



ORKUSTOFNUN
Jarðhitadeild

Lúðvík S. Georgsson
Guðmundur Ómar Friðleifsson
Magnús Ólafsson
Ólafur G. Flóvenz
Guðmundur Ingi Haraldsson
Gunnar V. Johnsen

Rannsóknir á jarðhita og setlögum í Öxarfirði og Kelduhverfi

OS-93063/JHD-15
Reykjavík, nóvember 1993



ORKUSTOFNUN
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verknr. 520 500

Lúðvík S. Georgsson
Guðmundur Ómar Friðleifsson
Magnús Ólafsson
Ólafur G. Flóvenz
Guðmundur Ingi Haraldsson
Gunnar V. Johnsen

Rannsóknir á jarðhita og setlögum í Öxarfirði og Kelduhverfi

OS-93063/JHD-15
Reykjavík, nóvember 1993

ISBN 9979-827-33-5

ÁGRIP

Fjallað er um niðurstöður rannsókna á jarðhita og setlögum í Öxarfirði og Kelduhverfi. Þrjú virk sprungubelti liggja um láglandið, kennd við Kröflu, Þeistareyki og Fremrináma. Láglandið fyrir botni Öxarfjarðar er hulið miklum setlögum sem myndast hafa í sigdal sem tengist norðurenda sprungubelta Kröflu- og Þeistareykjaeldstöðvanna. Setin þykkna í átt til sjávar og eru samkvæmt niðurstöðum bylgjubrotsmælinga talin allt að 1000 m þykk. Þau eru þykkust í miðju sigdældar Kröflueldstöðvarinnar.

Jarðhiti er á nokkrum stöðum á yfirborði, allt frá Skeiðsöxl á Tjörnesi í vestri, til Brunnár í austri. Mestur er hann innan Kröflusprungubeltisins en einnig er nokkur jarðhiti innan Þeistareykjasprungubeltisins. Hæstur hiti á yfirborði er við Skógalón, 100°C. Sýni til efnagreininga voru tekin á flestum jarðhitastaðanna. Niðurstöður efnagreininga sýna að sjávaráhrif eru sterk og er seltan mest næst ströndinni en minnkar eftir því sem fjær dregur sjó. Efnahitamælar sýna hæsta hitann við Skógalón um 135°C í hveravatninu og 160°C í vatni úr holu ÆR-4. Gasefnahitamælar og reikningar grundvalladir á blöndunarískani benda þó til að hiti djúpt í jarðhitakerfinu geti verið talsvert hærri, allt að 220°C. Þá benda ummyndunarsteindir og rannsóknir á vökvabólum frá botni holu ÆR-4 einnig til þess að hiti hafi þar komist yfir 200°C.

Viðnámsmælingar leiða í ljós a.m.k. 10 km² stórt svæði á austurbakka Bakkahlaups, þar sem viðnám er mjög lágt, 2-5 Ωm. Undir lágviðnáminu hækkar eðlisviðnám verulega og er lágviðnámið eins og kápa utan um háviðnámskrokk. Slík viðnámsgerð einkennir fjölmörg háhitasvæði á Íslandi. Svæðið er vel afmarkað til austurs og vesturs af virkum sprungustykkjum. Þar mælist hátt viðnám sem bendir til að kalt grunnvatn eigi þarna greiða leið niður. Minna lágviðnámsvæði kemur fram á hitasvæðinu við Skógalón og milli Þórunnarsels og Syðribakka.

Grynnra er á hljóðhraða um og yfir 5,0 km/s í Öxarfirði en víðast í gosbeltinu, líklega vegna þess að berggrunnur Öxarfjarðar er úr gömlu rofnu bergi. Háhraðalögin hvelfast upp undir hitasvæðinu við Bakkahlaup, en það er talið að megi skýra með háhitavirkni, sem þýðir jafnframt að hiti hafi náð allt að 250°C á 1200 m dýpi í miðju hitasvæðisins. Sambærilegt ris á háhraðalögum sést ekki í grennd við hitasvæðið við Skógalón. Áberandi mikil útgeislun jarðskjálftaorku er á litlu svæði suðaustantil í háhitasvæðinu við Bakkahlaup, rétt við virku misgengi Kröflusprungubeltisins. Það gæti bent til mikillar jarðhitavirkni þar, varmanáms eða suðu.

Niðurstöður rannsókna benda til að háhitasvæði sé innan Kröflusprungubeltisins á austurbakka Bakkahlaups í Kelduhverfi. Það er talið vera a.m.k. 10 km² stórt og flangt í stefnu N°15V en norðurmörk þess eru ekki þekkt. Virk sprungustykki afmarka það til austurs og vesturs. Þar á kalt grunnvatn greiða leið niður og því virka þau sem vatnsgeymir fyrir hitasvæðið. Mælt er með að 1200-1500 m rannsóknahola verði boruð á svæðinu sunnanverðu. Efsti hluti jarðhitakerfisins við Bakkahlaup er í setlögum, sem er einstætt meðal íslenskra háhitasvæða. Boranir eftir heitu vatni hafa borið mjög góðan árangur á hitasvæðinu við Skógalón. Líklega leynist háhiti þar undir, en það verður þó ekki fullyrt út frá fyrirliggjandi gögnum.

EFNISYFIRLIT

ÁGRIP	2
1. INNGANGUR.....	5
2. JARÐFRÆÐI ÖXARFJARÐAR	7
2.1 Inngangur	7
2.2 Kröflusprungubeltið.....	9
3. JARÐHITI OG BORANIR.....	11
3.1 Um dreifingu jarðhitans	11
3.2 Jarðhiti innan Kröflusprungubeltis	11
3.3 Jarðhiti innan Þeistareykjasprungubeltis	15
3.4 Annar jarðhiti	15
3.5 Borholur.....	15
4. VIÐNÁMSMÆLINGAR	19
4.1 Inngangur	19
4.2 Framkvæmd viðnámsmælinganna	19
4.3 Úrvinnsla viðnámsmælinganna	21
4.4 Niðurstöður viðnámsmælinganna	21
4.5 Jarðhiti og lágviðnám.....	23
5. EFNAFRÆÐI HEITA VATNSINS.....	31
5.1 Inngangur	31
5.2 Sýnataka og efnagreiningar	31
5.3 Efnainnihald heita vatnsins	31
5.4 Hiti í jarðhitakerfinu	35
5.5 Uppruni heita vatnsins.....	39
5.6 Gas í holum við Skógalón	40
5.7 Vinnslueiginleikar heits vatns við Skógalón.....	40
5.8 Samandregnar niðurstöður	42
6. BYLGJUBROTSMÆLINGAR OG ÞYNGDARMÆLINGAR.....	43
6.1 Almenn um bylgjubrotsmælingar.....	43
6.2 Framkvæmd mælinga í Öxarfirði.....	43
6.3 Umreikningur mæligagna í hljóðhraðasnið	46
6.4 Þyngdarmælingar.....	46
6.5 Túlkun hljóðhraðasniðanna	50
6.6 Mælingar á samfeldri orkuútgeislun	54
6.7 Niðurstöður jarðsveiflumælinganna.....	56
7. HELSTU NIÐURSTÖÐUR	57
7.1 Setlög og grunnvatn.....	57
7.2 Jarðhitasvæðin við Bakkahlaup og Skógalón.....	57
7.3 Annar jarðhiti í Kelduhverfi og Öxarfirði.....	59
7.4 Næstu skref rannsókna	59
HEIMILDIR	60
ABSTRACT.....	63

TÖFLUSKRÁ

1.	Jarðhitaholur í Öxarfirði og Kelduverfi	16
2.	Efnasamsetning vatns í Öxarfirði og Kelduverfi	32
3.	Yfirlit um lagskiptingu jarðar í Öxarfirði	51

MYNDASKRÁ

1.	Sprungubelti, jarðhiti og borholur í Öxarfirði og Kelduverfi	7
2.	Jarðhitasvæðið við Skógalón	12
3.	Hitamælingar í holu ÆR-3, við Skógalón	13
4.	Hitasvæðið á austurbakka Bakkahlaups	14
5.	Volgrur við Keldunes og upptök Litluár	14
6.	Hitamælingar í holu ÆR-4, við Skógalón	18
7.	Staðsetning viðnámsmælinga og -sniða í Öxarfirði og Kelduverfi	20
8.	Viðnámsennið A-A'	25
9.	Viðnámsennið B-B'	26
10.	Viðnámsennið C-C'	27
11.	Eðlisviðnám á 250 m dýpi u.s.	28
12.	Eðlisviðnám á 500 m dýpi u.s.	29
13.	Eðlisviðnám á 750 m dýpi u.s.	30
14.	Sýnatökustaðir í Öxarfirði og Kelduverfi	33
15.	Styrkur klóríðs og brómíðs	34
16.	Styrkur klóríðs á móti fjarlægð frá sjó	35
17.	Styrkur klóríðs og kalsíums í vatni	35
18.	Styrkur kísils og mældur hiti	36
19.	Kalsedónhiti í jarðhitavatni frá Öxarfirði og Kelduverfi	37
20.	Samband kísilstyrks og varmainnihalds í jarðhitavatni	38
21.	Jafnvægisferlar nokkurra steinda í jarðhitakerfinu við Skógalón	39
22.	Hlutföll tvívetnis og súrefnis-18 í vatni og sjó	40
23.	Hlutfall tvívetnis og styrkur klóríðs í vatni og sjó	41
24.	Kalkmettun heita vatnsins úr holu ÆR-3 við Skógalón	42
25.	Uppsetning endurkastsmælinga	44
26.	Uppsetning bylgjubrotsmælinga	44
27.	Staðsetning bylgjubrotsmælinga í Öxarfirði og Kelduverfi	45
28.	Niðurstöður tvívíðrar túlkunar á línu 1	47
29.	Niðurstöður tvívíðrar túlkunar á línu 2	48
30.	Þyngdarkort af Öxarfirði og Kelduverfi	49
31.	Líkan af eðlipungadreifingu undir söndum Öxarfjarðar eftir línu 1	51
32.	Jarðlagasnið eftir línu 1, þvert á sigdalinn í Öxarfirði	52
33.	Jarðlagasnið eftir línu 2, langsum eftir sigdalnum í Öxarfirði	53
34.	Niðurstöður á mælingum á samfelldri útgeislun jarðskjálftaorku	55

1. INNGANGUR

Um miðbik nífunda áratugarins fóru fram yfirlitsrannsóknir á jarðhita í Öxarfirði og Kelduhverfi. Tilurð verkefnisins var sérstök fjárveiting Alþingis á fjárlögum ársins 1984. Féð skyldi notað til forathugunar á jarðhita fyrir botni Öxarfjarðar, með það í huga að afla frekari vísbendinga um tilvist háhitasvæðis á þeim slóðum. Gagnasöfnun fór einkum fram á árunum 1984 og 1985, meðal annars var allur jarðhiti skoðaður vandlega, gerðar voru allmargar viðnámsmælingar og vatnssýni tekin til efnagreininga. Þau gögn, sem þá var safnað, reyndust ekki gefa fullnægjandi upplýsingar um jarðhitann og þær sérstöku jarðfræðilegu aðstæður sem þarna eru. Þráðurinn var því tekinn upp aftur árið 1987 og voru þá gerðar frekari mælingar, sem einkum beindust að því að afla upplýsinga um setlagabykkt á svæðinu, en það þótti skipta meginmáli til að hægt yrði að túlka önnur gögn á fullnægjandi hátt. Gerðar voru bylgjubrotsmælingar í samvinnu Orkustofnunar og Vísindaakademíu Sovétríkjanna og Orkustofnun gerði þyngdarmælingar eftir nokkrum línum í Öxarfirði. Jafnframt fóru fram umfangsmiklar rannsóknir á skilyrðum til fiskeldis, einkum í austanverðum Öxarfirði. Í tengslum við þær voru boraðar nokkrar rannsóknaholur í jarðhitasvæði úti á söndum Öxarfjarðar og jafnframt gerðar mælingar til frekari afmörkunar hitasvæðanna (Lúðvík S. Georgsson o.fl. 1989). Fiskeldisrannsóknirnar leiddu til óvænts fundar lífræns jarðgass í borholu við Skógalón. Til að kanna uppruna þess var boruð þar 450 m djúp rannsóknahola 1991, sem náði þó ekki niður úr setlögnum (Magnús Ólafsson o.fl. 1992). Úrvinnsla á setlagamælingunum hefur dregist mjög vegna anna við önnur verkefni og því ekki verið hægt að skila endanlegum niðurstöðum verkefnisins á skýrsluformi fyrr en nú.

Öxarfjörður er sigdalur á mótum rekbeltisins, sem liggur þvert yfir Ísland frá suðvestri til norðausturs, og hliðrunarbeltis sem kennt er við Tjörnnes. Algengt er að slíkar setdældir myndist þar sem rekbelti hliðrast til. Láglandið fyrir botni fjarðarinn er flatt og að mestu myndað af framburði Jökulsár á Fjöllum. Viðáttumiklir sandar einkenna strandlengjuna. Þykkt sandanna og annarra setlaga var til skamms tíma ekki þekkt, nema í borholu við Keldunes þar sem 140 m þykkur setlagabunki er ofan á berggrunninum. Þá höfðu mælingar á sjávarbotni gefið til kynna að setlögin væru um 150 m þykk úti á miðjum firði (Axel Björnsson 1975). Enn utar voru þau þó margfalt þykkari samkvæmt endurkastsmælingum sem bandaríska fyrirtækið Western Geophysical gerði árið 1972. Út á láglandi Öxarfjarðar ganga nútímahraun ættuð úr eldstöðvakerfunum á heiðunum upp af Öxarfirði. Þeirra helstar eru Kröfluestöðin og Þeistareykjaeldstöðin. Virk sprungubelti teygja sig tugi kílómetra út frá þeim til norðurs og ganga í sjó fram í Öxarfirði. Jarðhiti finnst allvíða á láglandinu en hiti er óvíska mikill á yfirborði. Öflugustu jarðhitasvæðin eru innan Kröflusprungubeltisins og þar jókst hitinn töluvert á yfirborði eftir umbrotin á árunum 1975-1984. Þessi breyting hefur að nokkru leyti gengið til baka síðan. Hitinn er mestur við Skógalón og eru þar sjóðandi hverir á yfirborði. Nýting jarðhitans er ekki mikil enn sem komið er. Hann er þó notaður til fiskeldis á þremur stöðum.

Á umliðnum áratugum hefur athygli beinst oftar en einu sinni að jarðhitinum í Öxarfirði og Kelduhverfi og allumfangsmiklar rannsóknir hafa farið fram í tvígang. Á árunum milli 1960 og 1970 var kannað víða í Kelduhverfi hvort fá mætti heitt vatn til húshitunar. Meðal annars var viðnámsmælt við flesta bæi og boruð 368 m djúp hola við Keldunes í Kelduhverfi. Árangur varð þó enginn. Í upphafi áttunda áratugarins vöknudu hugmyndir um að háhitasvæði gæti leynst undir söndunum fyrir botni Öxarfjarðar og í framhaldi af því voru gerðar allumfangsmiklar viðnámsmælingar á svæðinu á árunum 1973-1977 og allmörgum sýnum af jarðhitavatni var safnað til efnagreininga. Niðurstöður þessara athugana bentu til að hugmyndir um háhitasvæði ættu við rök að styðjast. Skýrsla kom aldrei út um niðurstöðurnar en yfirlit um þær var

gefið á ráðstefnu Jarðfræðafélags Íslands haustið 1977 (Valgarður Stefánsson 1977).

Næstu árin lágu jarðhitarannsóknir að mestu niðri í Kelduhverfi og Öxarfirði. Ein ástæða þess var spurningin um eignaréttinn. Það mál leystist í október 1983. Orkustofnun lagði fram rannsóknáætlun í upphafi árs 1984, sem miðaði að frekari rannsókn þess svæðis sem áhuga-verðast þótti (Valgarður Stefánsson 1984). Iðnaðarráðuneytið samþykkti áætlunina án breytinga og kom hún til framkvæmda sumarið 1984. Áætlunin fól í sér eftirtalda verkþætti:

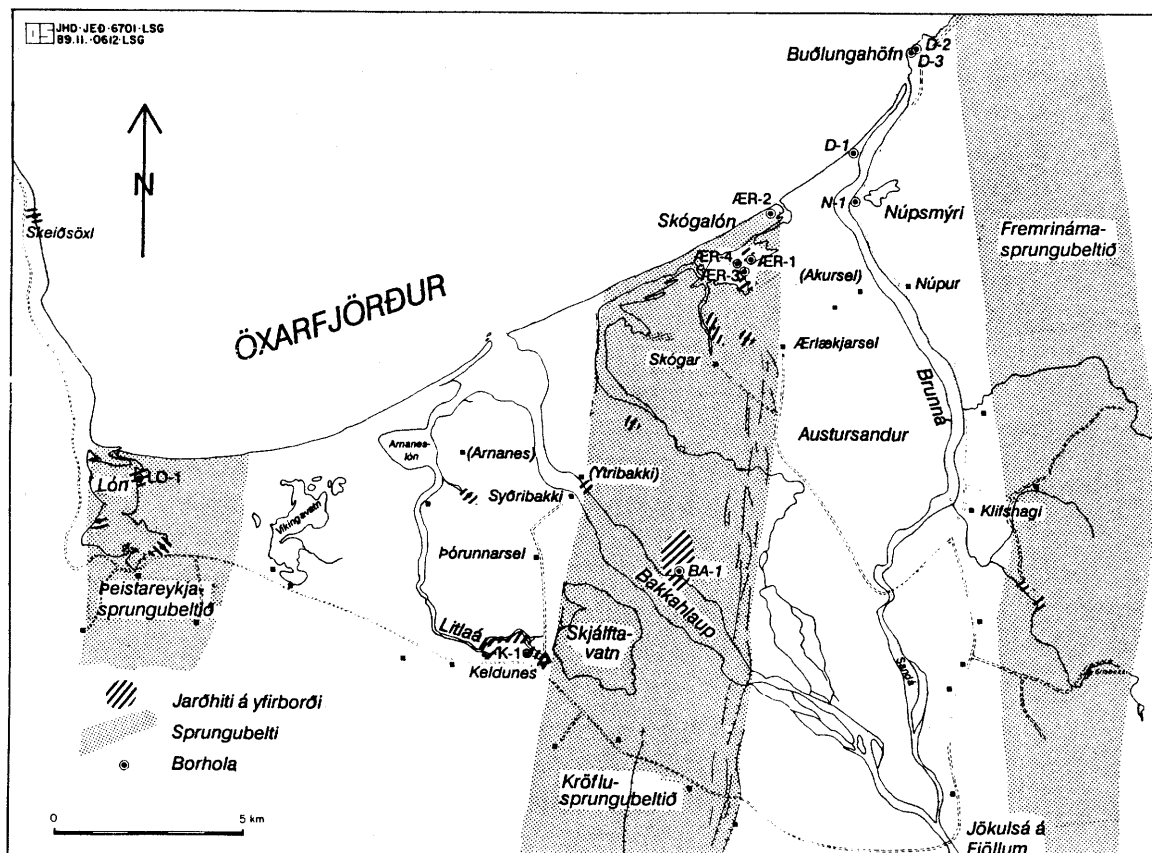
- Útbreiðsla jarðhita og sprungna skyldi könnuð.
- Landmælingar og þyngdarmælingar skyldu gerðar til að meta þykkt sandsins.
- Jarðsveiflumælingar skyldu einnig reyndar til að ákvarða þykkt sandsins.
- Viðnámsmælingar skyldu gerðar á tveim mælisniðum þvert yfir jarðhitasvæðið á austurbakka Bakkahlaups til að afla betri upplýsinga um innri gerð þess.
- Sýni skyldu tekin og efnagreind úr öllum laugum og hverum í Kelduhverfi og Öxarfirði.

Verkið var unnið samkvæmt áætlun árin 1984 og 1985, en eins og áður hefur komið fram þóttu niðurstöður ekki fullnægjandi. Úr því var bætt sumrin 1987 og 1988 þegar frekari gagna var aflað um þykkt sandsins og gerðar fleiri viðnámsmælingar. Hér á eftir verður fjallað um niðurstöður einstakra rannsóknabátta auk eldri gagna, sem voru yfirfarin og túlkuð að svo miklu leyti sem við átti. Jafnframt hafa verið felldar inn helstu niðurstöður úr síðari verkefnum, sem erindi þykja eiga í skýrsluna.

2. JARÐFRÆÐI ÖXARFJARÐAR

2.1 Inngangur

Öxarfjörður er 25 km breiður sigdalur sem afmarkast af fjalllendi að austan og vestan en lágum heiðum að sunnan. Land fyrir botni fjarðarins mótast annars vegar af nærveru þriggja eldstöðvakerfa og hins vegar árósum Jökulsár á Fjöllum, sjá 1. mynd. Í sigstöllum við vestanverðan Öxarfjörð sést, að tertíer blágrýtislög með þekju af hraunlögum og setlögum frá fyrri hluta ísaldar hafa sigið niður til austurs, en í fjallendinu austan við fjörðinn sést eingöngu mórberg og grágrýti frá ísöld. Hugmyndir eru uppi um að tertíeri og kvarteri jarðlagastaflinn, sem sést vestan fjarðarins, myndi berggrunn Öxarfjarðar neðan við 0,5-1 km dýpi, en töluverð óvissa er þó um þetta. Ofan til er fjörðurinn fylltur setlögum, sem að hluta til eru þekkt eftir boranir við Skógalón 1989 og 1991. Undirlendi Öxarfjarðar einkennist af framburði Jökulsár á Fjöllum, aurum og foksandi. Nútmahraun runnin sunnan af heiðum hylja upplöndin og ná fram á setfyllinguna. Meðal þeirra er hraun sem rann í sjó fram við hærri sjávarstöðu, þar sem nú er Kíflakot.



1. mynd: Sprungubelti, jarðhiti og borholur í Öxarfirði og Kelduhverfi.

Um Öxarfjörð liggja þrjú sprungu- og eldstöðvabelti sem kennd eru við Fremrináma, Kröflu og Peistareyki. Öll eru þau hluti af landreksbelti sem teygir sig þvert yfir norðanvert Ísland frá Vatnajökli í Öxarfjörð. Rekbeltið í Öxarfirði er endasleppt til norðurs og tengist við Kolbeins-eyjarhrygg um hliðrunarbelti sem kennt er við Tjörnes og kallað Tjörnesbrotabeltið. Á Tjörnesi eru þykkustu sjávarsetlög á Íslandi sem sjást á þurru landi, en setlagadældin öll er um

140 km löng í NV-SA stefnu og 40-50 km breið, og eru setlögín allt að 4 km þykk. Tjörnes er rishryggur úr þessari setdæld, og rís að austanverðu upp í 4-6 stórum stöllum upp í 300-400 m hæð utan til og upp í 600 m hæð sunnan til. Samkvæmt þeim kenningum sem helst eru viðteknar í dag (Kristján Sæmundsson 1974; 1978; 1980) er talið að Tjörnes brotabeltið hafi orðið til fyrir 4-6 milljónum ára er landrek á norðanverðu Íslandi, sem að mestu hafði verið í gosbelti í Húnavatnssýslum, færðist allt yfir á núverandi rekbelti á NA-landi. Þar var þá fyrir gosbelti sem Austfjarðabasaltið er m.a. myndað úr. Við þessa rekbeltaflutninga varð Tjörnesbrotabeltið til milli Kolbeinseyjarhryggjar og norðurenda gosbeltisins á Norðurlandi. Í framhaldi af því hliðraðist jarðskorpuplatan, norðan við svokölluð Húsavíkurmisgengi og framhald þeirra til vesturs um Flateyjarsund og yfir í Eyjafjarðarál, til austurs um allt að 60 km á nokkrum milljónum ára, og reis jafnframt úr sæ þar sem nú er Tjörnes. Ekki er vitað hversu langt til austurs hliðrunarspildan nær, en berggrunnur Öxarfjarðar neðan 1 km dýpis gæti að hluta til a.m.k. verið úr margra milljón ára gömlum tertíerum hraunlögum aðfluttum vestan frá Flateyjarskaga. Hliðrunarhreyfingarnar eru taldar hafa hætt fyrir um 1 milljón ára, þegar rekbeltið á Norðurlandi rifnaði áfram til norðurs í nokkrum skástígum sprungubeltum vestur um Grímsey yfir að Kolbeinseyjarhrygg. Jafnframt því að landreksásinn reif sig þannig áfram til norðurs myndaðist Öxarfjarðarsigdalurinn. Hann hefur að mestu fyllst upp af setlögum þar sem gosvirkni hefur ekki haft undan við að fylla upp sigið sem fylgir landrekinu. Borunin við Skógalón 1991 niður á 450 m dýpi staðfesti að efstu 350 m sigdældarinnar hafa fyllst upp á síðustu tíu þúsund árum. Bæði sig- og setmyndunarhraði eru því um 3,5 m á 100 árum, sem er ótrúlega há tala (Magnús Ólafsson o.fl. 1992). Kröflueldar, 1975-1985, leiddu í ljós að sig af þessu tagi gerist í afmörkuðum umbrotahrinum og nam heildarsig í Kröflusprungubeltinu þá um 2 m í Öxarfirði (Oddur Sigurðsson 1980).

Í ljósi þess sem að ofan er sagt um jarðfræði Öxarfjarðar og Tjörness, og þeirri óhjákvæmlega óvissu sem hlýtur að vera fyrir hendi í jafn flókinni jarðfræðimynd, þá má segja að óvissa um innri gerð og rætur jarðhitakerfa sé meiri í Öxarfirði en annars staðar. Það er þó ljóst að jarðhitinn er nátengdur sprungubeltunum þremur sem fyrr er getið og öll eru hluti af eldstöðvakerfum. Sprungubeltin ganga út frá megineldstöðvum þar sem eldvirknin er mest. Þessi sprungubelti eru aðeins um 5 km breið en teygja sig tugi kílómetra til norðurs og suðurs út frá miðjunni. Þau ná öll í sjó fram. Þeistareykjasprungubeltið liggur út vestanvert Kelduhverfi, Kröflubeltið austanvert í miðri sveit og Fremrinámabeltið út sveitina austan Jökulsár. Í öllum sprungubeltum eru ummerki um mikla eld- og brotavirkni. Eldvirkni virðist hins vegar ekki ná norður í Öxarfjörð og eru engin ummerki um eldgos á nútíma á láglandinu. Vestari sprungubeltin í Öxarfirði afmarkast af virkum sprungustykkjum, sem eru allt að 1,5 km á breidd. Land er þar mjög brotið og sprungið. Milli sprungustykkjanna er spilda þar sem land er lítið brotið. Umbrotahrinur ríða yfir með 100-150 ára millibili (t.d. Kristján Sæmundsson 1978). Þá gliðnar landið og sprungubeltið misgengur, a.m.k. að hluta til. Þess á milli er lítil hreyfing á sprungunum. Umbrot voru á Kröflusprungubeltinu í Kröflueldum 1975-1985 (t.d. Axel Björnsson 1985). M.a. var mikil hreyfing á norðurhluta þess um áramótin 1975-76 og aftur í janúar 1978 (Oddur Sigurðsson 1980). Rúm 100 ár eru liðin síðan hreyfingar urðu síðast á Þeistareykjasprungubeltinu, þ.e. árið 1885, og gætti þeirra mjög í Kelduhverfi. Minni sögum fer hins vegar af hreyfingum á sprungubelti því sem kennt hefur verið við Fremrináma. Fjarlægðin milli beltanna er einungis tæpir 8-10 km og spildan á milli líft brotin.

2.2 Kröflusprungubeltið

Megintilefni þeirra athugana, sem hér er gerð grein fyrir, var að kanna hvort háhitasvæði sé til staðar fyrir botni Öxarfjarðar. Einn þáttur í því var kortlagning á þeim hluta Kröflusprungubeltisins þar sem jarðhiti finnst á yfirborði, þ.e. á söndunum norðan við Þjóðveginn. Sunnan vegar hækkar land og þar er enginn hiti þekktur, enda eru þar þegar ofar dregur tugir metra niður á grunnvatnsborð.

Fljótlega eftir umbrotahrinurnar 1975-1976 og 1978 kortlagði Oddur Sigurðsson (1980) sprungur og ummerki þeirra á söndunum. Í fyrra skiptið brotnaði svæði, sem nær frá ströndinni og 5 km suður fyrir Þjóðveg en í seinni hrinunni svæði sunnan úr heiði og norður að Bakkahlaupi. Svæðin sköruðust því að þó nokkrum hluta. Lengdarmælt var yfir sprungubeltið og hæðarmælt var eftir Þjóðveginum. Samanlögð gliðnun reyndist vera rúmir 4 m en heildarsigið rúmir 2 m (Oddur Sigurðsson 1980). Niðurstöður sprungukortlagningarinnar koma vel heim við gögn Odds og sjást m.a. á 1. mynd og í fleiri kortum.

Norðurhluti Kröflusprungubeltisins er um 5 km breið sigdæld sem stefnir N5-10°A. Nyrstu sprungurnar sjást milli Skóga og Ærlækjarsels. Athyglisvert er að vesturjaðar sprungubeltisins er lítið sprunginn og er þar nánast ein röð af sprungum sem er þó ekki samfelld. Austurjaðarinn er hins vegar samfelld sprungustykki norður að Ærlækjarseli og er það sums staðar rúmur kílómetri á breidd. Þriðja sprungustykkið liggur hjá bænum Hóli. Það hefur ekki hreyfst í þessum síðustu umbrotum, en gæti hafa markað vesturjaðar sigdalsins í einhverjum hrinum fyrri alda. Hóll er u.þ.b. á miðri sigspildunni frá síðustu hrinu og þar hefur sigið orðið mest.

Ummerki umbrotanna, sprungurnar og misgengin, bera með sér að hreyfingin sem átt hefur sér stað er hrein gliðnun, og sig á miðhluta sprungubeltisins. Þarna finnast siggengi, sigdældir eða niðurföll (graben) og opnar sprungur. Á söndunum, þar sem sprungurnar voru athugaðar sumarið 1984, 6-8 árum eftir að þær mynduðust, sjást þær merkilega vel. Sigdældirnar eru breytilegar að stærð, frá fáum metrum á breidd upp í 300-400 m. Hæsti sigstallurinn er um 4 m en sig um fáa sentimetra sést á stöku stað. Algengast er að sigið sé á bilinu 0,3-1 m. Sigstallarir eru allt að 1,5 km á lengd.

Þykkt lausra jarðlaga ofan á berggrunninum og gerð yfirborðs hefur áhrif á hvernig sprungubeltin líta út. Norðurhluti þess svæðis sem kannað var er grónari en sá syðri og þar eru mjög þykk setlög. Þar ber mest á tiltölulega breiðum sigspildum. Syðri hlutinn, milli Þjóðvegjar og Bakkahlaups, er að mestu sandorpinn og setlöginn þynnri einkum suður undir Þjóðvegi. Þar eru auk breiðra sigspildna, eins og norðurfrá, mikið af nokkurra metra breiðum sigum, einnig svelgir eða einskonar niðurföll, þar sem sandurinn hefur skriðið niður í opnar sprungur og gjár. Þessi munur á ásýnd sprungubeltisins endurspeglar mismunandi yfirborðslög.

Boranirnar við Skógalón 1988 og 1991 leiddu í ljós gerð setlaga þar allt niður á um 450 m dýpi. Efsti hlutinn, niður á 65 m dýpi, er hluti af óseyri Jökulsár á Fjöllum. Þar fyrir neðan eru fíngerðari sjávarsetlög með steingervingum, sem bera þess merki allt niður á 140 m dýpi að óseyrin hafi verið að byggjast út í Öxarfjörð. Þaðan og niður á 210 m dýpi eru setlöginn úr ennþá fíngerðari jarðefnum, eðjulögum og fínsandi. Á bilinu 210-250 m eru um 50-75% setsins úr silti, og á 250-325 m dýpi er setið nær eingöngu úr leirkennu silti. Talið er að fínkorna setið hafi borist eftir sjávarbotni með eðjustraumum og öðrum botnstraumum. Kjarnaborað var í holu ÆR-4 frá 325 m dýpi í botn á 450 m. Efstu 5 m borkjarnans eru eðjustraumaset sem ber þess glögg merki að ströndin hafi legið mörgum kílómetrum innar en nú. Fyrstu merki um áhrif jökla í Skógalónsholunni sjást á 350 m dýpi, og virðist sem setlöginn ofan við séu öll yngri

en 10 þúsund ára. Þrjú jökulbergslög sjást síðan á bilinu 365-385 m dýpi, síðan eðjustraumaset myndað framan við Óseyri niður á 415 m dýpi. Þá tekur við 5 m þykkt sjávarsetlag sem virðist myndað allfjarri strönd, og loks sjást jökulbergslög í neðsta hluta kjarnans. Talið er ólíklegt að elsti hluti kjarnans geti verið eldri en nokkur hundruð þúsund ára gamall (Magnús Ólafsson o.fl. 1992).

3. JARÐHITI OG BORANIR

3.1 Um dreifingu jarðhitans

Á láglandinu fyrir botni Öxarfjarðar er vitað um jarðhita á 13 stöðum, austan frá Brunná og vestur í Skeiðsöxl á Tjörnesi. Þeir eru allir sýndir á 1. mynd. Jarðhitastöðunum má skipta í þrjá flokka eftir afstöðu þeirra til sprungubeltanna þriggja. Innan marka Þeistareykjasprungubeltisins finnst jarðhiti á 4 stöðum, innan marka Kröflubeltisins finnst jarðhiti á 7 stöðum, innan Fremrinámabeltisins á einum stað og utan sprungubeltanna finnst jarðhiti á einum stað, við Arnanes í miðri sveit.

Tengsl jarðhitans við sprungubeltin eru augljós, nær allir jarðhitastaðirnir eru innan þeirra og jarðhitinn utan þeirra er óverulegur. Aðeins þrír jarðhitastaðir geta talist sæmilega öflugir. Þessi heitu svæði eru öll innan Kröflubeltisins og mælist þar yfir 80°C hiti og mest 100°C. Á mörgum jarðhitastöðum dreifist hitinn á svæði sem er aflangt í sprungustefnu, N-S, einkum á þetta við um heitustu staðina. Verulegar breytingar urðu á jarðhita innan Kröflusprungubeltisins í kjölfar umbrotanna, sem urðu um áramótin 1975-76. Hiti hækkaði og hans varð vart á stærra svæði en áður. Þessi hitaaukning hefur gengið til baka að nokkru leyti.

Jarðhitinn í Öxarfirði og Kelduhverfi hefur nánast ekkert verið nýttur fram á síðustu ár, enda víðast fjarri bæjum og aðstæður óhagstæðar. Um tíma var reynt að hita upp íbúðarhús á Skógum og við Skógalón var hitinn notaður við súgurrkun á heyi, en hvorttveggja er nú aflagt. Í landi Arnanes var notast við volgrurnar í sundpoll, sem grafinn var fyrr á öldinni. Um langan tíma hafa kartöflur verið ræktaðar í ylvolum jarðvegi á hitasvæðinu við Bakkahlaup. Fiskeldisstöðvar, sem nota jarðhita, eru í Lóni, við Litluá og í Núpsmýri. Árið 1982 var gerð lausleg áætlun um hitaveitu frá Skógalóni til Kópaskers (María Jóna Gunnarsdóttir 1982). Borun öflugrar vinnsluholu við Skógalón sumarið 1988 hefur endurvakið þessar hugmyndir. Sömu leiðis hefur hún vakið upp hugmyndir um hitaveitu fyrir innsveitir Öxarfjarðarhrepps.

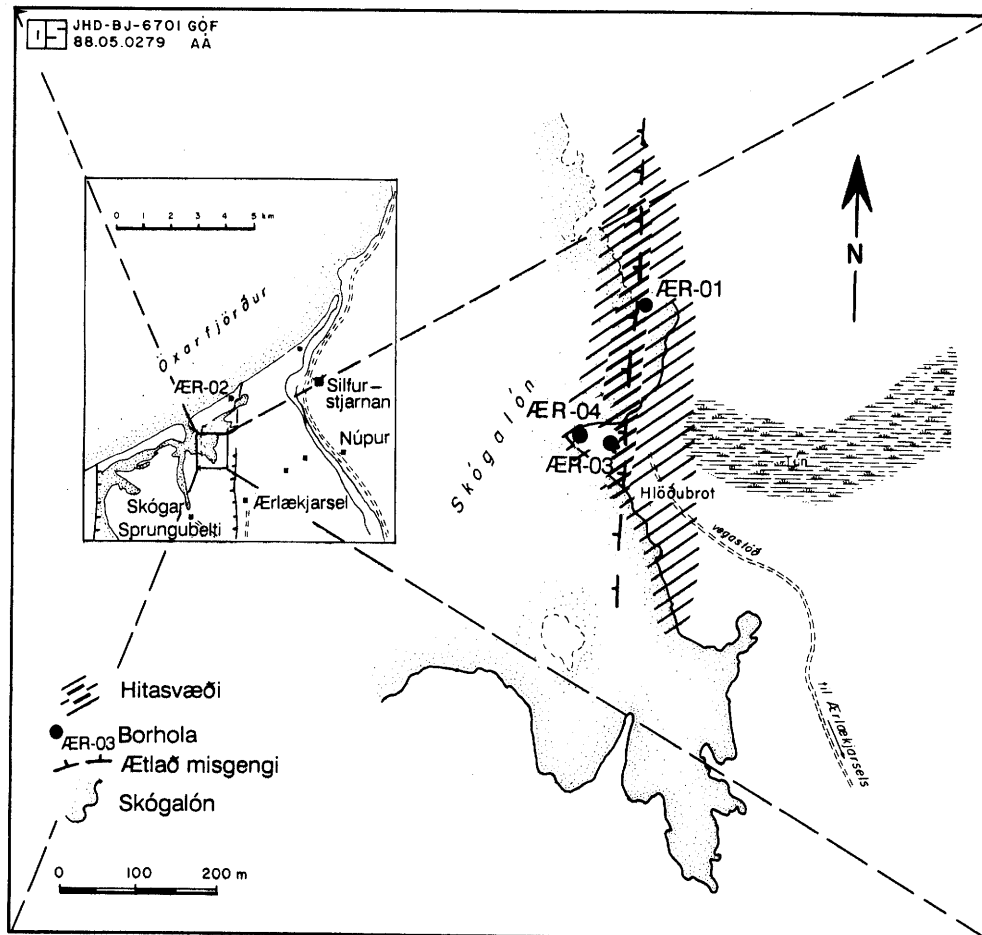
Hér á eftir verður jarðhitanum á láglandi Öxarfjarðar lýst í grófum dráttum. Í flestum tilvikum var jarðhitinn skoðaður á árunum 1984 og 1985. Flestir staðanna eru úti á söndunum og oft sést lítið eða ekkert rennsli heits vatns, þó að hita gæti á tíðum á stóru svæði. Þá sést yfirleitt ekki hvað veitir heita vatninu upp, þótt áhrif sprungubeltanna séu ljós þegar lítið er á dreifingu hitans í heild.

3.2 Jarðhiti innan Kröflusprungubeltis

Innan Kröflusprungubeltisins eru 7 uppkomustaðir jarðhita eins og áður segir og þar af eru þrjú öflugustu hitasvæðin. Eftirtektarvert er að heitustu svæðin eru í austanverðu sprungubeltinu, þar sem brotavirknin hefur verið mest. Hitasvæðið við Bakkahlaup, þar sem mælst hefur 81°C hiti inni í miðri sigdældinni, er þó í norður framhaldi af sprungustykkinu við Hól. Þar urðu engar brotahreyfingar í síðustu umbrotum.

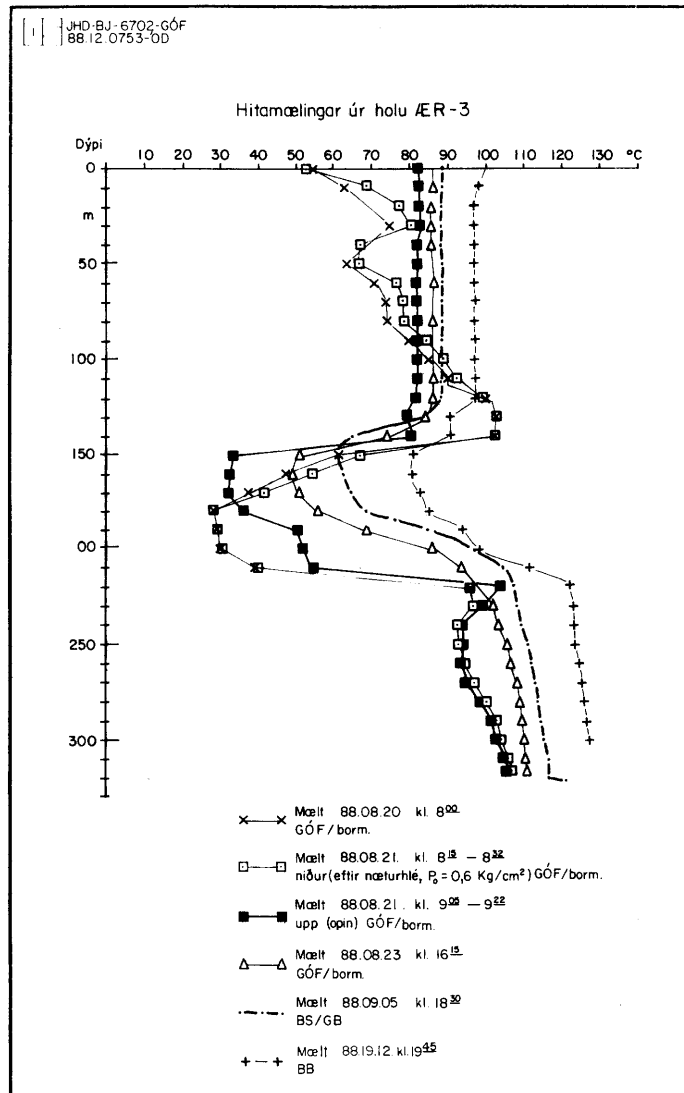
1. Mesta yfirborðsvirknin er við Skógalón (2. mynd). Hitinn kemur upp við strandlón. Ós þess lokast á hverju hausti í stórbrimum og er hitinn þá kaffærður veturlangt. Þarna er sjóðandi vatn á allstóru svæði og er þetta einn af fáum hitastöðum í Öxarfirði þar sem sést eitthvert afrennsli. Giskað var á að það næmi 10-15 l/s af 100°C heitu vatni. Fyrir Kröfluumbrotin var hitinn á yfirborði aðeins 70-80°C hiti. Þarna hafa nú verið boraðar fjórar rannsóknaholur. Hóla ÆR-1 var boruð sumarið 1987 og er 70 m djúp. ÆR-2 boruð sama ár í leit að nýtanlegum jarðsjó. Hún er 102 m djúp og er staðsett á sjávarkambinum

norðan við Skógalón. Hóla ÆR-3 var boruð árið eftir og er 322 m djúp. Hún gefur 40-50 l/s í sjálfrennsli af 96°C heitu vatni (Lúðvík S. Georgsson o.fl. 1989). Ekki varð vart breytinga á hitasvæðinu eftir að holan var boruð en hún var í sjálfrennsli í rúmt ár. Hita-mælingar í holu ÆR-3 eru sýndar á 3. mynd. Holan hefur ekki enn verið nýtt. Loks var hola ÆR-4 boruð 1991 sérstaklega til könnunar á lífrænu jarðgasi, en holan er jafnframt ágæt jarðhitahola og gefur a.m.k. 10 kg/s af 100°C heitu vatni (Magnús Ólafsson o.fl. 1992).



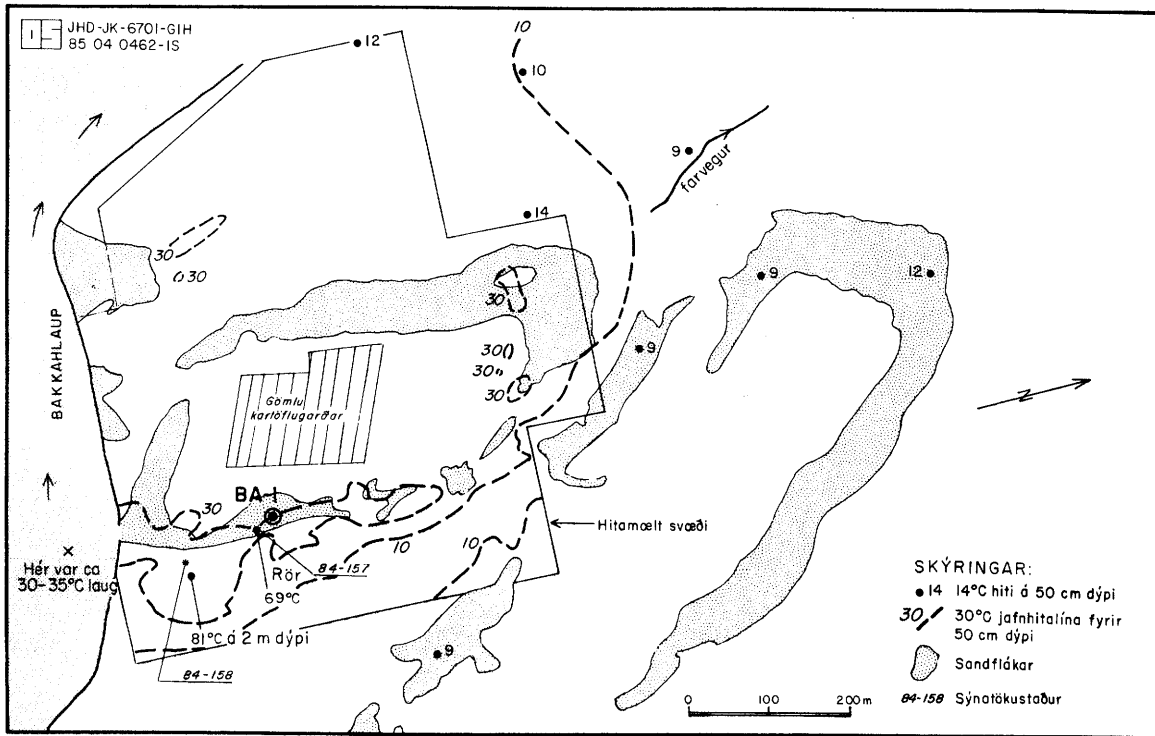
2. mynd: Jarðhitasvæðið við Skógalón.

2. Við Skógakl skammt norðan Skóga er mikið hitasvæði úti í fúamýri. Hiti mælist þar hæstur 93,5°C en afrennsli er lítið. Þó var um tíma reynt að nota það til upphitunar á Skógum.
3. Græniblettur heitir hitasvæði í fúamýri milli Skóga og Ærlækjarsels. Sumarið 1984 mældist þar 20°C hiti en skömmu eftir umbrotin mældist þar 52°C.
4. Hiti er um 2 km NA við Bakka (Ytribakka). Þar mældust 25°C við lækjarsprænu.
5. Í norðausturbakka Bakkahlaups við Ytribakka fannst töluverður hiti vorið 1988. Áin hefur verið að brjóta niður 2 m háan bakkann og er líklegt að þess vegna hafi hitinn ekki komið fyrr í ljós. Hiti mældist hæstur 31°C á 1 m dýpi í árbakkanum en rennsli var ekki hægt að meta.

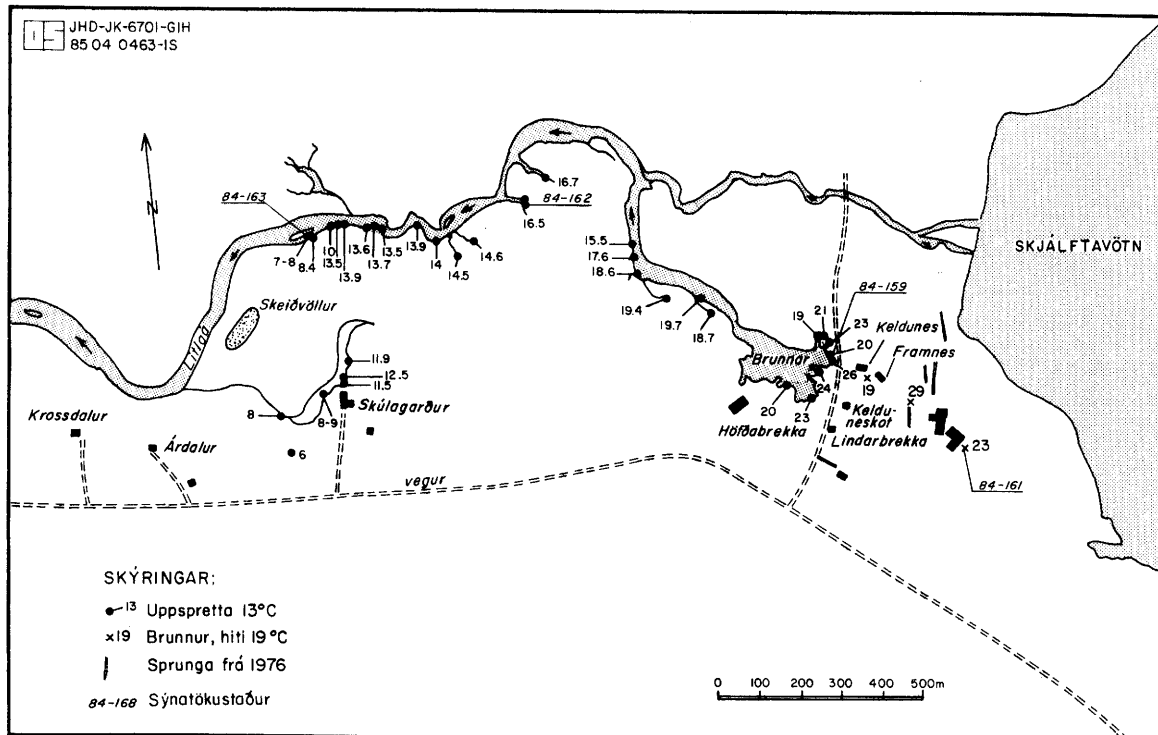


3. mynd: Hitamælingar í holu ÆR-3 við Skógalón.

6. Á norðausturbakka Bakkahlaups, um 3 km suðaustan Ytribakka, er stórt hitasvæði í gömlum árfarvegi og nær reyndar langt út í farveg Bakkahlaups. Hæstur hiti mældist 81°C á 2 m dýpi (4. mynd). Lítilsháttar rennsli sést, en vatnið hverfur fljótt niður í sandinn. Þarna undir er talið vera háhitasvæði. Kartöflur eru ræktaðar á stóru svæði við yllinn. Grunn rannsóknahola, BA-1, var boruð við heitasta staðinn haustið 1987 og reyndist hiti rúmlega 100°C á 70 m dýpi.
7. Við Keldunes og Framnes er volgt vatn í brunnnum og sprungum, einnig kemur fram mikið af volgu vatni undan hrauni í bakka Litluár alveg vestur að Skúlagarði (5. mynd). Hitinn er mestur austast, við vesturjaðar Kröflusprungubeltisins, og mældist þar 29°C en eftir umbrotin varð heitast 52°C. Þessi jarðhitaáhrif eiga líklega uppruna að rekja inn á Gjástykki en þar eru hitur sem efdust verulega í Kröflueldum. Afrennsli þaðan á greiða leið eftir Kröflusprungubeltinu niður að Keldunesi.



4. mynd: Hitasvæðið á austurbakka Bakkhlaups.



5. mynd: Volgurur við Keldunes og upptök Litluár.

3.3 Jarðhiti innan Þeistareykjasprungubeltis

Vitað er um hita á fjórum stöðum í þessum sprungusveim. Þrír þeirra eru við Lón, en einn við sjó út með Tjörnesi. Auk þess eru sagnir um hita í fjörunni undir Hringsbjargi.

1. Hiti er í fjörunni við Skeiðsöxl í landi Bangastaða. Þar mælist 49°C . Þessi hiti kemur upp rétt við misgengi.
2. Við Ytra Lón austanvert er staður þar sem heitir Laugar. Þar mældist mest 50°C hiti vor-
ið 1986. Mest ber á hitanum úti í lóninu og þar er yfir 30°C á allstóru svæði. Áreiðanleg-
ar heimildir eru um að á fyrri hluta þessarar aldar hafi mælst þarna um 82°C hiti (Guð-
mundur Ingi Haraldsson 1985; Guðmundur Ingi Haraldsson og Gunnar V. Johnsen 1986).
ÍSNÓ hf, sem var með fiskeldi í Lónum og síðan Rifós hf, sem tók við, hafa látið bora eina
jarðhitaholu og sex kaldavatnsholur á svæðinu. Jarðhitaholan LO-1 (1. mynd) var boruð í
mars 1987 niður á 165 m dýpi. Hiti reyndist hæstur 45°C á 70 m dýpi, en lækkaði á
næstu 40 m niður í $38,7^{\circ}\text{C}$, en hækkaði síðan í $40,9^{\circ}\text{C}$ í botni. Jarðhitavökvinn reyndist
ísaltur (1,6% selta mæld með leiðnimæli). Fyrstu fjórar kaldavatnsholurnar (10 m djúpar)
voru boraðar haustið 1987 rétt við fiskeldisstöðina og ein í viðbót sumarið 1989 (10 m
djúp) og er vatn í þeim $10-11^{\circ}\text{C}$ heitt. Síðasta holan var boruð sumarið 1993 og er hún
27 m djúp og hiti hæstur $6,6^{\circ}\text{C}$. Allar holurnar voru í nýtingu 1993.
3. Á botninum í Innra Lóni vestanverðu mælist á allstóru svæði $14-15^{\circ}\text{C}$ hiti.
4. Í SA-horni Innra Lóns eru margar vatnsmiklar lindir og eru þær heitustu um 11°C . Trú-
lega gætir hér áhrifa frá afrennsli af háhitasvæðinu á Þeistareykjum.

3.4 Annar jarðhiti

1. Í Klifarvegi í landi Arnaness, nærri Nýjabæ, eru all margar volgrur. Þar mældist hæstur
hiti 35°C en afrennsli er lítið.
2. Við Brunná í landi Klifshaga eru volgrur á tveimur stöðum á N-S línum og eru 200-300 m
á milli. Nyrðri volgran hefur mælst heitust $18,5^{\circ}\text{C}$ en sú syðri $11,5^{\circ}\text{C}$.

3.5 Borholur

Skrá yfir helstu jarðhitaborholur í Öxarfirði og Kelduhverfi er birt í töflu 1. Staðsetning flestra þeirra er sýnd á 1. mynd, þó er aðeins sýnd ein hola í Núpsmýri (N-1), en aðrar holur þar eru í næsta nágrenni hennar (Guðmundur Ómar Friðleifsson 1989). Þá er Kópasker utan kortsins.

Á árunum 1960-1970 voru boraðar fjölmargar neysluvatnsholur með höggbor, en fyrsta jarðhitaholan í Öxarfirði, K-1, var boruð 1971 við Keldunes (1. mynd). Holan varð 368 m djúp og mistókst hvað jarðhitaleit varðar. Rétt rúmlega 20°C heit vatnsæð er á rúmlega 300 m dýpi. Samkvæmt borskýrslu var dælt um 2 l/s með tæplega 1 m niðurdrætti (vatnsborð í 3,2 m) úr holunni í lok borunnar, en gögn um aðrar prófanir finnast ekki í fótum Orkustofnunar. Einhverju borsvarfi var safnað, líklega á um 10 m bili, og jarðlög greind samkvæmt því og borskýrslum. Samkvæmt þeim er nútímahraun frá yfirborði niður á a.m.k. 20 m dýpi, og síðan hrungjörn setlög niður á 160 m dýpi. Á 152 m dýpi er minnst á leirkennt lag, og þar neðan við á sæmilega heillegt berg sem litaði skolvatnið grænt og grátt til skiptis næstu 100 m. Ef miðað er við reynsluna af borunum við Skógalón gæti hér hafa verið um jarðhitaummynduð setlög að ræða, en ofanefnd jarðlagagreining gefur til kynna að á þessu dýptarbili sé móberg. Á 257 m

dýpi er getið um kolhart berglag og síðan mishart berg, sprungið á köflum, allt niður í botn holunnar á 368 m dýpi. Samkvæmt jarðlagagreiningu er þarna borað í hraunlagastafla.

Tafla 1: Jarðhitaholur í Kelduhverfi og Öxarfirði.

Staður	Nr.	Dýpi (m)	Ár boruð	Hæsti hiti (°C)
Ytribakki	BA-1	81	1987	107
Keldunes	K-1	368	1971-72	20
Lón	LO-1	165	1987	45
Daðastaðir	D-1	150	1987	22
Kópasker	KO-5	302	1987	21
Núpur	N-1	71	1988	35
"	N-3	62	1988	> 25
"	N-8	106	1988	34
"	N-9	136	1989	27,5
"	N-10	96	1989	33,8
"	N-15	218	1990	39
"	N-16	145	1990	21
"	N-17	200	1990	
Ærlækjarsel	ÆR-1	71	1987	107
"	ÆR-2	102	1987	30
"	ÆR-3	322	1988	128
"	ÆR-4	455	1991	150

Næsta hálfan annan áratug má heita að ekkert sé borað í Öxarfirði eða Kelduhverfi. Jarðskjálftahrinur og jarðsig samfara eldsumbrotum í Kröflu eftir 1975 riðu yfir héraðið á umræddu tímabili. Varð þá m.a. til Skjálftavatn og jarðhiti jókst víða á yfirborði. Í byrjun nýunda áratugarins hófst svo "fiskeldisævintýrið". Risu þá fljótlega upp fiskeldisstöðvar við Lón annars vegar og Litluá í Kelduhverfi hins vegar, sem báðar nýttu volgt jarðhitavatn á yfirborði ásamt öðrum jarðgæðum til fiskeldis. Í Öxarfjarðarhreppi voru skilyrði til fiskeldis ekki eins auðsæ, og leiddi það til nokkurra ára samstarfs milli heimamanna (Seljalax hf) og Orkustofnunar í leit að kjörskilyrðum til fiskeldis. Niðurstaða þess samstarfs var jákvæð og í framhaldi af því var matfiskeldisstöð reist í Núpsmýri og seiðaeldisstöð að Sigtúnum, báðar á vegum Silfurstjörnunnar hf.

Í tengslum við fiskeldi í Öxarfirði og Kelduhverfi hafa frá 1987 verið boraðar milli 30 og 40 borholur, þar af 7 í Kelduneshreppi á vegum ÍSNÓ hf og síðar Rifóss hf, en hinar í Öxarfjarðarhreppi á vegum Seljalax hf og Orkustofnunar og síðar Silfurstjörnunnar hf. Holurnar voru ýmist boraðar til leitar að jarðsjó, jarðhita eða grunnvatni. Niðurstöðum allflestora borana í Öxarfjarðarhreppi hefur verið lýst (Guðmundur Ó. Friðleifsson 1987, 1989; Lúdvík S. Georgsson o.fl. 1989; Magnús Ólafsson o.fl. 1992; 1993). Helstu niðurstöður og almenn atriði er lúta að samnýtingu vatnskerfa til fiskeldis eru dregin saman hér að neðan.

Þrjár holur voru boraðar í landi Daðastaða í leit að jarðsjó, og ein í landi Ærlækjarsels. Sautján holur voru síðan boraðar í landi Núps eftir köldu vatni og volgum jarðsjó, en fiskeldisstöð Silfurstjörnunnar hf stendur norðanvert við Núpsvatn. Dýpsta holan, N-17, er 200 m djúp og er hún staðsett rétt við fiskeldisstöðina.

Undir Núpsmýrinni er geysistór ferskvatnsgeymir í hripleku bólstrabergi. Bólstraberg þetta er hið sama og finnst í Öxarnúp, misgengið til vesturs og leynist undir sandinum á 20-60 m dýpi vestan við Öxarnúp. Vatnsgæfa bólstrabergið er a.m.k. 150 m þykkt. Vestast í Núpsmýrinni finnst eingöngu volgt jarðsjávarkerfi neðan sandsins, og er það a.m.k. 37°C heitt þar sem heitast er. Þar er sandurinn, ásamt setlögum frá síðjökultíma, 60 m þykkur. Litlu austar undir Núpsvatni er 50-70 m þykkt ferskvatnskerfi, 4-6°C heitt. Undir því, neðan 100 m dýpis, er volgt jarðsjávarkerfi og eru vatnskerfin samnýtt í dýpstu holunni (N-17). Úr henni er dælt 200-250 l/s af 10°C heitri, ísaltri vatnsblöndu (0,6% selta). Nærri fullsaltur jarðsjór finnst í botni holunnar um 20°C heitur. Úr heitu holunum vestast á svæðinu (N-1, N-8 og N-15) er 32-38°C heitum jarðsjó, nærri fullsöltum, dælt og hann fyrst nýttur til hitaveitu í gólfi stöðvarinnar, síðan í snjóbræðslu milli fiskeldiskerja og loks blandað í eldsvatnið. Eldshiti er um 9-10°C, en alls eru 800-900 l/s nýttir úr vatns- og jarðsjávarkerfunum undir Núpsmýrinni. Að auki er 350-400 l/s af köldum strandsjó dælt úr drenlögnum frá ströndinni. Samnýting mismunandi vatnskerfa af þessu tagi er einsdæmi í heiminum.

Jarðhitasvæðið við Skógalón er um 3 km vestan við fiskeldisstöðina í Núpsmýri, þar sem 100°C heitt vatn kemur upp úr sandinum. Við Skógalón hafa verið boraðar 4 holur, sem kenndar eru við Ærlækjarsel (ÆR-1 til ÆR-4). Fyrstu 3 voru boraðar vegna rannsókna á skilyrðum til fiskeldis á árunum 1987 og 1988, en sú síðasta 1991 til könnunar á uppruna lífræns jarðgass sem óvænt fannst í fyrstu holunni. Í fyrstu var talið að jarðhitasvæðið við Skógalón væri lághitasvæði því háhitaeinkenni fundust engin á yfirborði, hvorki í efnasamsetningu vatns né gass.

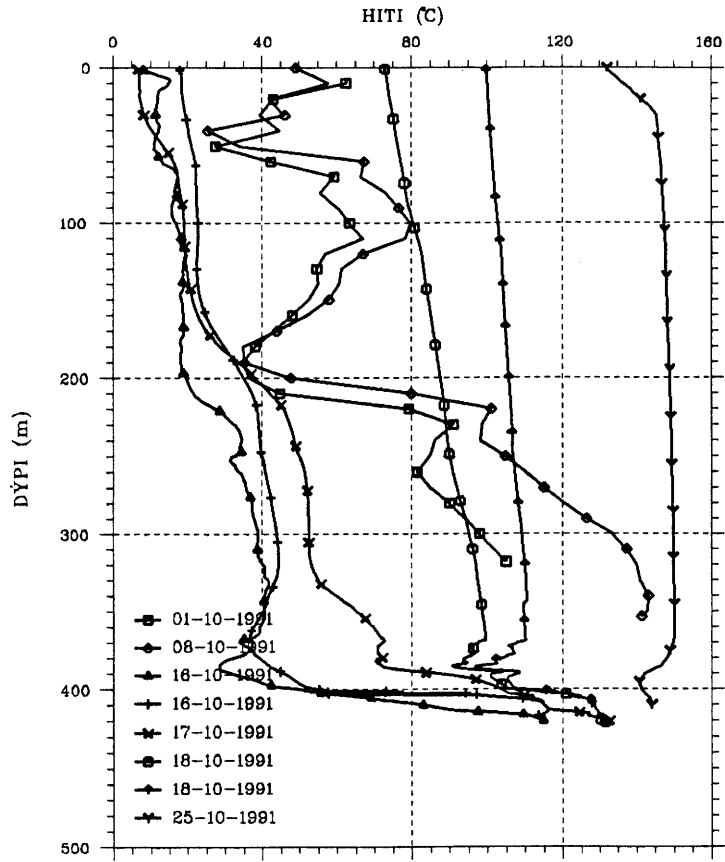
Ummerki um háhita fundust hins vegar í dýpstu holunni, ÆR-4, sem er 450 m djúp. Þannig bendir tilvist steindanna kvars-wairakft og svo blandlagsleirs, smektfts/klórfts, til að berghiti hafi komist yfir 200°C. Mælingar á vökvabóluhita í kalsíti staðfesta 200-250°C fornhita (Magnús Ólafsson o.fl. 1992), en hæsti berghiti í dag er 150°C á 400 m dýpi (6. mynd). Efnahitamælar gefa til kynna að vatn sem streymir inn í holuna á 360-370 m dýpi, sé með 160-190°C djúphita. Jafnframt sjást fyrstu vísbendingar um háhitaeinkenni í efnasamsetningu gassins, þar sem CO₂ mælist tæp 8% en í eldri holunum hafði það nánast ekki fundist. Vottur af olfu- eða kolagasi finnst í jarðhitavatninu. Reynt hefur verið að skýra uppruna þess, m.a. með borun ÆR-4, en án árangurs. Nú er vitað að gas þetta er ættað af meira dýpi en 450 m og er a.m.k. 20.000 ára gamalt og trúlega miklu eldra. Gasið myndast annað hvort í surtarbrandslögum eða lífrænu sjávarseti vegna jarðhitans. Verulegu máli skiptir hvort það er, því flest öll nýtanleg olfusvæði hafa orðið til vegna lífrænna leifa í sjávarseti. Athugunum á olfugasinu í Öxarfirði er lýst í sérstakri skýrslu (Magnús Ólafsson o.fl. 1992).

Jarðhitasvæðið við Skógalón er gjöfult því úr 320 m djúpri vinnsluholu (ÆR-3) fást 45 l/s í sjálfrennsli af 96°C heitu vatni, aðeins ísöltu (Cl um 2000 mg/l). Afköst holu ÆR-4 eru a.m.k. 10 kg/s af 100°C vatni og gufu, en botnhiti í holunni er um 150°C. Ekki er enn vitað hvort eða hvernig jarðhitasvæðið við Skógalón er tengt ætluðu háhitasvæði við Bakkahlaup, tæpum 10 km sunnar.

Við Bakkahlaup hefur einungis verið boruð ein grunn rannsóknahola (BA-1) og reyndist hiti í henni svipaður og í holu ÆR-1, rúmlega 100°C á 70 m dýpi. Ummyndun bergsins í grænan leir er hins vegar mun meiri en í Skógalónsholunum á sama dýptarbili, og var það talið nokkuð auðrakin afleiðing háhitavirkni. Sú greining ásamt gerð ummyndunar og hitamati út frá ummyndun við Skógalón styður eldri hugmyndir byggðar á jarðeðlisfræðigögnum um háhitasvæði við Bakkahlaup.

3 Dec 1993 hs
L= 82554 Oracle

**Ærlækjarsel
Holu ÆR-04
Hitamælingar**



6. mynd: Hitamælingar í holu ÆR-4 við Skógalón.

4. VIÐNÁMSMÆLINGAR

4.1 Inngangur

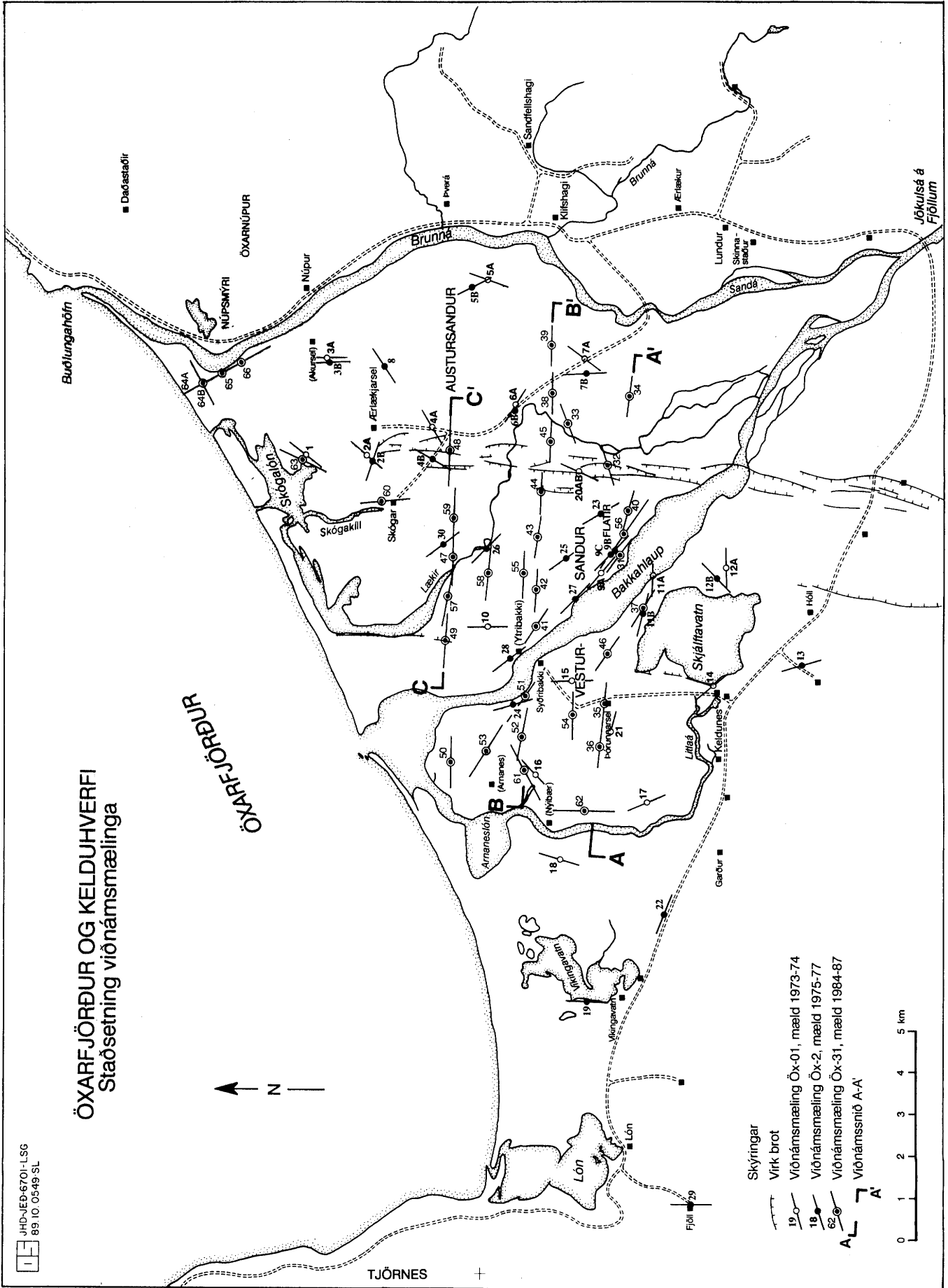
Viðnámsmælingar hafa lengi verið notaðar með góðum árangri hér á landi við yfirborðsrannsókn jarðhitasvæða. Með þeim er mælt eðlisviðnám bergsins gegn rafstraumi, en það er einkum háð vatnsinnihaldi þess (þ.e. poruhluta), hita, ummyndun og seltu grunnvatnsins. Með hefðbundnum mæliaðferðum má kortleggja eðlisviðnám í efsta kílómetra berggrunnssins þó að til séu aðferðir sem sjá mun dýpra. Yfirleitt er erfitt að aðskilja áhrifin frá þeim stærðum sem ráða eðlisviðnámi bergs. Engu að síður má með þeim fá upplýsingar um stærð jarðhitasvæða, kortleggja uppstreymisrásir og leita nýrra jarðhitasvæða. Út frá samræmdri túlkun viðnámsmælinga og annarra yfirborðsrannsókna má stundum draga ályktanir um hita og vatnsgæfni jarðhita-kerfa.

Viðnámsmælingar voru fyrst gerðar í Kelduhverfi og Öxarfirði sumarið 1960. Tilgangurinn var að leita að jarðhita sem gæti nýst til upphitunar og því var yfirleitt mælt nærri bæjum. Enn var mælt sumrin 1964, 1965 og 1968 og beindist athyglin þá einkum að bæjarhverfinu við Keldunes. Allar þessar mælingarnar voru gerðar með riðstraumstækjum en dýptarskynjun þeirra var því aðeins nokkrir tugir metra. Þetta voru góðar og gildar mælingar á þeim tíma en ekkert heitt vatn fannst til húshitunar. Í dag er gildi þeirra þó lítið sem ekkert vegna þess hve grunnt þær sjá, en einhverjar upplýsingar má þó lesa um jarðlög næst yfirborði. Enn var mælt við Keldunes sumarið 1970. Mælingarnar skynja töluvert dýpra en eldri mælingar en herslumuninn vantar upp á að gagn megi hafa af þeim.

4.2 Framkvæmd viðnámsmælinganna

Upp úr 1970 vöknudu hugmyndir um að háhitasvæði gæti leynst undir söndunum í Kelduhverfi og Öxarfirði. Um svipað leyti urðu miklar framfarir í viðnámsmælitækni. Ummerki jarðhita eru ekki mikil á yfirborði og því þótti tilvalið að beita viðnámsmælingum til að kanna þetta. Sumarið 1973 voru gerðar 12 viðnámsmælingar úti á söndunum í Öxarfirði og Kelduhverfi. Lengsti straumarmur mælinganna (AB/2) var 650-1500 m langur og dýptarskynjun því 400-1000 m. Niðurstöðurnar þóttu mjög áhugaverðar og var mælingum framhaldið sumrin 1974, 1975 og 1977. Mælingarnar urðu alls 30 en nokkrar þeirra voru mældar oft en einu sinni. Lengsti straumarmur var á bilinu 1000-1500 m. Unnið var úr mælingunum árið 1977. Niðurstöðurnar gáfu allgott yfirlit um viðnám í efsta kílómetranum í Kelduhverfi og Öxarfirði. Þær sýndu meðal annars að viðnámið væri lægst á allstóru svæði á norðausturbakka Bakkahlaups inni í Kröflusprungubeltinu. Undir því miðju mátti sjá vísbendingu um hærri viðnám á töluverðu dýpi. Engin skýrsla kom út um niðurstöðurnar vegna þess að landið var talið vera í einkaeign. Niðurstöður voru þó kynntar á nokkrum fundum, m.a. á ráðstefnu Jarðfræðafélags Íslands um íslenska jarðfræði sem fram fór í nóvember 1977 (Valgarður Stefánsson 1977).

Næstu árin var lítið unnið að jarðhitarannsóknum í Kelduhverfi og Öxarfirði. Eftir að fjárveiting fékkst til rannsókna árið 1984 voru m.a. gerðar frekari viðnámsmælingar. Markmiðið með þeim var að fá meiri vitneskju um lágviðnámsvæðið á austurbakka Bakkahlaups. Alls voru gerðar 16 mælingar (ÖX31-46) og voru þær settar út eftir tveim sniðum þvert á áhuga-verðasta svæðið og aðalsprungustefnu til að hægt yrði að nota tvívið líkön við túlkun þeirra. Sumarið 1987 var enn bætt við 20 mælingum (ÖX47-66), bæði til að þetta og lengja viðnáms-sniðin frá 1984 og sömuleiðis til að afmarka hitasvæðin betur til norðurs.



7. mynd: Staðsetning viðnámsmælinga og -sniða í Öxarfirði og Kelduhverfi.

Staðsetning allra viðnámsmælinga í Öxarfirði og Kelduhverfi er sýnd á 7. mynd. Þar sem mælt hefur verið mörgum sinnum á sama stað er eldri mælingin auðkennd með bókstafnum A en þær yngri með B og C.

4.3 Úrvinnsla viðnámsmælinganna

Túlkun allra viðnámsmælinga í Öxarfirði og Kelduhverfi var endurskoðuð fyrir þessa skýrslu. Allar mælingar voru túlkaðar einvítt. Tölvutúlkun elstu mælinganna staðfestir að flestar mælingar frá 1973 eru heldur stuttar til að verulegt gagn megi hafa af þeim.

Að einvíðri túlkun lokinni, voru mælingar á þremur sniðum teknar og túlkaðar tvívítt. Þessar mælingar eru allar frá 1984 og 1987. Flest skilyrði til tvívíðrar túlkunar eru allvel uppfyllt í þessum mælingum. Mælisniðin eru þvert á meginstefnu jarðhitasvæðisins og aðal-sprungustefnuna og litlar óreglur eru í jarðlögum nærri yfirborðinu. Yfirleitt er um 1 km milli mælinga sem er viðunandi, þó að þéttleikinn hefði mátt vera meiri einkum þar sem viðnám mælist lægst. Eitt er þó til boga. Bakkahlaup veldur því að mælingarnar, sem liggja næst ánni, snúa ekki alveg rétt, þ.e. eru ekki samsíða sniðlínunni. Aldrei skakkar þó meiru en 30°. Það er ekki tilviljun að samræmi milli mældra ferla og ferla samkvæmt líkanreikningum er lakast einmitt í þessum mælingum. Að lokinni tvívíðri túlkun var einvíð túlkun annarra mælinga endurskoðuð og leiðrétt þar sem ástæða þótti til við gerð viðnámskorta.

4.4 Niðurstöður viðnámsmælinganna

Tvívíðu viðnámsniðin gefa góða mynd af því hvernig edlisviðnám breytist með dýpi. Lega sniðanna er sýnd á 7. mynd.

Viðnámsnið A-A' er sýnt á 8. mynd og liggur vestan frá Litluá, um Þórunnarsel, jarðhitann í kartöflugörðunum á austurbakka Bakkahlaups og yfir á Austursand. Í efstu 50-100 m er viðnám yfirleitt nokkuð hátt, 80-350 Ω m. Þetta viðnámslag samsvarar væntanlega lausum sandi. Þar fyrir neðan er viðnám mjög breytilegt. Vestast, við Litluá og Þórunnarsel, skiptast á lágt og hátt djúpviðnám. Undir mælingu ÖX36 er djúpviðnám lágt, 8-10 Ω m, og gætir þarna mjög trúlega áhrifa frá jarðhita. Aftur á móti er djúpviðnám mun hærra bæði austan og vestan við þessa mælingu. Austan Þórunnarsels fer djúpviðnám aftur lækandi. Í tengslum við hitasvæðið á austurbakka Bakkahlaups mælist viðnám mjög lágt allt niður í 1 Ω m. Undir þessu svæði miðju er þó kjarni með háu viðnámi, um 200 Ω m, sem nær allt upp á 250 m dýpi. Svipuð viðnámslagskipun kemur fram miðsvæðis á ýmsum háhitasvæðum, t.d. í Hengli og Kröflu. Sterkar líkur má leiða að því að þetta háviðnám tengist jarðhitavirkninni og því er það einkennt með rauðu neti. Austurmörk lágviðnámsins eru nokkuð skörp og hækkar djúpviðnámið þar í 100-200 Ω m. Háa viðnámið fer saman við sprungustykkið, sem var virkast þegar kvika hljóp frá Kröflu norður í Kelduhverfi og Öxarfjörð 1975-1976 og 1978. Þegar komið er út á Austursand lækkar djúpviðnám aftur, niður í 20-25 Ω m.

Viðnámsnið B-B' er á 9. mynd. Það er um 2 km norðar og nær frá jarðhitnum við Arnanes, framhjá Ytribakka og vel yfir á Austursand. Í grófum dráttum gefur sniðið svipaða mynd. Sandurinn kemur skýrt fram í efstu 50-100 m. Þar fyrir neðan er viðnám all breytilegt. Vestan Bakkahlaups kemur fram þunnt lag undir lausa sandinum með mjög lágu viðnámi (2 Ω m). Lagið hefur öll einkenni seltu og er næsta víst að þarna er þykkt setlag myndað á sjávarbotni. Fyrir neðan það er viðnámið 40-80 Ω m en fer lækandi með dýpi. Nærri Bakkahlaupi eru skörp skil og djúpviðnám lækkar niður í 6-10 Ω m, en hækkar síðan heldur

aftur, áður en komið er inn í lægsta viðnámið sem tengist hitasvæðinu á austurbakka Bakkahlaups. Þar mælist djúpvíðnám 3-5 Ω m. Austurmörk þess eru nokkuð skörp og hækkar djúpvíðnámið í 70-100 Ω m, þegar komið er að virka sprungustykkinu frá Kröflueldum. Djúpvíðnámið lækkar síðan aftur, niður í 12-25 Ω m, þegar komið er út á Austursand.

Viðnámsstrið C-C' er á 10. mynd. Þetta er nyrsta striðið og er 2 km norðan við strið B-B'. Það er mun styttra en hin striðin en nær þó þvert yfir Kröflusprungubeltið. Myndin er enn mjög svipuð. Mjög lágt djúpvíðnám kemur fram með háviðnámskjarna en töluvert herra viðnám til beggja hliða.

Viðnámskort sýna eðlisviðnám svæðis á ákveðnu dýpi. Þrjú slík kort voru gerð fyrir Öxarfjörð og Kelduverfi. Á 11.-13. mynd er sýnt eðlisviðnám á 250, 500 og 750 m dýpi undir sjávarmáli. Viðnámskortin eru byggð á niðurstöðum tvívíðrar túlkunar þar sem hægt var að beita henni (striðin þrjú), en annars á einvíðri túlkun mælinga. Þó var reynt eftir megni að leiðrétta niðurstöðurnar og var þá tekið mið af nálægum mælingum sem höfðu verið túlkaðar tvívítt.

Eðlisviðnámið á 250 m dýpi er sýnt á 11. mynd. Viðnámið er lægst á 5-6 km² stóru og nokkuð vel afmörkuðu svæði á austurbakka Bakkahlaups. Svæðið er flangt með stefnunna N15°V og eðlisviðnámið er þarna 1-5 Ω m. Hitasvæðið við Bakkahlaup er á syðri hluta þessa svæðis. Lágviðnámstota teygir sig milli Þórunnarsels og Syðribakka. Þarna gætir vafalítið áhrifa frá jarðhita þó að hann sjáist ekki á yfirborði. Jarðhitinn við Arnanes gæti þó verið angi af þessum meiði. Jarðhitasvæðið við Skógalón sker sig ekki verulega úr á þessu dýpi og mælist viðnám þar um 10 Ω m. Það er hins vegar lægra, eða 2-6 Ω m, austur við Brunnárósa, en þær mælingar eru mjög nærri ströndinni og má reikna með að sjórinn hafi þar töluvert áhrif til lækkunar. Utan þessara svæða er viðnámið yfirleitt mun herra og gjarnan á bilinu 40-200 Ω m.

Eðlisviðnámið á 500 m dýpi er sýnt 12. mynd. Breytingin frá 250 m dýpi er töluverð. Lágviðnámsvæðið austan Bakkahlaups hefur nú stækkað töluvert og er nú a.m.k. 10 km² en norðurmörk þess eru ekki þekkt. Á þessu dýpi kemur innan þess fram kjarni með mun herra viðnámi, líklega af stærðargráðunni 100 Ω m. Kjarninn teygir sig eftir lágviðnáminu endilöngu en er mest áberandi syðst, þar sem jarðhitans gætir á yfirborði. Það er athyglisvert að stefnan á lágviðnámsvæðinu fer ekki alveg saman við stefnu sprungubeltisins, heldur stefnir það N15°V, nokkurn veginn þvert á ströndina. Lágviðnámstotan milli Syðribakka og Þórunnarsels er enn áberandi. Þá kemur fram mjög lágt viðnám í tengslum við hitasvæðið við Skógalón, eða um 2 Ω m. Þarna eru augljóslega tengsl milli jarðhitans og lágs viðnáms. Utan hitasvæðanna er viðnám almennt lægra en á 250 m dýpi og á Austursandi er það fremur lágt eða á bilinu 12-20 Ω m. Það er þó athyglisvert að út eftir báðum jöðrum Kröflusprungubeltisins teygja sig háviðnámstotur. Þetta háa viðnám má skýra með kælingu vegna streymis kalds grunnvatns niður í berggrunninn um opnar sprungur. Vestan Þórunnarsels hækkar djúpvíðnám mikið og er á stóru svæði yfir 100 Ω m. Þarna er komið út fyrir svæðið þar sem áhrifa jarðhita og eldvirkni gætir og má segja að þetta sé dæmigert djúpvíðnám í gosbelti utan jarðhitasvæða þar sem sjávarselta hefur lítil áhrif til lækkunar.

Eðlisviðnámið á 750 m dýpi er sýnt á 13. mynd, og er munurinn ekki mikill. Lágviðnámsvæðið á austurbakka Bakkahlaups hefur þó stækkað lítillega og háviðnámskjarninn sömu leiðis. Annars staðar eru breytingar einnig smávægilegar. Þó er háviðnámið sem fylgir sprungustykkinu á austanverðu svæðinu ekki eins áberandi og jafnframt hefur lágviðnámsvæðið á Austursandi stækkað.

Viðnámsmælingarnar gefa eindregið til kynna að hjarta jarðhitavirkni í Kelduhverfi og Öxarfirði sé á austurbakka Bakkahlaups, þar sem jarðhita gætir nokkuð á yfirborði og svæðinu þar norður af. Þetta svæði er a.m.k. 10 km² stórt, en virkasti hlutinn er syðst, eins og marka má af lægstu viðnámsgildunum og að þar er grynnt á háviðnámskjarnann. Við Skógalón er annað lágviðnámsvæði tengt þeim jarðhita sem þar er. Það er þó mun minna, en reyndar eru mörk þess ekki þekkt nema að litlu leyti. Loks kemur fram lítið lágviðnámsvæði milli Syðribakka og Þórunnarsels, trúlega tengt jarðhita.

4.5 Jarðhiti og lágviðnám

Rannsóknir á tengslum eðlisviðnáms bergs við ýmsa aðra eðlisþætti þess (Ólafur G. Flóvenz o.fl. 1985; Knútur Árnason og Ólafur Flóvenz 1992) hafa hafa meðal annars leitt í ljós að viðnám vökvans í berginu skiptir litlu máli, nema það sé óvenjulega lágt vegna mikillar sjávarblöndunar (< 1 Ωm). Bent er á að yfirborðsleiðni í sprunguveggjum sé ríkjandi þáttur í rafleiðni bergs sem er mettað vökva. Mismunandi eðlisviðnám bergs megi því fyrst og fremst rekja til mismunandi sprunguporuhluta, hita eða ummyndunar.

Hér er ekki ætlunin að fara djúpt í þessi atriði, því að enn er ekki mikið vitað um innri gerð jarðhitakerfanna í Kelduhverfi og Öxarfirði þó að rannsóknaboranir sumrin 1987, 1988 og 1991 hafi bætt nokkuð úr. Nokkra þætti má þó draga fram.

Jarðfræðilegar aðstæður í Öxarfirði eru öðru vísi en annars staðar innan gosbeltisins á Íslandi. Jarðhitinn þar kemur upp í þykkum setlögum og benda mælingar til að setlagastafinn geti verið um 1 km þykkur. Því verður að fara varlega þegar stuðst er við reynslu annars staðar frá. Það er þó næsta víst að hið lága eðlisviðnám, 2-5 Ωm, sem mælist á austurbakka Bakkahlaups, er ekki hægt að skýra eingöngu með mikilli seltu og/eða háum poruhluta. Það verður einnig að gera ráð fyrir að þarna leynist háhitasvæði, þ.e. að hitinn sé um eða yfir 200°C í efsta kílómetranum. Taka má mið af utanverðum Reykjanesskaga. Selta jarðsjávarins þar er sú sama og selta sjávar og bergið er mjög opið. Þar sem áhrifa jarðhita gætir ekki er viðnám 6-12 Ωm í efsta kílómetranum. Þetta svarar til hita sem er um og innan við 100°C. Innan háhitasvæðisins á Reykjanesi er djúpviðnámið hins vegar 2-3 Ωm (Lúðvík S. Georgsson 1984). Hiti í djúpkerfinu þar er um eða yfir 270°C. Bergfræðilega er svæðið mjög ólíkt Bakkahlaupssvæðinu en hár poruhluti ætti þó að einkenna bæði svæðin.

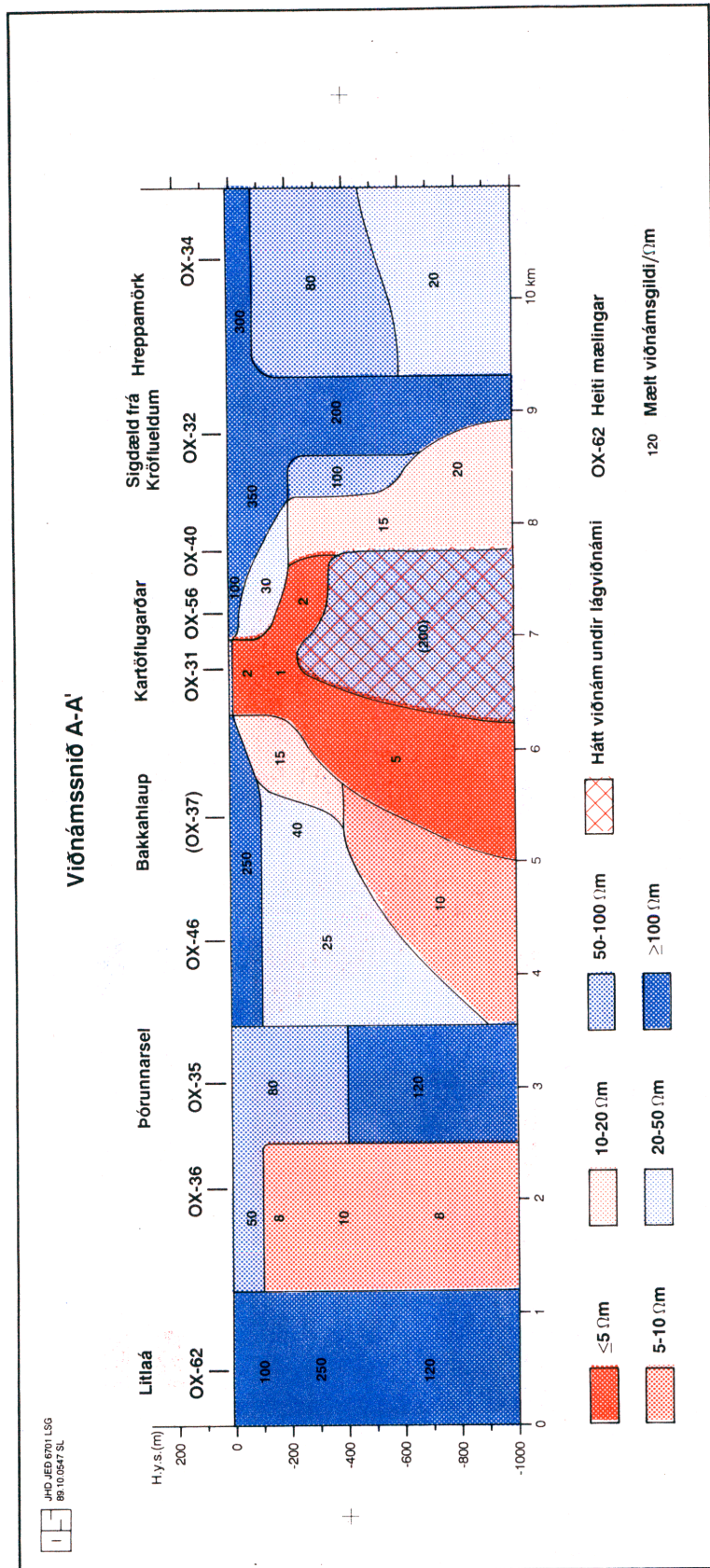
Viðnámsmælingarnar gefa til kynna að allviðáttumikið jarðhitasvæði sé innan Kröflusprungubeltisins á láglandi Kelduhverfis og Öxarfjarðar og hjarta þess sé á austurbakka Bakkahlaups þar sem jarðhita verður vart á yfirborði. Segja má að 5 Ωm jafnviðnámslínan á mynd 12 sé ágætis viðmiðunarlína um mörk þess og hún afmarkar um 10 km² stórt svæði sem er opið til norðurs. Miðað við stærð svæðisins má segja að það sé með ólíkindum hve lítil yfirborðsummerkin séu. Þetta skýrist þó af grunnvatnsaðstæðum. Kaldur grunnvatnsstraumurinn út vel lekan sandinn kæfir jarðhitavirknina að verulegu leyti.

Háviðnám undir lágviðnámi er algengt fyrirbæri á háhitasvæðum á Íslandi. Vel þekkt dæmi um þetta eru í Kröflu og Hengli. Þetta er nú talið stafa fyrst og fremst af breytingum á ummyndunarsteindum bergsins. Þegar hitinn fer yfir 250°C fara að myndast háhitasteindir eins og epídót og klórít í stað leirsteinda, en við það hækkar eðlisviðnám bergsins verulega. Háhitaummyndun, sem orsakar hátt viðnám undir lágviðnámi, er vísbending um að jarðhitakerfið hafi á lífsferli sínum náð a.m.k. 250°C hita, en það þarf þó ekki að vera dæmigert fyrir núverandi ástand. Mikil ummyndun, sem kom fram í holu BA-1, styður þessar hugmyndir. Jafnframt er ekki ólíklegt að þétt og fersk innskot geti hér einnig skipt einhverju máli, samanber kvikuhlaup

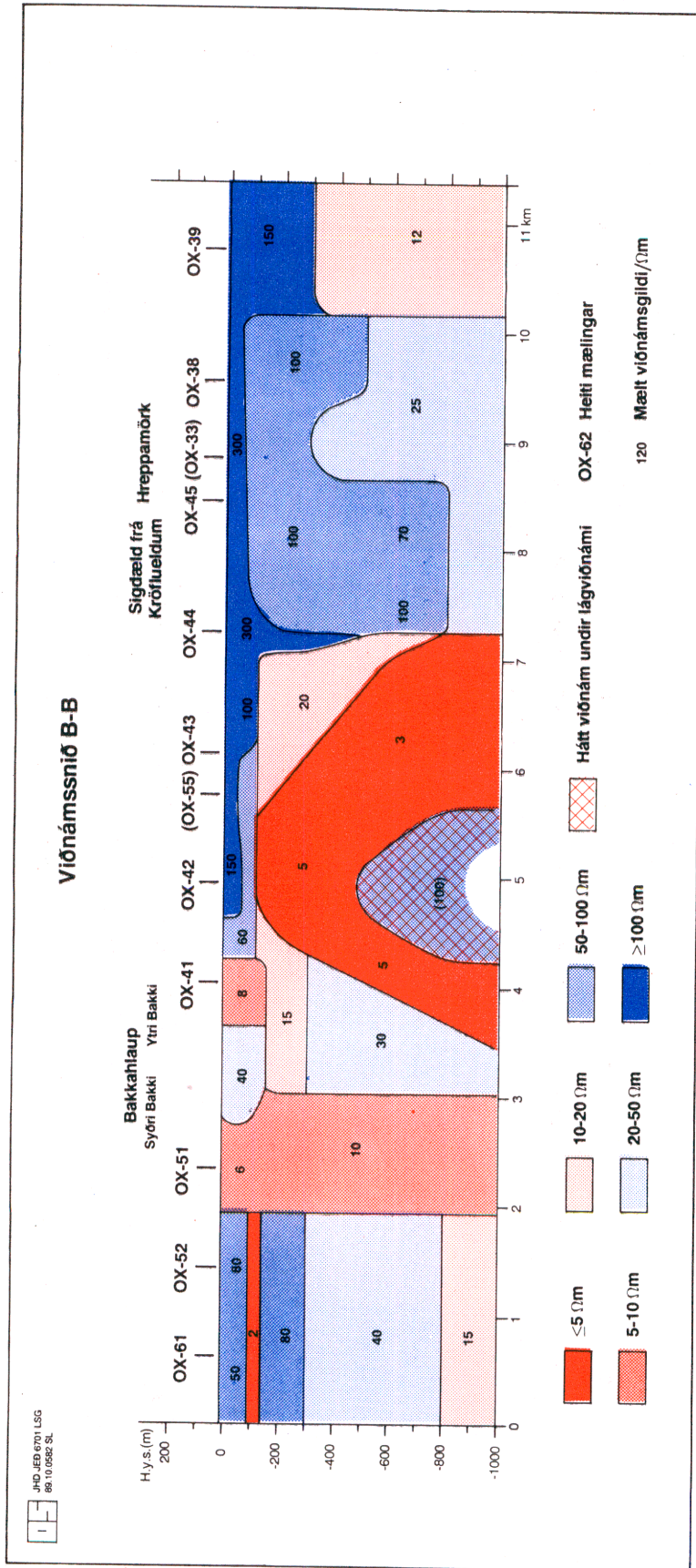
Kröfluelda.

Athyglisvert er hve virka sprungustykkið kemur skýrt fram á viðnámskortunum sem hávið-nám. Áður hefur verið minnst á ástæðuna. Þarna á kalt og ferskt grunnvatn greiða leið niður. Afleiðingin er kæling bergsins sem leiðir af sér allhált eðlisviðnám eins langt niður og áhrifanna gætir.

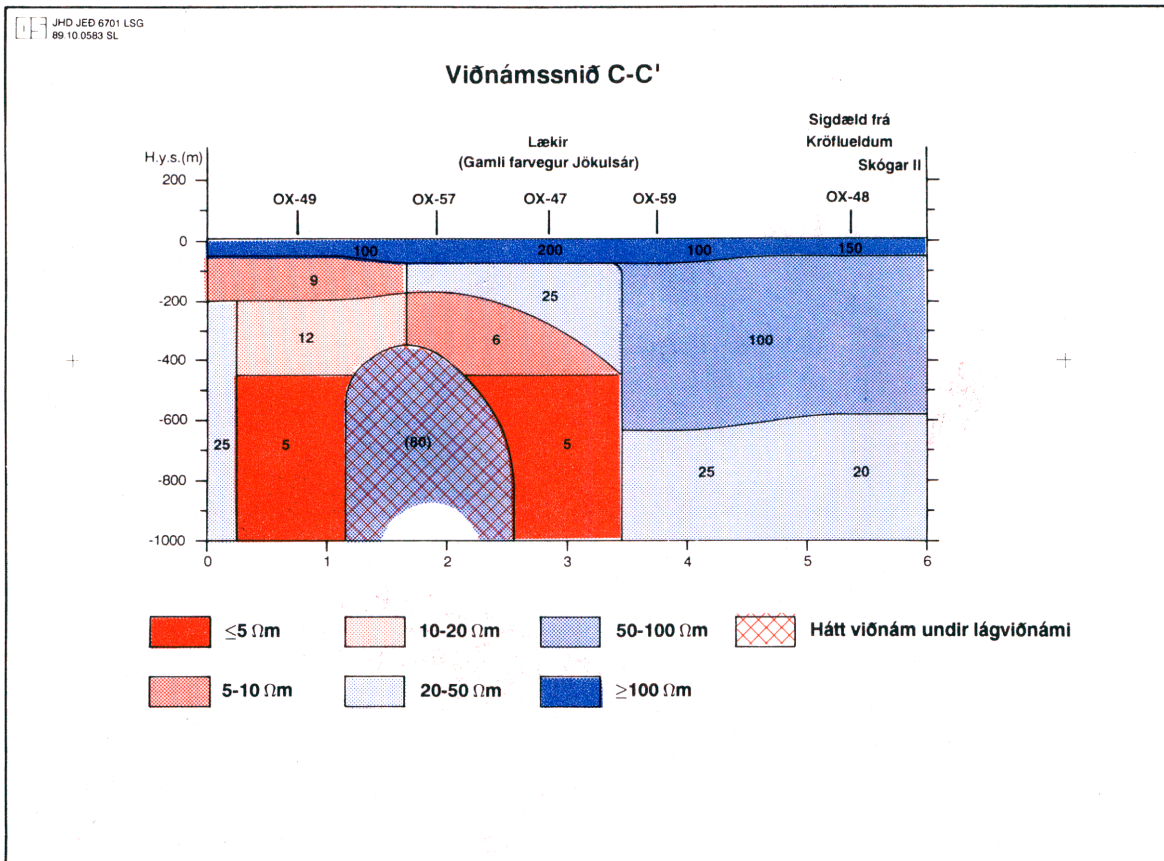
Samandregið gefa viðnámsmælingarnar eftirfarandi mynd. Á a.m.k. 10 km² stóru svæði á austurbakka Bakkahlaups er háhitasvæði, þar sem hiti er um eða yfir 200°C. Viðnám mælist þar mjög lágt, 2-5 Ωm, sem má bera saman við 15-200 Ωm utan þess. Svæðið er vel afmarkað til austurs og vesturs af virkum sprungustykkjum og gætu þau að nokkru virkað sem niður-streymisleiðir og því vatnsgeymir fyrir hitasvæðið. Undir lágviðnáminu er háviðnámskjarni. Líkur eru leiddar að því að þetta háviðnám stafi af ummyndunarsteindum, sem einkenna háhita-virkni, ásamt þéttum og ferskum innskotum, eins og dæmi eru um á öðrum háhitasvæðum.



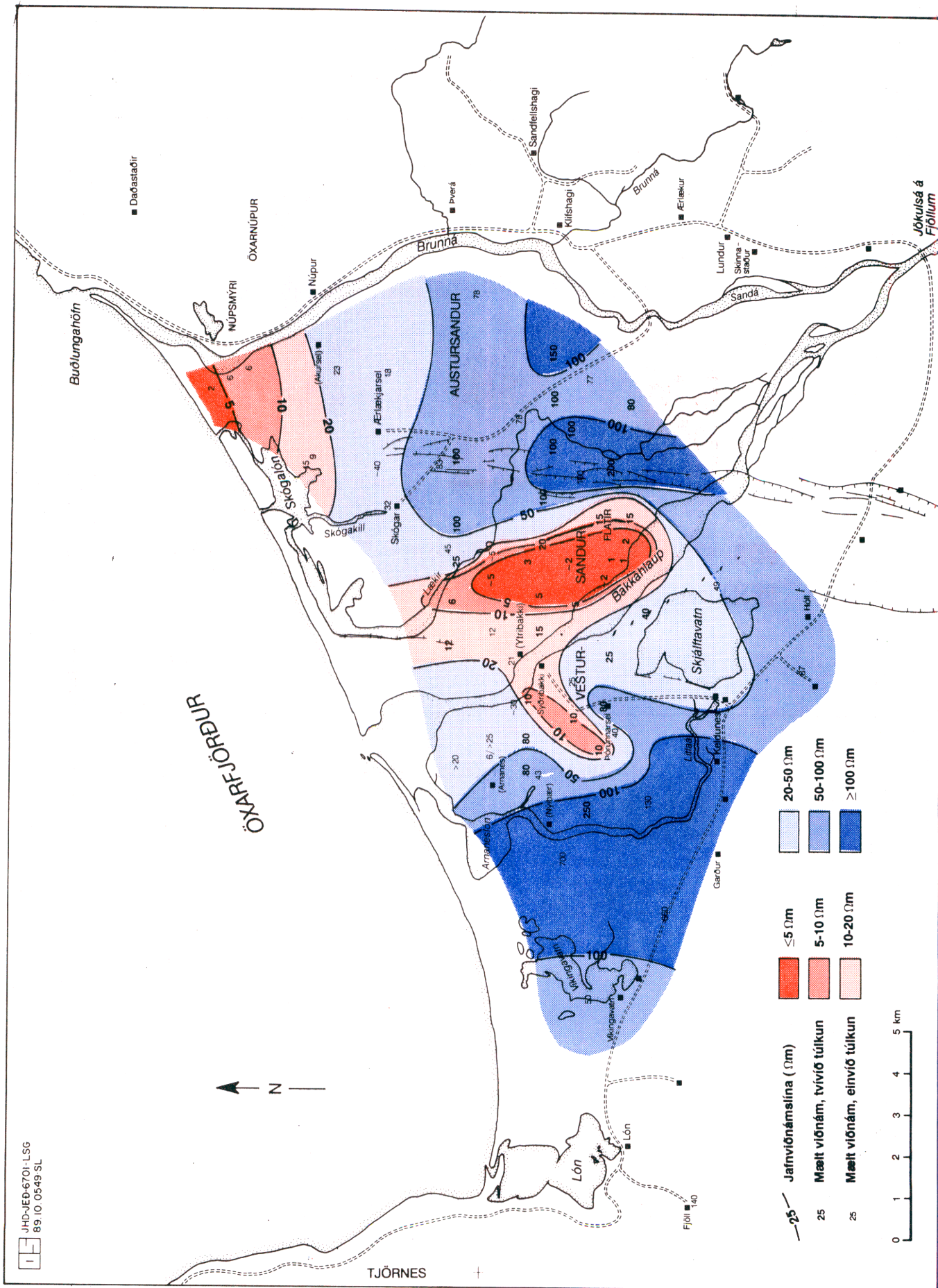
8. mynd: Viðnámssnið A-A'.



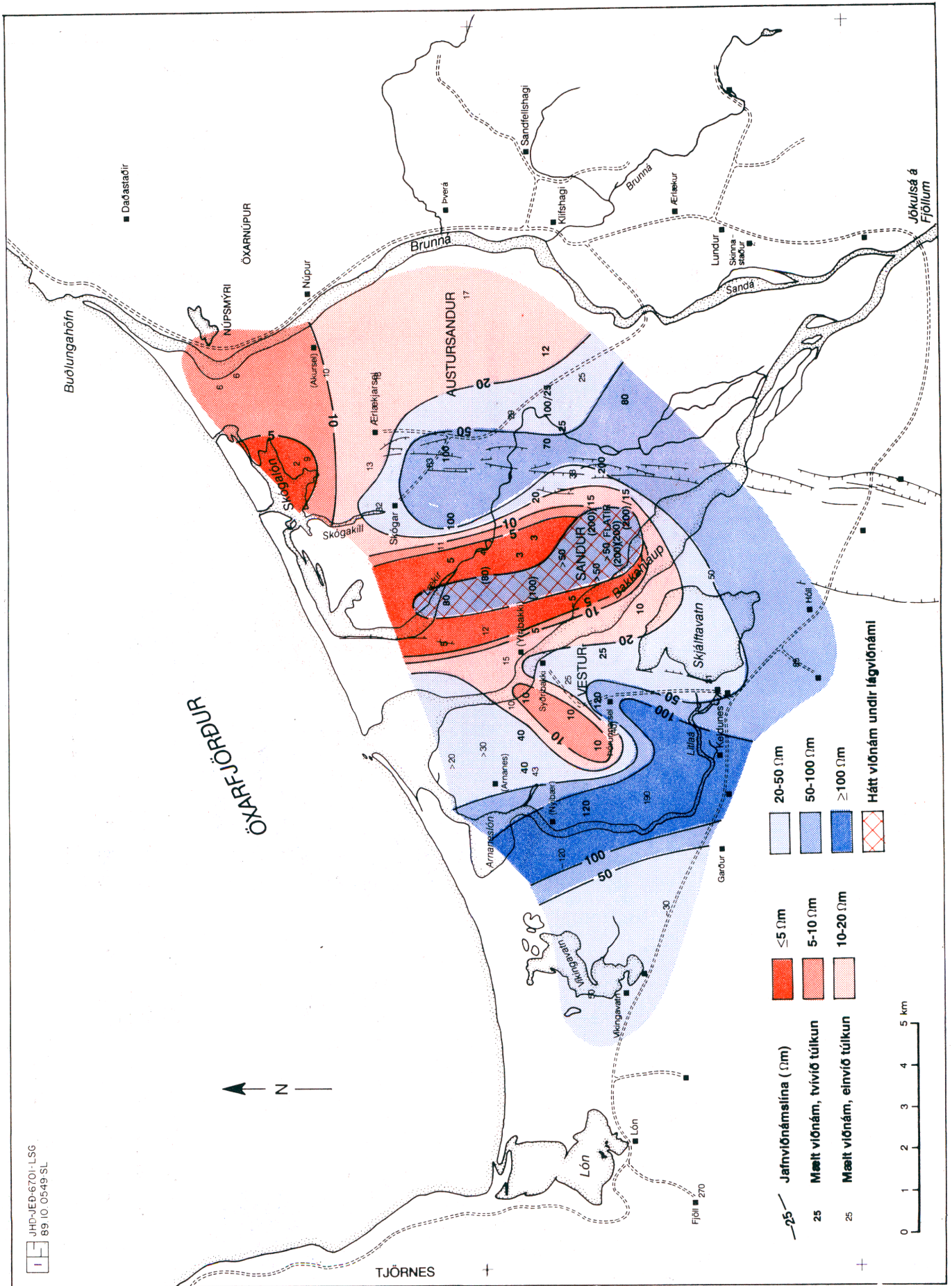
9. mynd: Viðnámssnið B-B'.



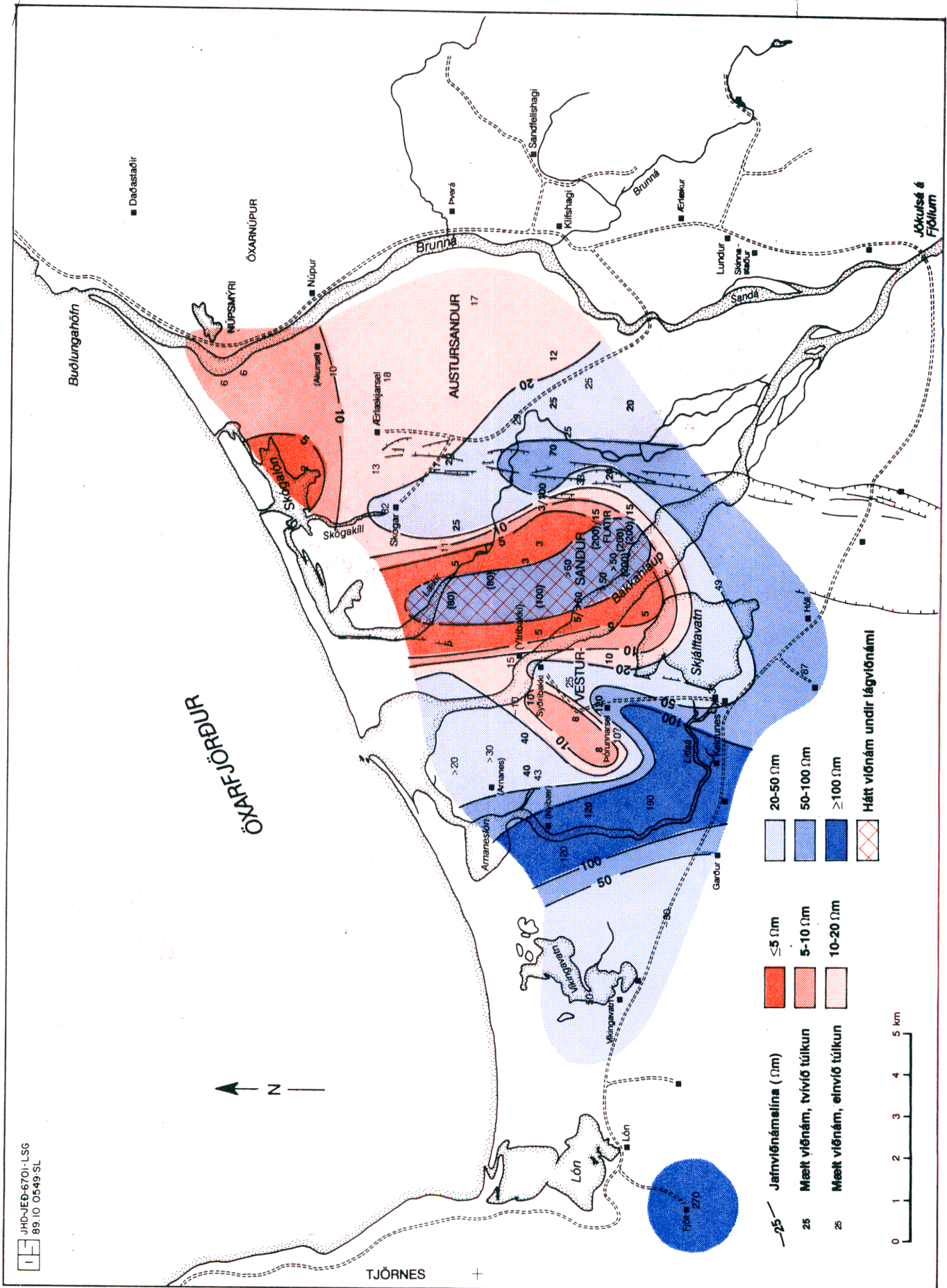
10. mynd: Viðnámssnið C-C'.



11. mynd: Eðlisviðnám í Öxarfirði og Kelduhverfi á 250 m dýpi undir sjávarmáli.



12. mynd: Eðlisviðnám í Öxarfirði og Kelduhverfi á 500 m dýpi undir sjávarmáli.



13. mynd: Eðlisviðnám í Óxarfirði og Kelduhverfi á 750 m dýpi undir sjávarmáli.

5. EFNAFRÆÐI HEITA VATNSINS

5.1 Inngangur

Í þessum kafla er gerð grein fyrir niðurstöðum athugana á efnasamsetningu heits vatns úr laugum, hverum og borholum í Öxarfirði og Kelduhverfi. Aðaltilgangur þessara athugana var að áætla hita í jarðhitakerfum, en jafnframt gefur efnainnihald heita vatnsins vísbendingar um uppruna þess og tengsl hinna ýmsu jarðhitastaða, auk þess sem leggja má nokkurt mat á nýtingareiginleika vatnsins.

Á Orkustofnun eru til allmargar efnagreiningar á jarðhitavatni úr Öxarfirði og Kelduhverfi frá árunum 1972 til 1977. Margar af þessum efnagreiningum eru ófullkomnar að því leyti, að einungis voru greind einstaka efni í sýnunum. Ennfremur hafa efnagreiningaaðferðir þróast verulega á undanförunum árum. Því þótti rétt að safna nýjum sýnum af sem flestum jarðhitastöðum til þess að hafa sambærileg sýni við heildarúttekt á jarðhitunum. Sýnin voru flest tekin í ágústmánuði 1984, en nokkrum var bætt við sumarið 1985. Jafnframt hafa bæst við ýmsar upplýsingar úr borholum ÆR-1, ÆR-3 og ÆR-4 við Skógalón. Niðurstöður þær, sem hér verður fjallað um, byggja aðallega á sýnum frá árinu 1984 og síðar, en þó hefur í sumum tilfellum verið tekið tillit til eldri greininga. Í umfjölluninni verður aðaláhersla lögð á jarðhitann innan Kröflusprungubeltis, enda er hiti hæstur þar og jarðhiti virkastur.

Í tveimur nýlegum skýrslum Orkustofnunar "Skilyrði til fiskeldis í Öxarfirði" (Lúðvík S. Georgsson o.fl. 1989) og "Könnun á uppruna gass í Öxarfirði" (Magnús Ólafsson o.fl. 1992) hefur verið fjallað nokkuð um hluta þeirra gagna sem hér liggja til grundvallar.

5.2 Sýnataka og efnagreiningar

Sýni hafa verið tekin á nær öllum þekktum jarðhitastöðum í Öxarfirði og Kelduhverfi og er staðsetning þeirra sýnd á 14. mynd. Sýnin voru tekin á hefðbundinn hátt (Magnús Ólafsson 1987). Vatn sem var heitara en 30°C var kælt við sýnatöku og sýrustig (pH), karbónat ($\text{CO}_2(\text{t})$) og brennisteinsvetni (H_2S) voru mæld samdægurs eða næsta dag. Önnur efni voru greind á efnarannsóknastofu Orkustofnunar, nema samsætur vetnis og súrefnis sem voru mældar á Raunvísindastofnun Háskólans. Niðurstöður efnagreininga eru sýndar í töflu 2.

5.3 Efnainnihald heita vatnsins

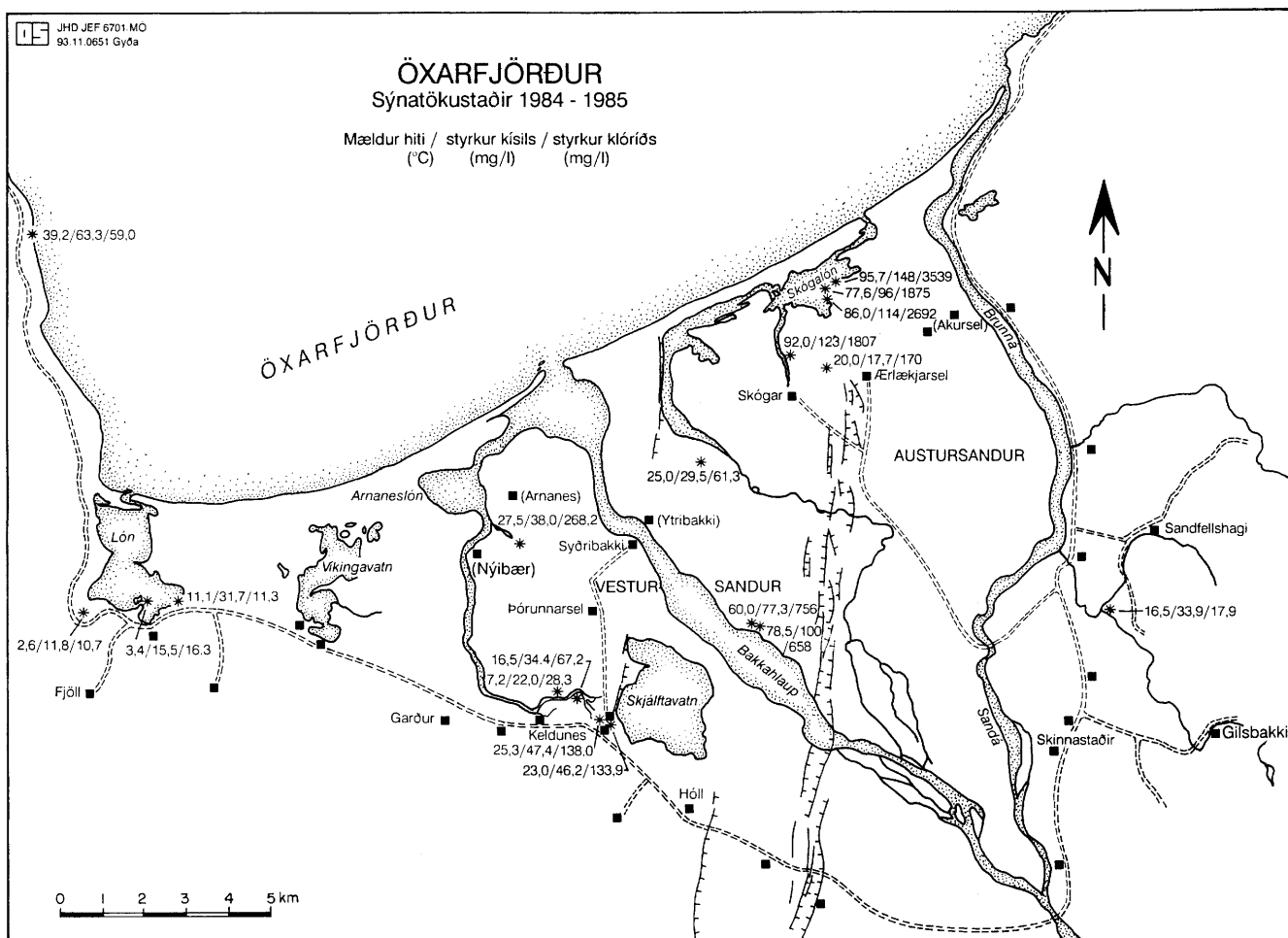
Eins og fram kemur í kafla 3 er jarðhiti dreifður víða um láglandið fyrir botni Öxarfjarðar, allt frá sýslumörkum í vestri (Engidalsgjá á Tjörnesi) austur að Brunnárbökkum í landi Klifshaga.

Efnasamsetning þeirra sýna, sem hafa verið tekin í Öxarfirði frá árinu 1984 í tengslum við jarðhitarannsóknir þar, er sýnd í töflu 2. Þar kemur fram, að styrkur uppleystra efna í vatninu er mjög mismunandi, t.d. spannar heildarmagn uppleystra efna bilið 100 til 6500 mg/l. Sýnatökustaðir eru sýndir á 14. mynd, ásamt mældum hita og styrk kísils og klóríðs. Þar kemur glöggt fram að hiti, styrkur kísils og annarra uppleystra efna er hæstur í vatni á jarðhitastöðum innan Kröflusprungubeltis, við Skógalón, Skógakvíl og Bakkahlaup. Styrkur klóríðs er mestur í heitu vatni frá Skógalóni og Skógakvíl, en þaðan minnkar hann með aukinni fjarlægð frá sjó.

Tafla 2: Efnasamsetning vatns í Öxarfirði og Kelduhverfi.

Staður	Númer	Hiti °C	pH/°C	SiO ₂ mg/l	B mg/l	Al mg/l	Na mg/l	K mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Fe mg/l	CO ₂ mg/l	SO ₄ mg/l	H ₂ S mg/l	Cl mg/l	F mg/l	Br mg/l	I mg/l	TDS mg/l	SD ‰	δ ¹⁸ O ‰
Skógalón	84-0150	95,7	7,3/16	148,0	1,77	0,03	1818,0	98,2	400,2	7,14	<0,1	30,3	232,1	0,05	3539	0,41	12,1	0,37	6401	-	-9,28
Skógalón	84-0151	77,6	8,8/16	96,3	0,97	0,05	1024,3	52,5	161,1	0,35	-	23,7	116,0	0,10	1875	0,91	6,4	0,13	3391	-88,1	-9,74
Skógalón	84-0312	86,0	7,5/15	114,3	1,44	0,05	1457,8	78,7	240,8	4,47	-	36,1	176,3	0,05	2692	0,43	9,4	0,24	4948	-92,2	-10,22
Bakki	84-0153	25,0	8,4/19	29,5	0,10	0,07	75,7	4,1	2,2	0,47	-	52,5	21,7	<0,05	61,3	1,85	0,2	<0,001	238	-76,0	-11,54
Skógakflí	84-0154	92,0	8,7/19	122,7	1,40	0,09	949,4	54,5	186,0	0,07	-	30,6	85,9	0,05	1807	0,33	6,2	0,12	3326	-88,5	-9,59
Græniblettur	84-0155	20,0	7,1/19	17,7	-	0,10	148,9	6,4	4,9	1,58	-	85,1	18,3	<0,05	170,3	1,65	0,6	<0,001	426	-68,7	-9,18
Klifshagi	84-0156	16,5	9,1/19	33,9	<0,1	0,03	34,6	1,3	3,6	0,25	-	35,7	6,5	<0,05	17,9	0,40	0,1	-	122	-75,3	-11,18
Bakkahlaup	84-0157	60,0	8,2/16	77,3	0,45	0,06	453,9	27,5	43,9	1,24	-	37,1	38,3	<0,05	755,5	0,41	2,6	0,05	1445	-88,2	-11,70
Bakkahlaup	84-0158	78,5	8,4/16	100,3	0,53	0,29	427,0	41,1	17,0	1,47	<0,2	30,8	46,1	<0,05	657,9	0,59	2,2	0,02	1283	-90,0	-11,98
Brunnar	84-0159	25,3	7,5/13	47,4	0,14	0,01	92,0	9,7	14,4	3,42	-	47,5	21,1	<0,05	138,0	0,22	0,5	<0,001	365	-78,7	-11,38
Ararnes	84-0160	27,5	9,1/14	38,0	0,13	0,04	197,2	14,5	6,2	2,48	-	27,3	46,9	<0,05	268,2	1,64	0,9	0,03	588	-82,7	-11,68
Keldunes	84-0161	23,0	7,1/14	46,2	0,13	0,02	90,6	8,8	13,0	3,26	-	50,2	19,5	<0,05	133,9	0,25	0,5	<0,001	347	-79,5	-11,35
Litlaá	84-0162	16,5	8,0/14	34,4	<0,1	0,01	51,5	5,6	9,7	4,00	-	48,5	15,7	<0,05	67,2	0,22	0,2	-	207	-78,2	-11,54
Litlaá	84-0163	7,2	8,0/14	28,0	<0,1	0,02	24,0	2,6	7,9	3,51	-	37,6	9,6	<0,05	28,3	0,13	0,1	-	121	-77,8	-11,38
Engidalsgjá	84-0164	39,2	7,7/14	63,3	0,28	0,01	94,3	5,3	7,0	1,04	-	35,9	24,6	<0,05	59,0	0,09	0,2	-	356	-76,1	-10,73
Lyngás	84-0165	4,5	8,6/22	22,6	<0,1	0,05	12,0	1,1	4,9	3,09	<0,1	29,9	3,3	<0,05	7,9	0,12	0,3	-	52	-76,9	-11,35
Klifshagi	84-0166	4,3	8,8/22	18,5	<0,1	0,01	12,1	0,8	6,7	1,31	-	26,2	2,6	<0,05	8,7	0,06	0,03	-	70	-70,9	-10,63
Borhola ÆR-1	87-0119	98,0	9,5/15	139,0	-	-	1249,8	77,3	259,5	0,18	<0,02	12,4	138,3	<0,05	2460	0,65	-	-	4630	-97,67	-9,99
Borhola ÆR-3	88-0149	90,0	8,1/16	125,6	-	-	870,0	48,3	159,9	0,46	<0,02	21,7	93,4	0,05	1560	0,21	5,4	-	2982	-98,8	-10,84
Borhola ÆR-3	89-0087	96,0	7,9/24	129,1	1,00	0,023	833,0	43,5	153,7	0,42	<0,02	24,3	96,6	0,07	1534	0,27	5,3	-	2709	-100,4	-10,93
Borhola ÆR-4	91-0189	128,5	6,9/22	199	1,34	-	1151	70	187	2,93	-	21,6	151	<0,03	2070	0,11	7,7	-	4007	-113,2	-11,09
Borhola ÆR-4	91-0209	132	8,6/22	214	1,36	0,045	1222	67	185	0,63	0,009	5,1	150	<0,03	2110	0,12	8,23	-	4085	-114,1	-11,05
Borhola N-1	88-0147	34,2	7,8/15	36,5	-	-	1792,0	86,4	151,6	60,1	0,1	58,6	398,0	<0,03	2985	0,36	10,3	-	4430	-	-9,77
Jökulsá	87-9165	2,9	7,8/14	16,8	-	-	19,8	1,4	6,1	3,62	<0,02	42,1	7,9	<0,05	6,9	0,16	-	-	104	-98,65	-13,90
Sjór	87-0219	4,0	8,1/22	1,6	-	-	10113	395,9	378,3	1162	<0,02	105,1	2545	<0,03	18288	0,70	-	-	36110	-7,1	-0,79

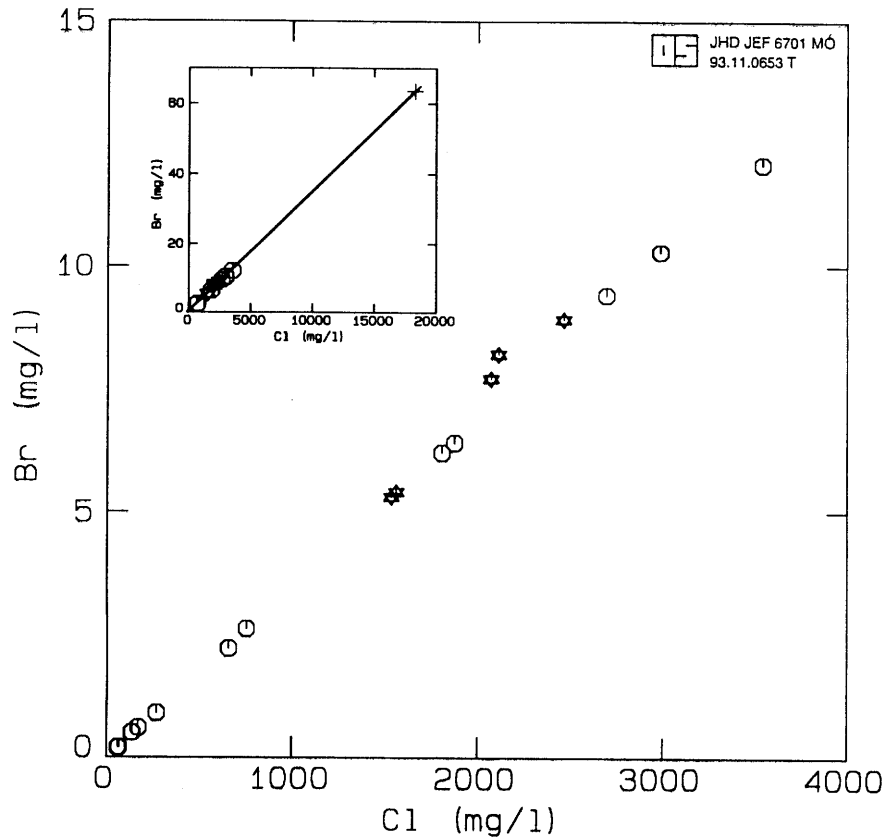
--: Ekki efnagreint



14. mynd: Sýnatökustaðir í Öxarfirði og Kelduhverfi, sýndur er mældur hiti og styrkur kísils og klóríðs.

Hin ýmsu efni, sem koma fyrir í vatni, hegða sér á mismunandi hátt gagnvart efnaskiptum sem eiga sér stað milli heits vatns og berggrunns sem vatnið steymir um (Stefán Arnórsson o.fl. 1982; 1983a). Sum þeirra eru virk, þ.e. þau taka þátt í slíkum efnaskiptum, en önnur eru óvirk og eru stundum nefnd utangarðsefni. Utangarðsefnin taka ekki þátt í efnajafnvægjum við ummyndunarsteindir, en geta borist inn í jarðhitakerfið úr sjó, kvikuinnskotum eða við útskolun úr bergi. Slík utangarðsefni eru t.d. klóríð og brómíð. Styrkur klóríðs og brómíðs í bergi er mjög lágur, en aftur á móti mjög hár í sjó og sjávarseti, þannig að línuleg fylgni milli styrks brómíðs og klóríðs eins og kemur fram á 15. mynd, gefur sterklega til kynna áhrif sjávar á jarðhitavökvann.

Ýmislegt í jarðfræðilegri byggingu svæðisins bendir til að sjór geti átt nokkuð greiðan aðgang inn í jarðhitakerfið undir söndunum fyrir botni Öxarfjarðar. Efnasamsetning vatnsins endurspeglar áhrif sjávar á jarðhitavökvann, og kemur það m.a. fram í háum styrk klóríðs í vatninu. Klóríðstyrkur er hæstur í vatni næst ströndinni, við Skógalón og Skógakfl, en minnkar eftir því sem fjær dregur frá sjó. Hiti er reyndar einnig hæstur á þessum jarðhitastöðum, en þar sem styrkur klóríðs í jarðhitavatni stjórnast ekki af hita þess, líkt og gerist með flest önnur aðal efni vatnsins þá liggur beint við að álykta að þessi há klóríðstyrkur stafi af áhrifum sjávar. Er

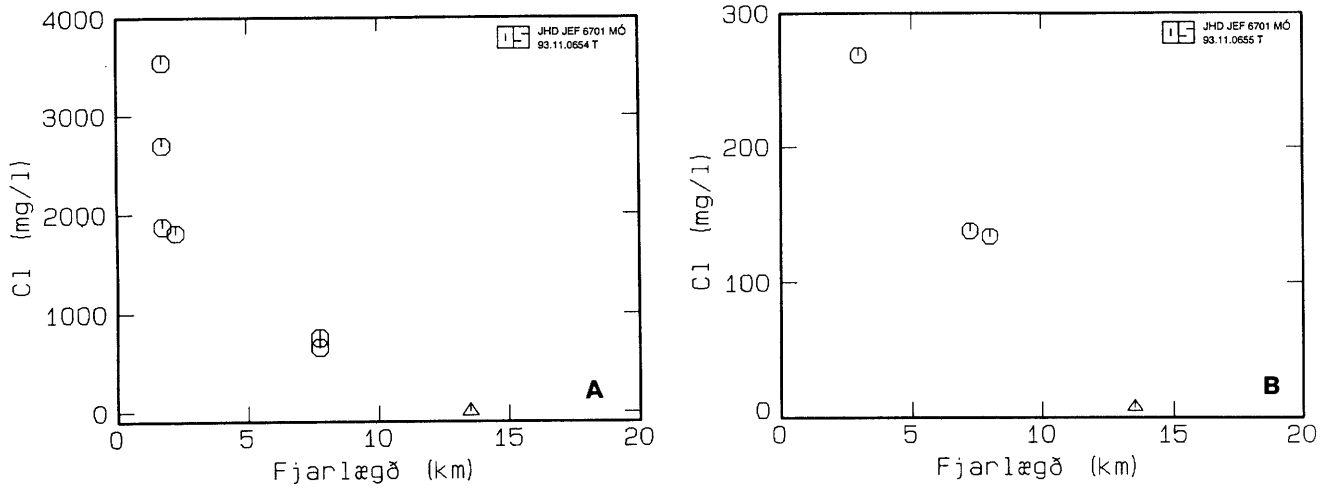


15. mynd: Styrkur klóríðs og brómíðs, innfellda myndin sýnir hvernig sýnin raða sér á tengilínu ferskvatns og sjávar.

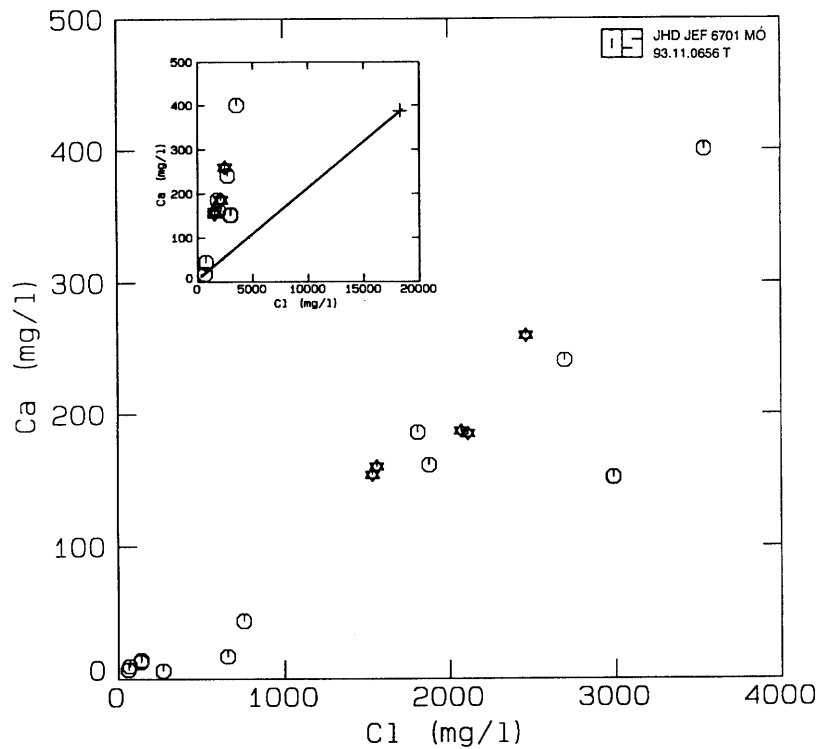
Þá látið liggja milli hluta hvort um beina fblöndun er að ræða eða einskonar útskolun úr undirliggjandi setlögum. Í kafla 5.5 hér á eftir verður reynt að sýna fram á með mælingum á samsætum súrefnis og vetnis, að selta jarðhitavökvans stafi af útskolun úr undirliggjandi berggrunni og setlögum, en ekki af beinni blöndun fersks jarðhitavatns við sjó. Á 16. mynd er sýndur styrkur klóríðs á mótí fjarlægð frá sjó fyrir nokkra jarðhitastaði, annars vegar innan Kröflusprungubeltis (16a) og hins vegar á vesturjaðri þess (16b). Lengst frá sjó er sýndur klóríðstyrkur í köldu grunnvatni við Lyngás í Kelduhverfi.

Eins og að framan sagði, þá eru önnur efni virk og taka þátt í efnaskiptum, sem eiga sér stað milli vatns og bergs. Á 17. mynd er sýndur styrkur kalsíums á mótí styrk klóríðs í jarðhitavatninu. Þar kemur fram að styrkur kalsíums er miklu hærri en vera ætti, ef um beina sjóblöndun væri að ræða. Þetta bendir til þess að efnaskipti eigi sér stað á milli vatns og berggrunns á þann hátt, að vatnið skolar burt kalsíum úr berginu, en bergið tekur trúlega til sín magnesíum úr vatninu í staðinn.

Í ljós hefur komið, að styrkur klóríðs í sýnum sem hafa verið tekin við Skógalón, fyrst úr hverum og síðar úr borholum, er mjög breytilegur. Þannig hefur styrkur klóríðs mælst hæstur 3539 mg/l úr tæplega 100°C heitum hver, en allmikið lægri í sýnum úr holunum þremur sem hafa verið boraðar á jarðhitasvæðinu. Þó má ætla að þær taki vatn á meira dýpi en laugar og hverir á yfirborði. Þetta bendir til þess að undirliggjandi jarðhitakerfi sé verulega lagskipt, eins og reyndar hefur komið í ljós, t.d. í hitamælingum í holunum (3. og 6. mynd).



16. mynd: Styrkur klóríðs á móti fjarlægð frá sjó; a. jarðhitastaðir innan Kröflusprungubeltis; b. jarðhitastaðir á vesturjaðri þess.



17. mynd: Styrkur klóríðs og kalsíums í vatni; innfellda myndin sýnir að sýnin falla ekki á tengilínu ferskvatns og sjávar.

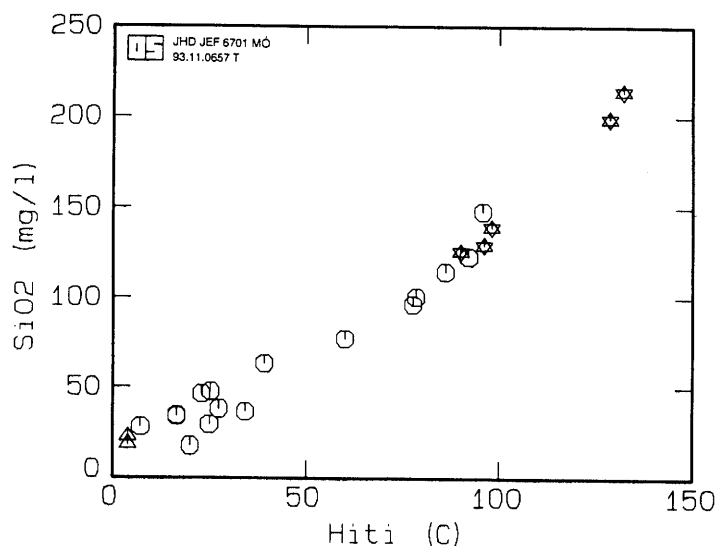
5.4 Hiti í jarðhitakerfinu

Vatn í heitum uppsprettum kemur úr jarðhitageymi neðanjarðar. Heita vatnið stígur til yfirborðs og kólnar, ýmist með leiðni, suðu, blöndun eða samspili tveggja eða allra þessara þátta. Efnasamsetningu heita vatnsins má nota til að segja til um djúphita í jarðhitakerfinu og eru notaðir við það ýmsir efnahitamælur og blöndunarílkön.

Styrkur allra aðalefna í jarðhitavatni, nema klóríðs, stjórnast af hita vatnsins, og má því áætla djúphita í jarðhitakerfum út frá styrk efna í vatni sem safnað er á yfirborði jarðar. Þá er gert ráð fyrir, að vatnið kólni með leiðnikælingu á leið sinni til yfirborðs. Blöndun heits vatns við kalt vatn eða sjó getur haft mikil áhrif á útreiknaðan efnahita.

Efnahitamælum, sem byggja á styrk uppleystra efna í heitu vatni má skipta í tvo flokka, annars vegar kísilhitamæla og hins vegar katjónahitamæla (Stefán Arnórsson o.fl. 1983b). Kísilhitamælar byggja á því, að uppleysanleiki kísilsteinda eykst með vaxandi hita og stjórnast styrkur kísils í jarðhitavatni annars vegar af uppleysanleika kalsedóns (lágthiti) og hins vegar af uppleysanleika kvars (háthiti). Kísilhitamælar hafa verið notaðir með góðum árangri á Íslandi og er algengt að kvarshitamælirinn sé notaður á vatn þar sem kalsedónhiti er hærri en 160°C. Katjóna hitamælar byggja á jónaskiptum sem eiga sér stað milli vatns og bergs, og eru háð hita. Slíkur efnahitamælir er t.d. Na-K hitamælirinn, sem byggir á hlutfalli natríums og kalís í vatninu.

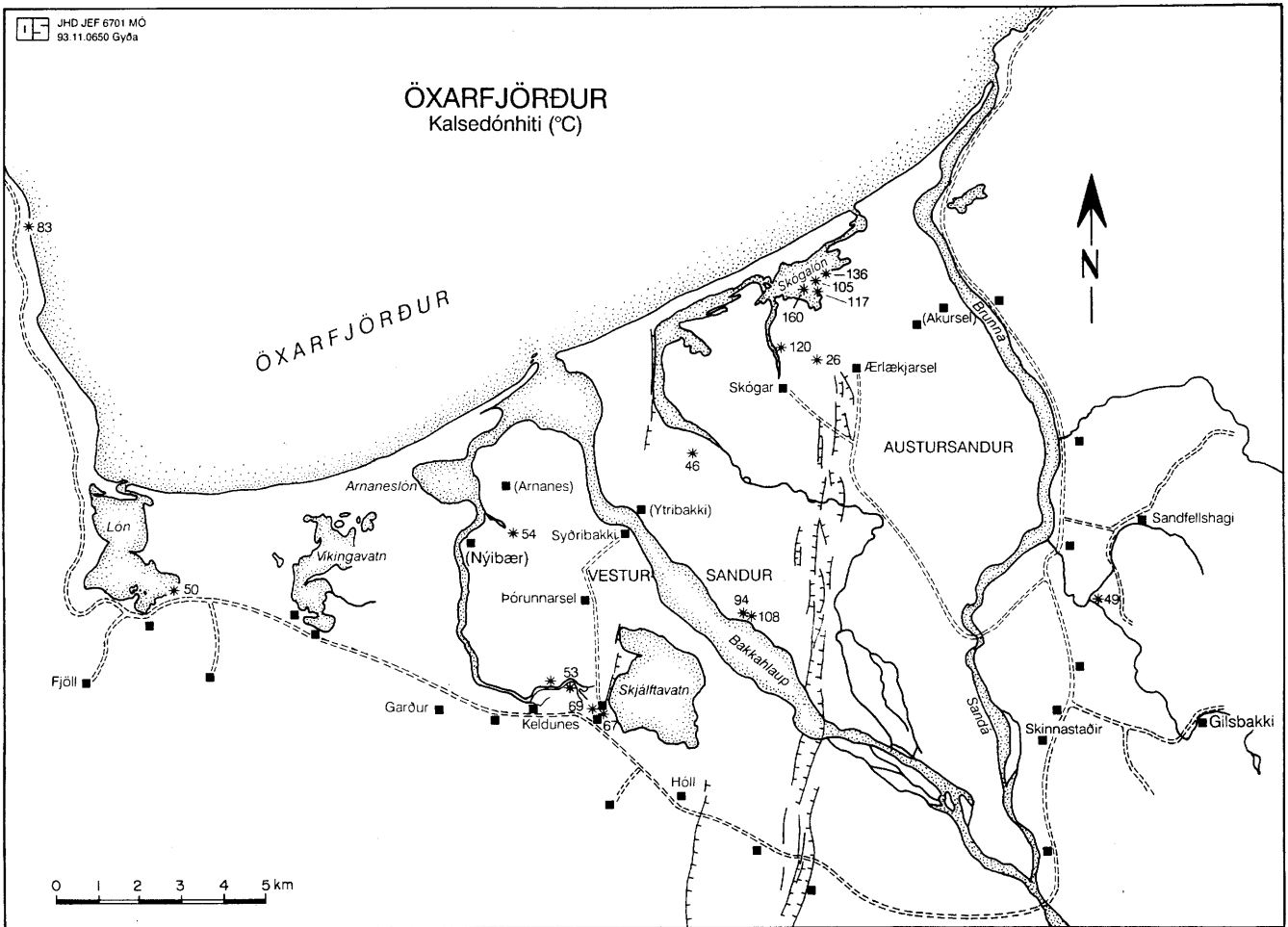
Á 18. mynd sést glögg að mjög góð fylgni er milli styrks kísils og mælds hita fyrir öll sýni af jarðhitastöðum fyrir botni Öxarfjarðar og sést þar einnig vel hvernig styrkur kísils vex með hækkandi hita vatnsins. Vegna seltumengunar jarðhitavatsins reyndist Na-K efnahitamælirinn ónothæfur.



18. mynd: Styrkur kísils og mældur hiti í jarðhitavatni í Öxarfirði og Kelduhverfi.

Til að sýna útreiknaðan efnahita á einstökum jarðhitastöðum, hefur kalsedónhiti verið færður inn á kort af sveitunum fyrir botni Öxarfjarðar (19. mynd). Kalsedónhiti er hæstur við Skógalón, Skógakfl og Bakkahlaup og reiknast hann á bilinu 94 til 136°C í laugum og hverum, en 115 til 160°C í vatni úr holum 1, 3 og 4 við Skógalón. Við Brunná reiknast kísilhiti um 50°C, en hefur í eldri efnagreiningum frá sama stað verið nær 30°C. Ekki er ljóst hvað veldur þessum mun, en litlar líkur virðast vera til, að þar megi fá vatn sem er heitara en 40 til 50°C.

Heitt vatn í Brunnunum og við Keldunes hefur kísilhita 65-70°C en í Engidalsgjá er hann um 80°C. Sýni frá Ytri Bakka og Grænabletti voru ekki nothæf til túlkunar á djúphita vatnsins. Á báðum þessum stöðum var um volgt yfirborðsvatn að ræða.

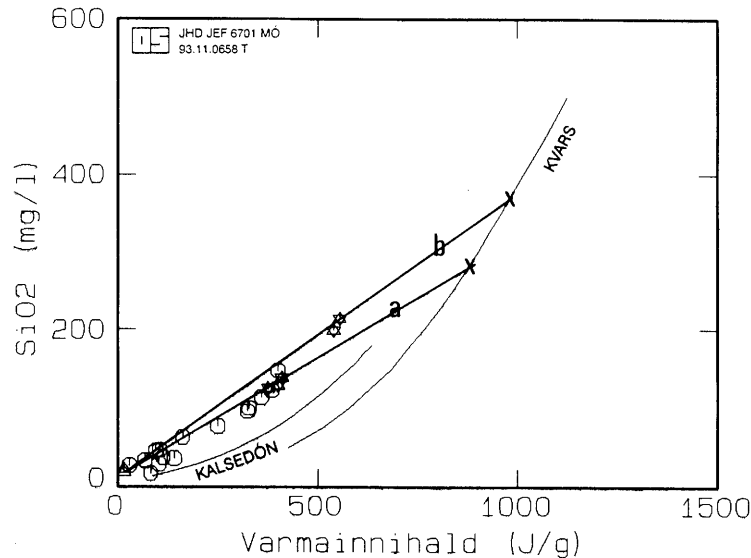


19. mynd: Kalsedónhiti í jarðhitavatni frá Öxarfirði og Kelduhverfi.

Kalt vatn og sjór innihalda lítið magn af kísli miðað við jarðhitavatn. Blöndun þess við sjó eða kalt vatn veldur lækkun á kísilstyrk og jafnframt á útreiknuðum kísilhita djúpvatns fyrir blöndun. Af framansögðu leiðir, að erfitt hefur reynst að meta hita og efnasamsetningu djúpvatnsins í jarðhitakerfunum fyrir botni Öxarfjarðar. Til þess að reyna að slá á þetta einhverju mati, þá hafa verið gerðir útreikningar, sem byggja á kísil-varmáinnihalds líkani því, sem kennt er við Fournier (Fournier 1977; Fournier og Potter 1982). Líkan þetta byggir á því, að styrkur kísils í köldu vatni og í því blandaða sé þekktur, og má þá reikna út hita jarðhitavatnsins fyrir blöndun. Við þessa útreikninga er gert ráð fyrir, að ekki eigi sér stað nein útfelling kísils eða kólnun með leiðni, eftir að blöndun átti sér stað. Dregið er upp línurit, sem sýnir samband kísilstyrks og varmáinnihalds jarðhitavatns. Ástæðan fyrir því, að hér er notað varmáinnihald vatns en ekki hiti er sú, að við blöndun vatns, sem hefur mismunandi hita, varðveitist samantlagt varmáinnihald þess, en ekki hiti.

Á 20. mynd er sýnt samband kísilstyrks og varmáinnihalds sýna, sem tekin voru í Öxarfirði ásamt ferlum sem sýna uppleysanleika kalsedóns og kvars (Fournier og Potter 1982). Ef dregin er besta lína í gegnum alla punktana (lína a á 20. mynd) kemur í ljós að kísilstyrkur djúpvökva gæti verið um 250 mg/kg og hiti hans um 200°C, ef gert er ráð fyrir að djúpvökvinn sé í jafnvægi við kvars. Ef hins vegar er dregin lína frá köldu vatni og eingöngu stuðst við heitasta sýn-

ið við Skógalón þá er niðurstaða svolstið önnur. Kísilstyrkur djúpvökva reiknast þá um 300 mg/kg og hiti um 220°C. Þegar niðurstöðum greininga úr holu 4 er síðan bætt við (lína b á 20. mynd) þá hækkar áætlaður hiti í jarðhitakerfinu í tæplega 230°C og kísilstyrkur í 360 mg/kg. Rétt er þó að minna á, að hér er um nálgun að ræða, sem byggir m.a. á því að kísilstyrkur jarðhitavökvans við Skógalón stjórnist af uppleysanleika kísilsteindarinnar kvars, en ekki kalsedóns.



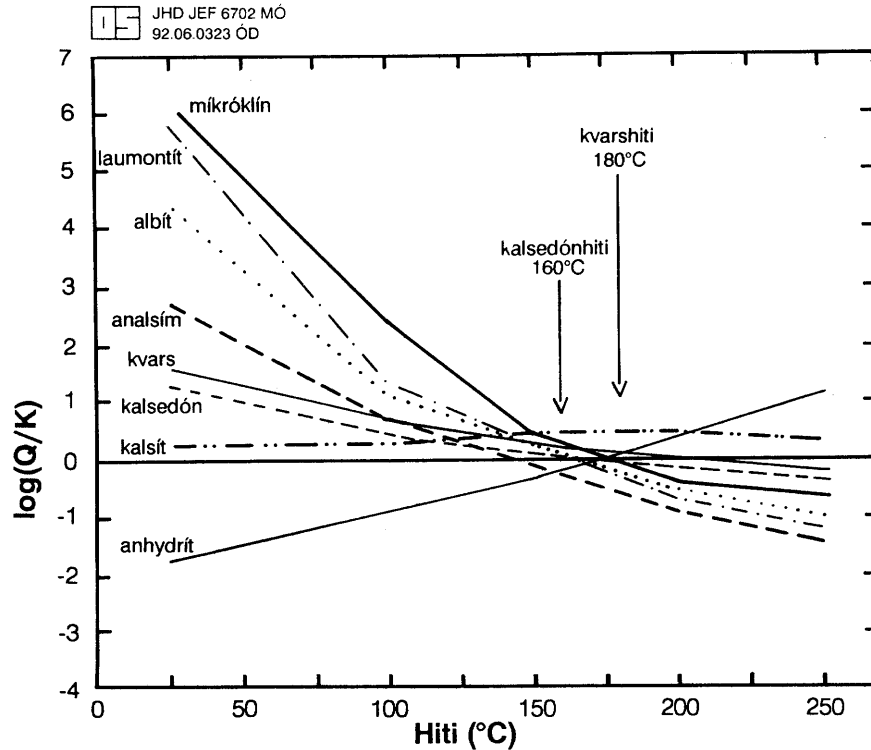
20. mynd: Samband kísils og varmainnihalds í jarðhitavatni (sjá skýringar í texta).

Í skýrslu Orkustofnunar "Könnun á uppruna gass í Öxarfirði" (Magnús Ólafsson o.fl. 1992) var reynt eftir ýmsum leiðum að meta hita í jarðhitakerfinu við Skógalón, aðallega út frá gögnum sem safnað var í tengslun við borun holu ÆR-4. Var þá m.a. litið á jafnvægisferla nokkurra steinda, sem koma fyrir í jarðhitakerfinu, og eru þeir sýndir á 21. mynd. Sýnt hefur verið fram á (Reed 1982; Reed og Spycher 1984; Tole o.fl. 1993) að líklegur jafnvægis-hiti jarðhitavökva sé einmitt þar sem flestir ferlarnir skera hitaásinn, þ.e. við þann hita þar sem $\log(Q/K)=0$. Á 21. mynd kemur fram að flest þau efnajafnvægi sem til greina koma fyrir vatn úr holu ÆR-4 skera hitaásinn á bilinu 160-190°C.

Á undanförunum árum hefur það færst nokkuð í vöxt að nota efnasamsetning jarðhitagass til að meta hita í jarðhitakerfum (t.d. Stefán Arnórsson og Einar Gunnlaugsson 1985). Í tengslum við sýnatöku úr holu ÆR-4 var safnað gasi með tilliti til þess að reyna að meta hita jarðhitakerfisins á þennan hátt. Út frá þeim upplýsingum sem safnað var reyndist unnt að slá ónákvæmu mati á hita í jarðhitakerfinu og reyndist hann vera á bilinu 190-260°C, eftir því hvaða gastegund eða hlutfall gastegunda var lagt til grundvallar.

Nýlega hefur verið bent á nýjan gashitamæli, sem byggir á hlutfallinu metan/etan í jarðhitagasi (Darling og Talbot 1992). Gasið úr holunum við Skógalón er eina jarðhitagasið hér á landi þar sem unnt er að beita þessum gashitamæli og þar gefur hann til kynna að hiti í jarðhitakerfinu geti verið á bilinu 200-220°C.

Þessar vangaveltur um hita í jarðhitakerfinu við Skógalón benda því til þess að hann geti varlega áætlað verið allt að 200°C, sem er um 50°C hærri en hæsti hiti sem mældist í holu



21. mynd: Jafnvægisferlar nokkurra steinda í jarðhitakerfinu við Skógalón.

ÆR-4. Því miður liggja ekki fyrir eins ítarlegar upplýsingar um hitaástand við Bakkahlaup, en margt bendir til að þar sé miðja háhitavirkni í Öxarfirði. Þar hefur einungis verið boruð 80 m djúp hola (BA-1) og úr henni hefur ekki fengist marktækt sýni til að meta efnahita. Þær upplýsingar um efnahita í jarðhitakerfinu við Bakkahlaup, sem hér er byggt á, fengust úr sýnum sem tekin voru úr grunnri holu (3-4 m) og gryfju sem grafin var í jarðsigið. Hæstur hiti á yfirborði mældist rúmlega 81°C, en kalsedónhiti reiknast hæstur tæplega 110°C. Hola BA-1 var öll boruð í mjög ummyndaðan og túffrískan sand, og var ummyndunin firna mikil og er ólíklegt að nokkuð annað en háhitavirkni hafi getað valdið henni (Lúðvík S Georgsson o.fl. 1989).

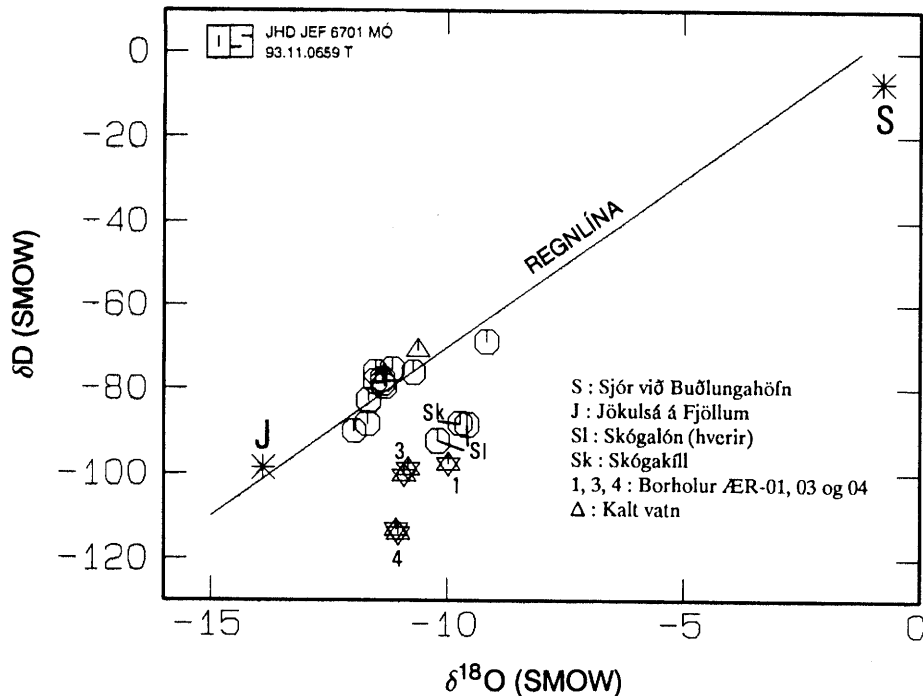
5.5 Uppruni heita vatnsins

Mest allt jarðhitavatn á Íslandi hefur upprunalega fallið sem regn á yfirborði jarðar og sigið niður í berggrunninn (Bragi Árnason 1976). Þar hitnar vatnið með því að taka til sín varma og leitar loks til yfirborðs um sprungur og ganga, oft eftir að hafa runnið langar leiðir neðanjarðar, eða í staðbundnum hringrásarkerfum (Axel Björnsson o.fl. 1990). Í Öxarfirði eru jarðhitakerfin þó talsvert flóknari, þar eð sjór eða sjávarsetlög hafa veruleg áhrif á efnasamsetningu jarðhitavatnsins. Til þess að rekja uppruna jarðhitavatns, hefur einkum verið stuðst við mælingar á hlutföllum samsæta (ísótópa) í vatni.

Algengustu samsætur súrefnis og vetnis í náttúrunni eru súrefni-16 (¹⁶O) og vetni-1 (¹H). Í öllu vatni er þó til staðar snefilmagn af öðrum samsætum, mest af súrefni-18 (¹⁸O) og tvívetni (D). Þrátt fyrir að erfitt sé að mæla styrk hversrar samsætu, þá er tiltölulega auðvelt að mæla hlutföll þeirra. Mæld hlutföll samsætanna í sýninu eru borin saman við staðalsjó (SMOW) og notuð mælieiningin ‰. Í úrkomu eru slík gildi yfirleitt neikvæð, en það fer eftir breiddargráðu, fjarlægð og hæð frá sjó hversu langt þau víkja frá sjávargildum.

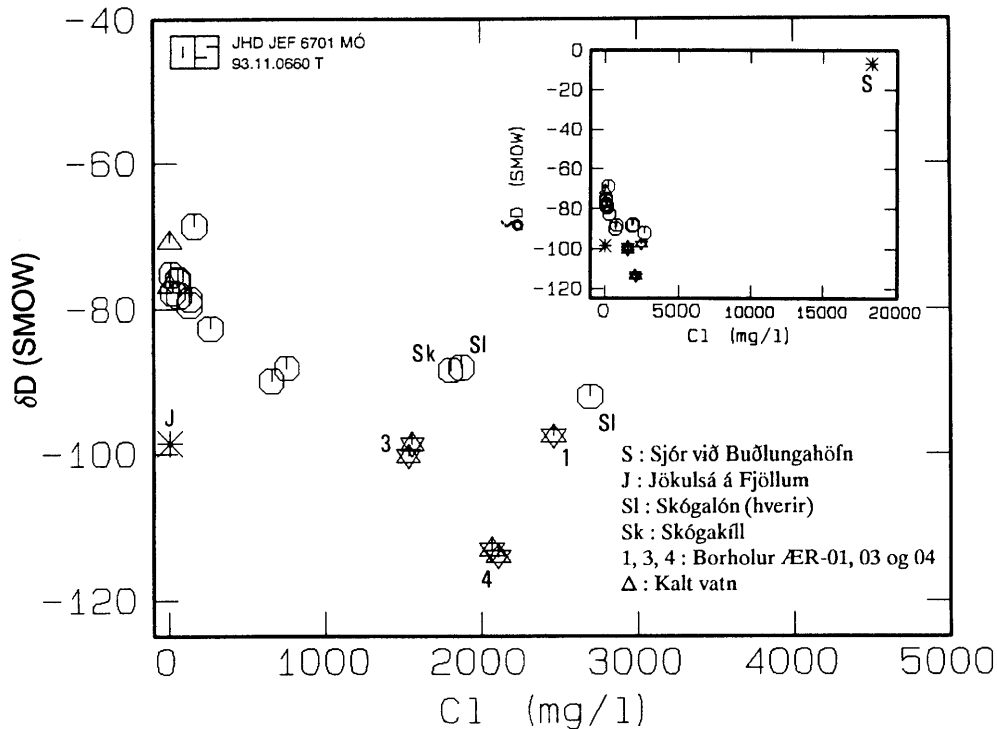
Rennslisleiðir grunnvatns og jarðhitavatns á Íslandi hafa verið kortlagðar á þennan hátt (Bragi Árnason 1976). Í stórum dráttum má segja, að grunnvatnsrennslíð sé frá miðbiki landsins í átt til sjávar. Þannig bentu mælingar Braga til þess, að lindavatnið við Lón, Grásfðu, Skúlagarð og Lindarbrekku ætti uppruna sinn á heiðunum sunnan við Kelduhverfi.

Niðurstöður mælinga á samsætum vetnis (δD) og súrefnis ($\delta^{18}O$) eru sýndar í töflu 2 og á 22. mynd. Þar er sýnt á hefðbundinn hátt samband þessara tveggja samsæta og í ljós kemur að flest sýnin falla á eða nærri svokallaðri regnlínu ($\delta D = 8\delta^{18}O + 10$). Nokkur sýni skera sig þó verulega úr, en það eru einmitt sýnin frá heitustu jarðhitastöðunum við Skógalón og Skógakfl, auk sýna úr holum 1, 3 og 4 við Skógalón. Öll sýna þau talsverða aukningu í $\delta^{18}O$ miðað við δD (oxygen shift), en slíkt er algengt um vökva í háhitakerfum (Ellis og Mahon 1977; Bragi Árnason 1976), en síður í lághitakerfum. Þetta eru jafnframt söltustu jarðhitasýnin og þau bera engin merki þess að selta þeirra stafi af beinni blöndun við sjó. Ef svo væri þá ættu þau að hafa samsætuhlutföll nærri regnlínunni í átt að sjó (22. mynd). Hér má jafnframt geta þess, að vatnssýni úr holu ÆR-4 hafa lægra δD gildi (eru léttari) en þekkist í úrkomu hér á landi í dag. Aftur á móti finnast svo lág gildi í fornu vatni, t.d. frá kuldaskiðum ísalda.



22. mynd: Hlutföll tvívetnis og súrefnis-18 í vatni og sjó í Öxarfirði og Kelduhverfi.

Til að undirstrika enn frekar að selta jarðhitavatnsins stafi ekki af beinni blöndun við nútíma sjó, þá sýnir 23. mynd samband klóríðs og δD . Þar kemur fram neikvæð fylgni milli þessarar tveggja þátta, sér í lagi milli sýna úr lindum og laugum, annarra en þeirra við Skógalón og Skógakfl, og sýna úr holum ÆR-3 og ÆR-4. Hugsanleg skýring á þessari fylgni gæti verið sú, að vatnið nú hafi að geyma einhvern hluta af fornu vatni (t.d. frá ísöld) úr sjávarsetlögum sem undir liggja. Slíkt vatn myndi hafa lægra δD gildi en grunnvatn og úrkoma í dag vegna kaldara veðurfars. Sambærilegar hugmyndir hafa verið settar fram varðandi uppruna ísalts jarðhitavatns á Suðurlandi (Stefán Arnórsson o.fl. 1993).



23. mynd: Hlutfall tvívetnis og styrkur klóríðs í vatni og sjó.

5.6 Gas í holum við Skógalón

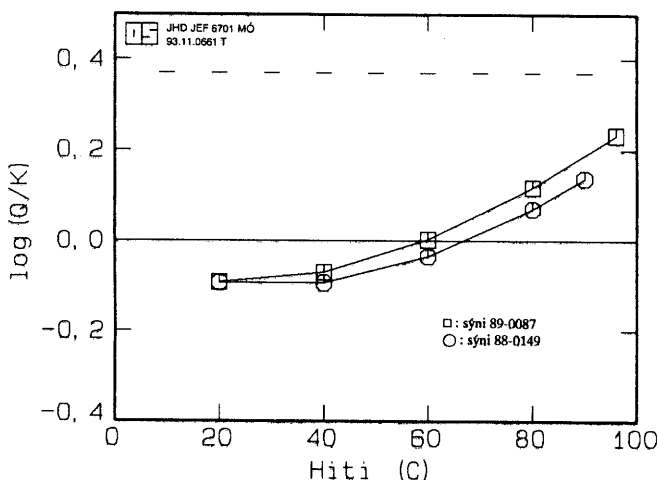
Eftir að borun holu ÆR-1 við Skógalón lauk kom fljótlega í ljós að holan safnaði á sig gasi þegar henni var lokað. Efnagreining á gasi þessu leiddi í ljós að það innihélt lítilsháttar magn af kolvetnum, öðrum en metani, en slíkt gas hafði ekki áður fundist með jarðhitagasi hérlendis. Sama var upp á teningnum eftir að hola ÆR-3 var boruð (Magnús Ólafsson og Halldór Ármannsson 1988) og vakti gasfundur þessi allnokkra athygli. Nánari greiningar á gasinu á rannsóknastofu í Bretlandi staðfestu greiningar Orkustofnunar og frekari túlkun á efnasamsetningu þess benti eindregið til að það væri myndað vegna niðurbrots lífræns efnis. Á fjárlögum ársins 1991 fékk Orkustofnun sérstaka fjárveitingu til að kanna uppruna þessa lífræna gass í Öxarfirði og hefur niðurstöðum rannsóknarinnar verið skilað í tveimur skýrslum (Magnús Ólafsson o.fl. 1992; Magnús Ólafsson o.fl. 1993) og er því ekki ástæða til að fjalla frekar um þær á þessum vettvangi.

5.7 Vinnslueiginleikar heits vatns við Skógalón

Á undanförunum árum hefur talsvert verið fjallað um það að virkja holu ÆR-3 fyrir hitaveitu á Kópaskeri og víðar í Öxarfjarðarhreppi. Hér verður því stuttlega dregið á vinnslueiginleika vatns úr holunni.

Eins og komið hefur fram þá er heita vatnið við Skógalón nokkuð salt, og of salt til að nota megi það til beinnar upphitunar eða annarar venjulegrar heitavatsneyslu. Aftur á móti virðist ekkert því til fyrirstöðu að nýta vatnið til óbeinnar upphitunar með varmaskiptum. Útfellingahætta úr vatninu er ekki umtalsverð og hefur í því sambandi verið litið á kalkmettun vatnsins

við mismunandi hita (24. mynd) fyrir tvö sýni úr holunni. Þar kemur fram að vatnið er yfirmettað með tilliti til kalks ofan við 80°C, en við lægri hita er það undirmettað. Brotna línan á 24. mynd er við $\log(Q/K)=0,37$, en reynslan hér á landi hefur sýnt að óveruleg hættu er á kalkútfellingum fyrr en yfirmettun fer yfir þessa línu (Bai Liping 1991). Reyndar ber þess að gæta að vegna seltu vatnsins úr holu ÆR-3, þá er meiri hættu á útfellingum úr því en öðru efna-snaudara vatni. Jafnframt þarf að gæta vel að því, að súrefni komist ekki í vatnið, því svona salt vatn verður afskaplega tærandi ef það inniheldur þó ekki sé nema örlítið súrefni. Til sam-anburðar má geta þess, að Hitaveita Seltjarnarness nýtir álka salt vatn til upphitunar, og þar er gerð krafa um að vatnið sé notað á varmaskipta en ekki til beinnar upphitunar.



24. mynd: Kalkmettun heita vatnsins úr holu ÆR-3 við Skógalón; brotna línan sýnir $\log(Q/K) = 0,37$.

5.8 Samandregnar niðurstöður

Jarðhitinn fyrir botni Öxarfjarðar er mestur innan virka gosbeltisins í Kröflusprungubeltinu. Jarðhitavatnið er víða ísalt og er selta þess talin stafa af útskolun úr fornum sjávarsetlögum. Sjávaráhrifin endurspeglast í efnasamsetningu heita vatnsins á þann hátt að selta þess er mest út við ströndina, en minnkar eftir því sem fjær dregur frá sjó.

Vatn frá heitustu jarðhitastöðunum við Skógalón, Skógakl og Bakkahlaup virðist vera í jafnvægi við berggrunninn sem það streymir um, en annað vatn ber einkenni blöndunar við kalt grunnvatn. Efnahiti reiknast hæstur um 135°C í hverum og 160°C í borholum við Skógalón, en reikningar grundvallaðir á blöndunarlíkani benda til að djúphiti jarðhitavökvans geti verið talsvert hærri, allt að 220°C. Niðurstöður gashitamæla benda einnig til hita yfir 200°C á þessum slóðum.

Heitt vatn úr holu ÆR-3 við Skógalón virðist vera ágætlega nýtanlegt til upphitunar, sé það notað á varmaskipta. Vatnið er ekki hæft til beinnar upphituna vegna mikils magns af uppleyst-um efnum og hárrar seltu.

6. BYLGJUBROTSMÆLINGAR OG ÞYNGDARMÆLINGAR

6.1 Almennt um bylgjubrotsmælingar

Bylgjubrotsmælingar eru önnur af tveimur meginaðferðum jarðsveiflumælinga (seismiskra mælinga) sem notaðar eru við könnun á jarðlögum. Hin aðferðin er endurkastmælingar.

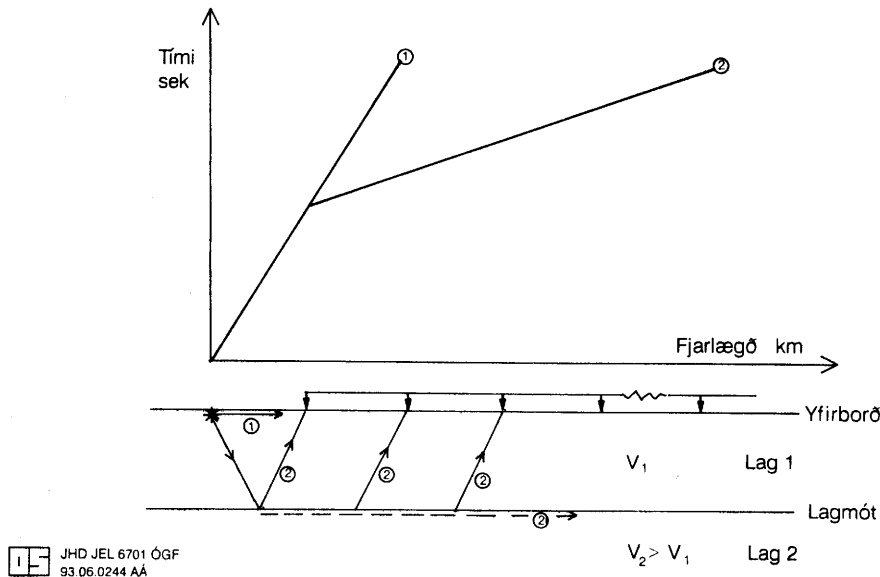
Endurkastmælingum svipar mjög til bergmálsdýptarmælinga á sjó (25. mynd). Búið er til hljóðmerki með sprengingu eða loftbyssu og mæld endurköst þeirra frá mismunandi lagmótum í jörðunni. Á landi er oft erfitt að koma við sprengingum með nógu stuttu millibili til að fá fullnægjandi gögn. Þá er algengt að notast við sérbúna trukka (vibratora) sem senda merki niður í jörðina með því að tjakka sig upp á plötu og hrista sig þar. Þar sem lagmót í jörðu eru oft óglögg og flókin verður endurvarpaða merkið flókin blanda af endurköstum frá mismunandi dýpi auk alls kyns margfaldra endurkasta og truflana. Því þarf langa mælikapla með miklum fjölda hljóðnema og viðamikil tæki til skráningar á mæligögnum. Úrvinnsla mælinganna er líka mjög umfangsmikil því greina þarf í sundur endurköst frá mismunandi lagmótum í jörðunni og fjarlægja truflanir. Endurkastmælingar eru langalgengasta aðferðin sem beitt er við olfuleit og rannsóknir á setlögum, en kostnaður við þær er hár.

Bylgjubrotsmælingar notfæra sér lögmálið um ljósbrot í stað endurkasts (26. mynd). Búnar eru til hljóðbylgjur á svipaðan hátt og í endurkastmælingum en á mun færri stöðum en í endurkastmælingum. Vegna þess að hljóðhraði í jarðlögum vex almennt með dýpi veldur hljóðbrot (hliðstætt ljósbroti) því að bylgjurnar snúa aftur til yfirborðs í tiltekinni fjarlægð frá sprengistað. Með því að mæla hversu lengi þessar brotnu bylgjur eru á leiðinni frá sprengistað að mælistað í tiltekinni fjarlægð má reikna út hljóðhraða undirliggjandi jarðlaga. Því lengra bil sem haft er milli hljóðnema og sprengistaðar því dýpra í jörðu hafa hafa þær bylgjur farið sem mælast og því dýpra ofan í jörðu fást upplýsingar um hljóðhraða. Niðurstöður bylgjubrotsmælinga eru þannig eins konar sniðmynd af jarðlögum sem sýnir hljóðhraða þeirra sem fall af dýpi. Af því að hljóðhraði jarðlaga er misjafn eftir gerð þeirra má draga ályktanir um gerð jarðlaga út frá hljóðhraðasniðum bylgjubrotsmælinga. Þannig hafa t.d. setlög almennt lægri hljóðhraða en fast berg.

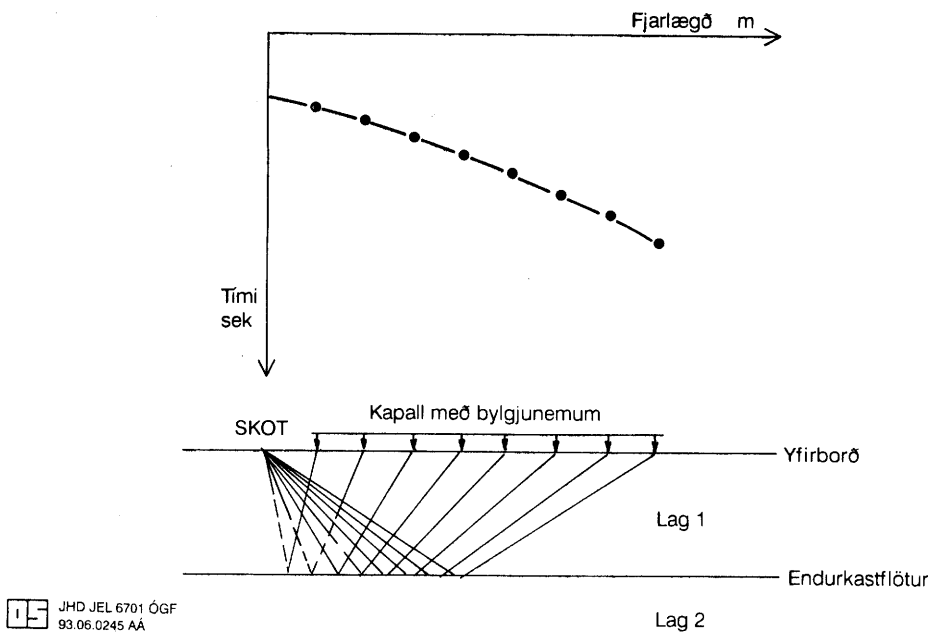
Bylgjubrotsmælingar gefa mun grófari upplýsingar um jarðlög en endurkastmælingar en eru að sama skapi mun ódýrari mæliaðferð. Báðar þessar mæliaðferðir hafa verið reyndar í Öxarfirði. Sumarið 1987 voru gerðar bylgjubrotsmælingar í Öxarfirði. Mælingarnar voru gerðar af hópi vísindamanna frá Háskólanum í Moskvu og Námuháskólanum í Leningrad á vegum Vísindakademíu Sovétríkjanna í samvinnu við Orkustofnun. Hér á eftir er gerð grein fyrir niðurstöðum þessara mælinga. Sumarið 1993 voru síðan gerðar endurkastmælingar í Öxarfirði í samvinnu við Háskólana í Bergen og Glasgow. Unnið verður úr þeim mælingum á árinu 1994 og þeirra því ekki frekar getið í þessari skýrslu.

6.2 Framkvæmd mælinga í Öxarfirði

Staðsetning bylgjubrotsmælinganna er sýnd á 27. mynd. Mælt var eftir tveimur línum, austur-vestur línu sem nær frá Víkingavatni í vestri að Sandfellshaga í austri, og norður-suður línu sem nær frá ströndu Öxarfjarðar vestan Skógalóns í norðri að jarðhitasvæðinu við Bakka-hlaup í suðri. Notaður var 1200 m langur kapall með bylgjunemum á 25 m bili þannig að hvor lína er gerð úr 1175 m löngum línubútum. Sprengt var á nokkrum stöðum á hvorri mæli línu. Bylgjur frá þeim skotpunktum sem merktir eru 1 til 4 voru skráðir eftir endilangri línu 2 en á línu 1 frá þeim sem merktir eru 6 til 10. Að auki var skotið á nokkrum stöðum og einungis



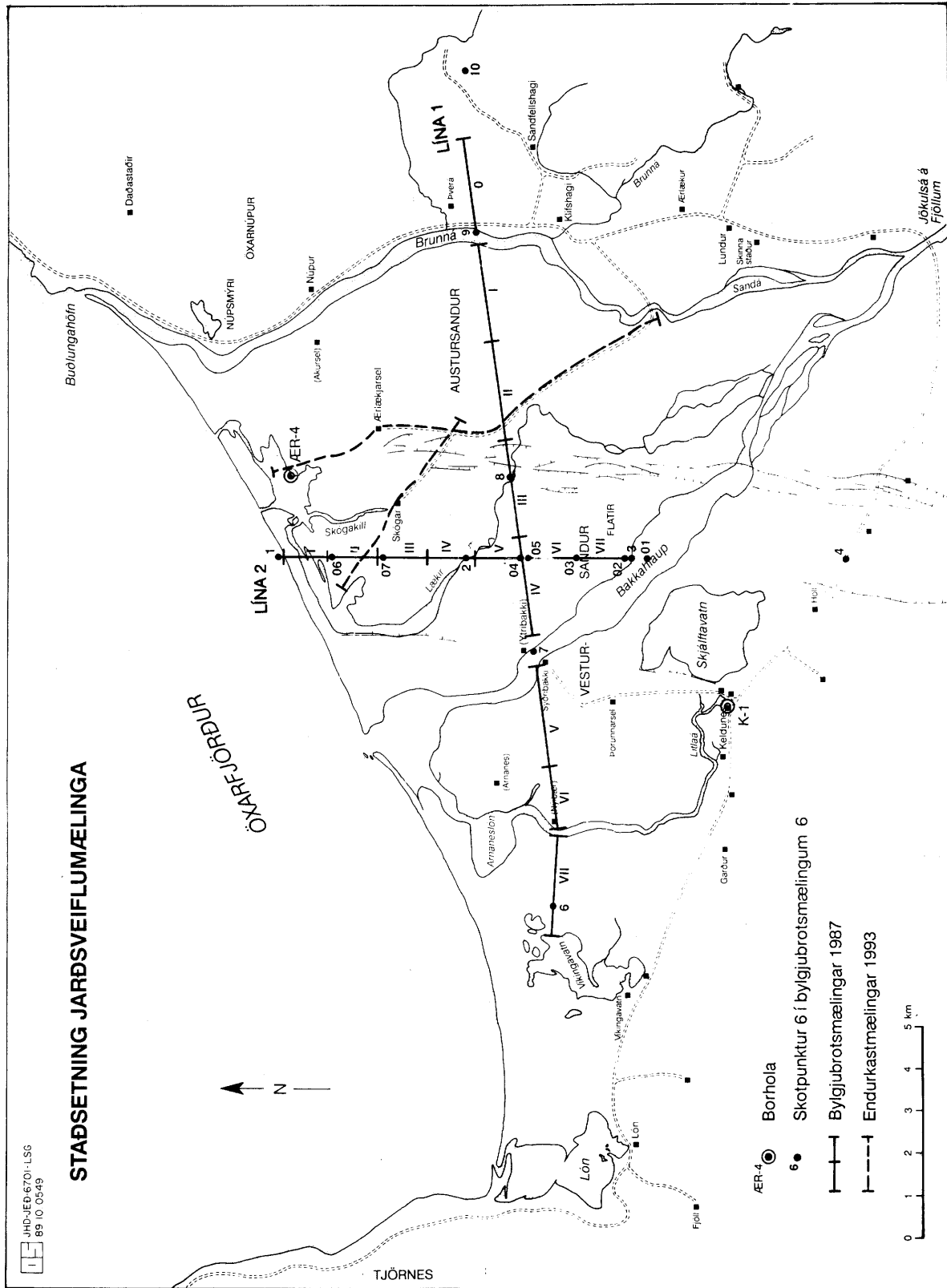
25. mynd: Uppsetning endurkastmælinga.



26. mynd: Uppsetning bylgjubrotsmælinga.

mælt á næstliggjandi kapalbili. Þeir skotpunktir eru merktir OX á 27. mynd. Tilgangur þeirra var að fá upplýsingar um bylgjuhraða í efstu nokkur hundruð metrunum á fleiri stöðum en þéttleiki hinna skotpunktanna gefur upplýsingar um.

Mælingarnar voru allar teknar upp á stafrænu formi og afhentar Orkustofnun á segulböndum. Yfirleitt eru mæligögnin mjög góð og auðvelt að lesa af komutíma fyrstu bylgna. S-bylgjur eru hins vegar mjög ógreinilegar en hugsanlegt er að greina megi S-bylgjuhraða einhverra laganna með viðeigandi lágtíðnisfun gagnanna. Það hefur hins vegar ekki verið gert.



27. mynd: Staðsetning bylgjubrotsmælinga í Öxarfirði og Kelduhverfi.

6.3 Umreikingur mæligagna í hljóðhraðasnið

Tvenns konar úrvinnsla var gerð á bylgjubrotsmælingunum. Í fyrsta lagi var einvíð túlkun á öllum skráningum frá hverjum einstökum skotpunkti og í öðru lagi var beitt tvívíðri túlkun með svonefndri Hagedoorn aðferð. Fyrirnefnda túlkunin var gerð af Inga Ólafssyni jarðeðlisfræðingi fyrir Orkustofnun (Ingi Ólafsson 1990), en síðarnefnda túlkunin var unnin af jarðeðlisfræðingum Náamaháskólans í Leningrad.

Einvíð túlkun: Gögnunum var skipt upp í prófíla þar sem hver prófíll er gerður úr öllum skráningum sem fengust frá einum og sama skotpunkti. Hver prófíll var síðan túlkaður einvítt, þ.e. ekki er gert ráð fyrir að lagmótum eða jafnhraðalínum halli undir mælistaðnum. Ýmist er gert ráð fyrir einsleitum hljóðhraðalögum eða að hraðinn vaxi samfelld með dýpi. Þetta er að sjálfsögðu talsverð einföldun á raunveruleikanum en gefur engu að síður grófa hugmynd um gerð jarðlaga undir hverjum prófíll. Niðurstöður einvíðu túlkunarinnar sýna yfirborðslag með hljóðhraða 1,5-1,6 km/s á öllu mælisvæðinu. Þetta lag er úr ósamhlímdum sandi. Þykkt þess er afar breytileg, frá því að vera mjög óveruleg upp í 250 m. Neðan sandlagsins taka við þrjú jarðlög þar sem hljóðhraði er á bilinu 2,7-3,5 km/s, vaxandi með dýpi. Neðri mörk þessara laga eru óglögg í einvíðu túlkuninni en virðast vera á 500-700 m dýpi. Þá gefur einvíða túlkunin einnig til kynna að lághraðaleg sé til staðar á 400-500 m dýpi undir línu 2.

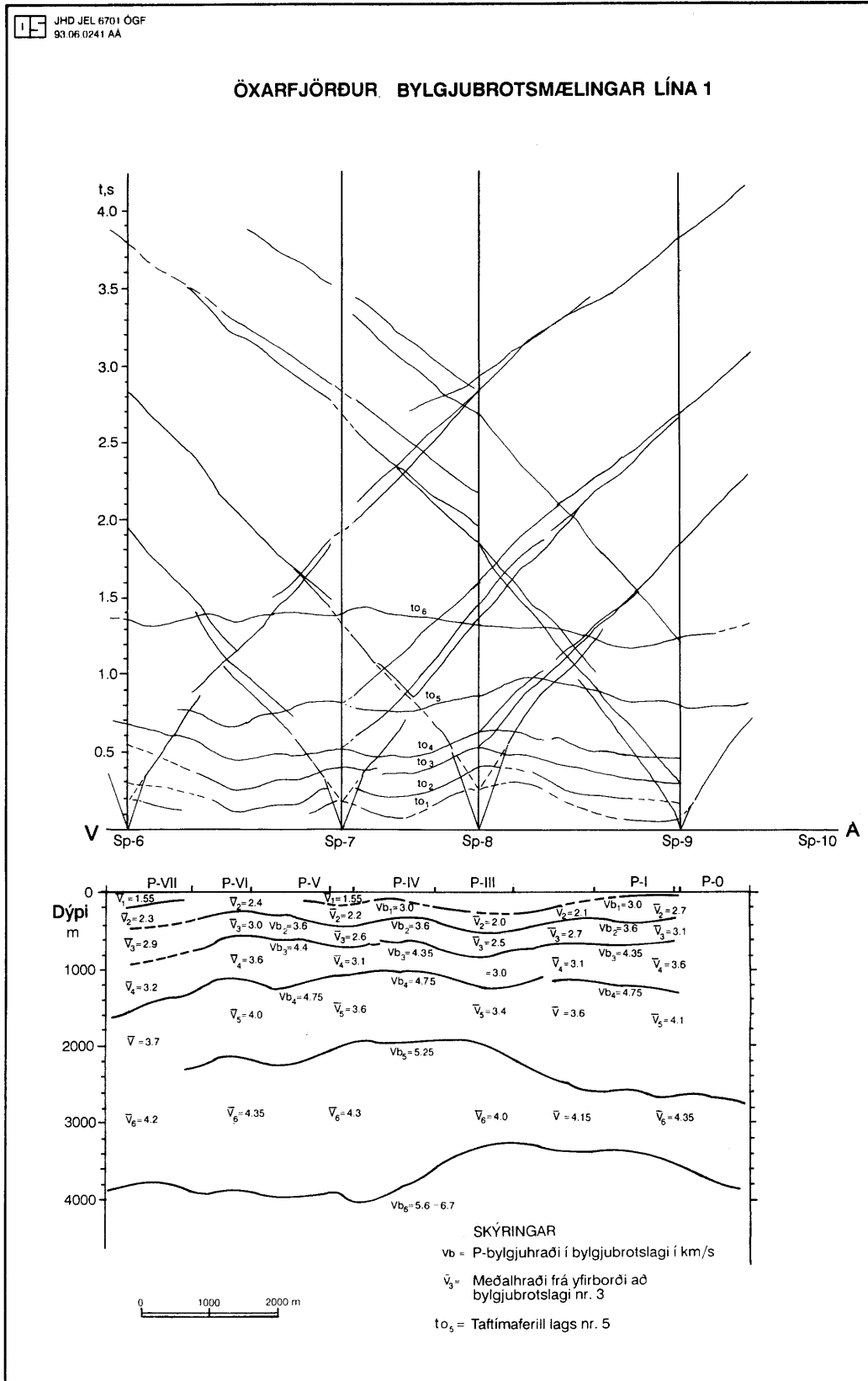
Tvívíð túlkun með Hagedoorn aðferð: Við tvívíðu túlkunina var notuð túlkunaraðferð sem kennd er við Hagedoorn (1959). Þá er jarðlögum á mælisvæðinu skipt upp í ákveðin hljóðhraðalög en hraði ekki látinn vaxa samfelld með dýpi eins og gert var í einvíðu túlkuninni að ofan. Hljóðhraði getur verið nokkuð breytilegur lárétt eftir hverju lagi og þykkt þess óregluleg. Túlkunin felst síðan í því að meta hljóðhraða laganna og reikna dýpið niður á þau. Þessi hluti úrvinnslunnar var að mestu unnin af sérfræðingum Náamaháskólans í Leningrad. Niðurstöður tvívíðu túlkunarinnar ásamt fartímaritum sem túlkunin byggir á eru birtar á 28. og 29. mynd, sjá nánar í kafla 6.5.

6.4 Þyngdarmælingar

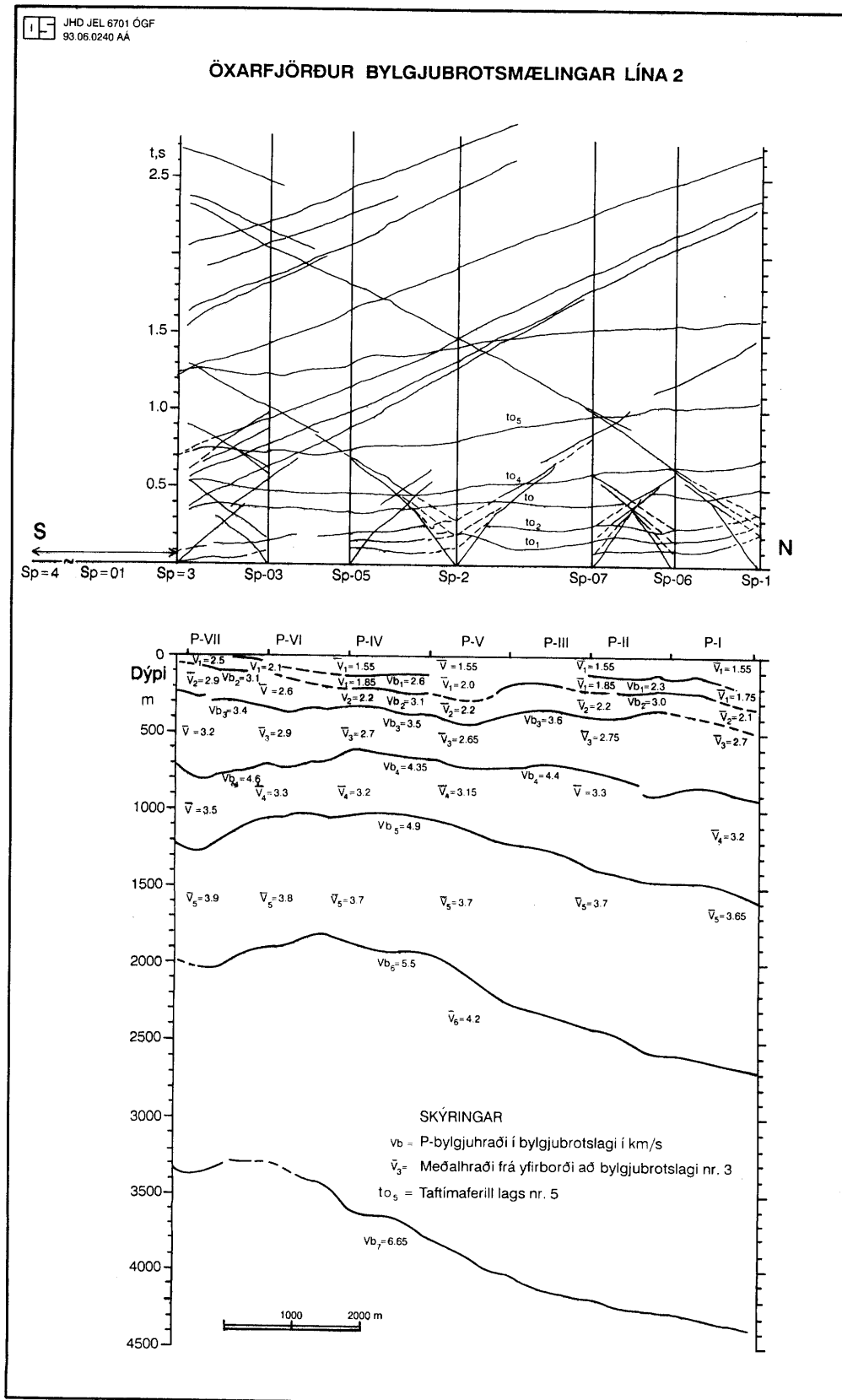
Þyngdarmælingar felast í mælingum á þyngdarsviði (þyngdarkrafti) jarðar. Þar sem eðlislétt jarðlög eru undir kemur fram lægð í þyngdarsviðinu en þar sem jarðlög eru eðlisþung koma fram hæðir. Setlög eru talsvert eðlisléttari en basalhraun og því er við því að búast að fram komi lægð í þyngdarsviði þar sem þykk setlög eru undir.

Sá galli er á túlkun þyngdarmælinga að ekki er unnt að greina milli þess hvort þyngdarlægð orsakast af þunnum en mjög eðlisléttum setlögum eða þykkari en heldur eðlisþyngri setlögum. Ef hins vegar eru til upplýsingar um þykkir setlaganna frá bylgjubrots- eða endurkastmælingum má ákvarða eðlisþyngdina út frá þyngdarmælingunum. Því er mikilvægt að túlka þyngdar- og bylgjubrotsmælingar í samhengi. Þess vegna gerði Orkustofnun þyngdarkort af mælisvæðinu í Öxarfirði sumarið 1987 samhliða bylgjubrotsmælingunum.

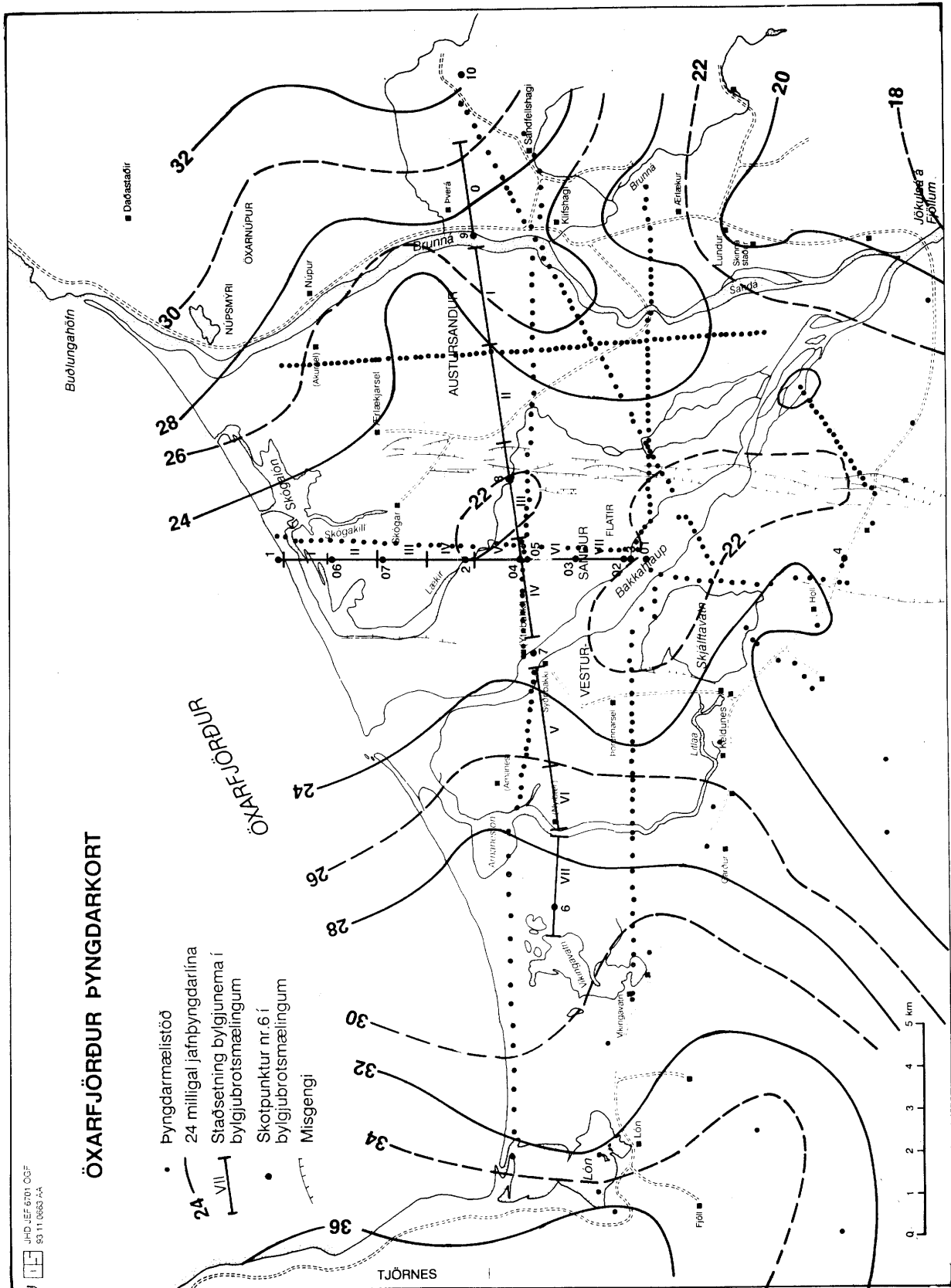
Á 30. mynd er sýnt þyngdarkort af mælisvæðinu í Öxarfirði ásamt staðsetningu mælipunkta. Kortið á 30. mynd er Bouguer kort en svæðisbundin áhrif þyngdarlægðarinnar yfir Íslandi hafa ekki verið fjarlægð. Kortið sýnir greinilega lægð í þyngdarsviðinu inn Öxarfjörð. Í fyrsta lagi er um að ræða breiða lægð sem liggur þvert yfir láglandi Öxarfjarðar. Að vestan afmarkast lægðin af misgengjum sem tilheyra sprungubelti Þeistareykjaeldstöðvarinnar og liggur í austurbrún Tjörness. Að austan afmarkast lægðin af austurhluta brotakertis Kröflueldstöðvarinnar



28. mynd: Niðurstöður tvívíðrar túlkunar á línu 1.



29. mynd: Niðurstöður tvívíðrar túlkunar á línu 2.



30. mynd: Þyngdarkort af Öxarfirði og Kelduhverfi.

sem liggur skammt austan Brunnár. Í öðru lagi er innan þessarar breiðu lægðar önnur afmörkuð lægð sem sýnir mikinn sigdal fylltan léttu efni, væntanlega setlögum.

Við samtúlkun þyngdar- og bylgjubrotsmælinganna var tekið þyngdarsnið þvert yfir Öxarfjörð á saman stað og lína 1 í bylgjubrotsmælingunum. Notað var tvívítt þyngdarforrit, GRAVTVI sem Karl Gunnarsson jarðeðlisfræðingur á Orkustofnun hefur samið. Það byggir á því að reikna þyngdarsvið frá tvívíðum skrokkum í jörðu sem hafa aðra eðlisþyngd en umhverfið.

Við túlkunina var byrjað á því að setja inn lagþykktir í samræmi við tvívíða túlkun bylgjubrotsmælinganna og gefa hverju lagi líkleg gildi á eðlisþyngd og reikna út það þyngdarsvið sem svarar til líkansins. Við val á eðlisþyngdargildum í upphafslíkanið voru notaðar niðurstöður eðlisþyngdarmælinga kjarna úr holu ÆR-4 (Magnús Ólafsson o.fl. 1992) fyrir þau lög sem hún náði til en annars var notað reynslusamband hljóðhraða og eðlisþyngdar (Nafe og Drake 1963; Christensen og Wilkens 1982). Til að fá samræmi milli líkansins og mæliniðurstaðna var eðlisþyngdargildum breytt og svolitlar breytingar gerðar á þykktum og útmörkum einstakra hljóðhraðalaga til að fá samræmi við þyngdargildin. Þær breytingar sem gerðar voru á hljóðhraðasniðunum takmörkuðust við staði þar sem niðurstöður þeirra voru síst áreiðanlegar, svo sem við enda mælifna og þar sem óreglur voru í lagmótum. Á 31. mynd er lokallíkan þyngdarmælinganna ásamt mældum og reiknuðum gildum. Í aðalatriðum hefur tekist að herma þyngdarniðurstöðurnar í samræmi við niðurstöður bylgjubrotsmælinganna, frávik mældra og reiknaðra gilda eru yfirleitt lítil nema helst vestast þar sem bylgjubrotsmælingar vantar.

Niðurstöður samræmdu túlkunarinnar á línu 1 eru sýndar á 32. mynd og á 33. mynd eru niðurstöður tvívíðu túlkunar línu 2 sýndar í sama kvarða.

6.5 Túlkun hljóðhraðasniðanna

Ef lítið er á 32. og 33. mynd má greina 8 mismunandi hljóðhraðalög á línu 2 en 7 á línu 1. Mismunurinn liggur í því að lag 2 og lag 3 koma fram sem eitt lag á línu 1, þ.e. lag 3 er of þunnt til að sjást sem fyrsta bylgja á línu 1 þótt það sé þar til staðar. Þarna er um svokallað falið lag að ræða. Tafla 3 sýnir yfirlit um hljóðhraðlögin og eðlisþyngd þeirra og gerð.

Hljóðhraðasniðið fyrir línu 2 á 33. mynd teygir sig frá háhitasvæðinu við Bakkahlaup norður eftir sigdalnum að ströndu Öxarfjarðar skammt vestan Skógalóns. Á myndinni má sjá 7 hljóðhraðalög og virðist lagmótum yfirleitt halla til norðurs. Skammt frá enda sniðsins eru borholur, hola ÆR-4 við Skógalón (Magnús Ólafsson o.fl. 1992) og 368 m djúp hola, K-1, við Keldunes (Kristján Sæmundsson 1972). Staðsetning borholanna er sýnd á 1. mynd. Báðar liggja þær nokkuð til hliðar við sniðið og má áætla að setlög í Keldunesholunni séu þynnri en ef holan væri inni í sniðinu. Lögin, sem fram koma í hljóðhraðasniðunum, eru þessi:

Lag 1: Efst í hljóðhraðasniðinu er lag með hraðann 1,6 km/s og er það úr ósamlímdum vatnsmettuðum sandi. Lagið þykkar til norðurs og verður mest um 200 m þykkt.

Lag 2: Þar fyrir neðan tekur við lag með hraða um 2,3 km/s og er það úr nokkuð samlímdum sand- og leirsteinslögum.

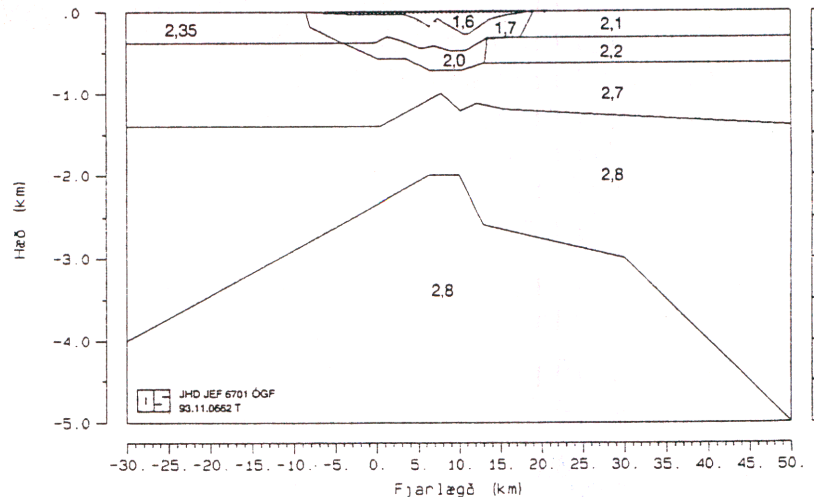
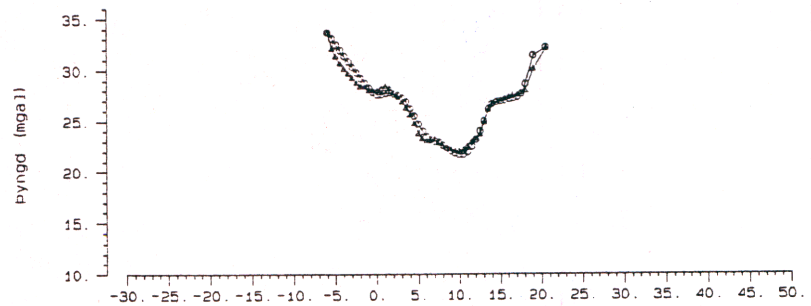
Lag 3: Það hefur hraða 2,9-3,0 km/s og er úr samlímdum setlögum. Það nær niður á 200-500 m dýpi á mælisvæðinu.

Tafla 3: Yfirlit um lagskiptingu jarðar í Öxarfirði.

Lag nr. nr	Hljóðhraði km/s	$\rho_{\text{ÆR04}}$ g/cm ³	ρ_{ND} g/cm ³	ρ_{CW} g/cm ³	ρ_{P} g/cm ³	Aths.
1	1,6		1,6	1,6	1,6	Vatnsmettaður sandur
2	2,3		2,0		1,7	Samlímd setlög. Lag 2 og 3 illsundurgreinanleg
3	2,9-3,0	1,8	2,2		1,7	Samlímd setlög
4	3,4-3,6	2,1	2,3	2,3	2,0	Vel samlímd set, völuþberg, silt
5	4,4-4,7		2,5	2,5-2,6	2,7	Líklega basalhraunlög
6.	4,9-5,5			2,7	2,7	Ummyndað basalt. Epidót belti
7.	5,6			2,8	2,8	Ummyndað basalt.

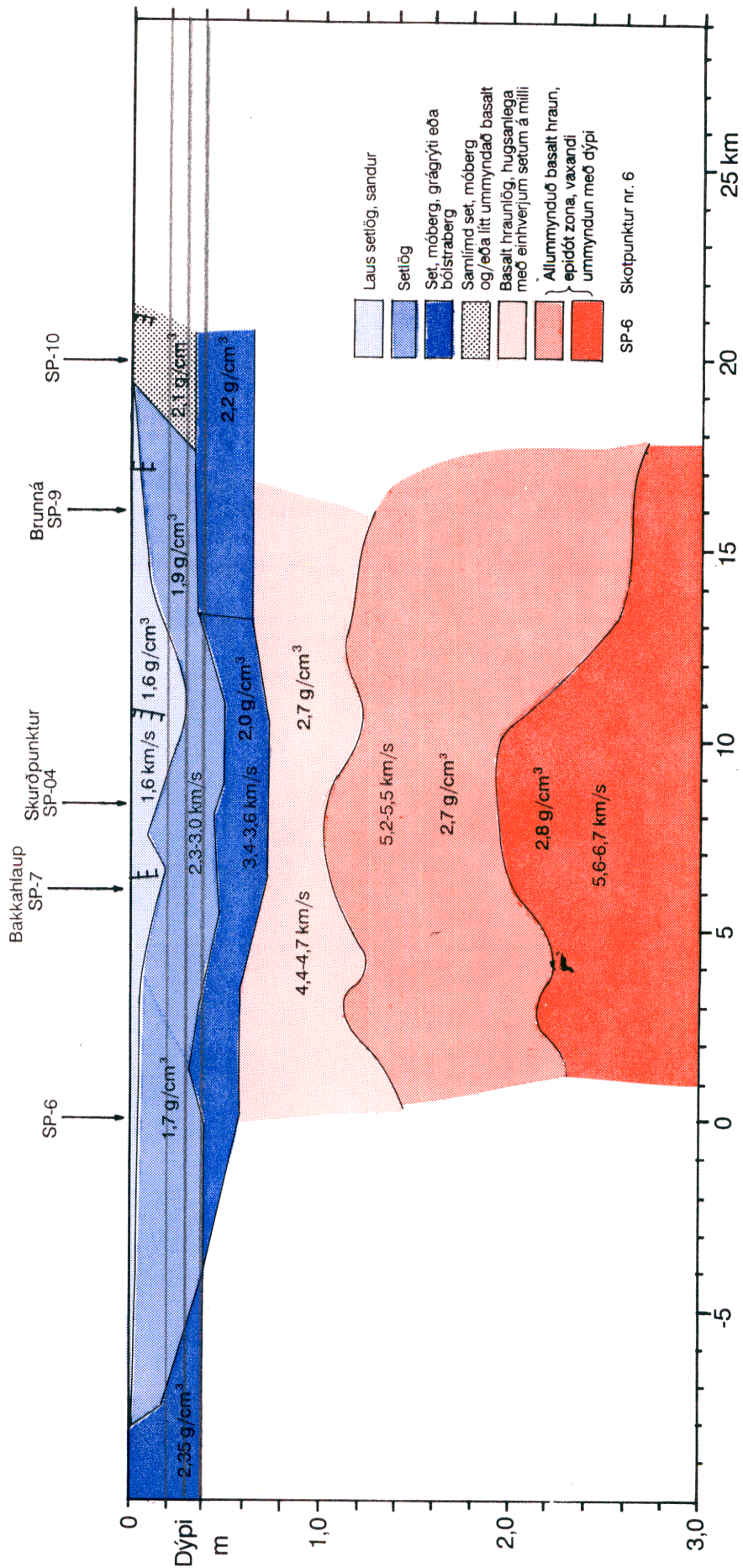
Hljóðhraðinn er samkvæmt bylgjubrotsmælingum, $\rho_{\text{ÆR04}}$ táknar eðlisþyngd áætlaða út frá kjarna úr holu ÆR-4, ρ_{ND} táknar áætlaða eðlisþyngd út frá Nafe-Drake ferlinum um samband hljóðhraða og eðlisþyngdar fyrir setlög, ρ_{CW} táknar eðlisþyngd samkvæmt mælingum Christensen og Wilkens (1982) á kjarna djúprar borholu á Reyðarfirði og ρ_{P} táknar þá eðlisþyngd sem fékkst við túlkun þyngdarmælinganna.

Þríhyrningar eru mæld gildi. Þríhyrningur reiknuð



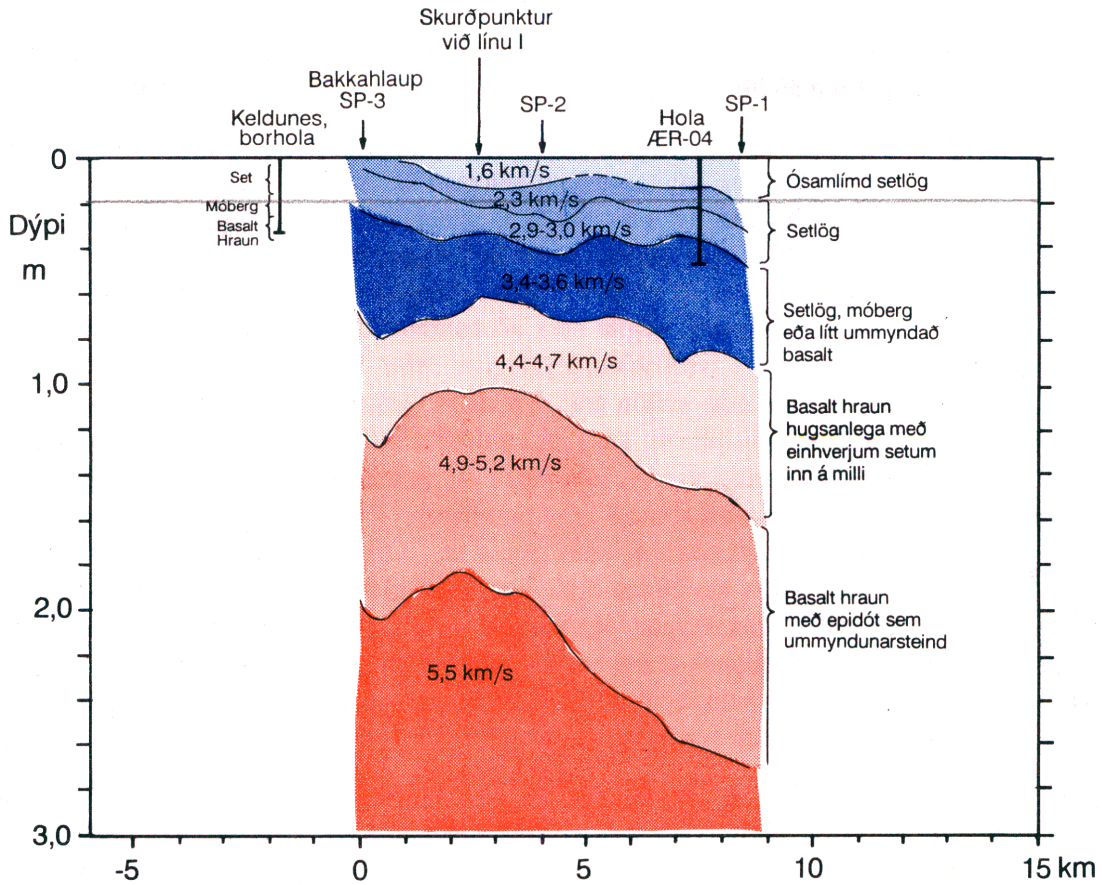
31. mynd: Líkan af eðlisþyngdareifingu undir söndum Öxarfjarðar eftir línu 1.

ÖXARFJÖRÐUR - Lína 1
 Jarðlagalíkan byggt á þyngdar- og bylgjubrotsmælingum



32. mynd: Jarðlagasnið eftir línu 1, þvert á sigdalinn í Öxarfirði.

ÖXARFJÖRÐUR - Lína 2 Jarðlagasnið byggt á bylgjubrotsmælingum



33. mynd: Jarðlagasnið eftir línu 2, langsum eftir sigdalnum í Öxarfirði.

Lag 4: Það er með hljóðhraða 3,4-3,6 km/s. Hraðans vegna gæti hvort sem er verið um að ræða ung lítt ummynduð hraunlög (grágrýti), móberg eða bólstraberg eða fremur vel samímd setlög svipuð þeim og finnast í endurkastmælingum á landgrunninu undan Norðurlandi. Hóla ÆR-4 nær líkast til rétt niður í þetta lag þótt ekki verði það fullýrt vegna þess að hún er til hliðar við mællínuna. Það sem helst bendir til að ÆR-4 nái niður í lagið er töliverð aukning í eðlisþyngd kjarnans neðan 416 m dýpis. Setlögin þar eru úr siltsteini og völubergi. Þetta lag teygir sig niður á um 1 km dýpi við ströndina en grynast til landsins.

Lag 5: Lag með hljóðhraðan 4,4-4,7 km/s er þar fyrir neðan. Þarna er líklega um að ræða lagskipt basalhraunlög með millilögum þótt ekki sé unnt að útiloka að einhver setlög kunni að vera þar inn á milli. Raunar eru til setlög með svo háan hraða sem hér um ræðir en þau eru venjulega mun eldri en ætla má að setlögin í Öxarfirði séu. Hljóðhraði í Tjörnes setlögum er ekki þekktur og er nauðsynlegt að mæla hann til að kanna hvort mögulegt sé að lag 4 sé úr setum.

Lög 6 og 7: Neðstu tvö lögín eru með hraða 4,9-5,2 km/s og 5,5-6,0 km/s. Þetta eru talsvert ummynduð basalhraunlög. Af sambandi hljóðhraða og ummyndunar (Ólafur G. Flóvenz 1980) má gera ráð fyrir að komið sé niður í epidót ummyndunarbelti þegar hljóðhraðinn er orðinn 5,0 km/s. Samkvæmt því má áætla að komið sé niður í epidótbeltið á um 1200 m dýpi undir háhitasvæðinu við Bakkahlaup.

Athyglisvert er að hljóðhraðalögin í basalhrauninum hvelfast upp undir jarðhitasvæðinu við Bakkahlaup, sem gefur til kynna vaxandi ummyndun inn að miðju hitasvæðisins. Engin merki sjást hins vegar um að hljóðhraðalögin lyftist upp nálægt Skógalónssvæðinu.

Óvenjulegt er að finna hraða um eða yfir 5,0 km/s jafn grunnt í gosbeltinu og í Öxarfirði nema inni í megineldstöðvum og háhitasvæðum þeirra. Í Öxarfirði er rétt liðlega 1 km niður á þennan hraða en í gosbeltinu utan háhitasvæða og megineldstöðva er dýpið yfirleitt 2,0-2,5 km. Á þessu gætu verið tvær skýringar. Annað hvort er berggrunnurinn undir Öxarfirði úr gömlu og rofnu tertíeru basalti eða um er að ræða áhrif ummyndunar vegna jarðhita og innskota. Fyrri skýringin er trúlegri, einkum vegna þess að háhraðalögin eru nærri því lárétt, þvert á stefnu gosbeltisins. Samkvæmt jarðfræðiupplýsingum hefur landrek einungis átt sér stað um nyrsta hluta gosbeltisins í um eina miljón ára. Miðað við rekhráðann 1 cm/ár ætti land að hafa gliðnað um 20 km á þessu tímabili, og sú gliðnun dreifst á fjögur eldstöðvakerfi, Þeistareyki, Kröflu, Fremrináma og Sveinagjárkerfið, sem teygir sig út Melrakkasléttuna. Ef landrekið hefur skipst jafnt á þessi sprungukerfi koma 5 km í hlut hvers. Þetta er mjög svipuð tala og breidd Þeistareykja- og Kröflusprungubeltanna, sem ganga út í Öxarfjörð (1. mynd). Spildan fyrir botni Öxarfjarðar er hins vegar um 20 km breið þannig að helmingur af berggrunnum þar hlýtur að vera mun eldri jarðskorpa, væntanlega talsvert rofin. Að auki er augljóst að stór hluti af gliðnuninni hefur orðið við gliðnun á siggengjum, fremur en af innskotavirkni í jarðskorpunni. Það þýðir að eldra bergið er mun meira en 50% af berggrunni Öxarfjarðar, en ung jarðskorpa lítil og þá bundin við takmarkað svæði innan sprungubeltanna tveggja.

Samtúlkaða sniðið á 32. mynd nær þvert yfir Öxarfjörð, skammt norðan jarðhitasvæðisins við Bakkahlaup. Myndin sýnir greinilega hvernig sandlögin efst í setlögnum þykkna inn að miðju Öxarfjarðar og greinilegt er að heildarþykkt setlaganna er þar mest, rúmlega 700 m.

Vert er að vekja athygli á þeim eðlisþyngdargildum sem sýnd eru á myndinni. Þau eru ákvörðuð út frá þyngdarmælingunum. Í raun er það einungis eðlisþyngdarmunur milli einstakra laga sem er reiknaður í túlkun þyngdarmælinganna en þar sem eðlisþyngd setlaganna er þekkt í holu ÆR-4 er unnt að reikna eðlisþyngd annarra laga út frá mismunatölunni.

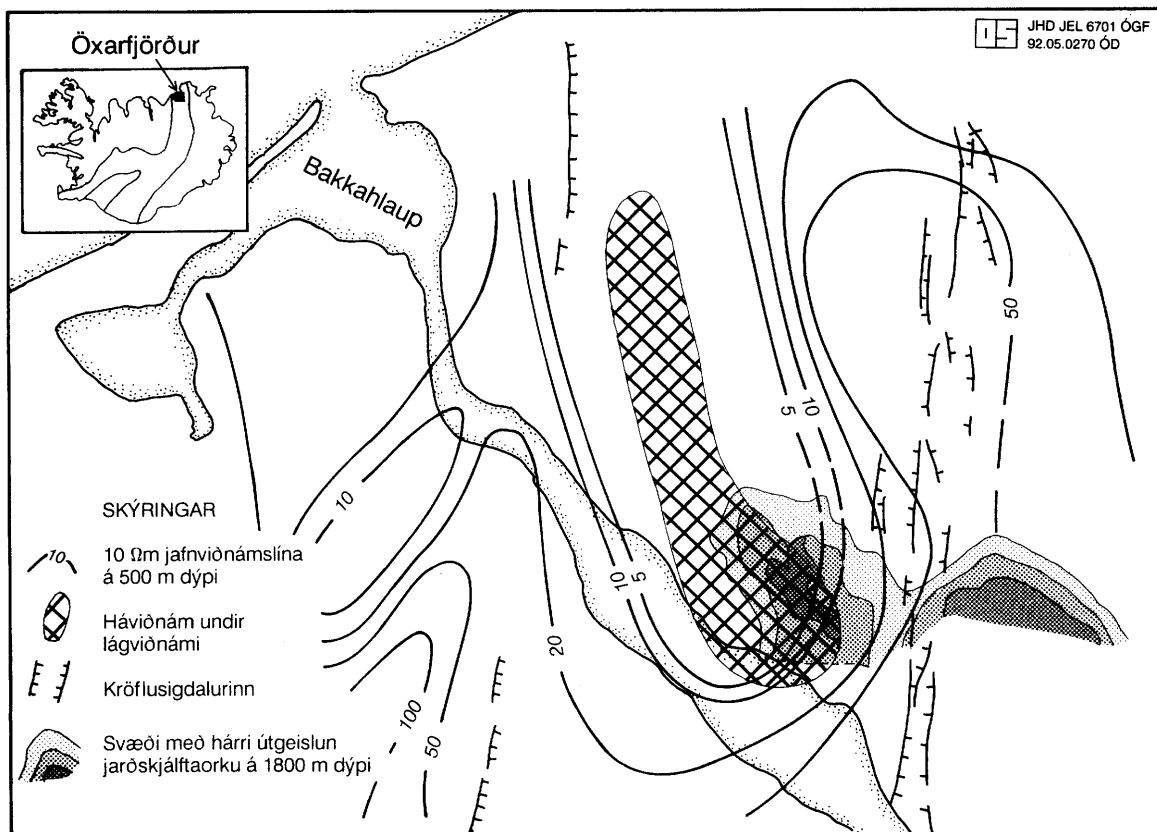
Ef eðlisþyngdargildin, sem notuð eru við túlkun þyngdarmælinganna, eru skoðuð og borin saman við þekkt reynslusambönd hljóðhraða og eðlisþyngdar (Nafe og Drake 1963; Christensen og Wilkens 1982) (tafla 3) kemur í ljós að eðlisþyngdargildin, sem best skýra þyngdarmælingarnar, eru lægri en vænta má út frá hljóðhraða fyrir setlögin en nokkuð eðlileg fyrir basaltlögin. Þetta gæti bent til þess að hljóðhraðinn, sem mælist, sé of hár vegna hugsanlegra lághraðalaga í setlögnum sem bylgjubrotsmælingar greina ekki. Í því tilfalli má ætla að heildarþykkt setlaganna geti verið vanmetin í túlkuninni hér.

6.6 Mælingar á samfelldri orkuútgeislun

Sumrin 1988 og 1989 var fram haldið samvinnu Orkustofnunar og Sovésku Vísindaakademíunnar um rannsóknir í Öxarfirði. Að þessu sinni voru gerðar tilraunir með mælingar á samfelldri útgeislun á jarðskjálfaorku, eða það sem oft er kallað jarðsuð. Hugmyndin var sú að

kanna hvort jarðhitasvæðinu í Öxarfirði fylgdi slík samfelld útgeislun sem tengja mætti jarðhita-virkninni. Talið er hugsanlegt að sprungumyndun vegna varmanáms úr bergi eða suða í jarð-hitakerfi geti skapað samfellda útgeislun sem leita mætti uppi með sérstakri skráningartækni og úrvinnslu. Mælingarnar og úrvinnsla þeirra voru alfarið í höndum Sovétmanna en Orkustofnun tók þátt í skipulagningu þeirra og samanburði á niðurstöðum við önnur gögn. Niðurstöðurnar voru afhentar Orkustofnun sumarið 1990 (Sovéska Vísindaakademían 1990).

Mæliaðferðin byggir á því að komið er fyrir réttthyrndu neti 24 bylgjunema með 50 m möskvastærð. Síðan er skráð sú jarðskjálftaorka sem berst að mælunum á 44,6 sekúndna bili. Með því að skipta jörðinni neðan og í grennd við mælinetið upp í litlar rúmmálseiningar má með sérstakri sfúnartækni reikna út hve mikill hluti þeirrar jarðskjálftaorku, sem mælist, á sér upptök í hverri rúmmálseiningu svæðisins. Það sýnir sig að mynstrið sem kemur út þegar skráð er aftur á sama stað, jafnvel ári síðar, er nánast hið sama, sem þýðir að ákveðnir blettir í jörð- unni undir mælinetinu geisla stöðugt frá sér jarðskjálftaorku.



34. mynd: Niðurstöður mælinga á samfelldri útgeislun jarðskjálftaorku.

Alls voru lögð út 11 mælinet þessi tvö sumur. Niðurstöðurnar eru sýndar á 34. mynd. Þar má sjá styrk útgeislunar á 1800 m dýpi borið saman við útbreiðslu lágviðnámsins sem einkennir jarðhitasvæðið við Bakkahlaup. Sjá má að útgeislunin er mest undir og rétt utan við lágvið-námssvæðið suðaustanvert, skammt frá virka misgengjabeltinu. Ef orsakir útgeislunarinnar eru tengdar varmanámi eða suðu gæti þarna verið álitlegasti hluti jarðsvæðisins með tilliti til nýt-ingar.

6.7 Niðurstöður jarðsveiflumælinganna

Niðurstöður bylgjubrots-, þyngdar- og útgeislunarmælinganna má draga saman á eftirfarandi hátt.

- Berggrunnurinn undir söndum Öxarfjarðar er hulinn miklum setlögum sem myndast hafa í sigdal sem tengist norðurenda sprungubelta Kröflu- og Þeistareykjaeldstöðvanna. Setin þykkna í átt til sjávar og eru þar talin um 1000 m þykk. Setlögin ná þvert yfir láglendi Kelduhverfis og Öxarfjarðar frá Tjörnesi í vestri og austur fyrir Brunná. Þau eru þykkust í miðju sigdældarinnar sem tengist Kröflueldstöðinni.
- Efsti hluti setlaganna er úr lausum vatnsmettuðum sandi og er hann allt að 300 m þykkur. Þar fyrir neðan taka við þrjú lög sem talin eru úr setlögum. Hljóðhraði þeirra er á bilinu 2,3-3,6 km/s. Hóla ÆR-4 er talin rétt ná niður í hið neðsta þeirra.
- Þar fyrir neðan er lag með hraða 4,4-4,7 km/s og er að öllum líkindum úr basalhraunlögum. Neðan þess sjást engin merki um setlög þótt minniháttar setlög verði ekki útilokuð.
- Grynna er á hljóðhraða um og yfir 5,0 km/s í Öxarfirði en vðast í gosbeltinu. Ætla má að hraði sem er um eða yfir 5,0 km/s fylgi epídót ummyndunarbeltinu. Þetta má skýra með því að gömul, rofin og ummynduð basaltlög (væntanlega frá tertfer) liggi undir setlögnum eins og líkur hafa reyndar verið leiddar að í jarðfræðikaflanum. Þetta getur einnig verið merki um að jarðlögin séu ummynduð af háhitavirkni. Hér er líklega um samspil beggja þátta að ræða, því ummyndun af háhitavirkni er vissulega líkleg skýring á því að háhraðalögin hvelfast upp undir jarðhitasvæðinu við Bakkahlaup, en ólíkleg skýring á því að almennt sé grunnt á svo háan hraða. Líkur benda því til þess að berggrunnur Öxarfjarðar sé úr gömlu rofnu bergi sem svarar til þess bergs sem myndar undirstöður Tjörnes setlaganna.
- Ef jarðhitavirkni er skýring á háum hraða á litlu dýpi undir hitasvæðinu við Bakkahlaup má búast við að hiti hafi náð allt að 250°C á 1200 m dýpi í miðju háhitasvæðisins.
- Hljóðhraðasniðin sýna að efsti hluti jarðhitakerfisins við Bakkahlaup er í setlögum. Slíkt er einstætt meðal íslenskra háhitasvæða og ber því að gæta varúðar við að yfirfæra reynslu af öðrum háhitasvæðum á háhitann í Öxarfirði.
- Mælingar á samfelldri útgeislun jarðskjálftaorku sýna áberandi mikla útgeislun á litlu svæði suðaustantil í háhitasvæðinu við Bakkahlaup, rétt við virku misgengi Kröflusprungubeltisins. Það gæti bent til mikillar jarðhitavirkni þar, varmanáms eða suðu.

7. HELSTU NIÐURSTÖÐUR

Tilgangur rannsókna, sem gerð hefur verið grein fyrir hér að framan, var að afla frekari vísbendinga um hvort háhitasvæði væri falið undir söndum í Öxarfirði. Í áætlun um þær sagði ennfremur: "Stefnt er að því að árangur þessara rannsókna verði nægjanlegur til þess að staðsetja fyrstu rannsóknaholu á svæðinu" (Valgarður Stefánsson 1984).

7.1 Setlög og grunnvatn

Kröflusprungubeltið og Þeistareykjasprungubeltið ráða miklu um dreifingu jarðhita í Öxarfirði og Kelduhverfi. Innan marka sprungubeltanna eru öll helstu jarðhitasvæðin. Þessi jarðhiti skiptist í tvennt. Annars vegar er um að ræða nokkur uppstreymissvæði og þeirra öflugust eru hverasvæðin við Skógalón, Skógakfl og Bakkahlaup sem öll eru innan Kröflusprungubeltisins. Hins vegar finnast á mörkum hrauns og sanda allmargar vatnsmiklar og volgar lindir. Þar er auðsæilega á ferðinni afrennslisvatn innan af heiðunum sem hefur komist í snertingu við háhitasvæðin í Gjástykki eða á Þeistareykjum.

Vatnasvið Öxarfjarðar er hulið nútímahraunum svo að úrkoma hripar að mestu niður og vatnið rennur neðanjarðar í átt til sjávar. Stór hluti þess kemur fram í vatnsmiklum lindum niðri á láglandinu á mótum hrauns og sands, en einnig gengur grunnvatnsstraumur út sandana. Sandarnir eru efsti hluti þykkra setlaga sem fyllt hafa upp setdal þann sem tengist norðurenda sprungubelta Kröflu- og Þeistareykjaeldstöðvanna. Setlög þykkna í átt til sjávar. Þykkust eru þau í miðju sigdældarinnar sem tengist Kröflueldstöðinni og eru þar talin vera um 1000 m þykk. Efsti hlutinn er úr lausum vatnsmettuðum sandi, sem er allt að 300 m þykkur. Síðan taka við þrjú lög sem einnig eru talin vera úr setlögum, og eru með hljóðhraða á bilinu 2,3-3,6 km/s. Neðan þeirra taka að öllum líkindum við basalhraunlög og sjást engin merki um set neðar, þó að ekki sé hægt að útiloka slíkt alveg.

Verulegra sjávaráhrifa gætir í grunnvatninu og endurspeglast það í efnasamsetningu heita vatnsins á þann hátt að selta þess er mest út við ströndina, en minnkar eftir því sem fjær dregur frá sjó. Líklegt er að selta jarðhitavatnsins stafi af útpvotti úr sjávarsetlögum eða að um sé að ræða staðbundna seltu sem komist hefur niður í bergið við hærri sjávarstöðu en nú er. Grunnvatnsstraumur er líklega aðalaorsök þess hve jarðhitaummerki á yfirborði eru fátækleg, þar sem kalda vatnið nær að kæfa yfirborðsvirknina að mestu.

7.2 Jarðhitasvæðin við Bakkahlaup og Skógalón

Háhitasvæði í tengslum við eldstöðvakerfi er eitt af aðaleinkennum gosbeltisins sem liggur þvert yfir Ísland. Háhitasvæðin innan marka þess eru fjölmörg. Lágheit finnst þar aftur á móti naumast og þá aðeins sem afrennsli af háhitasvæðum. Öxarfjörður og Kelduhverfi verða að teljast innan marka gosbeltisins, þó að eldvirkni hafi ekki orðið á yfirborði á láglandi á nútíma.

Vatn frá heitustu jarðhitastöðunum við Skógalón, Skógakfl og Bakkahlaup virðist vera í jafnvægi við berggrunninn sem það streymir um, en annað vatn ber einkenni blöndunar við kalt grunnvatn. Efnahiti reiknast hæstur um 135°C í hverum við Skógalón og 160°C í borholum, ef gert er ráð fyrir að jarðhitavökvinn hafi ekki blandast við sjó eða grunnvatn, en reikningar grundvallaðir á blöndunarlíkani benda til að djúphiti jarðhitavökvans þar geti verið talsvert hærri, allt að 220°C. Niðurstöður gashitamæla benda einnig til hita yfir 200°C á þessum slóðum. Sama er að segja um ummyndunarsteindir úr neðsta hluta holu ÆR-4 og greindan vökva-bóluhita.

Viðnámsmælingarnar sýna a.m.k. 10 km² stórt svæði á austurbakka Bakkahlaups með svipaða viðnámsgerð og ýmis þekkt háhitasvæði. Undir yfirborðslögum mælist mjög lágt eðlisviðnám, 2-5 Ωm. Neðar, á 300-600 m dýpi, hækkar eðlisviðnám verulega og er lágviðnámið eins og kápa utan um háviðnámskrokk. Svæðið er í miðju Kröflusprungubeltinu og afmarkast af sprungustykkjunum, sem hreyfðust í Kröflueldum, til austurs og vesturs. Allhátt viðnám, sem fylgir þessum sprungustykkjum niður á meira en 500 m dýpi, stafar af niðurstreymi kalds grunnvatns og því má líta á sprungustykkinn sem vatnsgeymi fyrir hitasvæðið. Háviðnám undir lágviðnámskápu er nokkuð sem einkennir mörg þekkt háhitasvæði á Íslandi. Það kemur fram þegar háhitaummyndun eins og klórft og epidót er orðin ríkjandi yfir lághitaummyndun, en við það hækkar eðlisviðnám bergsins verulega. Þetta er vísbending um að jarðhitakerfið hafi á lífsferli sínum náð a.m.k. 250°C hita. Við Skógalón er djúpviðnám einnig mjög lágt, um 2 Ωm, enda er þar mikill jarðhiti á yfirborði. Annars staðar er djúpviðnám nokkuð mismunandi en hvergi verulega lágt. Lægst er það á totu milli Syðribakka og Þórunnarsels og gætir þar líklega áhrifa jarðhita. Niðurstöður viðnámsmælinganna gefa mjög ákveðna vísbendingu um að hjarta jarðhitavirkni á rannsóknasvæðinu sé á austurbakka Bakkahlaups, þar sem jarðhiti er á yfirborði og þar norður af. Út frá þeim má einnig ætla að hiti í jarðhitakerfinu sé hærri en 200°C.

Grynnra er á hljóðhraða um og yfir 5,0 km/s í Öxarfirði en víðast í gosbeltinu. Ætla má að slíkur hraði fylgi epídót ummyndunarbeltinu. Þetta má skýra á tvo vegu. Líklegra er að gömul, rofin og ummynduð basaltlög (væntanlega frá tertíer) séu undir setlögum, en einnig geta jarðlögin verið ummynduð af háhitavirkni, nema um samspil beggja þátta sé að ræða. Ummyndun af háhitavirkni er þó vissulega líkleg skýring á því að háhraðalögin hvelfast upp undir jarðhitasvæðinu við Bakkahlaup. Ef það er rétt má búast við að hiti hafi náð allt að 250°C á 1200 m dýpi í miðju þess. Mælingar á samfelldri útgeislun jarðskjálftaorku sýna áberandi mikla útgeislun á litlu svæði suðaustantil í háhitasvæðinu við Bakkahlaup, rétt við virk misgengi Kröflusprungubeltisins. Það gæti bent til mikillar jarðhitavirkni þar, varmanáms eða suðu.

Niðurstöður rannsókna benda allar í sömu átt. Af þeim má draga þá ályktun að á austurbakka Bakkahlaups í Kelduhverfi sé háhitasvæði, sem þýðir að þar sé yfir 200°C hiti á innan við 1 km dýpi. Svæðið, sem er a.m.k. 10 km² stórt, er innan Kröflusprungubeltisins og virk sprungustykki afmarka það til austurs og vesturs. Hitasvæðið á austurbakka Bakkahlaups er nærri suðurmörkum þess, en jarðhiti finnst einnig á yfirborði norðar innan marka þess. Efsti hluti jarðhitakerfisins við Bakkahlaup er í setlögum. Slíkt er einstætt meðal íslenskra háhitasvæða og ber því að gæta varúðar við að yfirfæra reynslu af öðrum háhitasvæðum á það.

Líklegt er að varmagjafi háhitasvæðisins sé kólnandi innskot á nokkurra kílómetra dýpi. Þessi varmagjafi glæðist reglulega með nýjum kvikuinnskotum frá Kröflueldstöðinni. Í síðustu Kröflueldum hljóp kvika í tvígang norður í Öxarfjörð. Í kjölfar þeirra umbrota jókst jarðhitavirkni mikið á svæðinu.

Annað hitasvæði er við Skógalón. Boranir þar hafa gefið góðan árangur og fást úr holu ÆR-3 45 l/s í sjálfrennsli af 96°C heitu ísöltu vatni. Hvort þar er háhiti undir eða um að ræða afrennsli úr suðri verður ekki fullyrt út frá fyrirliggjandi gögnum. Vatnið úr holu ÆR-3 er ágætlega nýtanlegt til upphitunar, sé það notað á varmaskipta, en ekki hæft til beinnar upphituna vegna mikils magns af uppleystum efnum og hárrar seltu.

7.3 Annar jarðhiti í Kelduhverfi og Öxarfirði

Töluvert mikill jarðhiti er í Lónum í vestanverðu Kelduhverfi. Í Ytra-Lóni hefur mælst um 50°C hiti og áreiðanlegar sagnir eru um yfir 80°C hita. Lón eru í miðju Þeistareykjasprungubeltinu og vafalítið er jarðhitinn tengdur Þeistareykjaeldstöðinni. Staðsetning hans og jarðfræðilegar aðstæður benda til að þarna geti verið nokkuð öflugt jarðhitakerfi. Grunn vinnsluhola hefur verið boruð í það en full ástæða er til skoða það nánar.

Þá er einnig rétt að nefna jarðhitann við Arnanes. Á yfirborði hefur mælst þarna 35°C hiti. Viðnámsmælingar sýna hins vegar lágviðnámsfrávik litlu austar sem bendir til að þarna sé töluverður jarðhiti.

Volgt jarðsjávarkerfi undir Núpsmýri við Öxarnúp hefur verið nýtt með dælingu úr borholum til upphitunar í fiskeldi. Hæstur hiti sem fundist hefur er 37°C. Ólíklegt er að hægt sé að sækja mikið heitari vökva úr því kerfi.

7.4 Næstu skref rannsókna

Næsti stóri áfangi rannsókna háhitans í Öxarfirði er að bora djúpa rannsóknaholu á hitasvæðinu við Bakkahlaup. Með tilkomu hennar ætti túlkun allra yfirborðsgagna að komast á mun fastari grunn. Út frá fyrirliggjandi niðurstöðum fer ekki milli mála að slíka holu ætti að staðsetja syðst á svæðinu þar sem jarðhiti er mestur á yfirborði. Mælt er með að holan verði boruð niður á 1200-1500 m dýpi, eða vel niður í háviðnámskrokkinn undir lágviðnáminu.

Þá væri vissulega forvitnilegt að bora djúpa holu í hitasvæðið við Skógalón. Slík hola mundi svara spurningum um eðli hitakerfisins en gæti jafnframt varpað ljósi á uppruna lífræna gassins sem fundist hefur í holunum þar. Áður en til slíkrar borunar kæmi væri þó edlilegt að afmarka svæðið betur með viðnámsmælingum, t.a.m. TEM-mælingum sem hafa ýmsa kosti fram yfir hefðbundnar viðnámsmælingar og gætu hentað vel þarna.

HEIMILDIR

- Axel Björnsson 1975: Mæling setlaga á sjávarbotni. Tímarit V.F.Í., 2, 3-7.
- Axel Björnsson 1985: Dynamics of crustal rifting in NE Iceland. *J. Geophys. Res.*, 90, 10, 151-10, 162.
- Axel Björnsson, Guðni Axelsson og Ólafur G. Flóvenz 1990: Uppruni hvera og lauga á Íslandi. *Náttúrufræðingurinn*, 60, 15-38.
- Bai Liping 1991: Chemical modelling programs for predicting calcite scaling, applied to low temperature geothermal water in Iceland. *Jarðhitaskóli Sameinuðu Þjóðanna, skýrsla 1991-3*, 45 s.
- Bragi Árnason 1976: Groundwater systems in Iceland. *Vísindafélag Íslendinga XLII*, 236 s.
- Christensen, N.I., og R.H. Wilkens 1982: Seismic properties, density and composition of the Icelandic crust near Reyðarfjörður. *Journal of Geophys. Res.*, 87, 6389-6395.
- Darling, W.G., og J.C. Talbot, 1992: Hydrocarbon gas ratio geothermometry in the East African Rift system. *Water-Rock Interaction, Kharaka og Maest (ritstj.)*, Balkema, 1441-1444.
- Ellis, A.J., og A.J. Mahon 1977: Chemistry and geothermal systems. Academic Press, N.Y., 392 s.
- Fournier, R.O. 1977: Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. *Geothermics*, 5, 41-50.
- Fournier, R.O. og R. W. Potter II 1982: A revised and expanded silica (quartz) geothermometer. *Geoth. Res. Council Bulletin*, 11, 10, 3-12.
- Guðmundur Ingi Haraldsson 1985: Athugun á volgu vatni fyrir seiðastöð ÍSNÓ í Lóni í Kelduhverfi. *Orkustofnun, greinargerð GIH-85/04*, 5 s.
- Guðmundur Ingi Haraldsson og Gunnar V. Johnsen 1986: Jarðhitakönnun fyrir ÍSNÓ við Ytra-Lón í Kelduhverfi. *Orkustofnun, greinargerð GIH/GVJ-86/03*, 7 s.
- Guðmundur Ómar Friðleifsson 1987: Jarðhitalíkur á Kópaskeri. *Orkustofnun, greinargerð, GÓF-87/10*, 6 s.
- Guðmundur Ómar Friðleifsson 1989: Vatnskerfi í Núpsmýri. *Orkustofnun, OS-89058/JHD-30B*, 21 s.
- Hagedoorn, G.M., 1959: The plus minus method of interpreting seismic refraction sections. *Geophys. Prosp.*, 7, 158-82.
- Ingi Ólafsson 1990: Bylgjubrotsmælingar í Öxarfirði. Niðurstöður einvíðrar túlkunar. *Handrit í vörslu Orkustofnunar*.
- Knútur Árnason og Ólafur G. Flóvenz 1992: Evaluation of physical methods in geothermal exploration of rifted volcanic crust. *Geoth. Res. Council, Trans.*, 16, 207-214.
- Kristján Sæmundsson 1972: Varðar hreinsun á borholu við Lindarbrekku í Kelduhverfi. *Orkustofnun, greinargerð*, 9 s.

- Kristján Sæmundsson, 1974: Evolution of the axial rift zone in Northern Iceland and the Tjörnes fracture zone. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 495-504.
- Kristján Sæmundsson 1978: Fissure swarms and central volcanoes of the neovolcanic zone of Iceland. Í Bowes, D.R. og B.E. Leake (ritsj.): *Crustal evolution in northwestern Britain and adjacent regions*. *Geol. J., Spec. Issue*, 10:415-432.
- Kristján Sæmundsson, 1980: Outline of the geology of Iceland. *Jökull*, 29, 7-28.
- Lúðvík S. Georgsson 1984: Resistivity and temperature distribution of the outer Reykjanes peninsula, southwest Iceland. Expanded abstracts, 54th annual international SEG meeting, Atlanta, 81-84.
- Lúðvík S. Georgsson, Guðmundur Ómar Friðleifsson, Magnús Ólafsson, Ómar Sigurðsson og Þórólfur H. Hafstað 1989: Skilyrði til fiskeldis í Öxarfirði. *Ferskvatn, jarðsjór, jarðhiti og rannsóknaboranir*. Orkustofnun, OS-89041/JHD-08, 61 s.
- Magnús Ólafsson 1987: *Handbók um söfnun vatns- og gassýna*. Orkustofnun, OS-87021/JHD-03, 43 s.
- Magnús Ólafsson og Halldór Ármannsson 1988: Gas í borholum við Ærlækjarsel í Öxarfirði. Orkustofnun, greinargerð, MÓ-HÁ-88/22, 5 s.
- 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. Orkustofnun, OS-92031/JHD-03, 78 s.
- Magnús Ólafsson, Guðmundur Ómar Friðleifsson, Jón Eiríksson, Hilmar Sigvaldason og Halldór Ármannsson 1993: On the origin of organic gases in Öxarfjörður, NE-Iceland. Orkustofnun, OS-93015/JHD-05, 76 s.
- María Jóna Gunnarsdóttir 1982: Hitaveita á Kópaskeri. Áætlun um hitaveitu frá jarðhitasvæðinu að Lónaengi að Kópaskeri. Orkustofnun, OS82114/JHD30 B, s.
- Nafe, J.E. og C.L. Drake 1963: *Physical properties of marine sediments*. Í M.N. Hill (ritstj.): *The sea*, 3. Interscience Publishers, New York, 794-815.
- Oddur Sigurðsson 1980: Surface deformation of the Krafla fissure swarm in two rifting events. *J. Geophys.*, 47, 154-159.
- Ólafur G. Flóvenz 1980: Seismic Structure of the Icelandic Crust Above Layer Three and the Relation Between Body Wave Velocity and the Alteration of the Basaltic Crust. *J. Geophys.*, 47, 211-220.
- Ólafur Flóvenz, Lúðvík S. Georgsson og Knútur Árnason 1985: Resistivity structure of the upper crust in Iceland. *J. Geophys. Res.*, 90, 10,136-10,150.
- Reed, M.H., 1982: Calculation of multicomponent chemical equilibria and reaction processes in systems involving minerals, gases and aqueous phase. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46, 513-528.
- Reed, M., and N. Spycher 1984: Calculation of pH and mineral equilibria in hydrothermal waters with application to geothermometry and studies of boiling and dilution. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 48, 1479-1492.

- Sovéska Vísindaakademían 1990: Seismic noise studies in Öxarfjörður, N-Iceland. A preliminary report. Handrit í vörslu Orkustofnunar.
- Stefán Arnórsson og Einar Gunnlaugsson 1985: New gas geothermometry for geothermal exploration. Calibration and application. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 49, 1307-1325.
- Stefán Arnórsson, Sven Sigurðsson og Hörður Svavarsson 1982: The chemistry of geothermal waters in Iceland. I. Calculation of aqueous speciation from 0° to 370°C. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46, 1513-1532.
- Stefán Arnórsson, Einar Gunnlaugsson og Hörður Svavarsson 1983a: The chemistry of geothermal waters in Iceland. II. Mineral equilibria and independent variables controlling water compositions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 47, 547-566.
- Stefán Arnórsson, Einar Gunnlaugsson og Hörður Svavarsson 1983b: The chemistry of geothermal waters in Iceland. III. Chemical geothermometry in geothermal investigations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 47, 567-577.
- Stefán Arnórsson, Auður Andrésdóttir og Árný Erla Sveinbjörnsdóttir 1993: The distribution of Cl, B, δD and $\delta^{18}O$ in natural waters in the Southern Lowlands in Iceland. *Geofluids '93*. Contributions to an International Conference on fluid evolution, migration and interaction in rocks (ritstj. Parnell, Ruffell & Moles). Torquay, 313-318.
- Tole, M.P., Halldór Ármannsson, Pang Zhonghe og Stefán Arnórsson 1993: Fluid mineral equilibrium calculations for geothermal fluids and chemical geothermometry. *Geothermics*, 22, 17-37.
- Valgarður Stefánsson 1977: Jarðhiti í Axarfirði. Ágrip á ráðstefnu um Íslenska jarðfræði.
- Valgarður Stefánsson 1984: Um háhitarannsóknir í Öxarfirði á árinu 1984. Orkustofnun, greinargerð VS-84/01, 6 s.

ABSTRACT

The results from an extensive geothermal research since early 1980ies to date in the Öxarfjörður region are described. Three active northward trending fissure swarms cross the region from west to east, the Theistareykir -, the Krafla - and the Fremrináma fissure swarm. The Öxarfjörður lowland is composed of a river delta formed in a subsidence depression related to two of these fissure swarms. The en echelon arranged fissure swarms are part of the neovolcanic rift zone which crosses Iceland from SW to NE, being a part of the Mid-Atlantic ridge system. The NE-Iceland rift zone is shifted about 60 km westwards in the Öxarfjörður region to join with the Kolbeinsey oceanic ridge. A huge sedimentary depression is formed in this transform zone, about 100 km long E-W and 40 km wide N-S. The activity in the rift zone, for the last 1 m.ys. or so, within the transform zone itself is characterized by several en echelon arranged and rift-related subsidence troughs, the Öxarfjörður depression being formed in such a manner. The relatively young sedimentary succession in Öxarfjörður thickens towards the north, approaching 1 km in thickness according to reflection seismic data.

Geothermal surface manifestations are widespread in Öxarfjörður, but are chiefly located within the three fissure swarms. The highest surface temperatures of 100°C, is found in the Skóglón hot spring area, farthest to the north within the Krafla fissure swarm. Geothermometry applied on the surface hot springs suggested reservoir temperatures of 135°C. In the deepest drillhole (450 m) at Skógalón T approaches 160°C. Gas geothermometry on the well fluid suggests at least 220°C for the reservoir at depth. Fossil T of 200-250°C, are observed in secondary mineralogy and measured T_h in fluid inclusions within the well.

Resistivity measurements show an approximately 10 km² low-resistivity area (2-5 Ωm) further to the south at the Bakkahlaup river. Below the resistivity anomaly, high resistivity is observed - a property which characterizes many of the Icelandic high-T areas. The east-west resistivity boundaries of the anomaly clearly relate to the Krafla fissure swarm. High resistivity south of the anomaly and within the fissure swarm suggests that cold groundwater may have an easy access towards the high-T area. Two smaller low-resistivity anomalies are observed outside the main anomaly, one being at the Skógalón hot spring field.

Rocks of P-wave velocity about 5 km/s are found at shallower depth in the Öxarfjörður depression than elsewhere within the active rift zone in Iceland. This may suggest that old basaltic crust may be hidden below the sediments. The depth to the high-velocity rock is shallowest within the assumed high-temperature geothermal field, which can be explained by high-temperature activity and T upto 250°C at 1200 m depth. Also, unusually intense microseismic activity is observed at the SE-boundary of the resistivity anomaly, close to active faults, suggesting that intense heat transfer between fluid and hot rock may be taking place.

The overall result from the geothermal research suggests that an active high-T geothermal systems is located within the Krafla fissure swarm in Öxarfjörður. It may be extending across 10 km² and is elongated N15°W. Its northern boundary is not known while the active fissure swarm delineates it to the east and west. Groundwater is assumed to have an easy access to the high-T system in the south. In a sense the high-T system may be visualized as submerged in groundwater, explaining the insignificant surface manifestation as compared to conventional high-temperature systems hosted in volcanic rocks elsewhere in Iceland.

The next step in the research program of this unique high-T geothermal system in Öxarfjörður necessarily involves a deep geothermal research well. The drilling of a 1200-1500 m deep well in the southern part of the system is recommended.