blanda þeim saman. Upplýsingum um efnisgæði og framleiðendur er skilað með fóðringarskýrslu (steypuskýrslu).

Framangreindu sementsefni er síðan blandað við vatn í blandara sem þarf að afkasta um 1 tonni af þurrefni á mínútu. Þar þískast saman við ofanefnt þurrefnismagn í töflunni (byggt á 100 kg af portlandsementi) um 80 l af vatni og úr verða 139 l af sementseðju sem hefur eðlisþyngd 1,6.

Eðlisþyngd eðjunnar er skráð á þriggja mínútna fresti og henni haldið sem næst 1,60. Steypt er þar til sement kemur upp utan með fóðringunni, eða þá að áætluðu magni hefur verið dælt í holuna. Liðlega tvöfalt sementsmagn (120% umfram reiknað magn út frá rúmmáli bils milli fóðringar og holu) þarf að vera til staðar þegar steypingin hefst. Víddarmæling gefur nákvæmari efnisþörf til kynna.

Áætluð efnisþörf:

1. Steyping leiðirörs 90 m 15 tonn
2. Steyping yfirborðsfóðringar 200 m 15 tonn
3. Steyping öryggisfóðringar 365 m 30 tonn
4. Steyping vinnslufóðringar 775 m 30 tonn

Steypingu verður stjórnað af verkfræðingi sem gefur frekari fyrirmæli á staðnum.

11. SUÐUVINNA

Eftirfarandi suðuvinna tengist borverkinu:

- Suðuvinna við leiðirör og yfirborðsfóðringu
- Flangsa fyrir öryggisloka og kæfingarstúta
- Fóðringarflangs á öryggisfóðringuna (sem endanlega verður aðalflangs holunnar)

Hér er um vandasamar suður að ræða og er því algert skilyrði að suðumenn sem vinni verkin hafi gild hæfnisvottorð Iðntæknistofnunar fyrir málmsuðu, prófflokk E-R2-g og fyrir suðustöðu 2R og 5R (E=rafsuða, R2=efnisflokkur stáls St 37.2-St 52.3, g=efnisþykkt >6mm, 2R og 5R rörasuða lóðrétt og lárétt). Suðumaður þarf að leggja fram afrit af vottorði og suðuferilslýsingu áður en verkið hefst.

Um suðu fóðringarflangs á öryggisfóðringuna gildir eftirfarandi lýsing:

- Hallamál borið á flangsinn á fjórum stöðum. Flangsinum tyllt með suðupunktum og halli nældur á ný.
- Flangsinn og fóðringin forhituð í 120-200°C á 10 cm svæði ofan og neðan við suðustað. Hitakrít notuð til ákvörðunar á forhitun.
- Botnstrengur soðinn með 3-4 mm vír. Yfirsuða gerð með 4 mm vír. Byrjað er á að sjóða að innan. Tegund rafsuðuvírs er valinn með tilliti til stálsins í efsta fóðurrörinu, sem er þykkt efnisrör.
- Eftirhitun í 260-480°C og suðan vafin teppi til að stykkið kólni ekki of hratt.
- Þegar toppurinn hefur kólnað niður fyrir 100°C er gasflaska tengd við fóðringarflangsinn og þrýstiprófað með 60 bar-y þrýstingi. Þessum þrýstingi er haldið í minnst 15 mínútur og kannað með sápu hvort leki sé á suðu.

12. SKRÁNING UPPLÝSINGA OG AFHENDING GAGNA

Mikilvægt er að skrá reglulega þær upplýsingar sem fást meðan á borun stendur. Kemur það mikið til í hlut áhafnar borsins að sinna því. Veigamikið er að borskýrslur séu fylltar út samviskusamlega eins og þær gefa tilefni til. Yfirlit um helstu upplýsingar sem verkaki afhendir verkkaupa er sýnt í töflu 4. Þær skal afhenda fulltrúa verkkaupa jafnharðan. Þegar vart verður við stórt skoltap eða aðra vísbendingu um að vatnsæð hafi verið skorin, skal það skráð í borskýrslu og tilkynnt fulltrúa verkkaupa. Það sama á við ef vart verður við gasleka eða annað óvenjulegt, t.d. óvenju dökka borleðju.

Tafla 4. Helstu upplýsingar og gögn sem verktaki skal afhenda verkkaupa

Gögn afhent verkkaupa	Hvað skráð og hvernig	Tíðni
Borskýrslur-vaktaskýrslur	Samkvæmt eyðublaði Jarðborana hf.	1 sinni á klst
Borriti (Geograph)	Borhraði, krókátak, dæluþrýstingur. Afrit af sírita-blaði. Borari merki einnig inn á síritablaðið dýpi þegar drifstöng (kelly) er niðri. Síritinn alltaf hafður á, líka við upptektir.	12 klst síritablað
Svarfsýni	Svarfsýni sett í 120 ml dósir og þær merktar með holunúmeri, stað, dýpi, dagsetningu og tíma	Á 2 m bili
Svarfsýni	Svarfsýni til kolefnismælinga (TOC) er í sérstök loftþétt ílát sem merkt eru á sama hátt	Á 30 m bili eða oftar skv. beiðni
Svarfsýni	Svarfsýni sett í 1 l fötu	Á 100 m bili
Borkjarnar	Kjarnakassar	4-6 kjarnar
Mælingar á skolvökva	Tegund skolvökva, skoltöp, dæluslög, þrýstingur á dælu, hiti upp og niður á skolvökva, notkun á spónum og þéttiefnum.	Á 4 tíma fresti, eða á 20 m fresti, hvort sem kemur fyrir.
Borstrengur	Lengd á hverri borstöng og tengjum ásamt heildar- lengd á borstreng með drifstöng niðri. Fiskunarmál (OD og ID)	Þegar bætt er í borstöng
Fóðrunarskýrsla	Samkvæmt eyðublaði Jarðborana hf.	Að fóðrun lokinni
	Einnig eyðublað með mælingum frá fóðurrörasteypingu (steypumagn, dæluslög, P _o , eðlisþyngd, eftirdæling).	
Skýrsla um steypingu í skoltöp	Hve mikið skoltap, áætlað dýptarbil, steypumagn dælt í holu, eðlisþyngd, dýpi borstangar við steypingu, eftirdæling. Dýpi mælt á yfirborð steypu eftir hverja steyputilraun og dýpi á vatnsborð. Skoltap fyrir útborun.	Að lokinni tilraun
Efnisvottorð og teikningar	Um allt efni skal leggja fram upplýsingar framleiðanda um tegund, gæði og eiginleika þ.m.t. um meðhöndlun og hættu sem stafar af notkun þess. Af tækjum og tólum sem fara í holu og verða hluti af endalegri gerð holunnar skulu lagðar fram teikningar.	Viku fyrir notkun efnisins
Suðvottorð og suðuferilslýsingar	Suðumenn skulu leggja fram hæfnisvottorð og suðuferilslýsingu fyrir hverri gerð suðu á fóðringu og holutoppi.	Viku fyrir áætlað verk

13. RANNSÓKNIR MEÐAN Á BORUN STENDUR

Unnið verður jafnóðum úr jarðfræðilegum upplýsingum með smásjárskoðun á svarfi og öðrum upplýsingum sem safnað er samhliða boruninni. Jarðlagagreiningin miðar að því að segja til um jarðlagagerð, ummyndunarbelti og þróun jarðhitavirkni. Gerð vatnsæða verður greind jafnharðan eftir því sem tók eru á, fylgst verður með setgerð með tilliti til lífrænna leifa (móðurbergs), hugsanlegri olú og tjöromyndun. Tillögur um sérstakar sýnatökur og kjarnatökur verða settar fram í ljósi ofangreindra atriða. Fylgst verður með gasviðvörðunartæki og sérstök gassýni tekin hvenær sem þess gerist þörf. Loks er safnað upplýsingum um jarðlagagerð og ummyndun bergsins til lausnar hugsanlegum vandamálum í borun sem kann að mega rekja til ástands holunnar eða jarðlagagerðar.

Borholumælingar eru fyrirhugaðar að loknum hverjum áfanga. Holan er víddarmæld til að meta ástand hennar fyrir hverja fódöringu (hrunkaflar og skápar), hvar setja skuli miðjustilla á fódöringarnar og til ákvörðunar á sementsmagni. Jarðlagamælingar eru gerðar áður en fódrað er, til söfnunar á jarðfræðilegum upplýsingum um eðli bergs. Að borun lokinni er holan þrepprófuð til að meta lekt berglaga og væntanleg afköst. Holan verður örðuð með ádælingu ef niðurstaða þrepprófunar gefur tilefni til þess. Síðan verður henni hleypt upp og hún aflmæld.

Sýni af jarðhitavökva verða aðallega tekin eftir að borun holunar er lokið, í upphleypingu og blæstri. Vegna hugsanlegs olúgass og setlaga þá eru ráðstafanir gerðar til að geta tekið djúpsýni úr holunni meðan á borun holunnar stendur, auk þess sem sérstök gassýni verða tekin hvenær sem ástæða þykir til, og þau m.a. greind á borstað í gasgreini sem sérstaklega verður keyptur til verksins.

13.1 Borholujarðfræði

13.1.1 Markmið jarðlagagreininga

Sú áætlun um rannsókn á borsvarfi og kjarnabútum, sem hér fer á eftir miðar að því að hún svari spurningum um gerð og uppruna jarðlaga (flokkun í setlög, gjóskulög, hraunlög, innskot), lífrænt innihald setsins (kolefni, kalk), ummyndunarstig jarðlaganna vegna jarðhitavirkni (ummyndunarbelti, þróun með tíma og þroskastig lífrænna leifa), og loks fáist svör við ýmsum áleitnum spurningum um jarðlagaskipun og jarðsögu (aldur, höggun, myndunarumhverfi). Þekking á gerð jarðlaganna og á höggunarsögu Öxarfjarðar er nauðsynleg til að skýra uppruna olúgass, sem fundist hefur við fyrri boranir þar, og einnig til að skýra uppruna og eðli jarðhitakerfanna. Jarðeðlisfræðilegar mælingar benda til þess að verulegra breytinga sé að vænta í gerð jarðlagastaflans innan tveggja km dýpis, eða á því dýptarbili sem borað verður í gegnum. Upplýsingarnar eru nýttar til að setja saman heilsteypt jarðhitalíkan. Jafnframt fást upplýsingar um jarðlagagerð sem gagnast beint við túlkun á mismunandi jarðeðlisfræðilegum eiginleikum bergsins, og auka þannig notagildi mælinganna við staðsetningu fleiri borholna.

Vegna takmarkaðrar þekkingar á jarðlagaskipun í Öxarfirði er ekki hægt að gera nákvæma kostnaðaráætlun fyrirfram. Fjöldi sértækra greininga ákvarðast af því efni sem upp kemur við borunina, og hvernig jarðlagastaflinn skiptist í einingar. Greiningar yrðu ekki þær sömu og ekki jafnmargar í storkubergi og í setbergi. Ennfremur getur mikil ummyndun gert sumar

greiningarnar tilgangslausar. M.a. af þessum ástæðum er sérfræðilegt mat á borsvarfi á borstað nauðsynlegt samhliða boruninni. Reiknað er með að staðarjarðfræðingur sinni því starfi samhliða hefðbundnu hlutverki við greiningu háhitaholu í borun, og kalli til setlagafraeðing og efnafræðing þegar sérstök ástæða er til. Í áætlun þessari er reiknað með að slíkt ástand komi upp tvisvar, þ.e. við borun í setlagastaflann ofan 800 m, og svo í aðalholunni milli 800-1500 m dýpis. Hefðbundið hlutverk staðarjarðfræðings er jarðlagagreining á borsvarfi, ummyndunargreining og vatnsæðagreining. Endanlegt fóðringardýpi fyrir öryggisfóðringu og vinnslufóðringu er jafnframt ákvarðað af staðarjarðfræðingi í ljósi mats á hitastigi jarðhitakerfisins út frá ummyndun og svo jarðlagagerð. Auk þess safnar hann saman hvers kyns upplýsingum frá boruninni (svo sem skoltapi, skolhita, botnfalli, dæluþrýstingi, borhraða, álagi, borskýrslu bormanna o.fl.) og samtúlkar með upplýsingum úr borsvarfinu um jarðlagagerð og ummyndun bergsins, ásamt öllum tiltækum borholumælingum. Staðarjarðfræðingur á því að hafa nokkuð skýra mynd af ástandi holunnar á hverjum tíma og getur sú vitneskja aðstoðað borstjóra og verkkaupa við ákvarðanatöku við lausn vandræða sem upp kunna að koma í borun.

13.1.2 Mat á myndunarumhverfi setlaga í Öxarfirði

Meta má líklegustu jarðlagaskipan í Öxarfirði út frá fyrirbyggjandi borholu- og jarðeðlisfræðigögnum, og með samanburði við jarðlagasnið á yfirborði í nágrenninu. Komið var inn á sama efni í köflum 2 og 3, en þar einkum með tilliti til borunar. Hér er farið nánar út í gerð setlaganna og myndunarumhverfi jarðlaganna. Staðarjarðfræðingur aflar gagna til að svara sem flestum spurningum og hugmyndum sem tilgreindar eru hér að neðan.

Um Öxarfjörð liggur landreksás sem klýfur Norðurland í tvo fleka. Fjörðurinn er sigdalur sem setlög hafa safnast í frá upphafi, bæði þau sem berast frá landi með ám, vindum og jöklum og hin, sem myndast í sjónum og við ströndina. Einnig hafa gosmyndanir safnast þar fyrir, bæði gjóskulög og hraunlög. Stórfellt landsig og gliðnun hafa skapað skilyrði til upphleðslu þykkra setlaga. Norðan við Öxarfjörð og Tjörnes hliðrast rekásinn vestur um yfir á Kolbeinseyjarhrygg um svonefnt Tjörnesbrotabelti. Talið er að núverandi afstaða rekhryggjanna og brotabeltisins eigi sér að minnsta kosti milljón ára virka sögu, en vissir þættir í högguninni á svæðinu í heild munu þó vera miklu eldri. Jarðlagagreiningu er m.a. ætlað að leita svara um höggunarsögu svæðisins, sem m.a sést í mislægum jarðlögum sem hugsanlega mætti tímasetja.

Á fyrirhuguðu borstæði í Öxarfirði byggist þekking á jarðlagaskipun annars vegar á borunum og hins vegar á jarðeðlisfræðilegum gögnum. Út frá holu ÆR-4 við Skógalón (myndir 1 og 2) er vitað er að efstu 450 m eru byggðir upp úr setlögum, og kunna efstu 350 m að vera frá nútíma (yngri en 10 þúsund ára). Næstu 100 m þar fyrir neðan eru sennilega frá ísaldarlokum eða síðasta hluta ísaldar. Engar beinar aldursgreiningar eru til af þeim setlögum, en þau innihalda gögn um síðustu framrás jökla í Öxarfirði. Skógalón er í um 10 km fjarlægð norðaustan við væntanlegan borstað við Bakkahlaup. Önnur borhola nær Bakkahlaupi er holan við Keldunes (K-1, mynd 1), sem er um 5 km suðvestan þess og er hún 350 m djúp. Í henni eru hrungjörn setlög niður á 160 m dýpi og síðan líklega jarðhitaummynduð setlög niður í 250 m dýpi. Þar neðan við virtust taka við hraunlög (greining er að mestu byggð á borskýrslu). Út frá þessum gögnum má hugsa sér að nútímasetlög á væntanlegum borstað geti verið milli 200-300 m þykk eins og rætt var um í kafla 3, og ólíklegt að þau nái 350 m þykkt.

Jarðeðlisfræðileg gögn benda til þess að setlög í Öxarfirði nái niður á um 700-1000 m dýpi, þar sem endurkastsflötur bendir til hraunlagamyndunar. Aukning á hljóðhraða á um 1000-1500 m dýpi bendir síðan til að þar taki við enn þéttari, ummyndaður hraunlagastaflí. Ekki er unnt að nota meðalþykknunarhraða sets frá nútíma í Öxarfirði (3,5 cm/ár í ÆR-04) til að fá beina hugmynd um aldur jarðlagastaflans neðar, né heldur um landsig á svæðinu. Ástæðurnar eru fyrst og fremst tvær. Í fyrsta lagi verður að hafa í huga, að meginhluti nútímasettsins er óseyri, sem fyllir innri hluta fjarðarins og elsti hlutinn hefur myndast á nokkur hundruð metra dýpi en sá efsti við eða ofan sjávarmáls. Jafntímaflétir í óseyrarmyndunum eru sveigðir niður á við framan við ströndina á hverjum tíma. Þegar framburður í fjörðinn hefur náð að fylla upp að sjávarmáli flyst ströndin utar og það tekur að mestu fyrir setþykknun innan við hana. Í borholu ÆR-4 við Skógalón má ætla að efstu 50 m hafi myndast sem óseyrarpallur (delta platform, við strönd og ofan sjávarmáls), næstu 100 m sem óseyrarhlíð (delta slope) og neðstu 50 m af óseyrarmynduninni svari til frameyrarinnar (prodelta). Þetta mundi svara til þess að óseyrin sé að byggjast út í um 200 - 300 m djúpan fjörð (taka verður tillit til samþjöppunar í eðjukenndu setinu á frameyrinni og í óseyrarhlíðinni). Fíngert sjávarset er yfirgnæfandi í borun ÆR-4 á 100 m kafla frá um 200 til 300 m dýpis, og gæti myndun þess hafa tekið mikinn hluta nútíma eða um 5,000-10,000 ár. Þar fyrir neðan eru síðan setlög frá ísaldarlokum.

Í öðru lagi verður að gera ráð fyrir rofflötum frá margendurteknum framrásum skriðjökla, þegar neðar dregur í jarðlagastaflann (neðan við um 350 m í ÆR-4). Slíkt rof er mjög breytilegt og oft staðbundið, en getur numið a. m. k. 100 m á einu jökulskeiði. Til að gera sér grein fyrir hugsanlegri gerð jarðlagastaflans í Öxarfirði neðan við 450 m dýpi er rétt að fara yfir vitneskju um jarðlög í nágrenninu, og má vísa til myndar 2 í því sambandi.

Austan Öxarfjarðar eru jarðmyndanir frá yngsta hluta ísaldar og nútíma. Þessi jarðlög mótast af eldvirkni og jöklum og skiptast á hraunlög, móbergslög og jökulmyndað set. Á yfirborði sjást aðeins jarðlög sem eru yngri en um 700 þúsund ára, flest munu vera mun yngri eða frá síðustu 100 þúsund árum. Vestan við Öxarfjörð liggur Tjörnes, og þar hafa varðveist þykk setlög sem mynduðust í sjó eða rétt við sjávarmál. Rannsóknir benda til þess að þessi setlög þykkni til vesturs og hafi byggst út í setlagadæld, sem teygir sig til vestnorðvesturs meðfram norðurströndinni allt til Eyjafjarðar. Á Tjörnesi er undirstöðubergið úr tertíerum hraunlögum. Yfir það leggjast allt að 500 m þykk setlög (Tjörneslögin), en síðan tekur við um 600 m þykk blönduð eining, gerð af hraunlögum, setlögum og móbergi á víxl (Breiðuvíkurlögin). Öll setlögin eru hörðnuð, og hafa yfirleitt myndast neðansjávar eða rétt ofan sjávarmáls. Breiðuvíkurlögin skiptast í 14 um það bil 50 m þykkar einingar, þar sem hver syrpa endurspeglar framrás og hopun jökla. Tjörnes er rishryggur, og hefur landris staðið þar yfir í 1-2 milljónir ára. Talið er jafnframt að landsig í Öxarfirði hafi staðið í a. m. k. eina milljón ára. Er þá byggt á hugmyndum um aldurinn á núverandi tengingu rekásanna um Tjörnesbrotabeltið frá Kolbeinseyjarhrygg í Öxarfjörð. Engin gögn eru um landsig í Öxarfirði fyrir þann tíma, en á síðari hluta Míósen og á Plíósen var afar lítil eldvirkni skammt vestar á Norðurlandi, þar sem nú er Tjörnes og Skjálfandi. Þar var landsig í gangi samfara upphleðslu setlaga. Samanburður á jarðlagabyggingum á Tjörnesi og í fjörðunum vestan og austan við er þó varasamur. Í dag blasir Tjörnes við sem kryppa úr tertíerum hraunlagastafla, á vesturvængnum liggur fleygur af setlögum, en skörp brot og landsig hafa kaffært austurvænginn niður fyrir sjávarmál. Í 554 m djúpri kjarnaborun í Flatey á Skjálfanda kom í ljós, að upphleðsluhraði þar var a. m. k. tvisvar sinnum meiri en í jafngömlum jarðlögum á Tjörnesi, þ. e. á fyrri hluta ísaldar. Þetta

endurspeglar sennilega mismunandi höggunaraðstæður (hraðara sig við Flatey á þeim tíma en við Tjörnes).

Ef þessi umhverfismynd er yfirfærð á Öxarfjörð má gera ráð fyrir að ísaldarsyrpur þar geti verið þykkari en á Tjörnesi. Sennilega nemur heildarþykkt þeirra um 500-1000 m, og gæti hljóðhraðaaukningin í berggrunninum undir Öxarfirði á um 1500 m dýpi svarað til þess að setlögum og móbergslögum fækki um það bil. Er þá gert ráð fyrir þeim möguleika að undirstaða Öxarfjarðar sé niðursveigður tertíer berggrunnur. Sá möguleiki styðst einkum við misgengisstalla um austanvert Tjörnes, þar sem rofflötur við efra borð tertíera hraunlagastaflans fellur úr rúmlega 600 m hæð um miðbik Tjörness niður undir sjávarmál við Öxarfjörð vestanverðan. Þar sem ekki sést vel á jarðeðlisfræðilegum gögnum hvers konar berglög eru næst undir endurkastsfleti á 700-1000 m dýpi er sá möguleiki fyrir hendi að þar geti legið setlagamyndanir, sem væru frá fyrri hluta ísaldar eða jafnvel frá Plíósen.

13.1.3 Rannsóknir á borsvarfi og borkjörnum á meðan á borun stendur

Svarfgreiningu á borstað er ætlað að svara fjölmörgum spurningum um jarðlagagerð, myndunaraðstæður og jarðhitakerfið, eins og tíundað hefur verið. Svarf- og kjarnagreining á borstað nægir hins vegar ekki til að svara öllum spurningunum. Nákvæmari greiningum í ýmsum gerðum smásjáa, röntgentækjum og efnagreingatækjum þarf að bæta við til að svara ákveðnum spurningum og staðfesta svör við öðrum. Við sumum spurningum fást þó einfaldlega ekki svör fyrr en nokkrar borholur hafa verið boraðar á svæðinu, t.d. um stærð misgengja. Sýni til nákvæmra rannsókna eru valin samhliða svarfgreiningu á borstað, og viðeigandi ráðstafanir gerðar til að varðveita sýnin, þar til greining hefur farið fram. Lífrænt efni eyðist t.d. hratt ef því er ekki komið í loftþéttar umbúðir strax eftir að þau koma úr borholunni, og mikilsverðar upplýsingar myndu einfaldlega glatast ef ekki væri rétt að verki staðið frá byrjun. Hér gildir það sama og um sýni af jarðhitavökva sem meðhöndla þarf með röð aðgerða. Í töflu 5 er sett fram hugmynd að jarðlagaskipan við Bakkahlaup ásamt óvissumörkum, og helstu aðgerðir samhliða jarðlagagreingu talin upp.

Sýni af borsvarfi tekur áhöfn borsins á 2 m millibili af hristisigti. Eftir því sem kostur er þarf að gæta þess að sýnið sé ekki úr blöndu í svarfkassa, ef svarf er það fínt að ekki náist að taka það af hristisigti. Hvers kyns blöndun svarfs dregur úr nákvæmni svarfgreininga, en aldrei er unnt að komast hjá einhverri blöndun í holunni. Staðarjarðfræðingur greinir því stundum ný jarðlög á örlitlum hluta svarfsýnisins. Má t.d. nefna millilög eða þunna (<1-2 m) bergganga sem stundum eru greindir út frá örfáum svarfkornum í sýni, og verður því að taka tillit til ástands holunnar á hverjum tíma hvað svarfskolun varðar.

Auk venjulegra svarfsýna þarf að taka sérstök svarfsýni og sléttfylla með þeim sérstaka loftþétta málm-dós, merkta á sama hátt og venjulegu svarfsýnin. Að jafnaði þarf að taka slík sýni á 30 m fresti, en oftast ef staðarjarðfræðingur fer þess á leit. Ef bormenn verða varir við óvenju dökka borleðju, svo ekki sé talað um olíu eða tjörubræk, eða eitthvert óvenjulegt ástand er sjálfsagt að taka sérstakt sýni þar og setja í loftþétta málm-dós. Þessi sýni verð send til útlanda þar sem heildarmagn lífrænna efna (TOC = total organic carbon) verður

Tafla 5. Sundurliðun jarðfræðirannsóknna meðan á borun stendur

<ul style="list-style-type: none"> • Borstjóra og verkkaupa veitt ráðgjöf sem lýtur að jarðlögum og ástandi holunnar í ljósi greininga á jarðlögum, ummyndun, borgögnum og mælingum. • Verkkaupa send dagleg skýrsla um framvindu verksins • Borsvarf greint jöfnum höndum með tilliti til jarðlaga og ummyndunnar • Hvers kyns gögnum um borunina haldið til haga og þau nýtt til leiðréttinga á svarfgreiningu, mati á vatnsæðum, og ástandi jarðhitakerfisins • Fylgst er með gasi og gassýni tekin þegar ástæða er til • Þörf fyrir sérsýni til TOC-greininga metin hverju sinni • Sýni til þunnsneiðagerðar valin (áætluð 60 stk) • Sýni til XRD-greininga á leir valin (áætluð 40 stk) • Sýni til XRD-greininga á útfellingum valin (áætluð 60 stk) • Sýni til vökvabólugreininga valin (áætluð 20 stk) • Sýni til greininga á steingervingum valin (áætluð 15 stk) • Sýni til samsætugreininga af gasi, vatni eða bergi valin (áætluð 6 stk) <p>Hverjum áfanga holunnar fylgir auk þess sérstök rannsóknaraðgerð sem er sýnd hér að neðan:</p>		
DÝPI (m)	JARÐLAGAGERÐ	AÐGERÐ
0 – 300 Neðri mörk óviss (200 - 350 m)	Setlög frá nútíma	<ul style="list-style-type: none"> • Endanlegt fóðringardýpi ákvarðað. Öryggisfóðring þyrfti helst að ná niður í harðari setlög frá ísöld
300 – 800 Neðri mörk óviss (600 –1000 m)	Setlög frá ísöld og etv. hraunasyrpur á milli	<ul style="list-style-type: none"> • Endanlegt fóðringardýpi ákvarðað. Vinnslufóðring þarf helst að ná niður í a.m.k. 200°C hita, sem er ákveðinn út frá ummyndunarsteindum. Helst þyrfti að fóðra setlögin frá vinnsluhluta holunnar • Kjarnatökustaðir ákvarðaðir (1-2) • Djúpsýnatökustaðir ákvarðaðir
800 -1500 Neðri mörk óviss (verulega)	Hraunlög, móberg og setlög frá fyrrihluta ísaldar. Hugsanlega setlög frá Plíósen með sjávarsteingervingum og surtarbrandslögum	<ul style="list-style-type: none"> • Kjarnatökustaðir ákvarðaðir; í setlögum (1-2) og í hraunlagi (1) • Djúpsýnatökustaðir ákvarðaðir
1500-2000	Hraunlög og innskot	<ul style="list-style-type: none"> • Mat á ástandi hugsanlegra hitagjafa

greint. Ef TOC-gildi fer yfir 1-2 % verður lífræna efnið greint betur í ýmsum rannsóknartækjum í þeim tilgangi að komast að uppruna þess og þroskastigi með tilliti til olíumyndunar. Loks er gert ráð fyrir að bormenn taki stórt sýni (1-2 kg) í plastdós á u.þ.b. 100 m fresti, eða skv. nánari beiðni jarðfræðings. Þau sýni verða nýtt til ýmissa sértækra greininga, svo sem á steingervingum eða öðru.

Sýni til annara sértækra greininga, svo sem til þunnsneiðagerðar, vökvabólumælinga, röntngreininga á leir eða útfellingum, efnagreininga af einhverju tagi og steingringagreininga, velur staðarjarfræðingur samhliða venjulegri svarfgreiningu úr 120 ml sýnahópnum. Þau sýni verða síðan meðhöndluð á rannsóknarstofum og greind.

Gert er ráð fyrir því að staðarjarfræðingur og borholumælingamaður verði þjálfaðir af efnafræðingi til að taka sérstök gassýni meðan á borun stendur, þegar efnafræðingur er ekki á borstað.

Staðarjarfræðingur setur fram tillögu um kjarnatöku úr setlögum, vegna hugsanlegrar gas eða olíumyndunar. Eitt kjarnasýni af hraunlagi til Ar/Ar-aldursgreiningar er æskilegt. Vitneskja um aldur jarðlagastaflans skiptir máli varðandi uppbyggingu jarðhitasvæðisins. Vinnslueiginleikar háhitasvæðis, sem hýst væri í margra milljón ára gömlum hraunlagastafla undir mislægi og mun yngri jarðlögum yfir, gætu verið mjög ólíkir því sem þekktist í öðrum háhitasvæðum landsins, sem öll eru í tiltölulega ungum jarðlaga- og innskotamyndunum. Vitneskja um aldur jarðlagastaflans getur því skipt máli varðandi nýtingaráform.

Reiknað er með að kjarnaheimta verði 50-75%, og að 2-3 m af borkjarna fáið því úr hverju kjarnaröri. Borkjarnarnir verða gjörnýttir til rannsókna. Gert er ráð fyrir að staðarjarfræðingur verði í nánu sambandi við setlagafraeðing um tillögu að kjarnatökustað, og reiknað er með að setlagafraeðingur komi á borstað þegar kjarnataka fer fram.

Mesta óvissan ríkir um umfang rannsókna vegna gass og olíu, en það ræðst mest af niðurstöðum mælinga á heildarmagni lífrænna efna (TOC-mæling) og gasinnihaldi. Ef engar vísbendingar finnast um gas og olíu eða lífræn efni, þá sparast kostnaður sem ýmiss konar framhaldsrannsóknir hafa í för með sér. Rannsóknaráætlunin miðar hins vegar við að viðbúnaður sé þannig á borstað að verkkaupi geti tekið ákvörðun um kostnaðarsamasta verkþátt rannsókna, þ.e.a.s. um kjarnatöku í borun. Tillögur um kjarnatöku munu koma fram frá staðarjarfræðingi ef sterkar vísbendingar koma fram um að búast megi við móðurbergi eða geymslubergi fyrir gas og olíu. Ef engar slíkar vísbendingar finnast þá er einfaldlega ekki reiknað með kjarnatöku. Viðbúnaðurinn þarf samt að vera á borstað.

Æskilegt er að 2 borkjarnar verði teknir vegna vinnslueiginleika háhitasvæðisins, annar úr háhitammynduðum setlögum og hinn úr dæmigerðu basalhrauni, og holrými, lekt og fleira yrði mælt í kjörnunum. Slík mæligögn um jarðlög gagnast beint við gerð forðafræðilíkans af háhitakerfinu. Í áætluninni hér höfum við gert ráð fyrir að sameina söfnun rannsóknargagna í borkjörnum vegna gass og olíu og söfnun forðafræðigagna, með því einfaldlega að nota sömu kjarnana. Verkkaupi þyrfti hins vegar að meta hvort hann vill afla gagna um forðafræðieiginleika með töku t.d. 2 borkjarna, óháð því hvort vísbendingar um gas eða olíu finnast. Í því tilviki þyrfti að gera ráð fyrir 1-2 borkjörnum úr vinnsluhluta holunar. Við háhitaboranir á Nesjavöllum og Ölkelduhálsi hafa borkjarnar gagngert verið teknir í þessu skyni.

Gert er ráð fyrir að sérfræðingar hafi rannsóknaraðstöðu á eða nærri borstað. Þar verður borsvarfið greint jöfnum höndum, sérstakur gasgreinir verður settur upp til greininga á lífrænu gasi, og vinnuaðstaða verði til úrvinnslu mælinga og annara gagna sem aflað verður á borstað. Tölvuaðstaða verður á sama stað. Reiknað er með staðarjarðfræðingur semji stutta dagskýrslu um gang borverksins og framvindu rannsóknamála og sendi verkkaupa í tölvupósti daglega.

Í töflu 6 er tilgreindar helstu rannsóknaraðgerðir á borkjörnum meðan á borun stendur.

Tafla 6. Helstu rannsóknaraðgerðir á borkjörnum meðan á borun stendur

Tegund kjarna	Fjöldi kjarna	Lengd kjarna	Rannsókn í hverjum kjarna (fjöldi greininga í sviga)
Set	3-4	2-3 m	<ul style="list-style-type: none"> • Kjarnagreining • Sýni tekin í : TOC-greiningu (2-4) Rock Eval-greining (1-2) EOM, GC, GC/MS (1-2) vitrinite reflectance (1-2) steingervingagreiningu (2) þunnsneiðar (4) vökvabólusneiðar (2) segulmælingar (2) porositet-mælingu (2) permeability-mælingu (2) varmaleiðni-mælingu (1-2) efnagreiningu (1) • Auk þess verður mældur brotstyrkur kjarna, segulstefna og sprungugerð
Hraun	1-2	2-3 m	<ul style="list-style-type: none"> • Kjarnagreining • Sýni tekin í : Ar/Ar-aldursgreiningu (1) • það sama og setkjarnar, nema engin sýni af lífrænum efnum

13.1.4 Rannsóknir á borsvarfi og borkjörnum að lokinni borun

Fyrirhuguð rannsókn á borsvarfi og borkjörnum á rannsóknarstofum að lokinni borun er sýnd í töflu 7. Hér verður gerð nánari grein fyrir tilgangi rannsóknanna og einingaverðum á aðkeyptri þjónustu þar sem það á við, og hugsanlegum þjónustuaðiljum. Tilgreint er hvort greiningar eru vegna háhitarannsókna (h), olúransókna (o) eða setlagarannsókna (s).

Tafla 7. Helstu rannsóknir á borsvarfi og borkjörnum að lokinni borun

Efniviður	Tegund	*	Fjöldi eininga	Einingaverð (kr/einingu)	Áætlaður kostnaður (kr)	Framkv.- aðili**
Borsvarf	Þunnsneiðar	h	60	4.236	254.160	ROS
"	Þunnsneiða- greining	h	60		***	
"	XRD-leir	h	40	9.885	395.400	ROS
"	XRD-útfelling	h	60	5.936	356.160	ROS
"	Vökvabólu- þunnsneið	h	20	6.236	124.720	ROS eða HÍ
"	Vökvabólu- greining	h	20		***	
"	TOC-CaCO ₃	o	50	2.650	132.500	GEUS eða Bergen
"	Rock Eval	o	10	1.500	15.000	GEUS
Borsvarf Borkjarnar	Steingervinga- greiningar	s	15	4.000	60.000	HÍ og Aarhus
Borsvarf	Vitrinite reflect.	o	4	10.000	40.000	GEUS
"	EOM	o	4	2.750	11.000	GEUS
"	GC	o	4	9.000	36.000	GEUS
"	GC/MS	o	2	12.000	24.000	GEUS
"	Samsætu- greiningar	o	4	15.000	60.000	GEUS eða Aarhus
Borkjarnar	XRD-leir	h	5	9.885	109.425	ROS
"	TOC-CaCO ₃	o	16	2.650	42.400	GEUS
"	Rock Eval	o	4	1.500	6.000	GEUS
"	Vitrinite reflect.	o	4	10.000	40.000	GEUS
"	EOM	o	4	2.750	11.000	GEUS
"	GC	o	4	9.000	36.000	GEUS
"	GC/MS	o	2	12.000	24.000	GEUS
"	Samsætu- greingar	o	4	15.000	60.000	GEUS eða Aarhus
"	Vökvabólu- sneiðar	h	10	6.236	62.360	ROS eða HÍ
"	Vökvabólu- greining	h	10		***	
Borkjarnar Borsvarf	Olúgas greining í vökvabólum	o	10	10.000	100.000	IFE-Noregi
Borkjarnar	Segulmælingar	h	10	2.000	20.000	HÍ
"	Por/perm- mæling -gas	h	10	3.000	30.000	GEUS
"	Permeability liquid	h	5	15.000	75.000	GEUS
"	Varmaleiðni- mælingar	h	5	15.000	75.000	Chalmers
"	Efnagreiningar	h	10	3.600	36.000	McGill
"	Brotstyrkur	h	10	500	5.000	ROS
"	K/Ar- aldursgreining	s	1	285.000	285.000	Kanada
Samtals					2.526.125	

* h = háhitarrannsókn; o = sérrannsókn vegna olíu og gass; s = sérrannsókn vegna setlaga

** ROS = Rannsóknasvið Orkustofnunnar, HÍ: Háskóli Íslands, GEUS: Jarðfræðistofnun Danmerkur og Grænlands, McGill: Háskóli í Kanada, Chalmers: Háskóli í Gautaborg, Aarhus: Háskóli í Aarhus, Bergen: Háskóli í Bergen, IFE: Institutt for Energi Teknik í Norge

*** Hluti rannsóknarskýrslu

Eftir að borun er lokið er völdum svarfsýnum (og kjarnasýnum) komið í frekari úrvinnslu. Þunnarneiðar eru gerðir af berginu til að greina ummyndunarsteindir nákvæmar en hægt er í svarfsjá, og röntngreiningar eru gerðar í sama tilgangi til að greina þær steindir sem ekki er hægt að greina með góðu móti í þunnarneiðum. Að meðaltali eru tekin nokkur sýni í þunnarneiðar og röntngreiningar á hverju 100 m dýptarbili. Fjöldinn er háður efniviði, en yfirleitt eru heldur fleiri neiðar teknar ofan til í holu og nærri mörkum ummyndunnarbelta. Stundum er jarðhitaútfellingum safnað saman úr ákveðnum dýptarbilum og ein eða fleiri þunnarneið gerð af safninu til nákvæmra greininga á aldursröðun jarðhitaútfellinganna og vökvabólurannsókna.

Vökvabólur í kristöllum eru sýnishorn af jarðhitavökva sem lokaðist inni í kristal meðan hann var að vaxa, og getur gefið skýra mynd af breytingum í jarðhitakerfi með tíma. Þannig má t.d. lesa út breytingar í seltu vökvans, hitastigi og gasinnihaldi ef sýnishorn eru nógu góð. Eins er hægt að finna út með athugun á vökvabólum hvort olúgas hefur myndast í jarðhitakerfinu við Bakkahlaup, jafnvel þótt engin önnur merki fyndust þar um vegna háhitans. Borsvarf er vandmeðfarið í vökvabólugreiningu vegna smæðar svarfkorna og erfíðleika við þunnarneiðagerð. Stundum þarf þó ekki að gera þunnarneiðar, heldur dugar að taka svarfkornin beint í mælingu (t.d. kalsítplötur).

Erlendis er leit að móðurbergi fyrir gas og olúu yfirleitt hagað þannig í borun að heildarmagn lífræna efna er mælt (TOC=total organic carbon) í talsverðum fjölda sýna. Mæling á 10-15 m fresti er ekki óalgeng. Mæling með hreinsun sýnis kostar um 2650 kr/stk. Í ÆR-04 við Skógalón tókum við sýni til TOC-mælinga á 10 m fresti. Þar reyndust TOC-gildi það lág allt niður á 450 m dýpi að ekki kom til frekari greiningar á lífrænum efnum. Sama staða gæti komið upp í rannsóknarholunni við Bakkahlaup. Hér gerum við ráð fyrir að sýni til TOC-mælinga séu að öllu jafni tekin á 30 m fresti meðan borað er í setlögina, og að viðbótarsýnum verði bætt við ef staðarjarðfræðingur telur það ráðlegt, einkum neðan til í setlagastafnanum. Ef TOC-gildi mælist 1-2 % eða herra þá er haldið áfram með rannsókn sýnisins. Ef TOC-gildið reynist mjög lágt þá er sýnið einfaldlega ekki skoðað frekar. Oft er greint kalsít í TOC mælingu til að gefa vísbendingu um magn skeldýraleifa, en slík mæling er ómarktæk í jarðhitaumhverfi. Þar er kalsít ein af aðalmyndunarsteindunum. Kalsít er hins vegar hentugt til vökvabólumælinga, eins og kvars, sem er líka algeng steind í háhitakerfi þar sem hiti er yfir 200°C.

Ef TOC-gildi er herra en 1% þá er gerð svonefnd Rock Eval greining sem felst í því að sýnið er brennt og heildarmagn myndaðra kolvetna (S1) er mælt, ásamt magni þess lífræna efnis sem ekki hefur náð að þroskast í kolvetni (S2), og hitastig. Hlutfallið S1/S1+S2 gefur ástand móðurbergsins eða þroskastig með tilliti til olfúmyndunar til kynna.

Nákvæmari greiningar á lífrænu leifunum felast m.a. í því að mæla gljástig lífræna móðurefnisins (vitrinite reflectance) sem hækkar við þroskun þess. Lífræna efnið er jafnframt dregið út úr heildarsýninu (EOM=extraction of organic material) og aðskilið í svokölluð mettuð kolvetni, aromatísk kolvetni og NSO-leif. Kolvetnissamböndin eru síðan greind í gasgreini, og á grundvelli þeirrar greiningar er hægt að finna út hvort móðurbergið og/eða olían er mynduð úr lífrænum leifum ættuðum af landi eða úr sjó. Verði niðurstaðan sú síðarnefnda glæðir hún vonir um að umtalsverð verðmæti kunni að hafa myndast. Stundum þarf að ganga heldur lengra í leit að uppruna olíuefna og greina svokölluð hopan og steranefni í massagreini. Loks má sjá út úr samsætugreiningu á ¹³C hvort t.d. olíuefni

líkist lífrænum leifum frá einhverju ákveðnu jarðsögutímabili á landi eða sjó, og reyna þannig að tengja olúu við móðurberg af þekktum aldri eða gerð.

Í aðalatriðum er sömu rannsóknaraðferðum beitt á borkjarnasýni og svarfsýni við leit að lífrænum efnum. Að auki gefst tækifæri til að mæla holrými (porositet) og lekt (permeability) setbergs og a.m.k. eins hraunlags, ásamt varmaleiðni berggerðanna. Niðurstöður þeirra mælinga eru gagnlegar við gerð forðafræðilíkans. Þótt borkjarnarnir verði fáir og mælingarnar líka, þá verður unnt að nota niðurstöður nifteindamælinga á kjarnatökustöðum til að áætla holrýmið annars staðar í holunni.

Heildarefnagreining á bergi er tiltölulega ódýr aferð til að greina berg til bergtegunda. Hún getur verið gagnleg til að átta sig á upphleðslusögu jarðhitasvæðis, og til samanburðar við borholumælingar. Niðurstöður samanburðar má svo stundum nota til að fá vitneskju um ákveðinn bergeiginleika út frá jarðlagamælingunum einum. Við rannsókn á svokölluðum forðafræðistuðlum hefur ákveðin hluti bergsýna verið efnagreindur til að geta borið saman við forðafræðistuðlana, í því skyni að sjá hvort einhver kerfisbundin fylgni sé milli forðafræðieiginleika og bergefnasamsetningar. Athugunin er enn á tilraunastigi, en hér er m.a. gert ráð fyrir 10 heildarefnagreiningum af þeim sökum, auk þess sem að ofan var nefnt um jarðlagamælingar.

Gert er ráð fyrir nokkrum brotstyrksmælingum í borkjörnum, en það er ódýr aðferð til að meta styrkleika bergsins. Hins vegar er öllu dýrara að gera eina aldursgreiningu á bergi. Djúpt í berggrunni Öxarfjarðar kann að vera mjög gamalt berg frá tertíer, undir mun yngri jarðlögum. Vissa um það er einkar gagnleg til að setja saman jarðhitalíkan af háhitasvæðinu. Aldur bergsins kann auk þess að skipta máli varðandi lektareiginleika vinnslusvæðisins. Ein aldursgreining er því æskileg. Segulmælingar á borkjörnum er ódýr og fljótleg leið til að fá vísbendingu um aldur bergsins, þ.e.a.s. hvort það hafi sest til eða myndast á réttu eða öfugu segulskeiði. Niðurstöður þarf að skoða í samhengi við aldursmat á jarðlagastaflanum út frá öðrum forsendum, og helst að stilla af miðað við aldursgreiningu.

13.2 Borholumælingar

Ákveðið mælingafyrirkomulag hefur þróast á grundvelli fenginnar reynslu við rannsóknaboranir á háhitasvæðum. Gert er ráð fyrir að þessu fyrirkomulagi verði fylgt í öllum aðalatriðum við borun holunnar við Bakkahlaup. Ekki er talið nauðsynlegt að víkja frá því vegna hugsanlegrar olúu eða gass í jarðlögum. Meginmarkmiðin með mælingunum eru tvö. Annars vegar upplýsingaöflun vegna borverksins. Er þar aðallega um að ræða nauðsynlegar mælingar vegna fóðrunar holunnar, en einnig til að tryggja öryggi mannskaps, koma í veg fyrir skemmdir á mælitækjum og vegna ófyrirséðra erfðleika eða óvæntra atvika í borun. Helstu mælingar sem beitt er við þessa upplýsingaöflun eru hita-, víddar-, og steypugæðamælingar.

Hitt meginmarkmiðið er að afla sem fjölpættastra upplýsinga um jarðhitakerfið. Er þá átt við jarðlög, vatnsinnihald, lekt, legu vatnsæða og hita- og þrýstíástand, en einnig ýmsa vinnslueiginleika jarðhitakerfisins og borholunnar. Með samtúlkun þessara upplýsinga við borholujarðfræði, efnafræði jarðhitavökvans og yfirborðsrannsóknir fæst betra líkan af jarðhitakerfinu. Til þess að ná þessu markmiði eru gerðar ýmsar mælingar á

jarðeðlisfræðilegum eiginleikum holuveggjanna (yfirleitt kallaðar jarðlagamælingar; viðnám, sjálfspenna, nifteindir og gammageislun), upphitun holunnar eftir borun, viðbrögðum hennar við þrýstibreytingum og á varmaafli hennar í blæstri.

Framkvæmdaröð og tímasetning mælinganna stjórnast af framvindu borverksins og frágangi holunnar og því hversu hratt hún hitnar upp eftir að borun lýkur. Yfirlit yfir mismunandi mæliaðferðir og tilgang þeirra er gefið í töflu 8.

Gangi borun háhitaholu vandræðalaust fyrir sig, er einungis mælt í holunni í lok hvers áfanga. Hita-, víddar- og jarðlagamælingar eru gerðar áður en fóðring er sett niður. Jarðlagamælingarnar er einungis hægt að gera í opnum (ófóðruðum) og kældum háhitaholum og er því eini möguleikinn til að ná þessum upplýsingum að gera mælingarnar fyrir hverja fóðringu. Steypugæðamæling er gerð þegar fóðring hefur verið steypst föst.

Við borlok eru einnig gerðar hita-, víddar- og jarðlagamælingar í holunni áður en leiðarinn er settur niður. Eftir að honum hefur verið komið fyrir, fer fram þrýstisprófun (þrepaðæling). Hún er framkvæmd meðan borinn stendur á holunni, því notast er við dælur borsins. Holunni er síðan lokað. Farnar eru sérstakar mælingaferðir til þess að fylgast með upphitun hennar næstu sex vikurnar. Að lokinni upphitun er háhitaholu hleypt í blástur og hún aflmæld af og til í um sex mánuði. Síðasta skrefið er síðan að loka henni og fylgjast með því hvernig þrýstingur í holunni jafnar sig eftir blásturinn (recovery).

Áætlun um borholumælingar er sýnd í töflu 9.

Gert er ráð fyrir borholumælingabíl með einum manni á borstað meðan á borun stendur og öðrum manni við lok hvers áfanga. Reynslan er sú að óvænt atvik í borverkinu, svo sem hrun, festur, misheppnaðar steypingar o.fl. kalla iðulega á meiri mælingar og annars konar þjónustu við borverkið með litlum sem engum fyrirvara. Hita- og víddarmælingar eru oft gerðar til þess að staðsetja lekastaði sem þarf að þétta fyrir steypingu. Auk þess getur t.d. verið um að ræða lóðun á festur og hrun og sprengingar til að slá í sundur borstreng eða til að gata fóðurrör vegna steypinga. Eftir að borun lýkur þurfa mælingamenn að koma á staðinn vegna aflmælinga og vinnsluprófana.

13.2.1 Mælingar í borun

Hitamælingar

Mælingar á hitastigi í háhitaholu gefa margvíslegar upplýsingar. Þær eru notaðar til að meta hvort ádæling haldi holunni niðri, segja til um streymi jarðhitavökva í berginu og borholunni, finna vatnsæðar og meta stærð þeirra. Vatnsæðar koma best fram við endurteknar hitamælingar meðan breytingar á hitastigi og vökvastreymi í holunni eru sem örastar, svo sem við breytingar í ádælingu og við upphitun holunnar eftir borlok. Upphitunarferillinn gerir kleyft að meta ótruflaðan berghita.

Ef hiti í borholu er lægri en 150°C, eins og er meðan borað er með köldu vatni, er mælt með mjög nákvæmum rafeindahitanemum og eru mæligildin send um mælikapal til yfirborðs (rafrænar mælingar). Hægt er að gera samfelldar mælingar á hitastigi hvort heldur er sem

Tafla 8. Yfirlit yfir borholumælingar og tilgang þeirra

Mæling	Hvað mælt	Tilgangur
Hiti	<p>-Samfelldur hitaferill borholuvökvans í holunni. Rafræn mæling. Ekki hægt að mæla við hærra hitastig en u.þ.b. 150 °C. Kælingar þörf í háhitaholu. Gefur einnig mismunahita.</p> <p>-Hitastig borholuvökvans á ákveðnum stöðum í borholunni, t.d. með 100 m millibili. Vélræn mæling (Amerada/ Kuster). Beitt við mælingar þegar hitastigið fer yfir 150°C</p>	<p>-Fylgjast með millirennisli og upphitun af öryggisástæðum (goshættu)</p> <p>-Finna vatnsæðar og meta stærð þeirra</p> <p>-Segja til um streymi jarðhitavökva í berginu og holunni</p> <p>-Ákvarða upphitunarferil og meta berghita</p> <p>-Ávarða varmafræðilegt ástand jarðhita-kerfisins</p> <p>-Leiðrétta þrýstimælingar fyrir hitaáhrifum</p>
Þrýstingur	<p>-Samfelldur þrýstiferill í vökvasúlu borholunnar. Rafræn mæling. Ekki hægt að mæla við hærra hitastig u.þ.b. 150 °C. Kælingar þörf í háhitaholu. Gefur einnig mismunaprýsting.</p> <p>-Þrýstingur á ákveðnum stöðum í borholunni. Vélræn mæling (Amerada/ Kuster). Beitt við mælingar þegar hitastigið fer yfir 150°C</p>	<p>-Finna helstu vatnsæð borholunnar með því að fylgjast með þrýstingsbreytingum við æðar í upphitun</p> <p>-Ákvarða varmafræðilegt ástand jarðhita-kerfisins</p> <p>-Meta lekt berglaga við holuna og í jarðhitakerfinu</p> <p>-Meta þrýstingslækkun í jarðhitakerfinu vegna vinnslu (blásturs)</p>
Vídd	Þvermál holu	<p>-Áætla steypumagn sem þarf til að steypa fóduringuna fasta</p> <p>-Ákvarða staðsetningu miðjustilla á fódringunni</p> <p>-Leiðrétta jarðlagamælingar fyrir áhrifum breytilegra holuvíddar</p>
Steypugæði	Hvernig hljóðbylgjur berast eftir fódurrörinu, borholuveggnum og steypunni í rýminu þar á milli	<p>-Finna steypuborð og ósteypta kafla</p> <p>-Ákvarða hversu vel steypan hefur harðnað og bundist fódurrörinu og borholuveggnum</p>
Viðnám Sjálfspenna	Sýndarrafvíðnám bergsins umhverfis holuna	<p>-Ákvarða eðlisviðnám bergsins umhverfis holuna</p> <p>-Greina jarðlagaskipan, t.d. lagmót einstakra jarðlaga eða skiptingu jarðlagastaflans í syrpur</p> <p>-Bera saman við jarðlagagreiningar skv. svarfi</p> <p>-Bera saman við túlkun viðnámsmælinga á yfirborði</p> <p>-Tengja jarðmyndanir milli borholna</p>
Nifteindir (NN)	Dreifing nifteinda í berginu umhverfis borholuna.	<p>-Mæla rúmmál vatnsfylltra holrýma í berginu (poruhluta)</p> <p>-Greina jarðlagaskipan, t.d. lagmót einstakra jarðlaga eða skiptingu jarðlagastaflans í syrpur, og bera saman við jarðlagagreiningu skv. svarfi</p> <p>-Tengja jarðmyndanir milli borholna</p>

Gammageislun	Náttúruleg gammageislun bergsins umhverfis borholuna. Gefur upplýsingar um efnasamsetningu bergsins.	-Ákvarða magn kísilsýru í berginu -Greina á milli basískra, súrra og ísúrra jarðlaga á fljótvirkan hátt -Tengja jarðmyndanir milli borholna
Þrýstiprófun	-Þrýstingsbreyting við snögga breytingu á ádælingu -Í borlok er mælt í þrepum og í hverju þrepi mælt hvernig þrýstingurinn jafnar sig eftir breytinguna (þrepaðæling) -Eftir að blástur hefur verið stöðvaður og holunni lokað, er mælt hvernig þrýstingurinn jafnar sig -Samfara þrýstimælingunum eru gerðar hitamælingar	-Afla upplýsinga um staðsetningu æða og millirennslis -Meta lekt berglaga við holuna og í jarðhitakerfinu -Meta þrýstifall í jarðhitakerfinu vegna vinnslu (blásturs) -Meta vinnslugetu svæðisins
Afl	Krítískur þrýstingur og vatnsstreymi við mismunandi holutoppsþrýsting. Gerir kleyft að reikna heildarrennsli, gufuhlutfall og varmáinnihald heildarrennslisins.	-Meta vinnslueiginleika holunnar: Varmaafll, heildarrennsli, holutoppsþrýsting og gufuhlutfall og hvernig þessar stærðir bregðast við nýtingu. -Undirstöðuupplýsingar við mat á gæðum vinnslustaðar. Þær gefa einnig vitneskju um innri gerð svæðis og nýtast í mati á vinnslugetu -Varmáinnihald borholuvökvans er einnig notað til þess að reikna út efnasamsetningu djúpvökva

fall af dýpi eða tíma. Einnig má lesa út mismunahita, þ.e. hitastigsbreytingu á stuttu dýptarbili, og veitir hún nákvæmari upplýsingar um staðsetningu vatnsæða í holunni. Ef hitinn í borholunni er hærri en 150°C, eru notaðir vélrænir hitamælur (Amerada og Kuster mælur). Vélrænu mælarnir senda mælingar ekki upp til yfirborðs heldur skrá þær á spjöld inni í mælunum. Þeir eru ekki eins nákvæmir og rafrænu mælarnir og gefa aðeins mælingar í ákveðnum punktum. Hitamælingar eru einnig nauðsynlegar til þess að leiðrétta vélræna þrýstimæla fyrir hitaáhrifum.

Hitamælingum er einnig ætlað tryggja öryggi mannskaps og koma í veg fyrir skemmdir á mælitækjum. Þetta á einkum við þegar hlé verður á borun og ákveðin hætta skapast vegna upphitunar holunnar, t.d. þegar borstrengur er tekinn upp, holan fóðruð eða meðan jarðlagamælt er. Unnið er gegn hættu sem skapast af upphitun með því að halda stöðugt áfram að dæla köldu vatni í holuna. Stundum nær ádælingin ekki að kæla holuna í botn, einkum þegar millirennslis er milli vatnsæða. Við þær aðstæður getur holan hitnað mjög hratt upp. Öryggisins vegna er mikilvægt að koma í veg fyrir gos og þess vegna er ávallt framkvæmd hitamæling til að kanna goshættu áður en borstrengur er tekinn upp.

Þrýstimælingar

Hiti og þrýstingur eru mikilvægustu stærðirnar í rannsóknum á jarðhita, enda ákvarða þær varmafræðilegt ástand jarðhitakerfa. Mælingar á þrýstingsbreytingum í borholu við borlok, í upphitun, í upphleypingu og blæstri og eftir að blástur hefur verið stöðvaður og holunni lokað veita mikilsverðar upplýsingar um staðsetningu vatntsæða, lekt jarðlaga umhverfis holuna, þrýstíástand í jarðhitakerfinu og þrýstifall við vinnslu. Þessar upplýsingar eru afar mikilvægar við mat á vinnslueiginleikum og vinnslugetu jarðhitakerfisins. Ef hitinn er lægri en 150°C, er þrýstingur í borholum mældur á rafrænan hátt, t.d. með þannemum, en ef hitinn er hærri en 150°C, þarf að nota vélræna þrýstimæla, líkt og við hitamælingar.

Víddarmælingar

Víddarmælingar eru framkvæmdar þegar komið er í fóðringardýpin. Í mælitækinu er rafmótor sem spennir þrjá eða fjóra arma út í vegg borholunnar og nema þeir vídd hennar. Þegar tækið er dregið upp sendir það upplýsingar um víddina til yfirborðs. Víddarmælingar eru gerðar til að geta áætlað steypumagnið sem þarf til að steypa fóðringuna fasta og til að ákvarða staðsetningu miðjustilla á fóðringunni. Þær eru einnig notaðar til að leiðrétta jarðlagamælingarnar fyrir víddaráhrifum. Stundum veita þær upplýsingar um jarðlagamót og oft eru vatnsæðar í skápum.

Rétt er að taka fram að við víddarmælingar og jarðlagamælingarnar, sem lýst er hér að neðan, má hiti í holunni ekki fara mikið upp fyrir 120°C.

Steypugæði

Þegar fóðringunum hefur verið komið fyrir og þær steyptar fastar eru þær steypugæðamældar. Ef fóðurrör er illa steyppt, getur það skemmst eða gefið sig þegar vinnsla hefst úr holunni, t.d. vegna suðu á bak við fóðringu. Steypugæðamæling mælir hvernig hljóðbylgjur berast eftir fóðurrörinu, borholuveggnum og steypunni í rýminu þar á milli. Mælingin veitir upplýsingar um hversu vel steypan hefur harðnað og bundist fóðurrörinu og borholuveggnum. Hún skynjar jafnframt þá kafla sem ekki hefur náðst að steypa í. Þarf stundum að gata fóðurrör með sprengiefni rétt ofan við steypuborð og steypa aftur ef steypa hefur ekki náð upp til yfirborðs.

Jarðlagamælingar

Jarðlagamælingarnar veita upplýsingar um uppbyggingu jarðlagastafans sem borað var í gegnum. Með samtúlkun við svarfgreiningar, má greina milli jarðmyndana, bæði einstakra jarðlaga og heilla syrpnna, og ákvarða þykkt þeirra. Þessar upplýsingar eru síðan samtúlkaðar með svarfgreiningunni og þannig fæst tiltölulega glögg mynd af jarðlagaupbyggingunni. Þær eru mikilvægar til þess unnt sé að gera sér glögga mynd af jarðhitakerfinu. Ef borað er með algjöru skoltapi, gefa jarðlagamælingarnar einu upplýsingarnar um jarðlögin sem borað var í gegnum. Tenging við yfirborðsjarðfræði gefur fyrstu drög að þrívíðu jarðlagalíkani af jarðhitasvæðinu.

Tafla 9. Áætlun um borholumælingar

		Tími (klst.)	Fjöldi	Lengd (m)	Samtals (m)
1	Fóðrunardýpi leiðirörs 90 m				
	Hiti		1	90	90
2	Fóðrunardýpi yfirborðsfóðringar 200 m				
	Hiti	1	4	200	800
	Vídd	1	1	200	200
	Viðnám og sjálfspenna	1	1	110	110
	Nifteindir & gamma	1	1	110	110
	Steypugæði	2	1	200	200
3	Fóðrunardýpi öryggisfóðringar 365 m				
	Hiti	1	4	365	1.460
	Vídd	1	1	365	365
	Viðnám og sjálfspenna	1	1	165	165
	Nifteindir & gamma	1	1	165	165
	Steypugæði	2	1	365	365
4	Fóðrunardýpi vinnslufóðringar 775 m				
	Hiti	1	4	775	3.100
	Vídd	2	1	775	775
	Viðnám og sjálfspenna	2	1	410	410
	Nifteindir & gamma	3	1	410	410
	Steypugæði	3	1	775	775
5	Við borun 775 - 2000 m, vegna ófyrirséðra erfiðleika við borun og kjarnatöku				
	Hiti	1	2	1.500	3.000
	Vídd	2	2	1.500	3.000
6	Við verklok fyrir fóðrun holunnar með leiðara				
	Hiti	2	4	2.000	8.000
	Vídd	3	1	2.000	2.000
	Viðnám og sjálfspenna	2	1	1.225	1.225
	Nifteindir & gamma	4	1	1.225	1.225
7	Prepadæling eftir fóðrun:				
	Hiti	1,5	7	1.000	7.000
	Þrýstingur	2-3	5	1.000	5.000
8	Í upphitun, eftir að borinn hefur farið af holunni (Amerada/Kuster)				
	Hiti	2	4	2.000	8.000
	Þrýstingur	2	4	2.000	8.000
9	Aflmæling í blæstri (Yfirborðsmælingar)				
10	Þrýstijöfnun að loknum blæstri				
	Hiti	2-3	4	2.000	8.000
	Þrýstingur	3-24	7	1.500	10.500
	Samtals				74.360

*Vegna mælinga í upphitun eftir borun og við þrýstijöfnun eftir blástur þarf að gera ráð fyrir mælingabíl og tveimur mælingamönnum í 22 daga.

Jarðlagamælingarnar veita einnig upplýsingar um eðlisviðnám, sjálfspennu og náttúrulega geislavirkni bergsins og um heildarvatnsinnihald þess.

Viðnám Viðnámsmælingar nema rafviðnám bergsins umhverfis borholuna, en það er háð eðlisviðnámi steindanna í berginu, poruhluta bergsins, lögun poranna ásamt seltu og hita vökvans í þeim. Á nemanum, sem rennt er niður, er straumskaut sem sendir frá sér straum til stálkápu mælikapalsins. Á nemanum eru einnig tvö spennuskaut (í 16" og 64" fjarlægð frá straumskautinu). Spennan milli skauts á nemanum og skauts á yfirborði jarðar er notuð ásamt straumnum til að reikna sýndarviðnám bergsins. Viðnámsmælingarnar greina mismunandi jarðlög og gagnast við samanburð við viðnámsmælingar á yfirborði.

Sjálfspenna Með því að mæla spennun milli annars spennuskautsins á nemanum og spennuskautsins á yfirborði þegar enginn straumur er sendur um straumskautið fæst svokölluð sjálfspenna bergsins, sem endurspeglar náttúrulegan spennun milli mismunandi jarðlaga. Þær eru hefðbundin aðferð við greiningu setlaga og eru notaðar til að greina á milli leirsteins og sandsteins og áætla magn leirsteins í setlögum.

Nifteindamælingar nema heildarvatnsinnihald bergsins. Það svarar nánast til vatnsins í holrýmum þess (poruhlutans), en lítill hluti er þó bundinn í steindum. Mælingarnar fara þannig fram að nifteindagjafi í tækinu sendir frá sér nifteindir, sem síðan rekast á atómkjarnana í berginu. Þær hægja mest á sér í árekstrum við kjarna af svipuðum þunga og þeirra eigin (aðallega vetniskjarna) og ná þannig svokölluðu varmajafnvægi. Nemi í nifteindatækinu telur síðan þessar hægfara nifteindir og er fjöldi þeirra í réttu hlutfalli við heildarvatnsinnihald bergsins. Þannig má greina mismunandi jarðlög og meta poruhlutann.

Gammageislun Náttúruleg gammageislun bergs stafar frá geislavirkum samsætum, aðallega kalíum, úraníum og þóríum. Þessar samsætur eru í mjög litlu magni í berginu, en geislunin frá þeim er þó mælanleg. Fylgni er milli kísilinnihalds íslensks bergs og náttúrulegrar gammageislunar þess. Kísilrík berglög eru oft notuð til að tengja jarðmyndanir milli borholna. Auk þess er móðurberg fyrir gas og olíu oft mjög geislavirkt og mæling gammageislunar því ein leið til að finna móðurberg.

13.2.2 Mælingar við borlok

Við borlok eru framkvæmdar allar sömu mælingar og í fóðringardýpum, eins og lýst er í kaflanum hér að ofan. Eftir að gataður leiðari hefur verið settur í holuna er lekt hennar síðan ákvörðuð með þrýstiprófun (þrepadælingu). Rennsli vökvans í jarðhitakerfinu stjórnast af dreifingu þrýstings, lekt bergsins og seigju vökvans. Mælingar á snöggum þrýstingsbreytingum við þekktar breytingar á rennsli veita því upplýsingar um lekt jarðlaganna umhverfis borholuna. Seigjuna má ákvarða ef hitinn er þekktur.

Við þrýstiprófunina eru dælur borsins notaðar. Dælt er á holuna í þremur til fjórum þrepum og tekur það um hálfan sólarhring. Samhliða þrepadælingu er gerð samfelld þrýstimæling í ákveðnu dýpi, helst nærri ráðandi æð. Þá er einnig fylgst með hita í holunni.

13.2.3 Mælingar í upphitun

Meðan háhitahola er að hitna þarf að hita- og þrýstimæla hana reglulega. Tilgangurinn með mælingunum er að ákvarða ríkjandi berghita við holuna, þrýstiástand í jarðhitakerfinu og staðsetningu helstu æða. Mikilvægt að staðsetja aðalæðina, því hún ræður þrýstingi í holunni. Reiknað er með að eðlilegur upphitunartími sé 6-8 vikur. Gert er ráð fyrir að mæla þurfi einni, tveimur, fjórum og sex til átta vikum eftir borlok. Mælingarnar krefjast borholumælingabíls og tveggja manna.

13.2.4 Mælingar í upphleypingu og blæstri

Að lokinni upphitun er holunni hleypt í blástur gegnum sérstakan útblástursbúnað með hljóðdeyfi. Þegar fullum blæstri er náð, er framkvæmd aflmæling, sem veitir fyrstu upplýsingar um vinnslueiginleika holunnar. Með vinnslueiginleikum er hér einkum átt við heildarrennsli, holutoppsprýsting, gufuhlutfall og varmaafli holunnar. Aflið ræðst af varmainnihaldi (vermi) og rennsli vökvans og er yfirleitt gefið upp í megavöttum. Fylgst er með breytingum á þessum stærðum í um 3-6 mánuði, því mikilvægt er að geta metið viðbrögð holunnar bæði við langtímvinnslu og við nýtingu við mismunandi holutoppsprýsting. Gert er ráð fyrir að fylgst sé grannt með holunni með mælingum fyrstu 10 dagana eftir upphleypinguna. Síðan fækkar þesum venjubundnum mælingunum smám saman niður í eina mælingu á viku. Að auki þarf að framkvæma sérstakar mælingar einum, þremur og sex mánuðum eftir upphleypingu. Er þá heildarrennsli holunnar breytt með breytingum á blendustærð.

Hagkvæmast er að gera þessar mælingar í tengslum við ferðir til efnasýnatöku (sjá kafla 13.3 um efnafræði jarðhitavökvans), og er gert ráð fyrir að þær verði framkvæmdar af efnafræðingi með aðstoð heimamanns. Þó er miðað við að heimamenn sinni venjubundnum mælingum eftir upphleypingu.

Að aflmælingunum loknum er æskilegt að loka fyrir holuna og fylgjast með því hvernig þrýstingur í henni jafnar sig. Er þetta gert til að meta lekt holunnar þegar hún er orðin fullheit og þrýstifall í jarðhitakerfinu vegna blástursins. Æskilegt er að hafa þessar mælingar til samanburðar við þrýstiprófun í lok borunar og einnig til samanburðar við samskonar eftirlitsmælingar á holunni síðar, því það auðveldar mjög spár um þrýstifall og aflminnkun við langtímvinnslu.

Fylgjast þarf með þrýstijöfnuninni í um einn mánuð. Fyrstu tvo sólarhringana eftir að holunni hefur verið lokað er fylgst nær stöðugt með þrýstingi í henni, en síðan stopult næstu vikurnar, t.d. með þrýstimælingu viku eftir lokun og svo 2-3 vikum síðar. Síðan er gerð ein mæling eftir viku og lokamæling tveim til þremur vikum seinna. Nauðsynlegt er að gera hitamælingar í holunni samfara þrýstimælingunum, svo hægt sé að leiðrétta þær síðarnefndu fyrir hitaáhrifum. Mælingarnar krefjast borholumælingabíls og tveggja manna.

13.3 Efnafræði jarðhitavökva

13.3.1 Markmið með efnagreiningum

Helstu markmið með efnagreiningum á jarðhitavökva og gasi er einfaldast að telja upp:

Jarðhitavökvi:

- Kanna vinnsluhæfni: seltu, tæringarhættu, útfellingahættu og hugsanlega mengunarhættu
- Kanna djúphita í jarðhitakerfinu
- Kanna uppruna vatns og hugsanlegar rennslisleiðir

Gas:

- Ákvarða magn óþéttanlegra gastegunda í gufu vegna hönnunar raforkuvers
- Tryggja öryggi, vara við hugsanlegum gasútblæstri og eldhættu
- Kanna mengunarhættu við nýtingu
- Afla frekari upplýsingar um djúphitastig
- Fylgjast með kolvetni, magni og samsetningu með tilliti til skilyrða fyrir olúmyndun

Styrkur klóríðs (Cl) og súlfats (SO₄) er mælikvarði á seltu og þar með hugsanlega blöndun við sjó. Styrkur kísils (SiO₂) gefur til kynna hitastig jarðhitakerfisins og með öðrum efnum (t.d. Cl) hugmynd um blöndun við skolvatn eða annað kalt vatn sem komist gæti inn í holuna. Hlutfall tvívetnis (δD) og súrefnis-18 (δ¹⁸O) samsætna gefur til kynna uppruna vatnsins, þ.e hvort um er að ræða sjó eða vatn sem gufað hefur upp og fallið sem regn og í síðarnefnda tilvikinu hvar vatnið hefur fallið sem regn. Slíkar upplýsingar eru mikilvægar þegar meta skal stærð geymisins og rennsli til hans. Mörg snefilefni, (t.d. Li, Sr, Br, Al, Fe, Mn) gefa betri mynd af uppruna og hitaástandi. Um önnur (t.d. As, Hg, Pb) þarf að liggja fyrir vitneskja, t.d. vegna umhverfismats.

13.3.2 Sýnataka í borun

Gert er ráð fyrir að til verksins verði keyptur gasnemi sem nemur lífrænt gas. Verði styrkur þess umtalsverður skolvökvanum mun búnaðurinn gefa viðvörun.

Þá er og gert ráð fyrir að útvegaður verði gasgreinir sem nota má til þess að greina lífræna gasið. Gefi neminn til kynna að um umtalsvert magn þess sé að ræða munu verða tekin sýni af gasinu og það greint til tegunda. Þá er í ráði að taka kjarna meðan á borun stendur. Gasi (“head space gas”) yrði þrýst úr kjörnunum og það greint í gasgreininum.

Efnafræðingur mun setja upp búnaðinn og sjá um að sýni verði tekin. Gera má ráð fyrir allt að 20 manndögum við þennan verkþátt og vinnu við gasgreiningar í einni eða fleiri ferðum.

Ekki er unnt að lesa verð á slíkum búnaði beint úr verðskrá þar sem sérhæfða fylgihluti þarf til. Verið er að leita tilboða. Lauslegt mat miðað við tiltækar verðskrár er 1.800.000 kr (gasnemi 300.000 kr og gasgreinir 1.500.000).

13.3.3 Sýnataka eftir borun

Gert er ráð fyrir að efnafræðingur verði viðstaddur upphleypingu og verði á staðnum næstu 10 dagana. Hlutsýni verða tekin eftir því sem þurfa þykir (2-5 sýni) og í þeim greint pH, CO₂, H₂S, SiO₂, Cl og SO₄ auk gass sem yrði greint á staðnum. Heildarsýni yrði fyrst tekið þegar holan er komin í nokkurt jafnvægi, sennilega eftir u.þ.b. tveggja daga blástur og annað um viku síðar. Heildarsýni yrðu svo tekin aftur eftir um eins mánaðar blástur, þriggja mánaða blástur og sex mánaða blástur. Í síðasta skiptið yrðu auk hefðbundinna efna mældar tvívætnis og súrefnis-18 samsætur, kvikasilfur og nokkur önnur valin snefilefni (Li, Sr, Br, Al, Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, As, Hg, Pb).

Tafla 10. Áætlun um efnagreiningar

Greining	Einingarverð	Fjöldi	Verð í kr.
Heildargreining	67.538	5	337.690
Hlutgreining	11.499	5	57.495
Samsætugreining	8.117	1	8.117
Snefilefnagreining	39.872	1	39.872
Samtals			443.174

Við upphleypingu og blástur er gert ráð fyrir efnafræðingi og sýnatökubíl í alls 24 daga í fjórum ferðum á sex mánaða tímabili. Efnafræðingur mun sjá um aflmælingar ásamt heimamanni, sem sinnir reglubundnu eftirliti á prófunartímanum.

13.4 Rannsóknaskýrsla

Rannsóknarskýrsla verður tekin saman að borverki loknu, og ætti að vera lokið hálfu til einu ári eftir að borun lýkur. Þá ættu niðurstöður blástursprófunar og aflmælinga að liggja fyrir ásamt öllum öðrum rannsóknaniðurstöðum.

Skýrslan verður sniðin að hefðbundnu formi, þar sem borun, rannsóknnum og vinnslueiginleikum borholunnar er lýst. Gögnum sem safnast um borunina sjálfa og varða jarðlög þarf að halda til haga og nýta við skipulagningu borunar á næstu holum á svæðinu. Þekkingu á jarðlögum, ummyndun þeirra og vatnsæðum er haldið til haga í sama tilgangi ásamt því að mynda grunn að vinnslulíkani af jarðhitasvæðinu. Vitneskja um afl og eiginleika holunnar leggur grunn að frekari áformum um virkjun háhitasvæðisins.

Umfang lokaskýrslu um fyrstu djúpu rannsóknarholuna á nýju svæði er óhjákvæmilega meira en ef um rannsókn við borholu á þekktu svæði væri að ræða, og óvissa um niðurstöður er jafnframt meiri. Hér í lokin er birt kostnaðaráætlun um rannsóknir og lokaskýrslu. Hún er að stórum hluta byggð á verðskrár fyrirtækja og svo langri reynslu um vinnuframlag við gerð sambærilegra rannsóknarskýrslna.

13.5 Kostnaðaráætlun

Tafla 11. Kostnaðaráætlun fyrir ráðgjöf og mælingar við borun 2000 m djúprar háhitaholu í Öxarfirði

Verkþáttur	Gjald (kr/einingu)	Einingar	Áætlaður kostnaður
A MÖNNUN			
Verkefnisstjóri (klst)	4.300	150	645.000
Bortæknileg ráðgjöf (klst)	4.300	70	301.000
Ráðgjöf við kjarnatöku (manndagar)	54.090	12	649.080
Jarðfræðingur (manndagar)	54.090	80	4.327.200
Mælingasérfræðingar (manndagar)	54.090	104	5.625.360
Efnafræðingur (manndagar)	54.090	64	3.461.760
		Samtals kr	15.009.400
B BÍLAR			
Mælingabíll (dagar)	18.076	67	1.211.110
Sýnatökubíll (dagar)	17.300	24	415.200
Bílaleigubíll (dagar)	7.000	100	700.000
		Samtals kr	2.326.310
C BORHOLUMÆLINGAR			
Hiti (m)	40	39.360	1.570.464
Vidd (m)	40	6.340	252.966
Viðnám (m)	50	1.910	96.264
Nifteindir og gamma (m)	116	1.910	220.605
Steypa, CBL (m)	120	1.340	160.398
Þrýstingur (m)	40	23.500	937.650
		Samtals kr	3.238.347
D EFNAGREININGAR			
Heildargreining (sýni)	5	67.538	337.690
Hlutgreining (sýni)	5	11.499	57.495
Samsætumæling (sýni)	1	8.117	8.117
Snefilefnagreining (sýni)	1	39.872	39.872
		Samtals kr	443.174
E ÚRVINNSLA - LOKASKÝRSLA			
Sérfræðivinna (klst)	3.794	1.000	3.794.000
Aðkeypt sérfræðiþjónusta (sjá töflu 7)	2.526.125		2.526.125
Gasgreinir á borstað (dagar)	6.000	40	240.000
Teiknistofa (klst)	2.561	60	153.660
Útgáfukostnaður (skýrslur)	30.000	1	30.000
		Samtals kr	6.743.785
Áætlaður heildarkostnaður (kr)			27.761.016

FORSENDUR:

Gjaldskrá Orkustofnunar 1. janúar 1998

Kostnaður við flug og upphald er ekki meðtalinn.

14. HEIMILDIR

Drilling Data Handbook 1978. Editions Technip, Paris, bls 273.

Blow Out Prevention and Well Control, 1981. Technip, Paris.

Code of Practice for Deep Geothermal Wells, 1991. New Zealand Standard 2403.

Guðmundur Ó. Friðleifsson, 1993. Finnst olía á landgrunni Íslands? Vorráðstefna Jarðfræðifélags Íslands. Ágrip af erindi, bls. 21-22.

Guðmundur Ó. Friðleifsson, Jón Eiríksson, Magnús Ólafsson og Halldór Ármannsson, 1994. Oil on the Insular Shelf of Iceland ? Abstract to a presentation. Nordisk Geologisk Vintermöde, Luleå, Svíþjóð, p. 56.

Guðmundur Ó. Friðleifsson 1997. Setlögin fyrir Norðurlandi. Orkustofnun, greinargerð, GÓF-97/07, 2 bls.

Guðmundur Ó. Friðleifsson 1998. Olfúmyndun í setlögum við Ísland. Hvað þarf til ? Orkustofnun, greinargerð, GÓF-98/01, 8 bls.

Karl Gunnarsson, Einar Kjartansson, Knútur Árnason, David Abensour og Yngve Kristoferssen, 1996. Auðlindakönnun í Öxarfirði. Endurkastmælingar á Öxarfjarðarsöndum með Víbróseis-aðferð. OS-96001/JHD-01, Orkustofnun, 46 bls.

Landið þitt Ísland, 1981. Þorsteinn Jósefsson og Steindór Steindórsson. Bls. 209-210.

Lúðvík S. Georgsson, Guðmundur Ómar Friðleifsson, Magnús Ólafsson, Ómar Sigurðsson og Þórólfur H. Hafstað, 1989. Skilyrði til fiskeldis í Öxarfirði. Ferskvatn, jarðsjór, jarðhiti og rannsóknarboranir. Sérverkefni í fiskeldi 1987 og 1988. OS-8904/JHD-08, Orkustofnun, 61 bls.

Lúðvík S. Georgsson, Guðmundur Ómar Friðleifsson, Magnús Ólafsson, Ólafur G. Flóvenz, Guðmundur Ingi Haraldsson og Gunnar V. Johnsen, 1993. Rannsóknir á jarðhita og setlögum í Öxarfirði og Kelduverfi. OS-93063/JHD-15, Orkustofnun, 63 bls.

Magnús Ólafsson, Guðmundur Ómar Friðleifsson, Jón Eiríksson, Hilmar Sigvaldason og Halldór Ármannsson, 1992. Könnun á uppruna gass í Öxarfirði. Borun og mælingar á holu ÆR-04 við Skógalón. OS-92031/JHD-03, Orkustofnun, 77 bls.

Magnús Ólafsson, Guðmundur Ómar Friðleifsson, Jón Eiríksson, Hilmar Sigvaldason og Halldór Ármannsson, 1993. On the origin of organic gas in Öxarfjörður, NE-Iceland. OS-93015/JHD-05, Orkustofnun, 76 bls.

Oddur Sigurðsson, 1980. Surface Deformation of the Krafla Fissure Swarm in Two Rifting Events. J. Geophys. 47, bls. 154-159.

Sigurjón Páll Ísaksson, 1985. Stórhlaup í Jökulsá á Fjöllum á fyrri hluta 18. aldar. Náttúrufræðingurinn, 54 (4-5), bls. 165-191.

Valgarður Stefánsson, 1977. Jarðhiti í Axarfirði. Ágrip á ráðstefnu um íslenska jarðfræði, 1977.

Valgarður Stefánsson, 1997. Jarðhiti og lífrænt gas í Öxarfirði. Orkustofnun greinargerð, VS-97/05, 4 bls.

VIÐAUKI

SKÝRSLUR, GREINAR OG GREINARGERÐIR ORKUSTOFNUNAR UM ÖXARFJÖRÐ

1. Elsa G. Vilmundardóttir og Ingibjörg Kaldal, "Öxarfjörður - Héraðssandur. Jarðvegsathuganir 1994," *Greinargerð EGV/IK-95/01*, Orkustofnun, 1995-05-08.
2. Fjarhitun h.f., *Varmaveitur á Norðurlandi. Frumathugun. Skagaströnd, Hofsó, Raufarhöfn, Þórshöfn, Kópasker, Iðnaðarráðuneytið Rafmagnsveitur ríkisins*, Mars 1979.
3. Freysteinn Sigurðsson, "Vatnsbólslindir við Kópasker. Efri-Hóla- og Katastaðalindir," *Greinargerð FS-92/05*, Orkustofnun, 1992-08-19.
4. Grímur Björnsson, "Dæluþrófun á holu ÁH-2 Kópaskeri," *Greinargerð GrB-88/01*, Orkustofnun, 1988-01-05.
5. Grímur Björnsson og Guðmundur Ómar Friðleifsson, "Tillaga að dæluþrófun á holu 2 fyrir Árlax hf, Kópaskeri," *Greinargerð GrB/GÓF-87/01*, Orkustofnun, 1987-11-23.
6. Guðmundur Ingi Haraldsson og Gunnar V. Johnsen, "Jarðhitakönnun fyrir Ísnó við ytra Lón í Kelduhverfi," *Greinargerð GIH/GVJ-86/03*, Orkustofnun, 1986-06-30.
7. Guðmundur Ómar Friðleifsson, "Borun sjóholu við Kópasker. Unnið fyrir Árlax hf," *Greinargerð GÓF-87/06*, Orkustofnun, 1987-09-16.
8. Guðmundur Ómar Friðleifsson, "Borun og rannskókn á holu ÁH-2 við Kópasker," *Greinargerð GÓF-87/08*, Orkustofnun, 1987-11-19.
9. Guðmundur Ómar Friðleifsson, "Viðgerð á holu ÁH-1 Kópaskeri," *Greinargerð GÓF-87/09*, Orkustofnun, 1987-11-24.
10. Guðmundur Ómar Friðleifsson, "Jarðhitalíkur á Kópaskeri," *Greinargerð GÓF-87/10*, Orkustofnun, 1987-12-01.
11. Guðmundur Ómar Friðleifsson, "Borun holu N-1, Öxarfirði," *Greinargerð GÓF-88/02*, Orkustofnun, 1988-07-06.
12. Guðmundur Ómar Friðleifsson, "Finnst olía á landgrunni Íslands?" *Vorráðstefna Jarðfræðafélags Íslands. Dagskrá og ágrip, 20. apríl 1993*, p. 21-22, 1993.
13. Guðmundur Ómar Friðleifsson, "Geothermal Gradient and Hydrothermal Systems off North Iceland," *Greinargerð GÓF-94/05*, Orkustofnun, 1994-06-15.
14. Guðmundur Ómar Friðleifsson, "Fluid inclusions in association with hydrocarbons in Iceland," *Workshop on fluid inclusions in sediments and diagenetic processes, January, 17-19, 1997, Oslo, Norway. Nordic Network for Geological Fluids and Fluid Inclusions Research*, 1997. (3 bls).
15. Guðmundur Ómar Friðleifsson, "Olían og Ísland," *DV, 17. mars*, 1997.
16. Guðmundur Ómar Friðleifsson, Björn Benediktsson, Lúðvík S. Georgsson, Magnús Ólafsson, Jónas Matthíasson og Ingimar Jóhannsson, "Very low-temperature geothermal utilization in fish farming in Iceland - A case history from the Silfurstjarnan LTD, Iceland," *Proceedings of the World Geothermal Congress 1995, Florence, Italy*, p. 2299-2304, 1995.
17. Guðmundur Ómar Friðleifsson og Freysteinn Sigurðsson, "Ferskvatnsöflun í landi Núps, Öxarfirði," *Greinargerð GÓF/FS-88/01*, Orkustofnun, 1988-07-07.
18. Guðmundur Ómar Friðleifsson og Guðmundur Pálmason, "Athugun á viðbrögðum olúfélaga við gasi í Öxarfirði," *Greinargerð GÓF/GP-93/01*, Orkustofnun, 1993-12-01.
19. Guðmundur Ómar Friðleifsson og Jón Eiríksson, "Setlagarannsókn í Öxarfirði vegna fundar á lífrænu gasi," *Greinargerð GÓF/JE-88/03*, Orkustofnun, 1988-12-08.
20. Guðmundur Ómar Friðleifsson, Jón Eiríksson, Hafliði Hafliðason, Karl Gunnarsson, Gunnar Ólafsson, Kjartan Thors, Birger Larsen, Sverrir Þórhallsson og Árný Erla Sveinbjörnsdóttir, *ODP Proposal for Drillsites within the Tjörnes Fracture Zone Sedimentary Basin. Late Cenozoic Paleooceanography and Sedimentation History at the Arctic Boundary*. 1994. (19 bls).

21. Guðmundur Ómar Friðleifsson, Jón Eiríksson, Hafliði Hafliðason, Karl Gunnarsson, Gunnar Ólafsson, Kjartan Thors, Birger Larsen, Sverrir Þórhallsson og Árný Erla Sveinbjörnsdóttir, "ODP-umsókn 456 -- sú fyrsta frá Íslandi," *Vorráðstefna Jarðfræðafélags Íslands, Reykjavík, 12.apríl*, p. 18-20, 1995.
22. Guðmundur Ómar Friðleifsson, Jón Eiríksson, Magnús Ólafsson og Halldór Ármannsson, "Oil on the Insular Shelf of Iceland ? Abstract." *Nordisk Geologisk Vintermödet, Luleå, Sverige*, p. 56, 1994.
23. Halldór Ármannsson, "Um hugsanlega gufuöflun frá Þeistareykjum og Öxarfirði," *Greinargerð HÁ-91/02*, Orkustofnun, 1991-12-02.
24. Halldór Ármannsson, "Gas í Öxarfirði," *DV, 10. apríl*, 1997.
25. Halldór G. Pétursson, *Vatnsból við Valþjófsstaðafjall í Öxarfjarðarhreppi - verndarsvæði*, Náttúrufræðistofnun Íslands. Akureyri, September 1996. (4 bls). Greinargerð til landeigenda.
26. Hákon Aðalsteinsson, "Rof og framburður í Öxarfirði og Héraðsflóa," *Greinargerð HA-92/03A*, Orkustofnun, Október 1992.
27. Hákon Aðalsteinsson, "Sandstrendur Öxarfjarðar og Héraðsflóa," *Greinargerð HA-92/06*, Orkustofnun, 1992-11-13.
28. Hákon Aðalsteinsson og Oddur Sigurðsson, "Austurlandsvirkjun. Áhrif á framburð og strandrof við Héraðsflóa og Öxarfjörð, grugg og hitastig í Lagarfjótí, og ástand strandsjávar," *OS-93070/VOD-07*, Orkustofnun, Desember 1993. (43 bls).
29. Hákon Aðalsteinsson, Oddur Sigurðsson og Birgir Jónsson, "Coastal Changes in Öxarfjörður and Héraðsflói Bays due to Hydropower Development in NE-Iceland," *Proceedings of the Hornafjörður Coastal Symposium at Höfn, June 20-24*, p. 305-315, 1994.
30. Jón Eiríksson og Guðmundur Ómar Friðleifsson, "The Geology of North-Iceland with Respect to the TFZ-Sedimentary Basin," *Science Institute of Iceland*, 1994. (23 bls).
31. Jón Eiríksson, Guðmundur Ómar Friðriksson og Hafliði Hafliðason, "ODP boranir í Tjörnestrogið? - Stuðningsrannsóknir," *Vorráðstefna Jarðfræðafélags Íslands*, p. 43-44, 1995.
32. Karl Gunnarsson, Einar Kjartansson, Knútur Árnason, David Abensour og Yngve Kristoffersen, "Auðlindakönnun í Öxarfirði. Endurkastsmælingar á Öxarfjarðarsöndum með Víbróseis-aðferð," *OS-96001/JHD-01*, Orkustofnun, Júlí 1996. (46 bls).
33. Kristján Sæmundsson og Guðmundur Ingi Haraldsson, "Lónin í Kelduverfi. Varðar fyrirspurn um jarðhitarrannsókn," *Greinargerð KS/GIH-84/10-B*, Orkustofnun, 1984-10-05.
34. Kristján Sæmundsson, Sigurður Benediktsson og Ísleifur Jónsson, *Hreinsun á borholu við Lindarbrekku í Kelduverfi*, Orkustofnun, Mars 1972. (9 bls).
35. Lúðvík S. Georgsson, "Fyrsta verkáætlun vegna matfiskeldis við Skógalón í Öxarfirði," *Greinargerð LSG/MÓ-86/01*, Orkustofnun, 1986-02-17.
36. Lúðvík S. Georgsson, "Rannsóknáætlun vegna matfiskeldis við Skógalón í Öxarfirði," *Greinargerð LSG-86/02*, Orkustofnun, 1986-03-11.
37. Lúðvík S. Georgsson, "Jarðhiti í Norður-Þingeyjarsýslu og rannsóknir Orkustofnunar í Öxarfirði," *Erindi flutt á ráðstefnu Iðnþróunarfélags Þingeyinga um atvinnumál Norður-Þingeyjarsýslu, Raufarhöfn, 9-10 apríl*, 1988. (8 bls).
38. Lúðvík S. Georgsson, "Jarðhitaboranir við Skógalón í Öxarfirði," *Greinargerð LSG-88/01*, Orkustofnun, 1988-01-14.
39. Lúðvík S. Georgsson, "Um útboð borframkvæmda í Öxarfirði," *Greinargerð LSG-88/04A*, Orkustofnun, 1988-06-20.

40. Lúðvík S. Georgsson, "Fiskeldisrannsóknir Orkustofnunar í Öxarfirði sumarið 1988," *Greinargerð LSG-88/05*, Orkustofnun, 1988-08-16.
41. Lúðvík S. Georgsson, "Tillögur um arðskrá vegna sölu á heitu vatni frá Sandsbæjunum í Öxarfirði og Kelduhverfi," *Greinargerð LSG-96/01*, Orkustofnun, 1996-02-19.
42. Lúðvík S. Georgsson og Einar T. Elíasson, "Matfiskeldi í Öxarfirði. Sjávertaka úr borholum og hitun jarðsjávar með jarðvarma," *Greinargerð LSG/ETE-86/04*, Orkustofnun, 1986-08-27.
43. Lúðvík S. Georgsson, Einar T. Elíasson og Freysteinn Sigurðsson, "Sérverkefnið "Fiskeldi í Öxarfirði"" *Greinargerð LSG/ETE/FS-87/01*, Orkustofnun, 1987-01-14.
44. Lúðvík S. Georgsson og Guðmundur Ómar Friðleifsson, "Um möguleika Presthólahrepps á heitu vatni til húshitunar," *Greinargerð LSG/GÓF-87/08*, Orkustofnun, 1987-12-04.
45. Lúðvík S. Georgsson og Guðmundur Ómar Friðleifsson, "High Technology in Geothermal Fish Farming at Silfurstjarnan Ltd., NE-Iceland," *Geo-Heat Center Quarterly Bulletin*, 17(4):23-28, 1996.
46. Lúðvík S. Georgsson, Guðmundur Ómar Friðleifsson, Magnús Ólafsson, Ólafur G. Flóvenz, Guðmundur Ingi Haraldsson og Gunnar V. Johnsen, "Rannsóknir á jarðhita og setlögum í Öxarfirði og Kelduhverfi," *OS-93063/JHD-15*, Orkustofnun, Nóvember. (63 bls).
47. Lúðvík S. Georgsson, Guðmundur Ómar Friðleifsson, Magnús Ólafsson, Ómar Sigurðsson og Þórólfur H. Hafstað, "Skilyrði til fiskeldis í Öxarfirði. Ferskvatn, jarðsjór, jarðhiti og rannsóknarboranir. Sérverkefni í fiskeldi 1987 og 1988," *OS-89041/JHD-08*, Orkustofnun, Nóvember 1989. (61 bls).
48. Lúðvík S. Georgsson, Guðmundur Ómar Friðleifsson, Magnús Ólafsson, Þórólfur H. Hafstað og Freysteinn Sigurðsson, "Rannsóknir í Öxarfirði 1987. Staðan í október 1987," *OS-87044/JHD-26 B*, Orkustofnun, Október 1987. (16 bls).
49. Lúðvík S. Georgsson, Knútur Árnason og Ragna Karlsdóttir, "Resistivity Sounding in High-Temperature Areas in Iceland, with Examples from Öxarfjörður, N-Iceland and Brennisteinsfjöll, SW-Iceland," *14th PNOC-EDC Geothermal Conference, Manilla, Philippines, February, 1993*. (9 bls).
50. Lúðvík S. Georgsson, Magnús Ólafsson og Oddur Sigurðsson, "Staða rannsókna við Skógalón 25. júní 1986," *Greinargerð LSG/MÓ/OSig-86/05*, Orkustofnun, 1986-06-25.
51. Lúðvík S. Georgsson, Magnús Ólafsson og Oddur Sigurðsson, "Staða rannsókna við Skógalón í byrjun október 1986," *Greinargerð LSG/MÓ/OSig-86/06*, Orkustofnun, 1986-10-15.
52. Lúðvík S. Georgsson, Magnús Ólafsson og Oddur Sigurðsson, "Prospecting for fresh water, seawater and geothermal water near Skógalón in Öxarfjörður: Statusreport," *Greinargerð LSG/MÓ/OSig-86/07*, Orkustofnun, 1986-10-28.
53. Magnús Ólafsson, "Sýnatökuberð að Skógalóni í Öxarfirði í febrúar 1986," *OS-86024/JHD-08 B*, Orkustofnun, Apríl 1986. (15 bls).
54. Magnús Ólafsson, "Skógalón í Öxarfirði," *Greinargerð MÓ-86/03*, Orkustofnun, 1986-02-18.
55. Magnús Ólafsson, "Borholur ÁH-1 OG ÁH-2 Á Kópaskeri. Efnasamsetning vatns," *Greinargerð MÓ-88/02*, Orkustofnun, Febrúar 1988.
56. Magnús Ólafsson, "Árlax h/f Kópaskeri. Efnagreining tveggja sýna í október 1988," *Greinargerð MÓ-88/17*, Orkustofnun, 1988-10-07.
57. Magnús Ólafsson, "Öxarfjörður - 1988. Efnasamsetning vatns," *Greinargerð MÓ-88/20*, Orkustofnun, 1988-11-20.
58. Magnús Ólafsson, "Enn um jarðgas í Öxarfirði," *Greinargerð MÓ-90/04*, Orkustofnun, 1990-10-29.

59. Magnús Ólafsson, "Verkefnið Gas í Öxarfirði. Stutt yfirlit um aðdraganda verksins og fyrstu niðurstöður," *Greinargerð MÓ-92/08*, Orkustofnun, 1992-04-29.
60. Magnús Ólafsson, "Hitaveita Öxarfjarðarhéraðs. Heitt vatn úr holu 3 við Skógalón og nýting þess," *OS-95012/JHD-07 B*, Orkustofnun, Mars 1995. (14 bls). Unnið fyrir Hitaveitu Öxarfjarðarhéraðs.
61. Magnús Ólafsson, Guðmundur Ómar Friðleifsson, Jón Eiríksson, Hilmar Sigvaldason og Halldór Ármannsson, "Könnun á uppruna gass í Öxarfirði. Borun og mælingar á holu ÆR-04 við Skógalón," *OS-92031/JHD-03*, Orkustofnun, Júlí 1992. (77 bls).
62. Magnús Ólafsson, Guðmundur Ómar Friðleifsson, Jón Eiríksson, Hilmar Sigvaldason og Halldór Ármannsson, "On the origin of organic gas in Öxarfjörður, NE-Iceland," *OS-93015 /JHD-05*, Orkustofnun, Mars 1993. (76 bls).
63. Magnús Ólafsson, Guðmundur Ómar Friðleifsson, Ólafur G. Flóvenz, Sverrir Þórhallsson og Axel Björnsson, "Tillaga um rannsókn á jarðgasi í Öxarfirði," *Greinargerð MÓ/GÓF/ÓGF/SÞ/AB-90/01*, Orkustofnun, 1990-04-25.
64. Magnús Ólafsson og Guðni Axelsson, "Skógalón í Öxarfirði. Rannsóknir í október 1986," *OS-87015/JHD-11 B*, Orkustofnun, Apríl 1987. (13 bls). Unnið fyrir Seljalax hf.
65. Magnús Ólafsson og Guðrún Sverrisdóttir, "Hitaveita Öxarfjarðarhéraðs," *Greinargerð MÓ/GSv-96/07*, Orkustofnun, 1996-08-28.
66. Magnús Ólafsson og Halldór Ármannsson, "Gas í borholum við Ærlækjarsel í Öxarfirði," *Greinargerð MÓ/HÁ-88/22*, Orkustofnun, 1988-12-08.
67. Magnús Ólafsson og Hrefna Kristmannsdóttir, "Varðandi fjárlagatillögu um sérverkefnið Gas í Öxarfirði," *Greinargerð MÓ/HK/-05*, Orkustofnun, 1990-10-30.
68. Magnús Ólafsson og Ólafur G. Flóvenz, "Rannsóknir í Öxarfirði 1991. Dýpkun borholu," *Greinargerð MÓ-ÓGF-91/01*, Orkustofnun, 1991-01-08.
69. María Jóna Guðnarsdóttir, "Hitaveita á Kópaskeri. Áætlun um hitaveitu frá jarðhitasvæðinu að Lónaengi að Kópaskeri," *OS-82114/JHD-30 B*, Orkustofnun, Desember 1982. (8 bls).
70. María Jóna Gunnarsdóttir, "Athugun á hagkvæmni hitaveitu í Öxarfjarðarhreppi, N-Þing," *Greinargerð MJG-80/11*, Orkustofnun, 1980-09-24.
71. Norræna eldfjallastöðin, Orkustofnun, Raunvísindastofnun Háskólans og Veðurstofa Íslands, "Rannsókn á umbrotum við Kröflu og sprungukerfi í Kelduhverfi. Sameiginleg rannsóknaráætlun," *OS-JHD-7658*, Orkustofnun, Mars 1976. (21 bls).
72. Oddur Sigurðsson, "Raflínustæði í Kelduhverfi og Öxarfirði," *Greinargerð OS-81/03*, Orkustofnun, Júní 1981.
73. Ólafur G. Flóvenz, "Hugmyndir um setlagarannsóknir í Öxarfirði," *Greinargerð ÓGF-88/05*, Orkustofnun, 1988-11-28.
74. Ólafur G. Flóvenz, "Rannsóknir á setlögum og jarðhita í Öxarfirði: Samvinna Orkustofnunar og Vísindaakademíu Sovétríkjanna," *Greinargerð ÓGF-89/02*, Orkustofnun, 1989-04-24.
75. Ólafur G. Flóvenz, Guðmundur Pálmason og Lúðvík S. Georgsson, "Hugmynd að rannsóknnum á auðlindum í jörðu í Öxarfirði," *Greinargerð ÓGF/GP/LSG-89/04*, Orkustofnun, 1989-06-05.
76. Sverrir Þórhallsson, Guðmundur Ómar Friðleifsson og Lúðvík S. Georgsson, "Borun þriggja rannsóknarhola í Öxarfirði sumarið 1988. Viðauki," *OS-88008/JHD-04 B*, Orkustofnun, Apríl 1988. (14 bls).
77. Sverrir Þórhallsson og Ómar Sigurðsson, "Hitaveita Öxarfjarðarhéraðs. Könnun á leka og mælingar í holum við Ærlækjarsel," *Greinargerð SÞ/Ómar-94/01*, Orkustofnun, 1994-06-24.
78. Valgarður Stefánsson, "Jarðhiti í Axarfirði," *Ágrið á ráðstefnu um íslenska jarðfræði*, 1977.

79. Valgarður Stefánsson, "Jarðhiti og lífrænt gas í Öxarfirði," *Greinargerð VS-97/05*, Orkustofnun, 1997-06-08.
80. Valgarður Stefánsson, "Áætlun um háhitarannsóknir í Öxarfirði á árinu 1984," *Greinargerð VS-84/01*, Orkustofnun, 84-02-28.
81. Þóroddur F. Þóroddsson, "Neysluvatn á Kópaskeri," *Greinargerð ÞFP-80/01*, Orkustofnun, 1980-01-23.
82. Þóroddur F. Þóroddsson og Þórólfur H. Hafstað, "Varðandi neysluvatnsmál á Kópaskeri," *Greinargerð ÞFP/ÞHH-80/05*, Orkustofnun, 1980-07-08.
83. Þórólfur H. Hafstað, "Öxarfjörður. Grunnvatnsathuganir 1987-1988. Framlag til sérverkefnis í fiskeldi," *OS-89039/VOD-08 B*, Orkustofnun, Október 1989. (25 bls).
84. Þórólfur H. Hafstað, "Um rennsli í Brunná í Öxarfirði. Fáeinir rennismælingar frá lindarsvæðum við ána," *Greinargerð ÞHH-89/04*, Orkustofnun, 1989-03-03.
85. Þórólfur H. Hafstað og Freysteinn Sigurðsson, "Kópasker. Nýtt vatnsból við Katastaði," *Greinargerð ÞHH/FS-93/07*, Orkustofnun, 1993-10-10.