



ORKUSTOFNUN  
Jarðhitadeild

**Magnús Ólafsson  
Guðmundur Ómar Friðleifsson  
Jón Eiríksson  
Hilmar Sigvaldason  
Halldór Ármannsson**

**KÖNNUN Á UPPRUNA GASS Í ÖXARFIRÐI  
Borun og mælingar á holu ÆR-04 við Skógalón**

**OS-92031/JHD-03**

Reykjavík, júlí 1992

ISBN 9979-827-10-6



**ORKUSTOFNUN**  
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verknr. 504000

**Magnús Ólafsson**  
**Guðmundur Ómar Friðleifsson**  
**Jón Eiríksson**  
**Hilmar Sigvaldason**  
**Halldór Ármannsson**

## **KÖNNUN Á UPPRUNA GASS Í ÖXARFIRÐI**

**Borun og mælingar á holu ÆR-04 við Skógalón**

**OS-92031/JHD-03**

Reykjavík, júlí 1992

ISBN 9979-827-10-6



## EFNISYFIRLIT

<b>SAMANTEKT OG NIÐURSTÖÐUR</b>	<b>7</b>
<b>1. INNGANGUR</b>	<b>11</b>
1.1 Fyrri rannsóknir á jarðhita í Öxarfirði	11
1.2 Markmið rannsóknarborunar við Skógalón	11
<b>2. MYNDUN OLÍU OG GASS</b>	<b>13</b>
2.1 Um uppruna kolvatnsefna	13
2.2 Olía og gas á Íslandi	17
<b>3. JARÐFRÆÐILEGAR AÐSTÆÐUR</b>	<b>19</b>
3.1 Jarðfræði setlagadælda	19
3.2 Jarðfræðileg bygging Öxarfjarðar og umhverfis	20
3.3 Setlagadældir á hliðrunarbeltum	27
3.4 Gerð og uppruni setlaga í Öxarfirði	27
<b>4. AÐDRAGANDI OG BORUN HOLU 4</b>	<b>30</b>
<b>5. JARÐLAGAGREINING</b>	<b>33</b>
5.1 Svarfgreining og kjarnalýsing	33
5.2 Ummyndunarsteindir, lífrænar leifar og hitaástand	40
5.3 Sprunguathugun og holrými	43
<b>6. BORHOLUMÆLINGAR</b>	<b>48</b>
6.1 Hitamælingar	48
6.2 Berghiti	52
6.3 Jarðlagamælingar	53
6.4 Hallamælingar	56
6.5 Mælingar á kjarna	57
6.6 Samanburður á kjarna og mælingum	58
6.7 Eðlisþyngd kjarnans	61
<b>7. SÝNATAKA OG EFNAGREININGAR</b>	<b>62</b>
7.1 Efnasamsetning vatns	62
7.2 Efnasamsetning gass	65
7.3 Lífrænt gas við Skógalón	67
<b>HEIMILDIR</b>	<b>72</b>
<b>ENGLISH SUMMARY</b>	<b>77</b>

## TÖFLUSKRÁ

Tafla 1. Helstu upprunahópar náttúrulegra kolvatnsefna	15
Tafla 2. Helstu upplýsingar um borun hola 1-4	31
Tafla 3. Yfirlit um jarðlög í holu 4	39
Tafla 4. Heildarmagn lífrænna efna í seti	41
Tafla 5. Yfirlit um allar borholumælingar í holum í landi Ærlækjarsels	49
Tafla 6. Vatnsæðar í holum 3 og 4	52
Tafla 7. Hiti í borholum til áætlinar á berghita	52
Tafla 8. Hallamælingar í holum 3 og 4	56
Tafla 9. Niðurstöður mælinga á kjarnasýnum	58
Tafla 10. Samanburður á virkum poruhluta í kjarna og poruhluta út frá nifteindarmælingum	58
Tafla 11. Mælingar til að reikna eðlisþyngd á kjarnabútum	61
Tafla 12. Efnasamsetning vatns úr holum við Skógalón	63
Tafla 13. Efnahiti vatns úr holum við Skógalón	64
Tafla 14. Efnasamsetning gass úr holum við Skógalón	66
Tafla 15. Heiti lífrænna efna og efnaformúlur þeirra	67
Tafla 16. Efnasamsetning lífræns gass	68

## MYNDASKRÁ

Mynd 1. Staðsetning jarðhita og borhola við Skógalón	12
Mynd 2. Flokkun gasa úr kolvatnsefnum	14
Mynd 3. Kort af Íslandi og nágrenni þess. Nokkrir fundarstaðir kolvatnsefna	16
Mynd 4. Jarðfræðikort af norðurströnd Íslands	22
Mynd 5. Jarðfræðikort af Öxarfirði og nágrenni	23
Mynd 6. Verktími og áætlun við borun holu 4	32
Mynd 7. Einfaldað jarðlagasnið af holu 4	35
Mynd 8. Jarðlagasnið holu 4	36
Mynd 9. Eðjustraumaset á 328 m dýpi	37
Mynd 10. Lagskipting silts og sands á 333 m dýpi	37
Mynd 11. Uppbrotin siltlög í sandsteini á 358 m dýpi	37
Mynd 12. Siltsteinsklumpar í ffingerðum sandsteini á 358,5 m dýpi	37
Mynd 13. Syrpa af ótrufluðum sandsteinslögum á 409 m dýpi	38
Mynd 14. Fellingar í sandsteini og siltsteini á 409 m dýpi	38
Mynd 15. Jarðlög, ummyndunarsteindir og TOC í holu 4	45
Mynd 16. Sprungufjöldi, kjarnaheimta og poruhluti í kjarna	46
Mynd 17. Sprungufjöldi og ummyndunarsteindir í kjarna	47
Mynd 18. Hitamælingar í holu ÆR-01	50
Mynd 19. Hitamælingar í holu ÆR-02	50
Mynd 20. Hitamælingar í holu ÆR-03	50
Mynd 21. Hitamælingar í holu ÆR-03	50
Mynd 22. Hitamælingar í holu ÆR-03	51
Mynd 23. Hitamælingar í holu ÆR-04	51
Mynd 24. Berghiti í jarðhitakerfinu við Skógalón	53
Mynd 25. Jarðlagamælingar úr holu 3	54
Mynd 26. Jarðlagamælingar úr holu 4	55
Mynd 27. Hliðrun hola 3 og 4 frá lóðlfnu	57
Mynd 28. Virkur poruhluti og heildarporuhluti í kjarna	59
Mynd 29. Jarðlög og poruhluti í holu 4	60
Mynd 30. Hiti og rennsli úr holu 4	62
Mynd 31. Kalsítmættun vatns úr holum við Skógalón	64
Mynd 32. Jafnvægi nokkurra steinda við vatn úr holu 4	65
Mynd 33. $\delta^{13}\text{C}$ í metani af mismunandi uppruna	69
Mynd 34. Samband $\delta^{13}\text{C}$ og $\delta\text{D}$ í metangasi af mismunandi uppruna	70
Mynd 35. Samband $\delta^{13}\text{C}$ í metani og heildarmagns kolvatnsefna	70
Mynd 36. Samband $\delta\text{D}$ í metani og heildarmagns kolvatnsefna	71
Mynd 37. Samband $\delta\text{D}$ í metani og grenndarvatni	71



## SAMANTEKT OG NIÐURSTÖÐUR

Á árunum 1987 og 1988 vann Orkustofnun að rannsóknum á jarðhita og ferskvatni í Öxarfirði í þeim tilgangi að kanna aðstæður til fiskeldis. Við rannsóknir á jarðhitagasi úr borholum, sem þá voru boraðar við Skógalón, kom í ljós að gasinu fylgdi vottur af lífrænu gasi, svipuðu því sem finnst á olíuvinnslusvæðum.

Tilgangur borunar holu 4 við Skógalón árið 1991 var að kanna nánar uppruna þessa lífræna gass og fékkst til verksins sérstök fjárveiting á grundvelli rannsóknaráætlunar Orkustofnunar. Rannsóknaráætlun gerði ráð fyrir dýpkun holu 3 við Skógalón úr 320 m í 700 m með kjarnabor. Við undirbúning verksins veturinn 1991 varð þó að gera þá breytingu, m.a. vegna andstöðu borverktakans og heimamanna, að í stað dýpkunar holu 3 var ákveðið að bora nýja holu, holu 4.

Til að finna skýringu á uppstreymi lífræns gass voru afmarkaðir eftirfarandi verkþættir:

- Greining á tegund, magni og þroskastigi lífrænna efna.
- Greining á gasi.
- Setfræðileg greining jarðlaganna.

Því miður tókst borun holu 4 ekki sem skyldi og endanlegt holudýpi varð aðeins 450 m í stað þeirra 700 m sem áætlunin hafði gert ráð fyrir. Var þar m.a. um að kenna ónógum undirbúningi verktakans. Alls náðust 123 m af kjarna en svarf var greint úr efstu 325 m holunnar.

Gas og olfa myndast úr lífrænum efnum (kerógeni) í setlagafyllingum og talið hefur verið að myndunarferlið taki milljónir ára. Nýlegar rannsóknir hafa þó sýnt, að olfa getur myndast á aðeins nokkur þúsund árum við ákveðin jarðfræðileg skilyrði, t.d. jarðhitavirkni. Til að lífræna efnið varðveitist í setlögum verður umhverfið að vera súrefnissnautt, þannig að kjöraðstæður til olfuumyndunar eru í setlagatrogum þar sem mikið framboð er af lífrænum leifum, en súrefni í umhverfinu er af skornum skammti.

Lítið er vitað um magn kerógens í setlögum á Íslandi eða íslenska landgrunninu. Framleiðni lífræns kolefnis í hafinu umhverfis landið nú á dögum er með því mesta sem þekkt á jörðinni og ætla má að í jarðsögu landsins hafi skilyrði verið með þeim hætti að framleiðni lífræns efnis hafi verið nægilega mikil til að kerógenauðug setlög næðu að myndast. Aftur á móti er erfiðara að átta sig á því hvort súrefnissnauðar aðstæður hafi skapast þannig að kerógenið hafi varðveist og setið orðið að móðurbergi fyrir olfu eða gas. Ekki er ólíklegt að stór eldgos með miklu öskufalli og jökulhlaup, þar sem frambuður á silti og leir hefur verið mikill, gætu hafa kaffært lífrænan gróður og skapað súrefnissnauð skilyrði í setlögum.

Öxarfjörður liggur á mótum rekbeltis sem liggur yfir landið frá SV til NA og hliðrunarbeltis sem kennt er við Tjörnes, en algengt er að setlagadældir myndist þar sem rekbelti hliðrast til. Innan Tjörnesbrotabeltis finnast þykkustu setlög á Íslandi og landgrunni þess, en beltið spannar svæðið vestan frá Eyjafjarðarál austur að Melrakkasléttu, u.þ.b. 40 x 100 km. Setlagabykkt er allt að 4 km, en víða minni.

Efsti hluti setlaganna í holu 4, niður á 65 m dýpi, er hluti af óseyri sem Jökulsá á Fjöllum hefur byggt út í Öxarfjörð og eru lög þessi að mestu gerð úr grófum sandi og völuþergi. Þar fyrir neðan tekur við fíngræðari sandur með einstaka sjávarsteingervingum og bera setlögin vott um að óseyrin hafi verið að byggjast út í Öxarfjörð. Sandlög eru síðan yfirgnæfandi allt niður á 140 m dýpi og er trúlegt að setið hafi safnast fyrir í e.k. marbakka við neðri mörk öldurótsdýpis. Þar fyrir neðan taka við eðjulög og mjög fínkorna sandlög allt niður að 210 m dýpi. Á dýptarbilinu 210-250 m er setið um 50-75 % silt auk fíns sands og frá 250 m niður á 325 m, þar sem kjarnataka hófst, er setið að mestum hluta leirkennt silt. Talið er að fínu sand- og siltlögin hafi borist eftir sjávarbotni



með eðjustraumum eða öðrum botnstráumum.

Efsti hluti kjarnans er fínkorna sandur og silt, með einstaka steinum sem hafa beygt og sveigt mjúkt setið. Á 325-330 m dýpi sést dæmigert eðjustraumaset og greinilegt er að á þeim tíma er það settist til, hefur strönd Öxarfjarðar legið mörgum kílómetrum innar en nú. Setið hefur lítið náð að stífna milli þess sem spildur úr óseyrarhljóðinni skriðu fram á sléttari sjávarbotn. Á 332 m dýpi tekur við flóknari lagskipting þar sem eðja og sandur hafa þvælst saman. Þetta bendir einnig til hruns í óstöðugu umhverfi. Ögn neðar verður setið heldur grófara, og getur það bent til aukinna strauma og framburðar þannig að ströndin hafi verið að færast utar á ný, t.d. vegna lækkandi sjávarstöðu. Neðan 365 m dýpis tekur við illa aðgreind blanda af hálfnúnum hnullungum, sandi og eðju, svokallað dausberg (diamictite), sem hefur sennilega byggst upp á sjávarbotni undir íshellu. Á bilinu frá 365 m niður á 385 m eru þrjú slík lög, en þar fyrir neðan, niður á 415 m dýpi, er lóðgreint eðjustraumaset sem myndast hefur framan við óseyri. Á bilinu 415-420 m er brúnn leir í kjarnanum og bendir hann til rólegra setumhverfis, allfjarri strönd. Neðsti hluti kjarnans samanstendur af völubergi og dausbergi sem eru aðskilin af silti. Þetta bendir til þess að sá hluti hafi sest til í vatni þar sem straumar hafa verið breytilegir.

Fyrstu merki um áhrif jökla á setmyndun í Öxarfirði koma fram á 350 m dýpi. Setlöggin þar fyrir ofan bera vott um áflæði sem síðan snýst yfir í afflæði þar sem sandar Jökulsár á Fjöllum hafa byggst út yfir eldri óseyrahjóða- og fjarðaset. Líklegt er að þessi sethluti hafi myndast á síðustu 10.000 árum og gætu dausbergslöggin verið frá síðustu ísöld. Ekki er talið líklegt að elstu setlög í holu 4 séu meira en nokkur hundruð þúsund ára gömul.

Niðurstöður mælinga á heildarmagni lífræns efnis (TOC) í völdum sýnum úr holu 4 sýndu svo lág gildi (<0,02-0,05%) að ekki var ástæða til starlegrar rannsóknar á lífrænu efni í berginu. Uppruni lífræna gassins í Öxarfirði er því enn á huldu og að öllum líkindum er hans að leita dýpra í setlögum.

Ummyndun bergsins og mælingar á vökvabóluhita gefa sterklega til kynna að Skógalónssvæðið sé háhitasvæði fremur en lághitasvæði eins og talið hefur verið fram til þessa. Áhrif þess á lífræn efni geta verið með tvennum hætti. Annars vegar gæti hár hiti hraðað nýmyndun olfugass úr lífrænum leifum, en hins vegar gæti mjög hár hiti brotið niður eldri jarðolíu og þannig leitt til útstreymis á lífrænu gasi. Ekki var hægt að greina þar á milli þar sem ekki tókst að ná í fljóttandi eða föst kolvatnsefnissamböð með borun holu 4.

Að meðaltali eru 1-2 sprungur í hverjum kjarnametra. Breidd fylltra sprungna er á bilinu <0,1 mm til 7 mm. Um 70% sprungna eru mjórri en 1 mm og 90% mjórri en 2 mm. Athugum á sprungumynstri sýnir að sprungurnar eru af þrem gerðum, þ.e. reglulegar sprungur, misgengisprungur og togsprungur. Sprungufyllingarnar gefa til kynna að allar sprungugerðir séu myndaðar samtímis, þ.e. í sama spennusviði gliðunar og sigs.

Röð ummyndunar bendir til að staðbundin ryðmyndun, lághitazeólítar og smektít hafi myndast á undan háhitasteindum (kvars, wairakít-blandlagsleir) sem síðan er fylgt eftir af steindum mynduðum við núverandi hita í opna hluta holunnar, þ.e. kalsíti, mordeníti og kílnoptilólíti. Þetta bendir til þess, að jarðhitakerfið, allavega nánasta umhverfi holu 4, hafi hitnað upp, en síðan kólnað niður í þann hita sem nú ríkir.

Frá sjónarhóli jarðhitánýtingar er hola 4 nokkuð góð jarðhitahola. Afköst hennar hafa verið metin á a.m.k. 10 kg/s af 100°C heitu vatni, og hitamælingar sýna að aðalvatnsæð hennar er á 360-370 m dýpi og hiti er um 150°C.

Hitamælingar í borholum við Skógalón sýna að jarðhitakerfið er lagskipt. Þannig er t.d. lárétt rennsli á 30-40°C heitu vatni á 150-190 m dýpi en þar fyrir neðan vex berghiti.

Viddarmælingar í holu 4 sýna að frá fóðringarenda á 325 m dýpi og niður á 365 m dýpi eru holu-veggir sléttir en þar fyrir neðan er holuvídd mjög breytileg. Allur opni hluti holunnar er meira en 6" að þvermáli, allt upp í 10", þrátt fyrir að holan hafi verið boruð með 3" borkrónu.

Poruhluti setlaga var reiknaður út frá nifteindamælingum og reyndist hann vera á bilinu 26-62 %, hæstur í dausbergi á 360-370 m dýpi. Útreiknað kfsilsýruinnihald reyndist vera á bilinu 42-58 %, enda nánast eingöngu um basískt set að ræða.

Niðurstöður lektarmælinga voru þær, að lektin mældist víðast hvar á bilinu 0,03-0,07 mD (milli-Darcy), en á dýptarbilinu 410-415 m mældist hún verulega hærri, 0,2-0,3 mD. Virkur poruhluti setlaga, sem segir til um hlutfall opinna og samtengdra holrúma á móti heildarrúmmáli, mældist nokkuð hár og spannaði bilið 25-42 %. Langflest gildin falla þó milli 36 og 40 %. Bergeðlisþyngd mældist á bilinu 2,65-3,00 g/cm<sup>3</sup>, en eðlisþyngd einstakra kjarnabúta beint úr holunni mældist 1,5-2,7 g/cm<sup>3</sup>.

Vatn úr holum við Skógalón er fremur salt og efnaríkt og hentar því varla til beinnar nýtingar.

Efnahiti vatns úr holu 4 reiknast á bilinu 160-190°C og útreiknaður gashiti er svipaður.

Gasið úr holunum er að langmestum hluta köfnunarefni, en magn lífrænna gasa annarra en metans mælist á bilinu 0,2-0,5 %. Í gasi úr holu 4 greindist lítilsháttar koldíoxíð til merkis um hærri hita í henni en í öðrum holum við Skógalón.

Í gasi úr borholum við Skógalón hafa greinst eftirtalin kolvatnsefni auk metans: etan, própan, ísóbútan, n-bútan, neo-pentan, íso-pentan, n-pentan, ísó-hexan, n-hexan og benzen.

Heildarmagn kolvatnsefna með hærri mólþunga en metan er á bilinu 4-17 % þegar andrúmsloftsgöms hafa verið dregin frá, en magn metans reiknast á þennan hátt 83-96 %.

Niðurstöður efnagreininga og ísótópamælinga benda eindregið til þess að kolvatnsefnin hafi myndast fyrir tilverknað hita á lífræn efni í setlögum. Samkvæmt flokkun jarðgass frá mismunandi stöðum í heiminum þá flokkast lífræna gasið við Skógalón ýmist með olfu- eða kolagasi, sem bendir til þess að hluti þess a.m.k. hafi náð verulegum hita. Ekki tókst að greina á milli þess hvort gasið væri eingöngu af hafrænum eða landrænum toga.

Sýni af gasi úr holu 4 hefur verið aldursgreint og fyrstu niðurstöður benda til þess að það sé eldra en 20.000 ára og líklega miklu eldra.

Með þeim hefðbundnu rannsóknaraðferðum sem lýst hefur verið í skýrslu þessari hefur ekki tekist að finna uppruna lífræna gassins í efstu 450 m setlagabunkans í Öxarfirði. Í ljósi þeirra upplýsinga sem þó liggja fyrir koma helst þrjár hugsanlegar skýringar til greina:

- Að gasið sé upprunnið úr sjávarsetlögum á dýptarbilinu 450-700 m, þar sem berggrunnur tekur væntanlega við. Það var einmitt tilgangur rannsóknarinnar að kanna setlöginn niður á 700 m dýpi.
- Hugsanlegt er, að upprunans geti verið að leita í setlögum sem talið er að leynist undir hraunlögum, neðan u.þ.b. 1000 m dýpis. Óvissa ríkir þó um þessi dýpri setlög, en þau gætu tengst stóru setlagadældunni úti fyrir norðurströnd landsins.
- Lífræna gasið gæti hafa myndast við upphitun á leifum af landgróðri, t.d. surtarbrandi, sem leynast í hraunlagastaflanum neðan 700 m dýpis. Vitað er um nokkur þykk surtarbrandslög milli hraunlaga á Tjörnesi og hugsanlegt er talið að þau gætu náð austur yfir Öxarfjörð.

Aldursgreining gass úr holu 4, þó ónákvæm sé, bendir til þess að uppruna lífræna gassins sé að leita í setlögum neðan við núverandi botn holu 4 þar sem líklegt er talið að setlög ofan a.m.k. 350 m dýpis hafi myndast á síðustu 10.000 árum.

Þegar hugað er að framhaldi rannsókna á lífrænu gasi í Öxarfirði má benda á þrjú atriði sem telja má sem eðlilegt framhald:

- Sjálfsagt og eðlilegt er að ljúka við holu 4 og reyna að komast niður úr setlögnum þannig að ná megi upphaflegu markmiði rannsóknarinnar, að rannsaka setlöggin niður á 700 m dýpi.
- Til að kanna nánar gasútreymi úr setlögum í Öxarfirði má bora grunnar holur (1-3 m) og safna sýnum af seti og greina gas í setinu. Þetta er einföld og ódýr aðferð, en getur gefið gagnlegar upplýsingar um gasútreymi úr setlögum í Öxarfirði, t.d. hvort það er eingöngu tengt jarðhitnum við Skógalón eða ekki.
- Nauðsynlegt er að ljúka úrvinnslu á jarðeðlisfræðilegum mælingum sem gerðar voru fyrir nokkrum árum af skipi á Öxarfirði og einnig þeim sem Sovéskir vísindamenn gerðu á söndunum í Öxarfirði. Úrvinnsla úr þessum gögnum getur hugsanlega gefið upplýsingar um setlöggin sem talið er að geti leynst neðan hraunlaganna, líklega neðan u.þ.b. 1000 m dýpis.

## 1. INNGANGUR

### 1.1 Fyrri rannsóknir á jarðhita í Öxarfirði

Á árunum 1987 og 1988 vann Orkustofnun að rannsóknarverkefni í Öxarfirði í samvinnu við sveitarfélögin þar. Verkefnið miðaði að því að afla grunnupplýsinga um ferskvatn og jarðhita á svæðinu og að kanna sérstaklega aðstæður til fiskeldis í austanverðum Öxarfirði (Lúðvík S. Georgsson o.fl., 1989).

Niðurstöður rannsókna leiddu í ljós, að umtalsverðan jarðhita er að finna undir söndum Öxarfjarðar, og margt bendir til þess að þar megi finna eitt af háhitasvæðum landsins. Jafnframt er nú ljóst að jarðhitann er að finna í þykkum setlagabunka en af þeim sökum eru jarðfræðilegar aðstæður á svæðinu um margt frábrugðnar aðstæðum á jarðhitasvæðum í öðrum hlutum landsins. Jarðeðlisfræðilegar mælingar benda til þess að setlagabunkinn geti verið 700 til 800 m á þykkt. Hluti af ofangreindu rannsóknarverkefni var að bora nokkrar rannsóknarholur eftir jarðsjó og jarðhita. Tvær þeirra, holur 1 og 3, voru staðsettar á jarðhitasvæðinu við Skógalón í landi Ærlækjarsels. Boranir þar gáfu mjög góðan árangur. Hóla 3, sem er 322 m djúp gefur t.d. 40-50 l/s í sjálfrennsli af 96°C heitu vatni.

Sýni af vatni og gasi voru tekin úr holunum við Skógalón fljótlega eftir að borun lauk og kom þá í ljós að nokkurt magn lífræna gastegunda greindist í gassýnum úr báðum holunum. Sýni voru send til Bretlands til nánari greininga og niðurstöður efnagreininga þar staðfestu tilvist kolvatns-efna með lengri kolefniskeðjur en metan og því frábrugðið venjulegum háhitagösum. Fundur þessa lífræna gass er einstæður hér á landi.

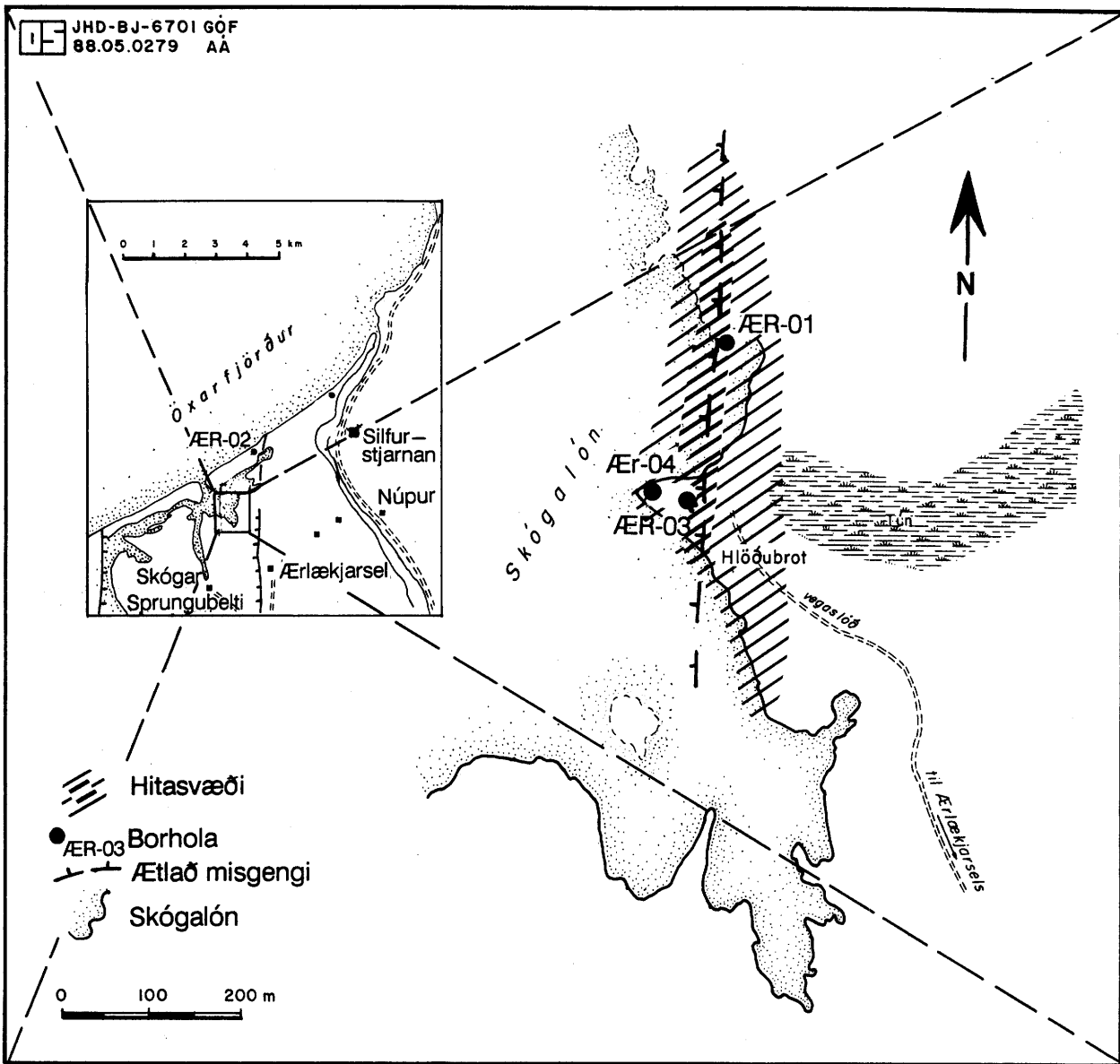
### 1.2 Markmið rannsóknarborunar við Skógalón

Á fjárlögum ársins 1991 fékk Orkustofnun sérstaka fjárveitingu, að upphæð 8,5 Mkr, til rannsókna á uppruna lífræns gass í borholum í Öxarfirði. Fjárveitingin byggðist á rannsóknaráætlun, sem sett var fram í greinargerð Orkustofnunar í apríl 1990 (Magnús Ólafsson o.fl., 1990). Þar var gert ráð fyrir að aðalkostnaður við rannsóknina yrði dýpkun holu 3 úr 320 m í 700 m með kjarnabor. Við undirbúning verksins var sú breyting gerð, að í stað þess að dýpka holu 3 var ákveðið að bora nýja holu (holu 4). Var það gert vegna andstöðu borverktaka og heimamanna í Öxarfirði við dýpkun holu 3.

Hóla 4 (ÆR-04) var boruð til þess að finna skýringu á uppstreymi lífræns gass við Skógalón í Öxarfirði (mynd 1). Til þess að ná þessu marki voru afmarkaðir þrjár rannsóknarþættir. Í fyrsta lagi var um að ræða greiningu á tegund, magni og þroskastigi lífræna efna, í öðru lagi greiningu á gasi, þar með töldu lífrænu gasi, og í þriðja lagi nákvæma greiningu setlaganna og jarðhitaummyndunar þeirra. Fylgst var með gasstreymi meðan á borun stóð, og sérstök setlagasýni voru tekin til greiningar á gasi í því skyni að hugsanlega fyndust gasgeymar og/eða gasæðar í setlög-unum.

Í skýrslu þessari verða birtar niðurstöður rannsóknarinnar. Aðaláhersla er lögð á lýsingu kjarnans og túlkun á efnasamsetningu gass úr holum við Skógalón. Auk þessa verður fjallað ítarlega um jarðfræðilega byggingu Öxarfjarðar og tengsl hans við gosbeltið á Norðurlandi og Tjörnesbrotabeltið.

Mælingar á lífrænum efnunum í svarfi og kjarna, svo og mælingar á poruhlutfalli o.fl. voru gerðar hjá dönsku jarðfræðistofnuninni (Danmarks Geologiske Undersøgelse: DGU) sem sendi jarðfræðing á borstað að eigin frumkvæði. Auk þess hefur W.G. Darling við bresku jarðfræðistofnunina (British Geological Survey: BGS) séð um greiningar á gasi úr öllum holum við Skógalón að beiðni Orkustofnunar.



Mynd 1. Staðsetning jarðhita og borhola við Skógalón.

## 2. MYNDUN OLÍU OG GASS

Um langt skeið hefur það verið ríkjandi skoðun meðal jarðvísindamanna að olía og jarðgas myndist við niðurbrot og þroskun lífræna efna á löngum tíma í þykkum setfyllingum. Annars vegar hafa menn talið að jarðolían hafi myndast úr leifum sjávarlífvera (hafrænt), en hins vegar að náttúrulegt jarðgas hafi myndast úr leifum lífvera sem uxu á landi (landrænt). Líta má á þetta sem meginreglu varðandi myndun olíu annars vegar og gass hins vegar, en á mörgum svæðum fylgjast að olía og gas. Á þeim langa tíma sem þetta myndunarferli tekur, fer lífræna efnið í gegnum ýmis þroskastig sem leiða til myndunar á náttúrulegu gasi og jarðolíu. Olían og gasið flytjast síðan frá myndunarstað sínum (móðurberginu) og safnast fyrir við e.k. gildirur, oft í vinnanlegu magni, við hræringar jarðskorpunnar. Yfirleitt hefur verið talið að þetta myndunarferli taki miljónir ára.

Gas og olía myndast því úr lífrænum leifum í setlögum. Í sjónum eru ljóstíllíffandi þörungar helsta uppspretta lífræns kolefnis. Framleiðni þeirra er einkum háð sólargeislun og framboði á næringarefnum. Hún er yfirleitt mest í yfirborðssjó á grunnsævi (t.d. landgrunnum) og þar sem næringarríkur sjór vellur upp eða ár bera mikið af næringarefnum til sjávar. Á landi er það loftslag á hverjum stað, einkum úrkoma, sem ræður framleiðni plantna með tilliti til lífræns kolefnis. Lífræn efni sem varðveitast í seti kallast einu nafni kerógen. Til þess að þau varðveitist verður umhverfið að vera súrefnissnautt, en í því felst að þörf fyrir súrefni er meiri en framboð. Það er einkum rotnun lífvera sem tekur til sín súrefni, en í vatni berst það inn í umhverfið með hafstraumum. Undir beru lofti varðveitist lítið af kerógeni, en í vatni geta mikil lífræn framleiðni og kyrrstaða vatns eða sjávar stuðlað að upphleðslu kerógenríkra setlaga í súrefnissnauðu umhverfi.

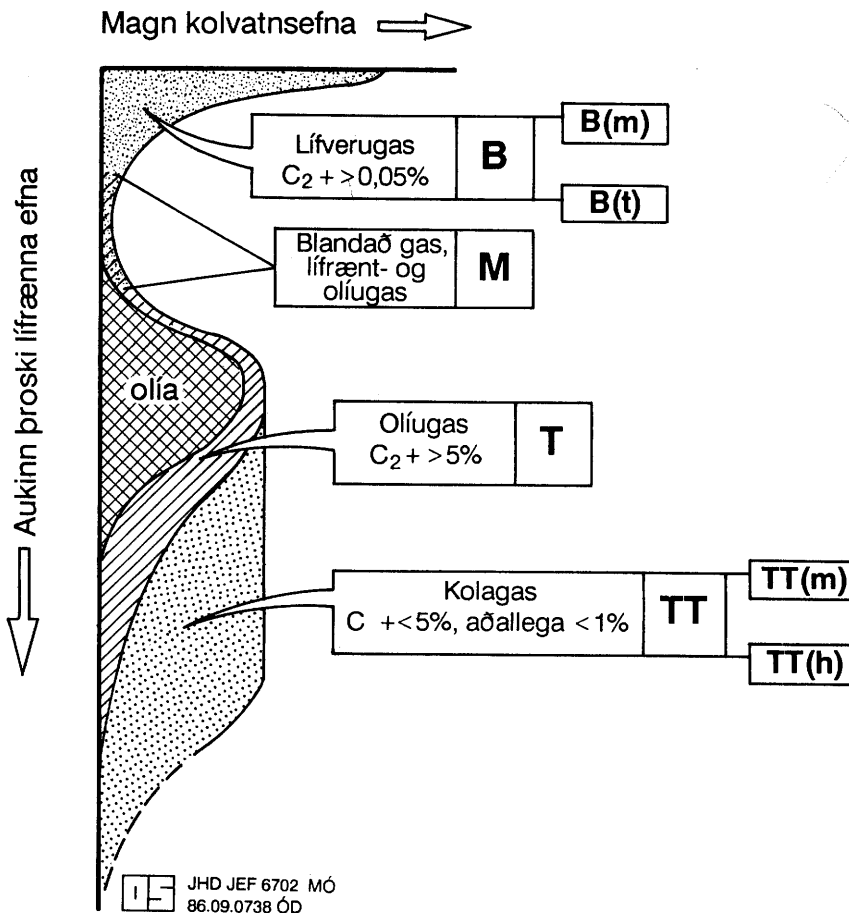
### 2.1 Um uppruna kolvatnsefna

Í öllum jarðhitakerfum finnst nokkurt magn af gasi sem er oftast af öðrum uppruna en jarðgas. Efnasamsetning jarðhitagass ræðst að nokkru leyti af hita í þeim jarðhitakerfum sem það kemur úr. Á háhitasvæðum eru aðalgastegundir koldíoxíð ( $\text{CO}_2$ ), brennisteinsvetni ( $\text{H}_2\text{S}$ ) og vetni ( $\text{H}_2$ ) en á lághitasvæðum er gasið að langmestu leyti köfnunarefni ( $\text{N}_2$ ). Auk þessara efna finnast aðrar gastegundir í mismiklum mæli, þar á meðal kolvatnsefni, einkum metan ( $\text{CH}_4$ ).

Lengst af hefur áhugi manna á kolvatnsefnissamböndum í jarðhitagasi beinst að rannsóknum á metan-gasi og notagildi kolefnisísótópa í metani og koldíoxíði til að áætla hita í jarðhitakerfum (t.d. Panichi o.fl., 1977).

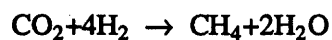
Fyrstu upplýsingar um kolvatnsefni með lengri kolefniskeðjur en metan ( $\text{C}_{2+}$ ) í jarðhitakerfum komu frá rannsóknum á gasi á jarðhitasvæðum í Yellowstone þjóðgarðinum (Gunter og Musgrave, 1971). Síðari tíma rannsóknir hafa síðan leitt í ljós að slík kolvatnsefnissambönd er að finna víðar í jarðhitakerfum ef grannt er skoðað. Sérstaklega á þetta við jarðhitakerfi sem koma upp í þykkum setlagabunkum (t.d. Nehring og Truesdell, 1978).

Útan jarðhitasvæða er kolvatnsefnisgösum yfirleitt skipt í tvo hópa eftir uppruna, þ.e. lífmynduð (biogenic) og hitamynduð (thermogenic). Schoell (1980) hefur kannað ísótópahlutföll í kolvatnsefnisgösum frá ýmsum svæðum og flokkað þau eftir uppruna á þann hátt sem sýnt er á mynd 2. Nokkur þeirra gasa, sem hann fjallar um, falla í hvorugan flokkinn og telur hann að þau séu e.t.v. að einhverju leyti ólífmynduð (abiogenic), og flokkar þau undir blandaðan uppruna (M). Ennfremur skiptir hann lífmynduðu gasi og hitamynduðu gasi eftir því hvort uppruni er landrænn (B(t)) eða hafrænn (B(m)), hitamynduðu gasi í blautgas (olíugas, T) og þurrgas (TT), sem er þroskaðra og deilist enn frekar í undirhópa eftir því hvort uppruni er landrænn (TT(h)) eða hafrænn (TT(m)). Hann leiðir rök að því, að lífmyndað gas sé oftast myndað í tveimur þrepum, þ.e. í fyrstu myndist  $\text{CO}_2$  úr rotnandi lífrænum leifum og  $\text{H}_2$  úr vatni fyrir tilverknað metanfæla (non-methanogens), en þessi efni sameinist síðan með aðstoð metanmyndara (methanogens) á eftirfar-

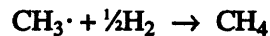


Mynd 2. Flokkun gasa úr kolvatnsefnum.

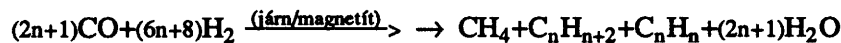
andi hátt:



Í einstöku tilfellum virðist stöðeindin  $\text{CH}_3\cdot$  myndast úr lífrænum úrgangi og sameinast  $\text{H}_2$  ættuðu úr vatni:



Á miklu dýpi á olfusvæðum kemur fyrir gas sem er eingöngu metan og talið myndað við beina sundrun úr lífrænum leifum (cracking), svo sem surtarbrandi (Laier, persónulegar upplýsingar, 1992). Kolvatnsefni hafa fundist í litlu magni í graníti í Siljanskálinni í Döllumum í Svíþjóð og eru talin mynduð úr CO og  $\text{H}_2$  hvötuð af járn og magnetíti (Laier, 1990):



Á sama stað hefur fundist vottur af kolvatnsefnum í dóleríti, sem talin eru ólífmynduð en komin úr kolefni í berginu og búin að vera innilokuð þar lengi (Laier 1990). Kolvatnsefni, sem fundist hafa í gasi á jarðhitasvæðinu á 21°N á Austur Kyrrahafshryggnum, eru talin af svipuðum toga (Welhan og Craig, 1983).

Í töflu 1 eru sýnd helstu einkenni gass úr hverjum upprunahópanna, sem hér hafa verið taldir upp. Gasið er þar flokkað eftir heildarmagni af kolvatnsefnum með hærri mólþunga en metan ( $\Sigma C_{2+}$ ) og ísótópahlutföllum kolefnis.

Tafla 1. Helstu upprunahópar náttúrulegra kolvatnsefnisgasa

Hópur	$\Sigma C_{2+}$	$\delta^{13}C\text{‰}$ (PDB)	Heimildir
Líffmyndað gas	0	-100 - -55	Schoell (1980), Laier (1990)
Hitamyndað blautgas	>5%	-50 - -25	Schoell (1980), Laier (1990)
Hitamyndað þurrgas	<5%	-50 - -25	Schoell (1980), Laier (1990)
Gas af blönduðum uppruna	0,3 - 5%	-60 - -50	Schoell (1980)
Ólíffmyndað, járnhvatað	30 - 90%	-40 - -20	Jeffrey & Kaplan (1988)
Ólíffmyndað, geymt í bergi	1 - 10%	-10 - -20	Jeffrey & Kaplan (1988)
Jarðhitagas, CO <sub>2</sub> /CO	0	-40 - -25	Welhan & Craig (1983) Lyon & Hulston (1984) Ármannsson o.fl. (1989)
Jarðhitagas úr setlögum	3 - 5%	-45 - -20	Des Marais o.fl. (1981a)
Ólíffmyndað frumskeiðsgas	vottur	<-10	<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> : Þessi hópur hefur ekki fundist svo að óyggjandi geti talist og eru gildin því ágiskun út frá fræðilegum forsendum.

Gold (1979) og Gold og Soter (1980, 1982) hafa sett fram þá kenningu, að mikið af því kolefni sem berst til yfirborðs jarðar sé frá möttli jarðar komið og um sé að ræða leifar frumskeiðskolefnis, víða á formi kolvatnsefnisgasa. Metan úr frumgufuhvolfi jarðar á að hafa grafist djúpt í jörð við mikinn hita og þrýsting og flókin kolefnissambönd myndast. Þau hafi síðan gefið frá sér metan, sem getur ferðast til yfirborðs um veikleika í jarðskorpunni. Þar sem mikill hiti er, svo sem á plötumótum eða við virk eldfjöll, hvarfast metan og myndar t.d. koldíoxíð og síðar e.t.v. kARBÓNÖT, en á kaldari stöðum getur metan náð allt til yfirborðs án þess að hvarfast. Gold (1980) telur m.a. að um slíkt uppstreymi geti verið að ræða á Íslandi nálægt jöðrum gosbeltisins en þó utan þess, svo sem á Vestfjörðum og Austurlandi. Taldi hann m.a. ekki unnt að skýra Lagarfliótsuppstreymið á annan hátt. Gold (1983) komst og að þeirri niðurstöðu að Siljanskálin í Dölnum í Svíþjóð væri álitlegur staður fyrir slíkt uppstreymi og myndun olfu í framhaldi af því. Hafa verið gerðar þar djúpboranir en niðurstöður athugana á gasi þaðan og frá Lagarflióti hafa ekki rennt sannfærandi stöðum undir þessa kenningu (Laier, 1990; Halldór Ármannsson og Sigmundur Einarrson, 1987).

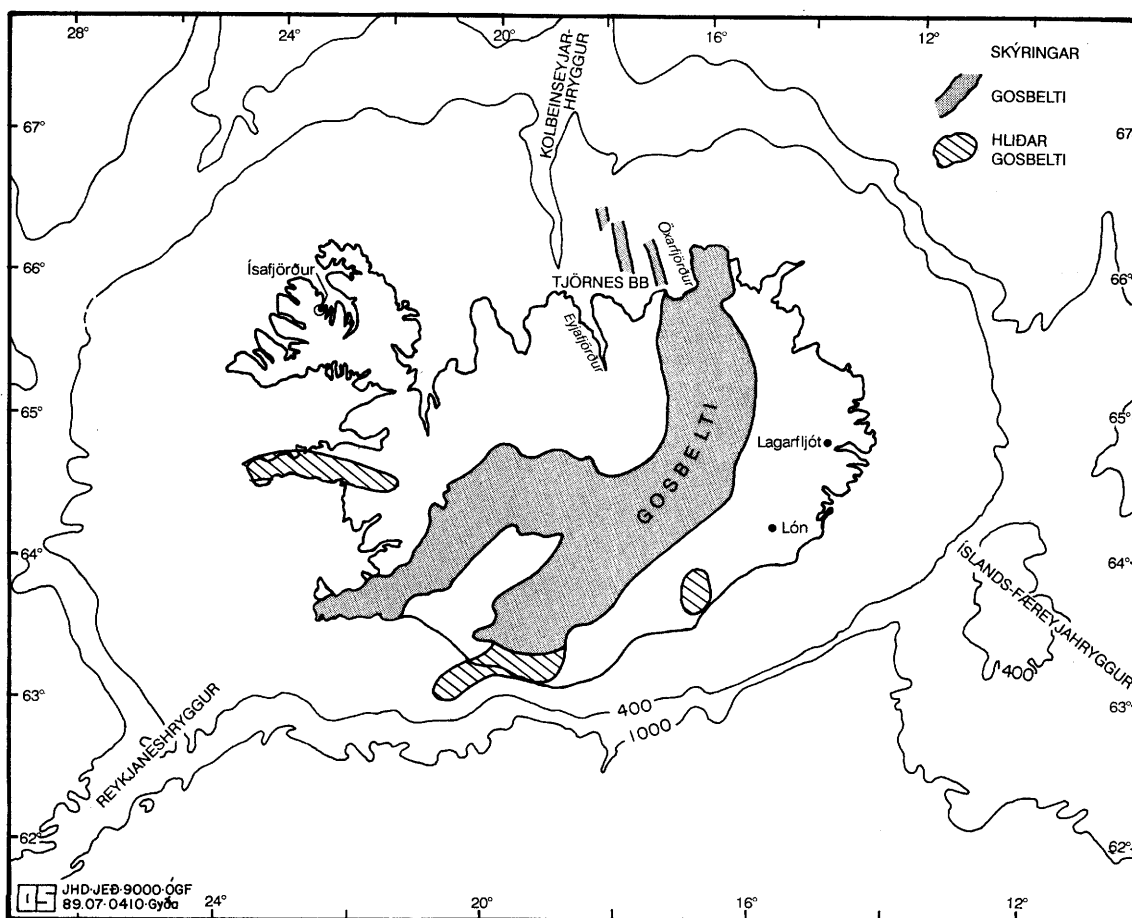
Á mörgum jarðhitasvæðum er metan talið myndað í hvarfi H<sub>2</sub> við CO<sub>2</sub> eða CO, hvötuðu af járn-samböndum eða gerlum og myndast þá yfirleitt eingöngu metan. Á jarðhitasvæðum í seti, t.d. Cerro Prieto í Mexíkó og Yellowstone Park í Bandaríkjunum, hefur fundist metan, sem ekki er venslað CO<sub>2</sub> og ber með sér önnur kolvatnsefni, þ.a.m. ómettuð og hringbundin (t.d. penten og bensen) (Des Marais o.fl., 1981a). Það gas er talið eiga uppruna sinn í sundrun lífrænna efna (t.d. surtarbrands) í setinu. Í tilraunum með slíka sundrun lífrænna leifa, þar sem líkt er eftir aðstæðum í jarðhitakerfi, hefur myndast gas með áþekka efna- og ísótópasamsetningu og gasið úr jarðhitakerfunum (Des Marais o.fl., 1981b). Sennilega er hér um að ræða sams konar gas og finnst á miklu dýpi á olfusvæðum en miklu yngra og munu önnur kolvatnsefni en metan eyðast í tímans rás.

Um langan tíma hefur verið vitað að hraði þeirra efnahvarfa, sem leiða til olfúmyndunar, er fyrst og fremst háður hita. Fyrir nokkrum árum kom í ljós að við ákveðnar aðstæður getur olfúmyndun-



arferlið tekið stuttan tíma, allt niður í nokkur þúsund ár. Rannsóknir á Guaymas setlagafyllingunni í Kaliforníufliða (Didyk og Simoneit, 1989) hafa t.d. leitt í ljós, að þar hefur myndast olfa í tengslum við jarðhitakerfi í setlögnum og greiningar hafa sýnt að olfan er um 5000 ára gömul. Talið er að setlögini hafi myndast á sðastliðnum 150.000 árum. Olfa þessi er að efnasamsetningu lík venjulegri jarðölfu, en litlar upplýsingar eru til um magn. Hiti í útstreymisopum jarðhitakerfisins er um 200°C á rúmlega 2000 m sjávardýpi. Poruhluti setlaganna er um 50% og heildarmagn lífrænna efna (TOC) á bilinu 0,2-2,0%.

Hér á landi hafa kolvatnsefnisgöms fundist utan Öxarfjarðar í Lagarfjótum og benda niðurstöður greininga þaðan til þess að þar sé um lífmyndað gas (mýrargas) að ræða (Jón Jónsson, 1967; Halldór Ármannsson og Sigmundur Einarsson, 1987). Vitað er um svipað gas á nokkrum öðrum stöðum innan hallabeltisins á Austurlandi (Jón Benjamínsson, 1985) og innan þess er einnig jarðbik, sem fannst í Skyndidal í Lóni (Sveinn P. Jakobsson og Guðmundur Ó. Friðleifsson, 1989). Metangas hefur og fundist í Ísafjarðarhöfn og sögur fara af gasuppstreymum í Bolungarvík, víðar á Vestfjörðum, Haukadalsvatni og Vestur-Hóp (Jón Jónsson, 1967; Haukur Jóhannesson, persónulegar upplýsingar 1992). Þá kemur metan víða upp með jarðhitagasi á Íslandi (Ármannsson o.fl., 1989). Mynd 3 sýnir kort af Íslandi og umhverfi þess og þar eru sýndir nokkrir þeirra staða þar sem kolvatnsefni hafa fundist.



Mynd 3. Kort af Íslandi og nágrenni þess. Nokkrir fundarstaðir kolvatnsefna.

## 2.2 Olía og gas á Íslandi

Almennt er talið að olfulinda sé helst að leita í þykkum setlagabunkum og fyrsti þáttur olfuleitar er oftast að finna og afmarka dældir fylltar setlögum. Setlög á Íslandi og landgrunni þess eru yfirleitt þunn, en á síðari árum hefur komið í ljós, að úti fyrir Norðurlandi finnast þykk setlög (sjá kafla 3). Til þess að olía geti myndast þurfa einnig að vera til staðar lífræn efni í setlögum.

Lítið er vitað um magn kerógens í setlögum á Íslandi eða á sjávarbotni við landið. Framleiðni lífræns kolefnis í hafinu umhverfis Ísland nú á dögum er ein sú mesta sem þekkt á jörðinni, eða yfir 500 mg af kolefni á fermetra á dag (Allen og Allen, 1990). Á landi eru varðveitt surtarbrandslög frá tertfer og kvarter, bæði inn á milli basaltlaga og í setlagasyrþum. Skilyrðin til þessarar miklu framleiðni skapast af því að sólargeislun er nægileg á þessari breiddargráðu, sjórinn næringarríkur, m.a. vegna árframburðar á uppleystum efnum og svifaur, og mikillar úrkomu, en það stuðlar að mikilli gróðursprettu á landi. Telja má líklegt að allir þessir þættir hafi haldist lítið breyttir í gegnum jarðsögu Íslands. Það má því ætla, að framleiðni lífræns efnis hafi verið nægilega mikil til að kerógenauðug setlög söfnuðust fyrir. Erfiðara er að átta sig á því hvort súrefnissnauðar aðstæður hafi skapast, þannig að kerógenið varðveittist og setið gæti orðið að móðurbergi sem fæddi af sér gas eða olfu. Vitneskja um fornstrauma, landslag og þróun setlagadælda er takmörkuð. Vitað er að straumakerfi Norður-Atlantshafsins hefur tekið miklum og sfendurteknum breytingum á síðustu ármiljónum (Ruddiman og McIntyre, 1973; Jansen og Sjöholm, 1991). Hins vegar liggja ekki fyrir gögn, sem segja til um efnafræðilega og eðlisfræðilega eiginleika botnsjávarins næst Íslandi. Hugsanlegt er að á meðan Golfstraumurinn náði ekki að ráði inn í Noregshaf hafi ástand sjávar verið gerólfkt því sem nú er við Ísland. Auk almennra breytinga á straumakerfum er hugsanlegt að brotahreyfingar á landgrunninu norðanlands hafi af og til getað myndað tiltölulega lokaða flóa við landið. Ýmsar breytingar á umhverfisaðstæðum geta þar að auki bætt varðveisluskilyrði, til dæmis gæti skyndileg aukning á framburði til sjávar af völdum loftslagsbreytinga kaffært lífræn setlög og hindrað rotnun þeirra. Kortlagning hafsbotsins við Ísland er á frumstigi og jarðlagaskipun nær óþekkt. Þess ber að geta, að langmest af olfu jarðar er ættað úr móðurbergi, sem safnast hefur fyrir á hafsbotni. Bestu skilyrði til myndunar móðurbergs eru í hálflyktum flóum og fjörðum, eða á landgrunnum, þar sem framleiðsla lífræns kolefnis er mjög mikil.

Lítið hefur verið unnið að rannsóknum sem lúta að olfuleit eða leit að kolvatnsefnum á Íslandi eða landgrunni þess. Hér verður lauslega minnst á nokkrar slíkar rannsóknir sem Orkustofnun hefur unnið að á síðastliðnum áratug að undanskilinni úrvinnslu á jarðeðlisfræðilegum mælingum innan efnahagslögsögu landsins.

Árið 1982 var boruð 554 m djúp rannsóknarhola í setlagastaflann undir Flatey á Skjálfandaflóa að tilhlutan nefndar um hagnýtar hafsbotsrannsóknir, sem starfaði á vegum Iðnaðarráðuneytisins. Markmið rannsóknarinnar var að kanna líkur á olfu í jarðlögum þessa svæðis og var niðurstöðum lýst ítarlega í skýrslu Orkustofnunar (Karl Gunnarsson o.fl., 1984). Í stuttu máli voru niðurstöður rannsóknarinnar þær, að engar vísbendingar fundust um olfumyndun í þeim setlögum sem holan skar, né um lífræn efni sem gætu ummyndast í olfu við hagstæð skilyrði.

Á árunum 1983-1985 stóð Orkustofnun fyrir könnun á uppstreymi gass í Lagarflijóti að tilhlutan Hafsbotsnefndar Iðnaðarráðuneytisins. Markmið rannsóknarinnar var að kanna uppruna gassins, en fyrri athuganir bentu allar til þess að þar væri eingöngu um metangas að ræða. Ítarlegar efnagreiningar og ísótópamælingar á gasinu staðfestu fyrri athuganir (Sigmundur Einarsson og Halldór Ármannsson, 1987) á þann veg að gasið í Lagarflijóti sé ungt og óþroskað lífverugas, sem myndast hafi við gerlarotnun, en ekki eldra gas sem gæti tengst olfumyndun.

Sumarið 1985 fannst jarðbik í holufyllingu í rótum Lambatungutinds í Skyndidal, Austur Skaftafellsýslu. Þetta var fyrsti fundur slíks efnis hér á landi og þótti því ástæða til að kanna uppruna

jarðbiksins nánar. Niðurstaða rannsóknarinnar (Sveinn P. Jakobsson og Guðmundur Ómar Friðleifsson, 1989) var sú, að heitt innskot hafi hitað upp surtarbrand milli hraunlaga og við upphitunina hafi myndast jarðolía úr surtarbrandinum. Jarðolían, ásamt bergkristalli, settist síðan til í holrými hraunlaga sem ofar lágu og kólnaði þar.

Kolvatnsefni af lífrænum toga fundust í tengslum við jarðhitarannsóknir í Öxarfirði árið 1988. Það var einmitt sá gasfundur sem varð kveikjan að rannsókn þeirri sem þessi skýrsla fjallar um.

Hér að framan hefur komið fram að algengast er að gas og olía myndist og varðveitist í setlögum. Ef leitað er að seti því sem fæddi af sér eða varðveitti olfuna eða gasið, er nauðsynlegt að huga að almennri jarðfræðilegri byggingu og höggunarsögu svæðisins. Setlög finnast víðast hvar á yfirborði jarðar, en þau verða aðeins þykk í tiltölulega afmörkuðum setlagadældum (sedimentary basins), þar sem yfirborð jarðar sýgur jafnt og þétt um langa hríð. Margar setlagadældir tengjast meginlandsjöðrum eða víðáttumiklum sigdölum og er stærð setlagadældarinnar úti fyrir norðurstönd Íslands af svipaðri stærð eða ífið minni en þær setlagadældir sem best eru þekktar á jörðinni í dag. Næstum öll nýtanleg kolvatnsefni á jörðunni finnast í setlagadældum.

### 3. JARÐFRÆÐILEGAR AÐSTÆÐUR

Olfa og jarðgas myndast og varðveitast að langmestum hluta í setlögum og því er það nauðsynlegur liður í allri olfu- og gasleit að huga gaumgæfilega að jarðfræðilegri byggingu og höggunar sögu þess svæðis sem til athugunar er.

Uppstreymi á lífrænu gasi í Öxarfirði bendir til, að lífrænt set sé þar undir. Nokkrir kostir koma til álita, þegar reynt er að skýra uppruna þessa lífræna sets. Nærtækast er að gera ráð fyrir að setið hafi myndast í Öxarfirði, sem er virk setlagadæld, þar sem jarðhiti hefur getað flýtt fyrir olfu- eða gasmyndun í tiltölulega ungu seti. Setlögin í Öxarfirði eru a.m.k. 700-800 m þykk við ströndin en þykkna til norðurs (Flóvenz Ó.G. og Gunnarsson K., 1991). Einnig má hugsa sér að berglögin undir núverandi setlagadæld í Öxarfirði innihaldi lífrænt set, sem gefið hafi af sér gas. Engin bein gögn eru til um gerð og uppruna þessara berglaga. Í sigstöllum við vestanverðan Öxarfjörð sést, að tertíer blágrýtislög með þekju af hraunlögum og setlögum frá fyrri hluta Ísaldar hafa sigið niður til austurs. Það má hugsa sér að þetta landsig nái niður fyrir sjávarmál og að þessi jarðlög séu að einhverju leyti sveigð niður og myndi berggrunn á um 700 til 800 m dýpi í Öxarfirði. Í tertíer hraunlagastaflanum upp frá Fjöllum við vestanverðan Öxarfjörð munu vera surtarbrandslög (Einarsson, 1958), og vestan til á Tjörnesi eru surtarbrandslög efst í Köldukvíslarhraunlögum (Eiríksson, 1979), sem einnig eru tertíer að aldri. Samkvæmt kálum argon greiningum er aldur Köldukvíslarhraunlaganna undir Tjörneslögum og við Fjöll um 7-10 miljónir ára (Aronson og Sæmundsson, 1974; Albertsson, 1976; Kristinn J. Albertsson, 1978). Í Tjörneslögum, sem eru a.m.k. 3-5 miljón ára gömul, eru fjölmörg surtarbrandslög auk sjávarsetlaga. Hugsanlegt er, að samsvarandi lög hafi varðveist í Öxarfjarðarsigdalnum, jafnvel þótt Tjörneslögin hafi skafist brott af rofi Ísaldarjökla á sjálfum rishryggnum vestan við Öxarfjörð. Enn eldri setlög kynnu að hafa hlaðist upp á landgrunninu undan Flateyjarskaga og e. t. v. víðar fyrir um 10 miljónum ára (Jancin o.fl., 1985). Að lokum má nefna þann möguleika, að gasið sé ættað úr jarðlögum, sem tilheyra Jan Mayen hryggnum eða framhaldi hans suður á bóginn. Þegar Noregur skildist frá Grænlandi fyrir um 55 miljónum ára fór landrek í fyrstunni fram um Ægishrygg í Noregshafi. Fyrir um 27 miljónum ára dó þessi hryggur út og landrek hófst um Kolbeinseyjarhrygg sem liggur vestar, þannig að um 100 km spilda af grænlenku landgrunni varð innlyksa á milli hryggjanna (Talwani og Eldholm, 1977; Kristjánsson, 1980). Þessi ræma kallast Jan Mayen hryggur, og möguleiki er á að hann innihaldi m.a. setlög frá fornlífsöld og miðlífsöld (Karl Gunnarsson, 1988). Ekki er vitað, hve langt til suðurs þessi setlög ná eða hvort þau ná til Íslands.

#### 3.1 Jarðfræði setlagadælda

Myndun setlagadælda stjórnast fyrst og fremst af eiginleikum og ferlum í jarðskorpunni og efsta hluta möttuls. Flekakeningin fjallar um hreyfingar í þessum lögum, sem mynda um 100 km þykka skurn um jörðina. Skurnin er nefnd stinnhvolf, og skiptist upp í allmarga jarðskorpufléka, sem hreyfast um yfirborð jarðar. Jarðskorpan myndar efsta hluta stinnhvolfsins á hverjum stað. Mestar líkur eru á myndun setlagadælda á beltum þar sem jarðskorpuflékar mætast. Flekamótin eru þrenns konar: rekkbelti (divergent plate boundary), þar sem flekar skiljast að og ný jarðskorpa myndast, sökkbelti (convergent plate boundary), þar sem flekar eyðast, og hliðrunarbelti (conservative plate boundary), þar sem flekar hreyfast hver meðfram öðrum. Öxarfjörður og landgrunnið vestur að Kobeinseyjarhrygg liggja á flekamótum, sem eru sambland af rekkbelti og hliðrunarbelti.

Eftir uppruna má flokka setlagadældir í þrjá flokka. Í fyrsta lagi myndast dældir þar sem tognar á jarðskorpu, í öðru lagi þar sem jarðskorpan hvelfist niður, til dæmis við úthafsrennur, og í þriðja lagi þar sem hliðrunarhreyfingar eiga sér stað. Í öllum tilvikunum er landsig frumskilyrði til þess að umfangsmikil setlög safnist fyrir og varðveitist.

Mikill hluti setmyndunar fer fram neðan sjávarmáls eða rétt við strendur. Þar eru varðveisluskilyrði venjulega betri en uppi á landi, þar sem veðrun og rof mæða á berggrunni og lausum jarðlögum. Segja má, að samspil landslags og loftslags stjórni því hvers konar setlög safnast fyrir á hverjum stað. Greina má nokkrar algengar gerðir setmyndunarumhverfa á jörðinni í dag, og þannig hefur það verið í gegnum jarðsöguna. Sem dæmi má nefna eyðimerkur, ársléttur, óseyrar, lónarif, landgrunn og djúpsævi. Innan setlagfræðinnar hafa verið skilgreind líkön til að auðvelda túlkun gagna, sem safnað er úr setlagadældum. Meðal umhverfa, sem helst mynda umgerð um upphleðslu móðurbergs fyrir olfu og gas eru stöðuvötn, óseyrar, og setlagadældir á hafsbotni. Frá þessu eru þó margar undantekningar, og þar á meðal landgrunnshlíðar og ársléttur (fenjasvæði).

### 3.2 Jarðfræðileg bygging Öxarfjarðar og umhverfis

Það er alkunnugt, að jarðfræði Íslands einkennist af flekamótum, sem liggja um landið og deila því á milli Norður- Ameríkflekans og Evrasíuflekans. Flekamótin eru engan veginn einföld, heldur skiptast á rekbelti og hliðrunarbelti (mynd 3).

Um Öxarfjörð liggur rekbelti, sem teygir sig þvert yfir norðanvert Ísland frá Vatnajökli um Kverkfjöll og norður á landgrunnið norðaustanlands í beinu framhaldi af Gjástykki og Kröflu. Rekbeltið einkennist víðast hvar af sprungubeltum og eldvirkni. Yfirleitt fara saman merki um gliðnun, landsig og eldvirkni á rekbeltunum, og þegar þessi ferli eru virk samtímis er talað um eldstöðvakerfi. Rekbeltið í Öxarfirði er endasleppt til norðurs og tengist við Kolbeinseyjarhrygg um hliðrunarbelti, sem er kennt við Tjörnes og kallað Tjörnesbrotabeltið.

Á Tjörnesi eru þykkustu sjávarsetlög á Íslandi, sem til sést á þurru landi, en Tjörnes er rishryggur. Að austanverðu rís skaginn í 4-6 stórum, skörpum stöllum upp í 3-400 m hæð utan til og í um 6-700 m hæð sunnan til. Á vestanverðu nesinu eru hlíðar hins vegar aflíðandi og samsvarandi stallasig sjást ekki. Trausti Einarsson (1958) lýsti miklum misgengjum sem liggja til SA frá Húsavík og allt austur fyrir Tjörnes og taldi hann að tertíer jarðlög norðan þeirra hefðu lyfst um a.m.k. 700 m. Þorleifur Einarsson o. fl. (1967) töldu Tjörnes hafa verið að brotna og haggast linnulítið síðan á míósen og að við það hefðu aftur og aftur myndast kerfi N-S lægra hryggja og sigdala, sem fylltust jafnóðum af seti. Síðasti þáttur þessarar höggunar hafi svo verið upplýfting alls nesis, mest á SA-Tjörnesi, 5-600 m, en minni norðar.

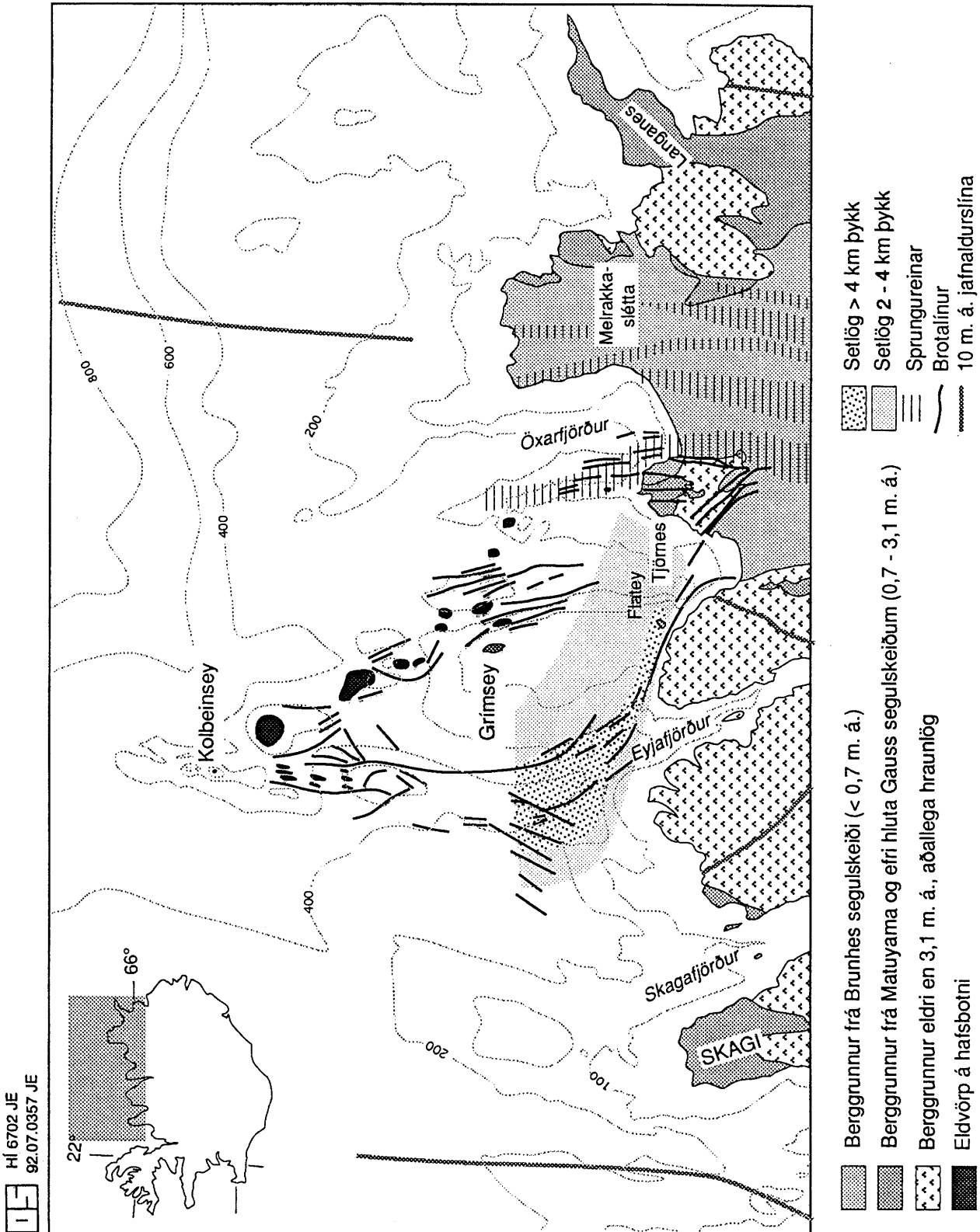
Laust fyrir 1970 komu fram hugmyndir um hliðrunarbelti (transform faults) við norðurströnd Íslands á milli Kolbeinseyjarhryggjar og norðurenda gosbeltisins í eða út af Öxarfirði (Sykes 1967). Þær hugmyndir byggðu á staðsetningu og brotlausn jarðskjálfta undan Norðurlandi. Nánari athuganir á jarðskjálftum þóttu styðja þetta (Ward o.fl., 1969; Ward og Björnsson, 1971), en að frekar væri þó um að ræða nokkurra tuga km breitt sprungu- eða brotabelti (fracture zone), með eiginleikum hliðrunarbeltis. Ward (1971) tók saman yfirlit um það sem ritað hafði verið um jarðlög og höggun á Norðurlandi og ályktaði að Húsavíkurmisgengin væru einu augljósu merkin um þetta brotabelti á landi, og að þau væru suðurjaðar þess sem hann nefndi Tjörnesbrotabeltið (Tjörnes Fracture Zone). Samhliða útfærslu á hugmyndunum um hliðrunar- eða brotabelti, bæði norðan- og sunnanlands, birti Ward (1971) fyrstur manna á prenti hugmyndir sem upp voru komnar um flutning rekbelta á Norðurlandi.

Kristján Sæmundsson (1974, 1978, 1980) útfærði þessar hugmyndir um hliðrunar- og brotabelti mun nánar og færði fram rök fyrir þeim. Samkvæmt fyrstu útfærslu Kristjáns (1974) taldi hann Tjörnesbrotabeltið hafa orðið til fyrir um 4 milljónum ára við flutning rekbeltisins á norðanverðu Íslandi frá Húnavatnssýslum austur á núverandi stað á austanverðu Norðurlandi. Næstu þrjár ármiljónirnar hafi Húsavíkurmisgengin, og framhald þeirra vestur um Flateyjarsund og yfir í Eyjafjarðarál, hliðrast um a.m.k. 60 km milli norðurenda gosbeltisins í botni Öxarfjarðar og rekáss, sem þá var virkur á Grímseyjargrunni eða í Eyjafjarðarál, í framhaldi af Kolbeinseyjarhryggnum. Kristján benti þó einnig á að Tjörnesbrotabeltið væri ekki alveg svo einfalt að gerð. Einu sjáan-

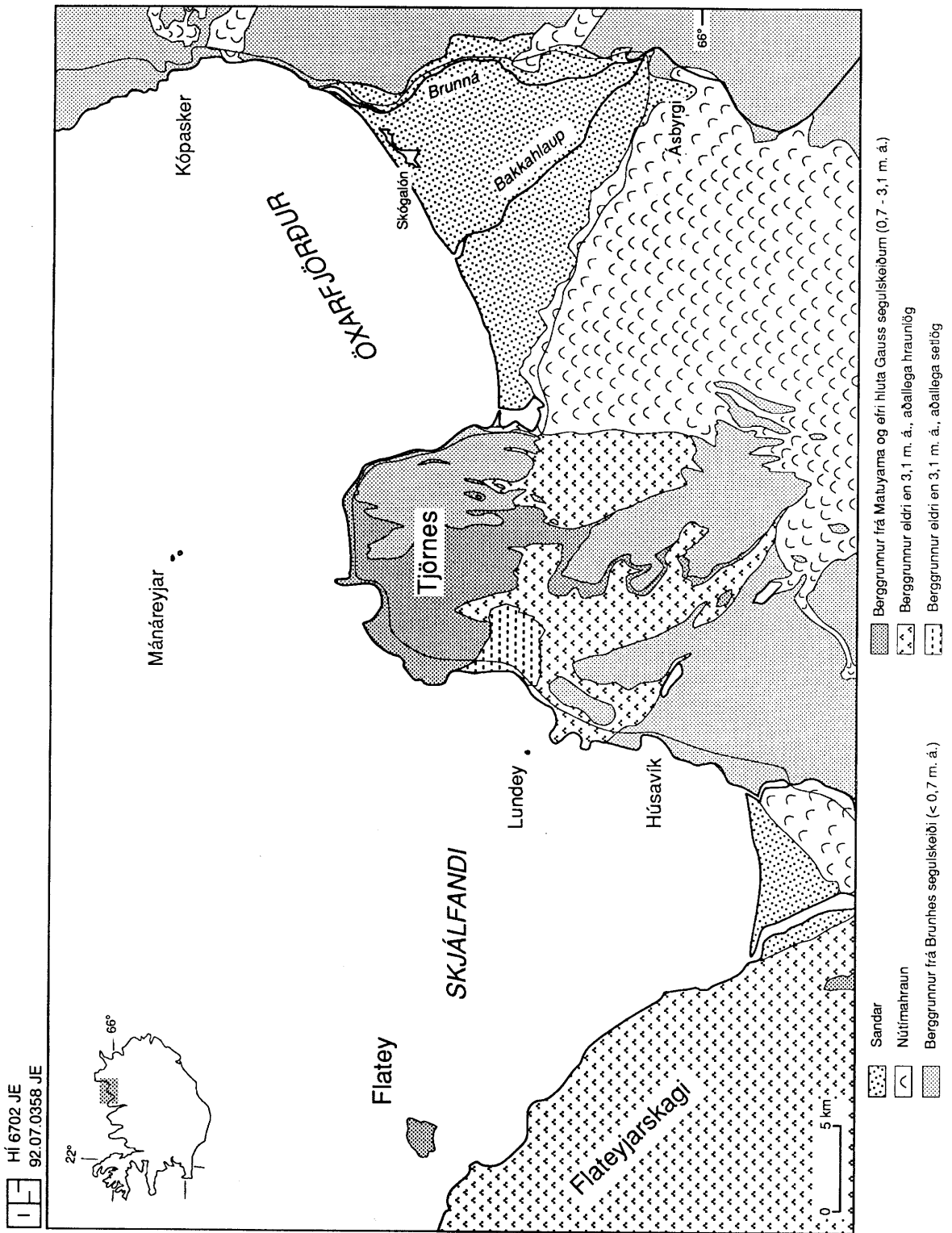
legu ummerkin um sniðgengi væru Húsavíkurmisgengin og framhald þeirra til vesturs. Þessi misgengi koma fram sem skarpt brot í dýptarlínum á sjókortum og hliðrun Grímseyjargrunns til austurs miðað við Flateyjarskaga. Tjörnesbrotabeltið er afmarkað af útbreiðslu jarðskjálfta, og innan þess stefna línur í landslagi norður-suður. Austanvert eru Melrakkaslétta og Sléttugrunn, en síðan koma Öxarfjarðardjúp, Tjörnesgrunn, Skjálfandadjúp, Grímseyjargrunn og loks Eyjafjarðaráll vestast í framhaldi af Kolbeinseyjarhrygg (og jafnvel Skagagrunn enn vestar). Kristján taldi, að þessi landform hefðu fyrst og fremst myndast við höggun og eldvirkni. Öxarfjarðardjúp væri greinilega gliðnunarsigdalur í beinu framhaldi af gosbeltinu á Norðausturlandi og eldvirkni í gangi beggja vegna við hann, vestan til á Sléttu og á Mánáreyjahrygg á Tjörnesgrunni. Eyjafjarðaráll væri sennilegast sambærileg myndun í framhaldi af Kolbeinseyjarhryggnum, tengd rekás sem verið hafi virkur á Grímseyjargrunni áður en eldvirkni braust norður um Öxarfjörð og tók að sjá um gliðnunina innan Tjörnesbrotabeltisins. Kristján taldi það hafa orðið fyrir um einni miljón ára og hefði sniðgengisfærsla þá minnkað um Húsavíkurmisgengin. Stuttu síðar setti Guðmundur Pálmason (1974) fram niðurstöður þyngdarmælinga yfir landgrunninu undan Norðurlandi. Þar kom fram áberandi lægð í þyngdarsviðinu í grennd við Flatey og til VNV fyrir mynni Eyjafjarðar. Guðmundur taldi lægðina vera í tengslum við Húsavíkurmisgengin, og bera vott um þykk setlög undan Norðurlandi.

Walker (1975) stakk upp á því að þessi N-S lægu form væru skástífg röð "rekása" (eldstöðvakerfa) sem tengdu gosbeltið á NA-landi við Kolbeinseyjarhrygg líkt og á Reykjaneskaganum þar sem slík skástífg röð eldstöðvakerfa situr ofan á sveigju megin-rekássins til austurs þar sem Reykjaneshryggurinn tengist landi. Athuganir McMasters o.fl. (1977) sem fólust í segulmælingum, endurkastmælingum, dýptarmælingum og söfnun sýna af hafsbótmi, staðfestu þessa tilgátu Walkers í stórum dráttum. Þeir könnuðu og kortlögðu mestallt Tjörnesbrotabeltið og greindu þrjú sigsvæði (sigdali eða "trog") aðskilin af hryggjum. Landslagið töldu þeir að mestu vera mótað af höggun og eldvirkni, og byggðu það á nýlegum ummerkjum um hvort tveggja á belti sem liggur frá Öxarfirði og til vesturs norðan við Grímsey og í enda hryggjarins suður af Kolbeinsey. Eldvirkninni skipuðu þeir niður í skástífga röð N-S lægra spildna með NNV-SSA heildarstefnu, en segulmælingar þeirra sýndu nokkuð greinilegt nær óslitið rétt segulmagnað frávik, nær óslitið eftir allri þeirri línu. Grímseyjargrunn og svæðið vestan við Eyjafjarðaráll falla hins vegar að mestu undir öfugt segulmögnuð frávik. Segulmælingar Vogt o.fl. (1980) sýna einnig þetta rétt segulmagnaða frávik með NV-SA heildarstefnu, en samkvæmt mælingum þeirra má jafnvel skipta því upp í skástífga röð af NNV-SSA til N-S lægum spildum. Hið sama kemur fram á yfirlitskorti Nunns o.fl. (1983) og þessar spildur falla að mestu saman við eldvirknisvæði McMasters o.fl. Þeir McMaster fundu engin VNV-ASA sniðgengi né önnur ummerki sem þeim gætu tengst, nema misgengi sem fram komu í setlögum þvert yfir botn Skjálfandafloa í framhaldi af Húsavíkurmisgengjunum. Á mynd 4 eru dregnar saman helstu niðurstöðum Kristjáns Sæmundssonar, McMasters o.fl. og annarra, sem bætt hafa við heildarmyndina af jarðfræði Tjörnesbrotabeltisins, eins og rakið verður hér á eftir.

Kristján Sæmundsson (1978, 1980, 1986) endurbætti heildarmyndina í seinni yfirlitsgreinum með hliðsjón af nýrri upplýsingum og athugunum. Í ljós kom að rekásinn sem lá um Húnavatnssýslur virðist hafa orðið óvirkur fyrir um 6-7 miljónum ára og má því telja líklegt að gosbeltið á norðanverðu Norðausturlandi hafi orðið til um svipað leyti, enda var þá orðið ljóst að jarðlögum á Flateyjarskaga mátti skipta í tvær syrpu eftir aldri. Annars vegar eldri syrpu, 9-10 miljón ára, en hins vegar yngri syrpu og mældist elsti hluti hennar rúmlega 5 miljón ára gamall (Cotman, 1979; Kristján Sæmundsson, 1980).



**Mynd 4.** Jarðfræðikort af norðurströnd Íslands, sem sýnir yfirlit um höggun og eldvirkni á landgrunninu og um aldur jarðlaga. Jafnframt eru sýnd þau svæði, þar sem þykk setlög hafa mælst. Þykkt setlaga annars staðar eru ekki þekkt (heimildir: Kristján Sæmundsson 1974, 1980; McMaster o.fl. 1977; Kjartan Thors 1982; Jancin o.fl. 1985; Ólafur Flóvenz og Karl Gunnarsson 1991)



Mynd 5. Jarðfræðikort af Öxarfirði og nágrenni (heimildir: Haukur Jóhannesson og Kristján Sæmundsson 1989, Jarðfræðikort; Jón Eiríksson o.fl. 1987, Flateyjarskýrsla).



Tjörnesbrotabeltið var upphaflega skilgreint út frá dreifingu og gerð jarðskjálfta (Sykes 1967; Ward 1971). Nánari athuganir á því sviði hafa ekki leitt af sér einfalda mynd. Nákvæmari staðsetning Páls Einarssonar (1976a) á skjálftum, sem urðu á svæðinu árin 1968 og 1969, benti til þess að langt og vel afmarkað skjálftabelti lægi úr botni Öxarfjarðar, norðan við Grímsey og í suðurenda Kolbeinseyjarhryggjar. Páll taldi líklegt að þessi virkni tengdist misgengi eða mjóu misgengjabelti með þessa VNV-ASA stefnu og kenndi það við Grímsey. Brotlausn eins skjálftans benti til hægri hliðrunar sniðgengis með sömu stefnu. Páll benti þó einnig á að engin önnur jarðfræðileg rök hefðu fundist fyrir slíku misgengi eða misgengjabelti, hvorki í landslagi á hafsbotninum, né á landi eftir skjálfta sem urðu á SA-enda þessarar línu í botni Öxarfjarðar árið 1955. Niðurstaða Páls var sú að hliðrun jarðskorpunnar milli gosbeltisins á Norðausturlandi og Kolbeinseyjarhryggjar færi fram um a.m.k. tvö samhliða hliðrunarbelti, Grímseyjar- og Húsavíkurmisgengin, og hugsanlega einnig um þriðju línuna sem lægi frá gosbeltinu norðan við Mývatn um Dalsmynni og Dalvík yfir í Fljót og þaðan vestnorðvestur yfir mynni Skagafjarðar. Mjög sterkur skjálfti árið 1963 átti sennilega upptök á þessari línu, en hann leiddi upphaflega til þvergengistúlkunarinnar á öllu skjálftasvæðinu undan Norðurlandi, enda sýnir brotlausn hans sniðgengi með VNV-ASA stefnu og hægri hliðrun sem annan möguleika af tveimur.

Í síðari yfirlitsgreinum sínum hafa þeir Páll Einarsson og Sveinbjörn Björnsson (1980) (Sveinbjörn Björnsson og Páll Einarsson, 1981) þó heldur dregið úr þessari ströngu túlkun og telja skjálftavirknina of dreifða til að hægt sé að tengja hana einföldum þvergengjum eða plötumótum. Með auknum mælingum og nákvæmari staðsetningu á upptökum jarðskjálfta hefur aukist vitneskja um eðli og orsakir þessarar virkni. Samkvæmt kortum í Skjálftabréfapistlum Páls Einarssonar (1976a, 1976b, 1983, 1984) virðist ljóst að skjálftar dreifast ekki samfelt á Grímseyjarlínuna, heldur virðast skjálftahrinur og virknin einstök ár dreifast á svæði eða spildur með N-S læga stefnu sem raðast skástígt á VNV-ASA meginlínuna. A.m.k. 3-5 slíkar skákir falla vel að eldvirknisvæðum McMasters o.fl. (1977), en tvær til viðbótar eru í austurkanti Grímseyjargrunns og á utanverðu Skagagrunni. Skjálftavirkni tengd Húsavík-Flateyjar línunni og Dalvíkur-Skagafjarðar línu fellur hins vegar mun betur að beinni sniðgengjatúlkun og dreifist í samræmi við stefnu línanna í flestum tilfellum.

Kjartan Thors (1982) kannaði nánar syðsta hluta Tjörnesbrotabeltisins með endurkastsmælingum á botni Skjálfandaflóa og svæðisins umhverfis Flatey, og vestur að mynni Eyjafjarðar. Á þessum slóðum höfðu þyngdarmælingar bent til lægðar í þyngdarsviðinu (Guðmundur Palmason, 1974) og var því talið líklegt, að efsti hluti jarðskorpunnar þar væri gerður úr setlögum. Athuganir Kjartans sýndu að mjög skörp skil eru á milli tertfer jarðlagastafans á Flateyjarskaga og setlagastafa sem þar er undan landi. Skil þessi eru brött, og má rekja þau frá vestanverðum Skjálfanda og yfir að mynni Eyjafjarðar þar sem þau falla saman við hliðrun Grímseyjargrunns til austurs eins og fram kemur í dýptarlínum á því svæði. Varla leikur nokkur vafi á því að um meiriháttar misgengi er að ræða, líklega með bæði sniðgengis- og siggengisfærslu, og hefur það verið kennt við Flatey. Mælingar Kjartans sýndu einnig misgengi og stalla á botni Skjálfandaflóa, sem skera þar bæði nútímasetlög og eldri lög. Við þessu mátti búast eins og nafn flóans bendir til, og eru sögulegar heimildir um mikla jarðskjálfta milli Húsavíkur og Flateyjar og víðar í Tjörnesbrotabeltinu (Páll Einarsson, 1976; Sveinbjörn Björnsson, 1976; Sveinbjörn Björnsson og Páll Einarsson, 1981). Þessi yngstu misgengi virðast vera skástígt og hafa hvert um sig NV-lægari stefnu, en röðin í heild fellur á vestnorðvestur línu og tengir saman Flateyjarmisgengið og Húsavíkurmisgengin á Tjörnesi, sem mynda einnig sams konar mynstur. Í mælingum Kjartans á Grímseyjargrunni eru vísbendingar um misgengi í staflanum á um 5-10 km breiðu belti utan við Flateyjarmisgengið mikla og samsvara því aftur Húsavíkurmisgengjunum, bæði hvað varðar stefnu og breidd beltisins. Þessar vísbendingar um misgengi hverfa að mestu þegar fer að halla ofan í Skjálfandadjúpið, sem virðist vera töluvert mótað af jökulsvörfun, ef marka má miðhrygg út eftir öllum flóanum og út í djúpið, hvort sem uppruna hans má rekja til höggunar eða ekki.

Hryggur þessi er úr storkubergi út að misgengjabeltinu í botni flóans, en er hulinn yngra (nútfma) seti að mestu. Utar virðist hann mótaður í setberg langt út í Djúpið. Fyrir utan misgengjabeltið er hins vegar storkubergssvæði við vesturströnd Tjörness og virðist tertíer jarðlagastaflinn, sem þar er á landi milli Húsavíkur og Köldukvíslar, ná a.m.k. 5-10 km til NV út í flóann og í honum allmikið landslag (líklega vegna höggunar), sem yngri setlög hafa fyllt í að mestu. Lághallandi endurvarpsfletir einkenna setlögin í botninum utan við þetta svæði og má reikna með því að þar sé framhald Tjörneslaganna til norðvesturs út í flóann. Loks má sjá af mælingum Kjartans að hraulögin, sem mynda Flatey, eru að flatarmáli á við fimmfalda stærð eyjunnar, og virðast þau vera aflöng í VNV-ASA stefnu, þó svo mælingarnar séu tæplega nógu þéttar til að fullyrða það með vissu.

Kortlagning og aldursgreining jarðlaga og athuganir á höggun jarðlagastaflans á Flateyjarskaga og Tjörnesi hafa varpað nýju ljósi á þá mynd sem hér hefur komið fram af myndun og þróun Tjörnesbrotabeltisins, og þá sérstaklega Húsavíkur-Flateyjarmisgengjakerfisins (Jancin o.fl., 1985; Young o.fl., 1985). Helstu niðurstöður þeirra eru að skipta megi jarðlagastaflanum í tvo hluta eftir aldri og gerð. Eldri hlutinn vestan og norðan til á skaganum er u.þ.b. 9,5-13 miljón ára og að mestu úr þóleíft hraunlögum, og yngri hlutinn að austan- og sunnanverðu er yngri en 6,5 miljón ára og að mestu úr ólivínþóleíft dyngjuhraunum. Efst í yngri hlutanum, suðaustast á svæðinu eru hugsanlega jökulbergslög (Jancin o.fl., 1985). Eldri hlutinn er mjög haggður og brotinn, og því meir sem nær dregur Flateyjarmisgenginu. Halli jarðlaga milli misgengja verður þar vðá allt að 45°, og stefna ganga og misgengja breytist reglubundið meir og meir til austurs samfara stórauðinu ummyndun jarðlaga. Lítil vafi virðist vera á því að a.m.k. 10 km belti sunnan við Flateyjarmisgengið hafi afmyndast stórlega vegna hægri hliðrunar um Húsavíkur- Flateyjar-kerfið (Young o.fl., 1985). Hins vegar virðist mestöll höggun og ummyndun tengd sniðgengisfærslu hafa átt sér stað áður en yngri hluti jarðlaganna lagðist mislægt ofan á þennan haggða eldri stafla. Young o.fl., (1985) komust að þeirri niðurstöðu, að um 20 km sniðgengisfærsla og afmyndun hafi átt sér stað um Húsavíkur-Flateyjar-kerfið, á u.þ.b. tveim miljónum ára. Þetta gerðist fyrir meira en 6-7 miljónum ára, en í því felst að fyrir þann tíma hafi rekás verið virkur í gosbelti á Norðausturlandi, og þá líklega á svipuðum stað og núverandi gosbelti, sem hefur m.a. gefið af sér alla yngri jarðlagasyrpu á Flateyjarskaga. Hraunlög í borholukjarna frá Flatey voru aldursgreind af Kristni J. Albertssyni (Albertsson og Eiríksson, 1989). Samkvæmt þeim aldursgreiningum og segulmælingagögnum á hraunlögum og setlögum í kjarnanum (Eiríksson o.fl., 1991) virðast öll jarðlögin, sem borholan skar hafa myndast á Matuyama segulskeiðinu á tímabilinu frá 2,5 til 0,7 miljón árum.

Margrása endurkastmælingar í Tjörnesbrotabeltinu hafa leitt í ljós að þar er dæld, þar sem setlög ná 4 km þykkt (Flóvenz og Gunnarsson, 1991). Vestasti hluti setlagadældarinnar er í framhaldi til suðurs af rekbeltinu á Kolbeinseyjarhrygg, en lægðin liggur til austurs um landgrunnið að Skjálfaða. Sovéskir jarðvísindamenn hafa mælt hljóðhraða í basaltstaflanum á Norðurlandi og á rekbeltinu í Öxarfirði, og eru niðurstöðurnar raktar í grein Ólafs Flóvenz og Karls Gunnarssonar (1991). Gögnin frá Öxarfirði sýna, að setlög í sigdalnum í Öxarfirði þykkna til norðurs í áttina að Tjörnesbrotabeltinu, og eru um 700 til 800 m þykk við ströndina fyrir botni Öxarfjarðar. Þbylgjuhraði vex í jarðhitasvæði á mællifnunni, og telja Ólafur og Karl þetta stafa af staðbundinni lækkun á holrými vegna útfellinga. Ólafur og Karl benda á, að Tjörnesbrotabeltið sé afmarkað af tveimur VNV-lægum hliðrunarsprungum, Flateyjarmisgenginu að sunnan og Grímseyjarbrotalífunni (Einarsson, 1986) að norðan. Á Tjörnesbrotabeltinu liggja þrjár stórir sigdalir með norðursuður stefnu: Eyjafjarðaráll, Skjálfaði og Öxarfjörður. Eyjafjarðaráll liggur til suðurs frá Kolbeinseyjarhrygg, og myndar lægð í landgrunninu, sem afmarkast af misgengjum með norðaustlæga stefnu. Austurbarmur þessa sigdals sveigir að Flateyjarmisgenginu til austsuðausturs, og setlagadældin, sem kennd er við Flatey, teygir sig austur á Skjálfaða. Borun í Flatey leiddi í ljós að efstu 550 m jarðlagastaflans eru aðallega setlög, sem mynduðust á neðsta hluta Ísaldar, ýmist á

grunnsævi eða rétt við sjávarmál. Meðan lögin voru að hlaðast upp hefur sighraðinn numið 0,5-1,0 mm á ári, en á síðustu miljón árunum eða svo, hefur sig stöðvast og land jafnvel risið á Flateyjarsvæðinu (Karl Gunnarson o.fl., 1984; Eiríksson o.fl., 1985; Albertsson og Eiríksson, 1989; Eiríksson o.fl., 1990).

Nýlega hafa Geirfinnur Jónsson o.fl. (1991) birt yfirlit yfir segulræmur á Íslandi, en þær gefa mikilvægar upplýsingar um heildarbyggingu landsins, og mynda kerfi, sem er nokkurn veginn sam-síða rekbeltunum. Segulræmurnar eru taldar stafa af því að jarðlagastaflinn skiptist í hallandi syrpur af rétt og öfugt segulmögnum jarðlögum. Rétt segulmagnaðar segulræmur frá Brunhes (<0,7 m. ár) falla nokkurn veginn saman við núverandi gosbelti á landi. Nyrsta segulræman frá Brunhes þekur eldfjallasvæðið austan við Mývatn og liggur þaðan norður í Öxarfjörð, en þar verður snögg breyting til norðvesturs um Tjörnesbrotabeltið allt til Kolbeinseyjarhryggjar. Í Öxarfirði afmarkast segulræman af misgengjunum við Kópasker og Húsavík. Geirfinnur o.fl. telja að segulsviðið á þessum slóðum sé truflað af völdum afmyndunar í jarðskorpunni.

Af framansögðu má ráða eftirfarandi heildarmynd af Tjörnesbrotabeltinu og jarðfræðilegri gerð Öxarfjarðar, Skjálfanda og nágrennis.

Tjörnesbrotabeltið var í upphafi skilgreint út frá jarðskjálftum, og er 75-80 km breitt og 140-150 km langt svæði á landgrunninu undan Norðurlandi, milli Kolbeinseyjar og lands og frá Öxarfirði og vestur á Skagagrunn. Styrkleiki og gerð stærstu jarðskjálfta sýnir ótvírátt að uppruni þeirra tengist láréttum plötuhræfingum, hliðrun og gliðnun, og eldvirkni frá gosbeltinu á NA-landi yfir á Kolbeinseyjarhrygg.

Sú hliðrun virðist nú fara fram um skástíga NV-SA læga röð eldstöðvakerfa milli Kolbeinseyjar og Öxarfjarðar. Kerfin mynda hryggi og sigdældir í hafsbotninn og upplýsingar um skjálftavirkni, höggun, segulfrávik og eldvirkni á svæðinu falla allar vel inn í mynd af margbrotnum og flóknum plötumótum.

Áður fyrr virðist þessi hliðrun platnanna hafa farið fram um mun afmarkaðra sniðgengjabelti, Húsavíkurmisgengin, og plötumótin þá verið einfaldari að allri gerð. Yfir þessu misgengjabelti og norður af því hefur safnast saman mikið set og varðveist í setlagastafla, vegna þess að sig hefur fylgt láréttu færslunni og setið fyllt þær dældir jafnóðum. Setfargið hefur jafnframt þrýst jarðskorpunni niður jafnóðum og setið hlóðst upp.

Almennt er litið svo á, að Húsavíkurmisgengin hafi orðið til vegna flutnings og myndunar gosbeltis (rekbeltis) á Norðausturlandi fyrir um 6-7 miljónum ára. Þau hafi síðan glatað hlutverki sínu sem meiriháttar sniðgengi þegar gosbeltið sótti til norðurs út Öxarfjörð og núverandi skipulag plötumótanna tók við. Áætlaður aldur jarðlaga í Flatey fellur vel að því að þetta hafi gerst fyrir um einni miljón ára og samfara því hafi setupphleðsla að mestu hætt á Flateyjarsvæðinu, svo sem léleg samlíming efstu laganna og núverandi lega þeirra nálægt myndunarmhverfi (sjávarmál) bendir til. Síðustu ármiljónina hefur setmyndun þá farið fram fjær landi og kann myndun Skjálfandadjúps að hafa veitt straumum og framburði utar en áður.

Rannsóknir á Flateyjarskaga benda til að ísaldarsetlögin undir Flatey hafi sest til eftir að hliðrunarhræfingar voru hættar, því að enda þótt Jancin o.fl. 1985 telji að lárétt færsla um það belti misgengja og afmyndunar, sem þeir lýsa á Flateyjarskaga hafi numið a.m.k. 20 km á um tveggja miljón ára tímabili, þá telja þeir þá færslu hafa átt sér stað fyrir meira en 6-7 miljónum ára. Samkvæmt því yrðu ísaldarsetlögin að teljast alls óháð þeirri sniðgengisfærslu, en lega og lögun setlagastaflans er þó líklega afleiðing af þeim veikleika í jarðskorpunni sem slíkt misgengjabelti óneitanlega er og gerir landsig undan eigin fargi mun auðveldara en ella. Þessi aldursákvörðun á virkni misgengjanna bendir til mun eldri setlagamyndana á botni dældarinnar en áður var talið líklegt, þ.e.a.s. allt að 9-10 miljón ára gamalla í stað 6-7 miljóna, sem hæst var áætlað áður. Á hitt er að líta, að Húsavíkurmisgengin hafa verið virk allt fram á okkar daga, þó svo ekki sé ljóst

hvort sú virkni tengist frekar láréttri færslu eða sigi.

Segja má að umhverfi setmyndunar við Norðausturland sé spunníð úr tveim þáttum. Í fyrsta lagi hefur land sigið og misgengið samfara jarðhræringum á Tjörnesbrotabeltinu, þannig að set hefur safnast fyrir í lægðum á hafsbotni og láglandi. Þessi jarðfræðilega umgjörð og sá óróleiki, sem henni fylgir, hefur ekki einasta skapað skilyrði til varðveislu setlaga, heldur einnig bylt jarðlög-unum til og lyft þeim úr sæ austanvert við Skjálfanda. Margt bendir til að strönd Norðausturlands hafi legið nokkurn veginn um Skjálfanda, Tjörnes og Öxarfjörð allan þann tíma, enda hafa tertíer og kvarter setlög á Tjörnesi að mestu leyti myndast á grunnsævi eða rétt ofan við sjávarmál (Guðmundur G. Bárðarson, 1925; Norton, 1974; Jón Eiríksson, 1985). Sennilegt er að setlög in á Tjörnesbrotabeltinu séu að mestu byggð upp úr landrænu seti frá Íslandi og lífrænu sjávarseti. Gera má ráð fyrir að mest beri á landræna setinu næst landi.

### 3.3 Setlagadældir á hliðrunarbeltum

Þar sem rekbelti hliðrast til er algengt að setlagadældir og rishryggir skiptist á. Hliðrunarmis-gengin mynda venjulega belti, þar sem einstök misgengi eru ýmist bein eða bugðótt, og þótt stundum fari öll hliðrunarhreyfingin fram um afmarkað belti, geta blokkir í jaðarflekunum orðið fyrir verulegri afmyndun. Aðalmisgengin eru nærri lóðrétt og liggja djúpt í stinnhvolfinu, en greinast upp, þegar kemur upp í efstu jarðlögin, sem eru oftast setlög. Hliðrun um bogin eða svingðótt misgengi leiðir gjarnan til þess að fram kemur röð af hryggjum og trogum (pull apart basins). Hugsanlegt er, að Tjörnes sé slíkur hryggur, a. m. k. að hluta til.

Jafnvel þótt hin innri náttúruöfl hafi mikil áhrif á landslag og brotahreyfingar við plötuskil, og þar með á uppsöfnun og varðveislu setlaga, þá markast setmyndun ekki síður af loftslagi, veðrun og rofi. Þannig leggja ytri öflin sinn þátt til umhverfisins. Óhjákvæmilegt er að skoða uppruna sets-ins á landgrunninu undan Norðausturlandi í ljósi beggja þessara þátta. Með hliðsjón af því að öll setlögin, sem til náðist með boruninni í Flatey og eins Tjörneslögin eru mynduð nálægt strönd má slá því föstu að setmyndunin hafi nokkurn veginn haft undan landsigi á þessum tveim stöðum síð-ustu 4 miljónir ára eða svo. Framboð á lausum jarðefnum hefur verið mikið alla ísöldina vegna svörfunar jökla og eldvirkni í vatni og undir ís, og jöklar og fallvötn hafa skilað setinu til sjávar og þeim mun utar, sem landsig var hægara eða framboð meira. Vonir standa til að unnt verði að lesa mun nákvæmari mynd af setlögum í Skjálfanda út úr nýlegum jarðeðlisfræðilegum mæling-um (Karl Gunnarsson, 1985 og 1988).

### 3.4 Gerð og uppruni setlaga í Öxarfirði

Á landgrunninu undan Norðurlandi frá Skaga austur að Melrakkaslétu skiptast á spildur, sem hafa N - S stefnu, og hafa ýmist risið eða sigið. Helstu heimildir um gerð setlaga í sigdældum á landgrunninu eru borholukjarninn frá Flatey (Karl Gunnarsson o.fl., 1984; Jón Eiríksson o.fl., 1990) og jarðlagasyrpur á Tjörnesi (Eiríksson, 1981, 1985). Setlög frá Matuyama og Brunhes (yngri en 2,5 miljón ára), í þessum sniðum bera vott um jökulskeið og hlýskeið, þannig að jöklar hafa margsinnis gengið yfir svæðið og út á landgrunnið, en horfið þaðan á hlýskeiðum. Þannig skiptast á jökulurðir, jökulárset og sjávarset. Eldri setlög eru einnig varðveitt á Tjörnesi, og þar skiptast á grunnsjávarset og surtarbrandslög. Þessi setlög eru frá plósen, og ná e. t. v. aftur á mífósen.

Þótt líta megi á Öxarfjörð í dag sem yngstu sigdældina á landgrunninu fyrir Norðurlandi er engan veginn útilokað, að eldri setlagamyndanir liggi neðar í staflanum. Þá kemur sérstaklega til greina að framhald setlagadeldarinnar meðfram Flateyjar-Húsavíkurmisgengjunum eða forvera þeirra hafi teygst sig austur með Norðurlandi og safnað í sig setlögum einhvern tíma á tertíer.

Landsig er áberandi í Öxarfirði, og áberandi sigstallar liggja austan og vestan fjarðar. Jarðlög á yfirborði eru fremur ung. Víðáttumikil grágrýtislög og móbergsmýndanir frá efri hluta Ísaldar eða Brunhes segulskeiðinu liggja um Melrakkaslétu og í fjöllum og núpum við austanverðan Öxarfjörð. Nútfmahraun teygja sig niður á láglendi sunnan við Kópasker og norðvestur af Hafrafelli, og ná víðast niður undir flatlendi fyrir sunnanverðum firðinum í Kelduhverfi. Þeir hraunstraumar eru flestir upp runnir í grennd við Þeistareykjabungu. Þar framundan kvíslast Bakkahlaup og Brunná um sanda Jökulsár á Fjöllum, sem hefur hlaðið fram sandinn fyrir botni Öxarfjarðar. Fjarðarbotninum svipar að mörgu leyti til óseyrarsléttu og einkennandi eru grunn lón, sandhólar og strandrif. Við vestanverðan Öxarfjörð sér í tertíert berg í Fjöllum og neðst í misgengisstöllum norður eftir Tjörnesi, en þar á ofan hvíla setlög og hraunlög frá fyrri hluta Ísaldar, eða frá Matuyama og Brunhes segulskeiðunum.

Áður en fjallað er um setlagfræðilega túlkun gagna úr holu 4 við Skógalón verður vikið að almennu setmyndunarumhverfi á Öxarfjarðarsvæðinu og þeim líkönum, sem helst koma til álita við umhverfisgreiningu út frá borsvarfi og kjarna.

Tenging Kolbeinseyjarhryggjar og Öxarfjarðar um Tjörnesbrotabeltið hefur breyst á síðustu ármiljónum við það að Öxarfjarðarrekbeltið hefur teygt sig norður á bóginn. Skipulag rekbeltanna hefur þannig breyst, og um leið hefur orðið breyting á landsigi og eldvirkni. Þess vegna er erfitt að spá fyrir um aldur setlaga í Öxarfjarðarsigdældinni. Hugsanlegt er að mislægi séu í jarðlagastíflanum, og að flöturinn sem greinist í jarðsveiflumælingunum á 700 - 800 m dýpi við ströndina marki upphaf núverandi sigtímabils (ef mislægi liggja þá ekki enn ofar). Gögn frá Tjörnesi sýna, að landsig austan við Tjörnes og snörun jarðlaga til austurs var komið af stað þegar á Matuyama (Eiríksson, 1985). Þess vegna mætti ætla, að efsti hluti setlaganna í Öxarfirði sé frá Brunhes og Matuyama, þ. e. frá Ísöld.

Setmyndun á Ísöld mótast af breytingum á útbreiðslu jökla. Umhverfisbreytingar eru miklar milli jökulskeiða og hlýskeiða. Segja má, að setmyndunin fari fram í nokkrum beltum með tilliti til legu íssins. Innsta beltið er undir ís (subglacial zone). Þetta belti er að sjálfsögðu lítið á hlýskeiðum, og takmarkast nokkurn veginn við stærð Vatnajökuls á núverandi hlýskeiði. Á jökulskeiðum má gera ráð fyrir að jöklar hafi náð út í sjó í fjörðum og á landgrunni. Undir ísnum á sér fyrst stað rof og síðan upphleðsla botnurðar undir lok jökulfrámrásar, þannig að eftir situr rofmislægi og lag af botnurð.

Næst kemur belti við Ísjaðarinn (ice-proximal zone). Þetta belti er ýmist á landi eða í sjó, og verður setmyndunin auðvitað mjög ólík eftir aðstæðum. Á landi myndast gjarnan jökulgarðar, víðáttumiklir sandar og annað jökulárset. Á hafsbotni geta myndast jökulurðarbakkar (sporðurðir) við Ísjaðarinn, einkum ef hann er tiltölulega stöðugur um langa hríð, þar sem set, sem berst með jökulísum bráðnar úr botnlögum íssins. Þessi jökulurð sest til ofan á botnurðarlag, og fingrast í áttina til sjávar saman við botneðju og fallsteinaurð. Bræðsluvatn frá ísnum og sjávarfallastraumar geta valdið því að inn á milli koma setlinsur og tungur úr skoluðu efni. Fremri hluti jökulurðarbakkans getur byggst fram, orðið brattur og hrúnið fram í skriðuföllum og eðjustraumum, sem teygja sig til hafs. Þar sem jökuljaðarinn kelfir í sjó fram beint yfir neðansjávarsporðurð getur safnast þar fyrir jökulurð sem berst með botni íssins, í ísnum og á ísnum. Þar sem landföst íshella breiðir sig út yfir hafsvæðið jökulísin flýtur yfir fjarðarbotna eða landgrunn safnast hins vegar eingöngu fyrir jökulurð, sem berst með botni jökulsins.

Þar sem heimskautaloftslag ríkir og botnfrosnir jöklar breytast í fljótandi íshellur getur komið þriðja gerðin af setmyndunarbelti undir íshellu (ice shelf zone). Fremur lítil gögn eru til um setmyndun við þessar aðstæður (Powell, 1984), en umhverfið einkennist af setmyndun fremur en rofi, sérstaklega urð, sem bráðnar úr ísnum og botnfellur. Straumar af völdum bræðsluvatns, sjávarfallastrauma eða annarra hafstrauma geta valdið því að setið skolast og lagskipting kemur fram. Einnig má gera ráð fyrir tungum eða linsum af illa aðgreindu aurflóða- og skriðuseti, sem ættað er

frá þeim beltum, þar sem ísinn hættir að kenna grunns. Þetta geta verið grynningar á landgrunnum eða fjarðarbotnum.

Yst í jöklaumhverfi, sem nær út í sjó er svo ísjakabelti (iceberg zone). Þar sest til efni, sem bráðnar úr ísjökum, sem kelfa í sjó fram úr ísjaðrinum, og varðveislumöguleikar þess eru mjög góðir, hvort sem ís er að hopa eða ganga fram. Setið einkennist venjulega af fallsteinum og seti, sem losnar úr jökulfsnum við bráðnun borgarísjaka. Ef kelfingin fer fram nálægt beltinu þar sem ísinn hættir að kenna grunns fingrast ísjakasetið saman við bræðsluvatnsset og skriðu-, aurflóða- og eðjustraumaset frá jaðarbeltinu.

Jarðlagaskipun í efstu 325 m setlagastaflans í Öxarfirði var könnuð með borunum við Skógalón 1988 (Lúðvík S. Georgsson o.fl., 1989). Greiningar á borsvarfi leiddu í ljós, að efsti hlutinn reyndist vera grófkornað set, mól og sandur, sem rakið var til framburðar Jökulsár á Fjöllum. Þar fyrir neðan greindist fínkornað sjávarset með skeljum. <sup>14</sup>C-aldursgreining á skeljabroti af 70-80 m dýpi gaf aldurinn 3000 ár. Brotkorn úr basalti neðar í holunni bentu til þess að þar kynnu að vera stórir hnullungar eða jafnvel hraunlög í staflanum. Áætlað var, að allur setlagastaflinn, sem holan skar, væri yngri en 10000 ára.

#### 4. AÐDRAGANDI OG BORUN HOLU 4

Í upphaflegri áætlun Orkustofnunar varðandi rannsókn á lífrænu gasi í borholum við Skógalón í Öxarfirði var gert ráð fyrir að dýpka holu 3, sem er 320 m á dýpt, með kjarnabor í u.þ.b. 700 m. Holan var boruð sumarið 1988 og hún gefur 45 l/s af 96°C heitu vatni. Heimamenn í Öxarfirði stóðu að hluta til að fjármögnun borunarinnar og eiga holuna að hluta. Í þessari fyrstu áætlun var gert ráð fyrir að komið yrði fyrir 4" röri í holunni frá holutoppi og það steyppt fast í botni holunnar. Áætlunin gerði síðan ráð fyrir að dýpkun holunnar með kjarnabor færi fram innan í rörinu þannig að koma mætti í veg fyrir að holan skaðaðist.

Í marsmánuði 1991 hófust viðræður við Jarðboranir h/f um framkvæmd verksins eftir að í ljós kom að þeir væru líklega eini verktakinn hér á landi sem framkvæmt gæti þetta verk. Fljótlega kom þó í ljós að Jarðboranir h/f voru ekki tilbúnir að taka að sér að dýpka holu 3 meðal annars vegna þess að þeir töldu kjallara hennar ekki þola það álag sem fylgdi dýpkun holunnar, en lögðu aftur á móti til að boruð yrði ný hola. Jafnframt kom í ljós að Öxfirðingar voru heldur á móti því að dýpka holu 3 vegna ótta við að hún skemmdist. Niðurstaða viðræðna við Jarðboranir h/f og Öxfirðinga var síðan sú, að ákveðið var að ganga til samninga við Jarðboranir h/f á grundvelli tilboðs sem þeir lögðu fram um borun nýrrar holu. Samningur milli aðila um borun holu 4 var undirritaður 7. júní og í stuttu máli þá fólst hann í því að Jarðboranir h/f tóku að sér að bora og fódra 320 m holu á föstu verði, en þar fyrir neðan yrði borað með kjarnabor á daggjöldun. Einnig tóku Jarðboranir h/f að sér gerð borplans og hönnun holutopps. Hóla 4 er 30 m vestan við holu 3, en staðsetning borhola við Skógalón er sýnd á mynd 1.

Borun fyrri hluta holu 4 fór fram í ágústmánuði 1992. Jarðborinn Glaumur boraði niður á 325 m dýpi og fódraði holuna með 3/2" soðinni fódningu. Verkið gekk vel og var umsjón þess alfarið í höndum Jarðborana h/f. Framhald verksins drógst síðan fram eftir september, þar sem jarðborinn Hrímnir, sem átti að annast kjarnaborun neðan 325 m dýpis, tafðist við þorverk í Kröflu. Hann var síðan fluttur á borstað dagana 20. og 21. september. Hér á eftir verður stiklað á því helsta varðandi framvindu kjarnaborunar neðan 325 m dýpis, en nánari lýsingar er að finna í borskýrslum verktaka og minnisblöðum og bréfum í vörslu Orkustofnunar.

Eftir breytingar sem gera þurfti á holutoppi áður en Hrímnir kæmist á holuna og lítilsháttar veðurtafír hófst kjarnaborun 25. september. Borun gekk nokkuð vel fyrstu tvo dagana og að kvöldi 26. septembers var holan orðin rúmlega 362 m á dýpt og kjarnaheimta var mjög góð, oftast alveg um 100%. Neðan 360 m dýpis fór holan að hitna og vatn að koma í hana og borun gekk illa niður á rúmlega 370 m dýpi. Vandræðagangur við borun á þessum kafla stafaði aðallega af því að borinn var ekki útbúinn þeim nauðsynlegu tækjum, sem gert var ráð fyrir í verklýsingu. Þann 28. september tókst að bora niður á 371 m dýpi, en þá slitnaði spilvír og sendill varð eftir niðri í holunni. Til þess að ná honum upp varð að taka upp borstrenginn og þar sem vitað var að vatnsæðar og hrun hafði verið til vandræða á dýptarbilinu 360 til 370 m var ákveðið að steypa í holuna. Kjarnaheimta var léleg á þessu dýptarbili.

Steyppt var í holuna 30. september og steypuborun hófst á 318 m dýpi daginn eftir. Fljótlega leitaði borstrengurinn þó út úr gömlu holunni og var þá borað niður með henni og að kvöldi 2. októbers var holan orðin 365 m á dýpt. Þá brotnaði splitti í sendli og kjarnarör festist í botni holunnar. Daginn eftir skall á norðan óveður og ákveðið var að bormenn færu í helgarfrí.

Borun hófst að nýju þann 8. október og gekk hægt, og holan náði 371 m dýpi um kvöldið. Það var nánast sama dýpi og holan hafði náð 28. september. Daginn eftir boruðust rétt um tju metrar, en þann 10. október fór borun að ganga betur og kjarnaheimta að batna. Borun gekk einnig nokkuð vel fram yfir hádegi 11. október, allt þar til borstrengurinn festist. Holan var þá orðin 425 m á dýpt og ekki tókst betur til en svo að borstöng brotnaði þegar verið var að losa strenginn. Eftir tafir af þessum sökum hófst borun á ný og að kvöldi 13. októbers var holan orðin 440 m á dýpt.

Kjarnaheimta batnaði verulega á 390 m dýpi og var oftast ágæt þar til borun lauk, fyrir utan lélega kjarnaheimtu í kringum 430 m. Nánari lýsingu á kjarna og kjarnaheimtu er að finna í köflum 5 og 6.

Þegar hér var komið sögu var fjárveiting til verksins nánast uppurin, þar með talið viðbótarframlag Iðnaðarráðuneytis að upphæð 2,7 Mkr. Í ljósi þess og vandræða sem upp voru komin vegna þess hve vanbúinn borinn var til verksins var ákveðið að hætta borun. Þann 14. október voru þó boraðir að því er talið einir 15 m og endanlegt holudýpi varð 455,3 m. Þegar borstrengur var tekinn úr holunni kom síðan í ljós að hann var brotinn í 420 m dýpi og skilja varð eftir 35 m af borstöngum, borkrónu og kjarnatökutæki eftir í holunni.

Mynd 6 sýnir verkfma við borun holunnar, annars vegar svarfborunar með Glaum og hins vegar við kjarnaborun með Hrífni. Einnig hefur verið færð inn á myndina áætlun fyrir kjarnaborun þar sem gert er ráð fyrir að gangur borunar væri 30 m/dag.

Ýmsar mælingar voru gerðar í holunni, fyrst áður en borinn fór af henni og síðan voru sumar þeirra endurteknar þegar borinn var farinn. Fylgst var með upphitnun holunnar allt þar til hún var komin í blástur. Sýni til efnagreininga voru tekin eftir að holan fór í blástur og í köflum 6 og 7 er gerð grein fyrir borholumælingum og efnasamsetningu vatns og gass. Að lokinni sýnatöku var holunni lokað og holutoppsbúnaður fjarlægður þar sem borplanið fer undir vatn þegar hækkar í Skógalóni á vetrum. Í töflu 2 eru sýndar helstu upplýsingar um holurnar fjórar í landi Ærlækjarsels.

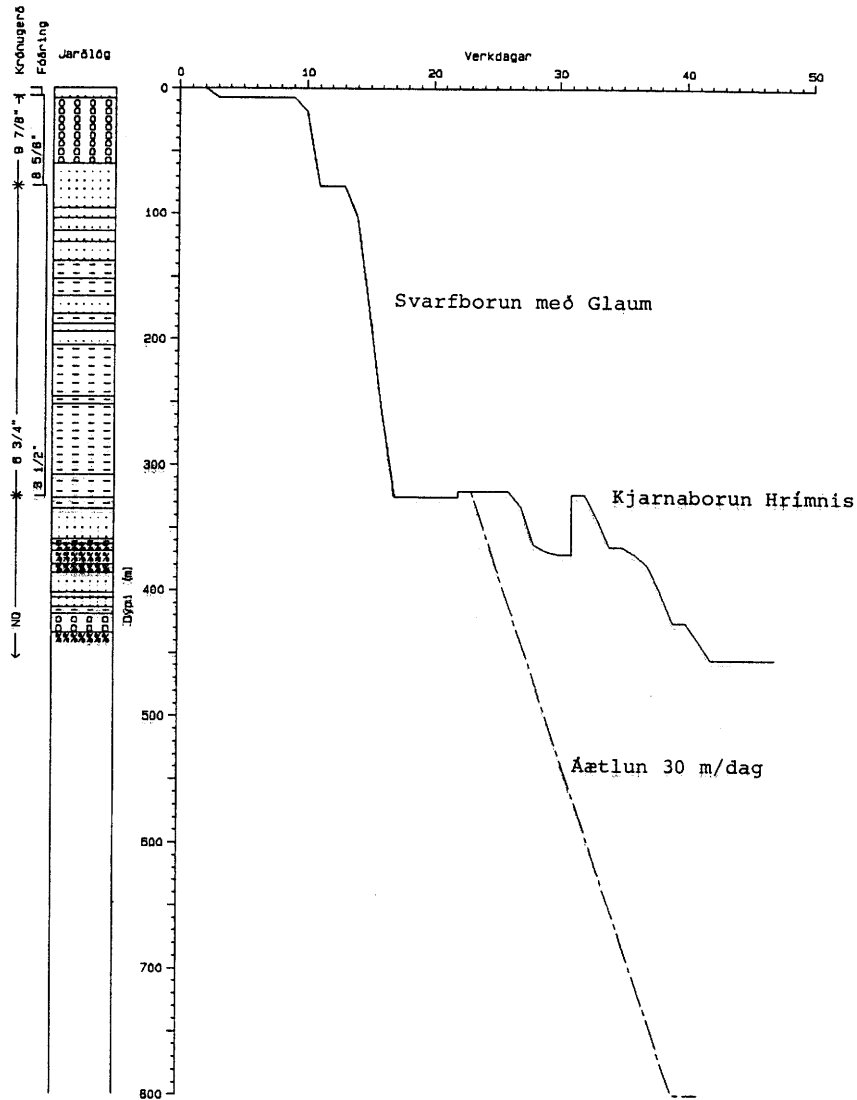
Tafla 2. Helstu upplýsingar um borun hola 1-4

Staður	Bor verk	frá	til	Dýpi m	Bor nafn	Borkróna vídd tommur	Fóðring vídd tommur	Fóðringar dýpi m
62551	ÆR-01			23	Heimamenn	Dæling	10	23
62551	ÆR-01	29-06-87	17-07-87	71,2	Loki	7 7/8	5 1/2	69
62551	ÆR-01	07-08-87	07-08-87	71,2	Traktor	Dæling	2	69
62552	ÆR-02	05-08-87	18-08-87	101,6	Loki	8 1/2	6 5/8	16
62552	ÆR-02	05-08-87	18-08-87	101,6	Loki	8 1/2	5 1/2	101
62553	ÆR-03			30	Heimamenn	Dæling	14	30
62553	ÆR-03	19-07-88	25-08-88	136	Glaumur	12 1/4	9 5/8	119
62553	ÆR-03	19-07-88	25-08-88	322,3	Glaumur	8 1/2	7	322
62554	ÆR-04			5,8		Grafið	14	5,8
62554	ÆR-04	24-06-91	02-09-91	78	Glaumur	9 7/8	8 5/8	78
62554	ÆR-04	24-06-91	02-09-91	325	Glaumur	6 3/4	3 1/2	325
62554	ÆR-04	20-09-91	19-10-91	455,3	Hrífnir	3		

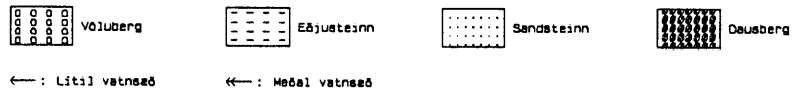


JHD JFR 6702 60F  
82.01.0012

### Ærlækjarsel Hóla ER-04 Verktími og Áætlun



Skýringar við jarðlagasnið



Mynd 6. Verktími og áætlun við borun hól 4.

## 5. JARÐLAGAGREINING

### 5.1 Svarfgreining og kjarnalýsing

Borsvarfið úr holu 4 var greint á sama hátt og í boruninni 1988. Tekin voru reglulega svarfsýni, sem endurspeglar um tveggja metra borkafla hvert. Sýnin voru sigtuð og sandhlutinn greindur undir smásjá. Svo sem vænta mátti eru niðurstöður svipaðar og í holu 3. Engu að síður er mikið öryggi í því að greina svarfið úr báðum holunum, ekki síst þegar meta skal hvort brotkorn úr basalti eru úr stökum hnullungum eða samfelldum hraunlögum. Sama má raunar segja um setlög-

in.

Borkjarninn var greindur undir smásjá jafnóðum og hann kom upp. Kornastærð, lagskipting, litur og önnur setlagafraeðileg einkenni voru skráð samhliða öðrum athugunum og sýnatöku. Í töflu 3 eru dregin saman helstu einkenni á setlögnum og flokkun þeirra, og á mynd 7 er jarðlagastúla, sem sýnir breytingar á setgerð og kornastærð með dýpi. Mynd 8 sýnir jarðlagasnið af holu 4 ásamt krónugerð og fóðringardýpi.

Fyrir botni Öxarfjarðar er óseyri, sem Jökulsá á Fjöllum hefur byggt út í fjörðinn. Efstu setlögin í þessari óseyri eru um 65 m þykk í holu 4 og í augljósum tengslum við ferli, sem eru virk í dag. Þar fyrir neðan verður setið smám saman fínkornóttara og fer að bera á sjávarsteingervíngum. Þessi breyting ber vott um að óseyrin er að byggjast út í Öxarfjörð. Öxarfjörður er nægilega breiður og opinn fyrir haföldunni, til að óseyrin byggist ekki út í tungumyndaða eyri, heldur hefur hafaldan undan að dreifa efninu og jafna því meðfram ströndinni fyrir botni fjarðarins. Öldugangurinn við ströndina er nægilega mikill til að byggja upp eins konar strandrif meðfram endilangri ströndinni, þannig að afrennsli til sjávar kemst ekki hindrunarlaust sína leið. Þannig myndast röð af lönnum innan við ströndina, og eru þau að nokkru leyti árstíðabundin. Í lönin getur safnast fíngerð eða sandur. Þegar óseyrin byggist upp af grófkornóttum áframburði, getur lónasetið varðveist í linsum, og er þá gjarnan merki um nálægð við strönd. Frá 60-64 m í holu 4 skiptast á malar- og siltlög, sem má skoða sem strandlóna- og fjöruset á vxl.

Neðan við 64 m dýpi ber mikið á sandlögum, sem sest hafa til rétt við og neðan við fjöruborð, og á sama bili koma fyrstu sjávarsteingervíngarnir. Þarna eru brot úr samlokum og götugar. Engin leið er að fullyrða um vatnsdýpi á þeim tíma, sem lög þessi mynduðust án þess að gera sérstaka rannsókn á steingervíngunum. Með hliðsjón af kornastærð setsins og varðveislunni steingervínganna er þó sennilegast að setið hafi safnast fyrir á eins konar marbakka við neðri mörk öldurótsdýpis, e.t.v. á 30-50 m dýpi. Sandurinn hefur sennilega borist út á marbakkann og meðfram strönd út frá árósum fyrir tilverkað öldustrauma og sjávarfallastrauma. Sandlögin eru yfirgnæfandi í holunni niður undir 140 m dýpi, og eru fremur fínkorna, en þá tekur við kafli þar sem skiptast á eðjulög og mjög fínkorna sandlög, allt niður undir 210 m dýpi. Vegna þess að um svarfgreiningu er að ræða er ekki hægt að fullyrða um lagskiptingu setsins. Sandlögin hafa annað hvort borist eftir sjávarbotni með eðjustraumum eða öðrum botnstraumum, og fíngerð eðjan hefur botnfallið úr sviflausn eða flust með eðjustraumum niður eftir fjarðarbotninum frá grynningum nær ströndu. Skeljabrot og örsteingervíngar finnast af og til í svarfinu á báðum þessum köflum.

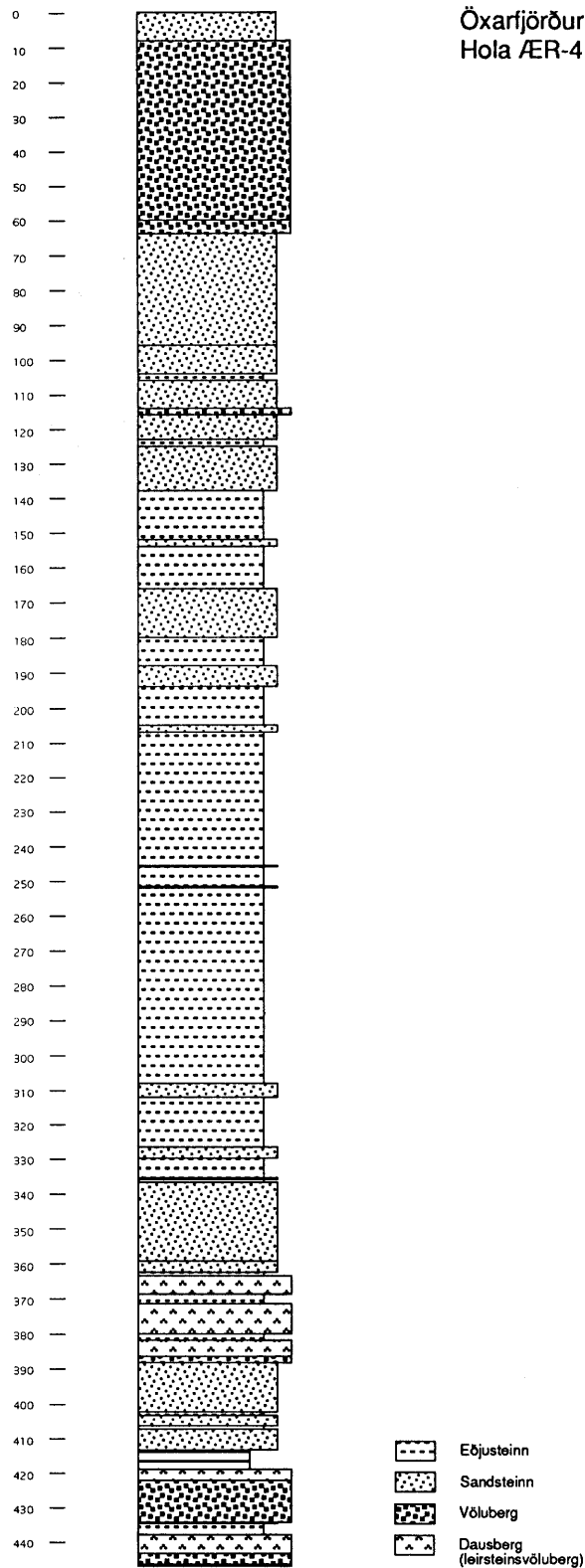
Á dýptarbilinu 210-246 m er setið um 50-75 % silt, afgangurinn fín sandur, og neðan við örþunnt lag af völóttum sandi við 246 m tekur við enn fínna set, leirkennt silt, sem nær niður á 324 m, þar sem kjarnaborun hófst. Í efstu 12 m kjarnans niður á um 336,7 m er setið áfram fínkorna. Efst í kjarnanum eru lagþynnur úr fínsandi og silti, og þar sést að steinn hefur fallið í mjúkt setið og sveigt botnlögin niður. Á mynd 9 er sýnt hvernig setið lítur út á 328,6 m dýpi, en þar er dæmigert eðjustraumaset með lóðgreindum sand og siltlögum. Á þessum tíma hefur strönd Öxarfjarðar legið mörgum kílómetrum innar en nú. Áframburður til sjávar hefur staðnæmst undan ströndinni neðan við öldurótsdýpi þar sem botnfallandi svifaur og botnskriðsefni byggðu fram óseyrarhlíð. Af og til hafa yfirhækkun vegna setburðar, brim, flóð, eða jarðskjálftar valdið því að

spildur úr hlöðinni hafa hrunið fram. Á þessum kafla ber kjarninn vott um að setið hafi lítið náð að stífna milli slíkra atburða, og hefur setið þyrlast upp, blandast sjó og myndað eðlisþunga eðjustrauma, sem hafa ætt niður á fjarðarbotninn, og byggt upp ysta hluta óseyrarinnar. Lítið er um samfelld, fínlagskipt og ótrufluð eðjulög, sem mundu hlaðast upp í rólegra umhverfi milli jarðskjálfta og skriðufalla. Á um 332 m dýpi fer að bera á flóknari lagskiptingu, þar sem eðja og sandur hafa þvælst saman eins og reykslæður. Þetta bendir til hruns á vatnsósa efni en þó samloðandi (mynd 10). Á þessu bili eru einnig varðveitt fargförlag á lagamótum, og eru þau merki um mjög hraða setmyndun. Setið verður heldur grófara í korninu og sandkennt við 336,7 m, en merki um hrun halda áfram. Hér er mikið um siltklumpa í sandinum, og má skýra tilveru þeirra með því að lagskiptur sandur og silt hafi hrunið fram. Sandurinn hefur verið kvikur vegna mikils holrýmishvatns en siltið samloðandi. Dæmi um þetta eru sýnd á myndum 11 og 12. Vaxandi kornastærð á þessu bili getur bent til aukinnar umhverfisorku, til dæmis vegna aukinna strauma og framburðar þannig að ströndin hafi tekið að færast utar á ný, eða e.t.v. vegna lækkandi sjávarstöðu. Slíkt gæti skýrt vaxandi ummerki um afmyndun og hrun á hálfstífu og stífu efni, vegna þess að við afflæðina fer að mæða á setlögum (aukið rof og setfarg), sem áður voru á meira dýpi og fjær landi. Setið er að mestu sandkennt niður á 363,5 m, en þá tekur við mjög illa aðgreind blanda af hálfnúnum hnullungum, sandi og eðju. Greinileg lagskipting kemur fyrir, og í setinu eru skeljabrot. Í neðri hluta þessa setlagahluta virðist grunnurinn vera myndaður við botnfall úr sviflausn, en ofar verður efnið söndugt, en það er eðjan og sandurinn sem ber setið uppi. Þetta lag flokkast sem dausberg (diamictite), og hefur sennilega byggst upp á sjávarbotni undir íshellu eða stöðugum straumi ísjaka frá skriðjökli, sem kelft hefur út í Öxarfjörð. Ofar í kjarnanum eru aðeins stakir fallsteinar, sem kunna að hafa bráðnað úr ísjökum eftir vetrarflóð eða jökulhlaup í Jökulsá þess tíma. Á bilinu 363,5-386,5 m eru þrjú lög af dausbergi, aðskilin af tveimur tveggja metra þykkum siltlögum. Undir dausberginu, frá 386,5-413,5 m er syrpa, sem byrjar neðst með lagþynnóttum fínsandi með siltlögum (mynd 13) en verður svo smám saman grófari upp á við og endar í þriggja metra þykkum völubergslagi efst. Að mestu leyti er hér á ferðinni lóðgreint eðjustraumaset, og ber mikið á fellingum og truflaðri lagskiptingu í fíngerðari hlutum setlagabunkans (mynd 14). Engir steingervingar fundust í þessum kafla, sem sennilega hefur myndast framann við óseyri, sem byggst hefur fram við afflæði. Slíkar óseyrar einkennast venjulega af því að kornastærð vex upp á við. Frá 413,5 m niður í 419 m er brúnn leir í kjarnanum, og bendir hann til rólegra umhverfis, sennilega í sjó allfjarri strönd. Neðsti hluti kjarnans er síðan fremur grófkornóttur og samanstandur af tveimur þörum úr völubergi og dausbergi, sem eru aðskilin af siltsteinslagi frá um 435-438 m. Dausbergslögin eru svipuð þeim sem finnast ofar í kjarnanum og hafa sennilega sest til í vatni. Völubergið í neðri hluta paranna er illa aðgreint, en völuarnar eru þó ekki aðskildar af grunni. Siltlinsur inn á milli benda til að straumur hafi verið nokkuð breytilegur.

Fyrstu merki um áhrif jökla á setmyndun í Öxarfirði liggja á um 350 m dýpi. Setlögin næst þar fyrir ofan bera vott um áflæði, sem síðan snýst yfir í afflæði, þar sem sandar Jökulsár hafa byggst út yfir eldri óseyrarhlöða- og fjarðarset. Líklega er allur þessi kafli myndaður á síðustu 10.000 árum, en dausbergslögin gætu verið frá síðasta jökulskeiði. Fíngerðara set inn á milli þeirra ber vott um breytingar á stærð jökla, en ekki verður fullyrt um, hversu víðtækar þær breytingar voru eða hve langt aftur í tímann þær ná. Ekki er þó ástæða til að ætla að elstu lögin, sem til náðist séu meira en nokkur hundruð þúsund ára gömul.

IE HÍ 6702 JE  
92.07.0359 JE

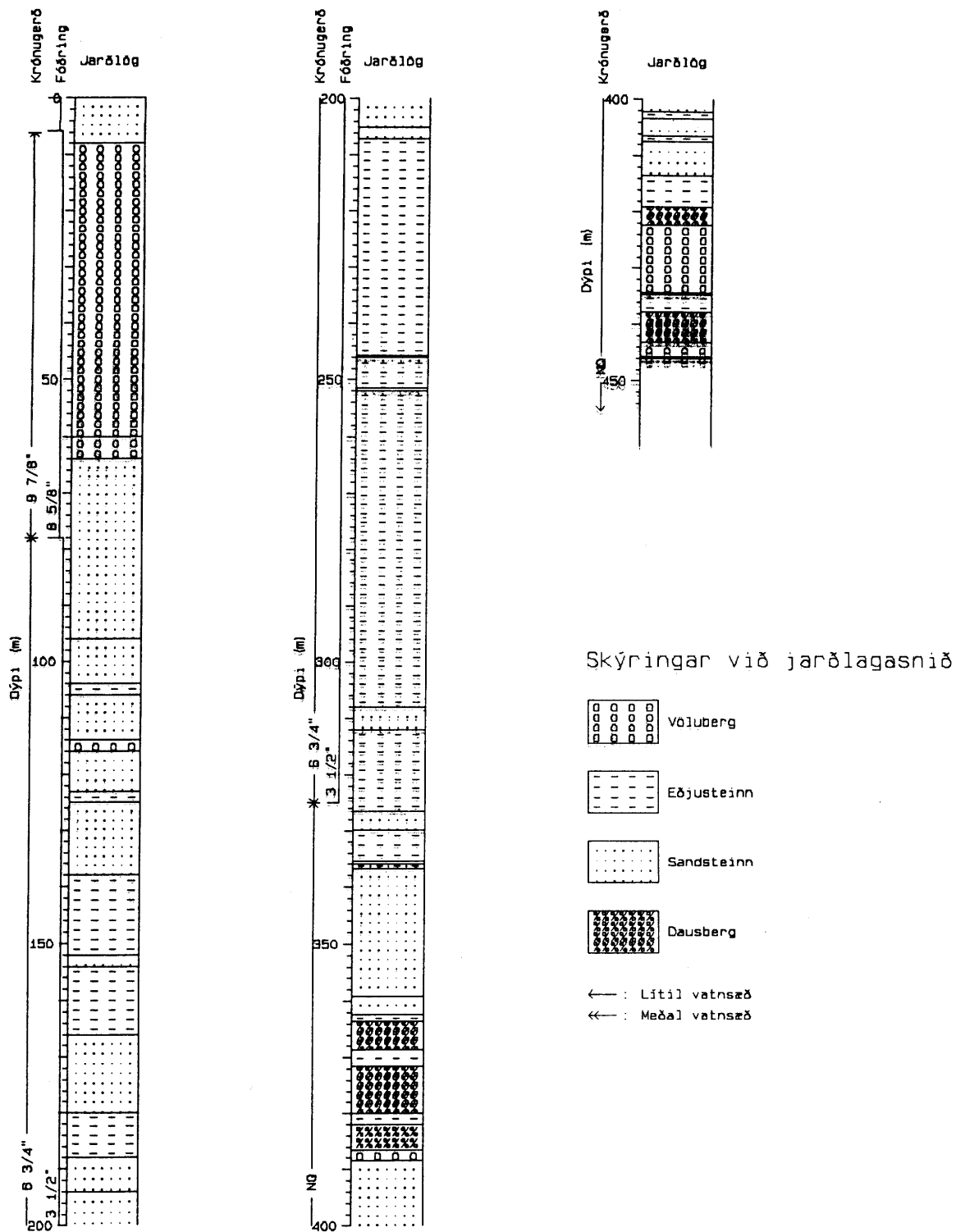
Öxarfjörður  
HOLA ÆR-4



Mynd 7. Einfaldað jarðlagasnið af holu 4 sem sýnir breytingar á gerð sets og kornastærð.

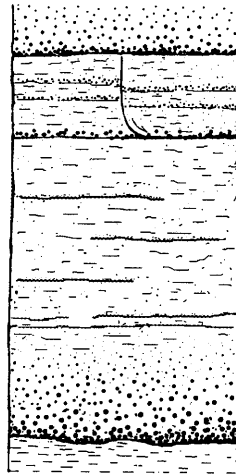
JHD JFR 6702 GÓF  
92.07.0360 T

ÆRLÆKJARSEL HOLA ÆR-04 JARÐLAGASNIÐ



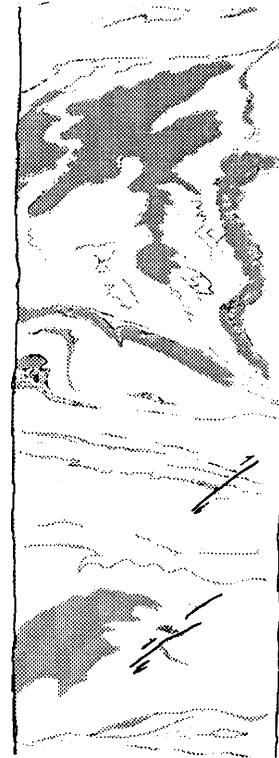
Mynd 8. Jarðlagasnið holu 4.

15 HÍ 6702 JE  
92.07.0369 JE



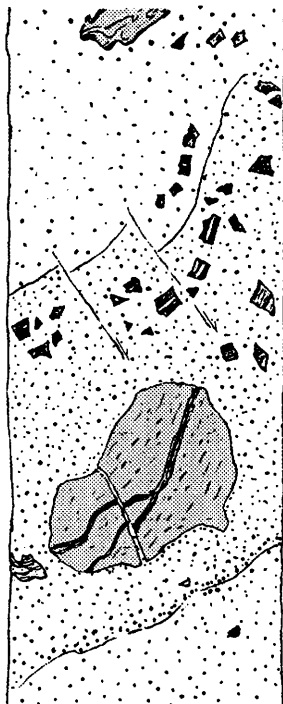
**Mynd 9.** Eðjustraumaset á 328 m dýpi. Lóðgreind sandlög með skarpa il smækka upp á við niður í silt. Minni háttar skágengi hafa myndast samfara setmynduninni.

15 HÍ 6702 JE  
92.07.0370 JE



**Mynd 10.** Lagskipting silts og sands á 333 m dýpi. Upphafleg bygging hefur raskast við snemmæjar hreyfingar á vatnsósa setinu við þáverandi yfirborð.

15 HÍ 6702 JE  
92.07.0371 JE




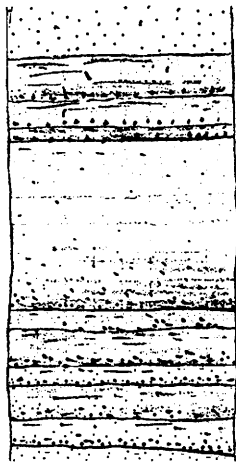
**Mynd 11.** Uppbrotin siltlög (dökkir klumpar) í sandsteini á 358 m dýpi. Siltið hefur lagst út yfir vatnsósa sand og brotnað upp seinna, þegar kvikur sandurinn undir hefur hreyfst af einhverjum ástæðum.

15 HÍ 6702 JE  
92.07.0372 JE




**Mynd 12.** Siltsteinsklumbar í fíngerðum sandsteini á 358,5 m dýpi. Siltið hefur upphaflega myndað samfellt lag, en það hefur brotnað upp eftir að hafa stífnað. Brotin benda til lárréttar skúfspannu á siltlagið, t.d. vegna sterks straums, hruns eða skriðufalla yfir lagið.

 HÍ 6702 JE  
92.07.0373 JE



**Mynd 13.** Syrpa af ótrufluðum sandsteinslögum á 409 m dýpi

 HÍ 6702 JE  
92.07.0374 JE



**Mynd 14.** Fellingar í sandsteini og siltsteini á 409 m dýpi. Setið hefur skriðið til eftir botni án þess að tapa samloðun sinni.

Tafla 3. Yfirlit um jarðlög í holu 4

Dýpi (m)		Ásýnd <sup>1)</sup>	Berggerð	Athugasemdir
Frá	Að			
0,0	8,0	S	Sandur	
8,0	60,0	G	Möl	
60,0	64,0	G	Möl	Skiptist á sandkennd möl og silt
64,0	96,0	S	Sandsteinn	Samlímt basaltgler og kristallar, fáein bergbrot. Siltlög inn á milli
96,0	104,0	S	Sandsteinn	Sandsteinn og siltsteinn með ummyndunaræðum. Stakur steingervingur
104,0	106,0	F	Siltsteinn	
106,0	114,0	S	Sandsteinn	
114,0	116,0	G	Völuberg	
116,0	123,0	S	Sandsteinn	Greinileg lagskipting. Skeljabrot
123,0	125,0	F	Siltsteinn	
125,0	138,0	S	Sandsteinn	
138,0	152,0	F	Siltsteinn	Fínsandur efst, um 50%, en minnkar niður á við. Götungar, skeljakrabbar og skeljabrot (samlokur?)
152,0	154,0	S	Sandsteinn	Fínkorna, siltkenndur sandsteinn með skeljabrotum og götungum
154,0	166,0	F	Siltsteinn	Silt með skeljabrotum, gróft að hluta
166,0	180,0	S	Sandsteinn	Finn til meðalgrófur sandsteinn
180,0	188,0	F	Siltsteinn	Sandborinn siltsteinn með stökum, svörtum basaltglerkornum
188,0	194,0	S	Sandsteinn	Siltborinn sandsteinn, miðhluti lagsins er grófastur
194,0	205,0	S	Siltsteinn	Siltsteinn með skeljum
205,0	207,0	S	Sandsteinn	Mjög finn sandsteinn
207,0	245,7	F	Siltsteinn	Siltsteinn með skeljabrotum, verður fínkornaðri upp á við
245,7	246,0	S	Sandsteinn	
246,0	251,5	F	Siltsteinn	Leirborið silt, 10% sandkorn, mest bergbrot úr basalti
251,5	252,0	S	Sandsteinn	Illa aðgreindur sandsteinn, brúnar, leirkenndar æðar
252,0	308,0	F	Siltsteinn	Siltsteinn, skeljabrot í 287m
308,0	312,0	S	Sandsteinn	
312,0	326,5	F	Siltsteinn	Siltsteinn, neðri hluti lagþynnóttur með 2ja cm sandþynnum með skörpum efri og neðri lagmótum. Engin lóðgreining. Hnullungur hefur fallið í mjúkt setið og hvelft niður undirlagið
326,5	329,8	S	Sandsteinn	Lóðgreind fínsandslög, 5-25 sm, oftast 10-12 cm. Lagþynnóttar silteiningar með fallsteinum. Sandlög með skörpum botni verða fínkornaðri upp á við og enda í silti. Fáein snemmæ misgengi, engin merki um hrun
329,8	335,4	F	Siltsteinn	Lagþynnóttur siltsteinn meðfáeinum mjög ffinum sandlögum. Margir fallsteinar. Hrunfellingar algengar. Fallsteinn í 331,8 m hefur ekki sokkið á kaf í eðjuna. Sand og siltlög hafa lagst eins og klæði yfir hann
335,4	335,9	S	Sandsteinn	Illa aðgreind linsa efst (dausberg?), annars fínsandur með allt að 2ja cm siltsteinsklumpum
335,9	336,7	F	Siltsteinn	Ógreinilega lagþynnóttur til ólagskiptur siltsteinn með afmynduðum sandsnúrum
336,7	359,2	S	Sandsteinn	Rétt lóðgreindur, upp í meðalgrófan sandstein efst. Kantaðir, nærættaðir siltsteinsklumpar efst. Siltlinsur í neðri hluta. Algengir fallsteinar við 345 m
359,2	362,4	S	Sandsteinn	
362,4	363,5	F	Siltsteinn	
363,5	368,7	D	Dausberg	
368,7	371,5	F	Siltsteinn	Siltsteinn með stökum sandkornum. Steingervingar?
371,5	380,0	D	Dausberg	Dausberg, mest hnullungar í siltgrunni, sérlega steinótt við 374-375 m og við 377m
380,0	382,0	F	Siltsteinn	Lagþynnóttur siltsteinn til sandsteinn
382,0	386,5	D	Dausberg	Stórir hnullungar í siltgrunni

Framhald á næstu síðu



Tafla 3, framhald

Dýpi (m)		Ásýnd <sup>1)</sup>	Berggerð	Athugasemdir
Frá	Að			
386,5	388,4	G	Völuberg	Rétt lóðgreint völuberg, komborið mynstur
388,4	402,2	S	Sandsteinn	Lagþynnóttur fín- til mjög fínkornóttur sandsteinn. Efri hlutinn mjög þunnlöggóttur, hvert lag lóðgreint upp í siltstein. Rauðbrúnn litur, stundum mest áberandi neðst í lóðgreindum einingum
402,2	403,3	F	Siltsteinn	Fínþynnóttur siltsteinn
403,3	406,4	S	Sandsteinn	Meðal- til þunnlöggóttur fínsandsteinn. Fallsteinar við 404,3 m. Lóðgreindar einingar úr þunnlöggóttum sandsteini til siltkenndum leirsteini. Nokkur siltsteinalög eru brotin upp vegna sigs í kvika eðju
406,4	407,4	F	Siltsteinn	Fínþynnóttur siltsteinn og mjög fín sandsteinn. Ólagskiptur að sjá neðst, neðri mörk við misgengi
407,4	413,5	S	Sandsteinn	Mjög þunnlöggóttar til lagþynnóttar einingar úr fínsandsteini og siltkenndum leirsteini. Almennt roffböttur við botn eininganna. Nærættaðir steinar úr silti koma fyrir, fargfór í nokkrum einingum
413,5	419,0	F	Leirsteinn	Brúnn leirsteinn, siltlög inn á milli. Lóðgreinist upp á við yfir í lagþynnóttan grófsiltstein og leirstein
419,0	422,3	D	Dausberg	Grár siltgrunnur, dausberg völótt við 419 og 422 m. Sennilega sjávarsteingervingar
422,3	434,3	G	Völuberg	Illa aðgreint völuberg, grunnur aðallega sandur, grænt efst
434,3	434,6	S	Sandsteinn	Mjög fín sandsteinn, lagþynnóttur neðst
434,6	437,8	F	Siltsteinn	Brúnn og grár siltkenndur leirsteinn, (25 cm einingar), verður aðallega grár og þá grófari efst, sandþynnur í efstu 10 cm
437,8	443,3	D	Dausberg	Neðsti hlutinn aðallega völótt silt, sennilega myndað í vatni. Völóttara efst og grunnur verður sandkenndari upp á við.
442,6	445,8	G	Völuberg	Illa aðgreint völuberg
445,8	446,0	S	Sandsteinn	Grófkoma sandsteinn
446,0	446,3	G	Völuberg	Illa aðgreint völuberg

<sup>1)</sup>: Skýringar við ásýndarlykla:

G: Mól eða völuberg. Meðalkomastærð > 2,0 mm

S: Sandur eða sandsteinn. Meðalkomastærð 0,0625-2,0 mm

F: Eðja eða eðjusteinn. Meðalkomastærð < 0,0625 mm. Eðja getur innihaldið bæði silt og leir í hvaða hlutföllum sem er.

D: Dausberg. Illa aðgreind blanda af hnullungum, steinum, vólum og sandkornum í eðjukenndum grunni. Einstök korn snertast ekki og fjóta í grunnininu.

## 5.2 Ummyndunarsteindir, lífrænar leifar og hitaástand

Mynd 15 sýnir yfirlit af helstu ummyndunarsteindum holu 4. Ummyndun borsvarfs úr efri hluta holunnar var greind lauslega en meiri áhersla lögð á ummyndunargreiningu í kjarnahluta holunnar. Steindir voru greindar á hefðbundinn hátt, þ.e. í handsýni, með eða án smásjár, í þunnisneiðum með bergfræðismásjá, og með röntgentæki. Samhliða jarðлага- og ummyndunarathugunum voru sýni valin til greininga á heildarmagni lífrænna kolefna í setlöggunum (TOC-mæling) og eru niðurstöður TOC mælinga sýndar við hlið ummyndunarsteindanna á mynd 15.

Heildarmagn lífrænna efna (TOC: total organic carbon) í setinu var greint á dönsku jarðfræðistofnuninni (DGU) svo sem fyrr er sagt. Tilgangurinn með TOC-mælingu er að finna og velja sýni til frekari kolefnisrannsókna, fyrst með því að ná kolefninu úr berginu (EOM: extraction of organic matter), og nota það síðan til frekari rannsókna, svo sem efnasamsetningar, ísótópagreininga og fleiri rannsókna sem allar miða að því að komast að uppruna, umhverfi, þróun og gerð kolvatnsefnissambandanna. Þannig má t.d. greina á milli hvort viðkomandi kolvatnsefni eru mynduð á staðnum eða hvort þau eru aðflutt úr land- eða sjávarseti. Almenna reglan er sú, að

sögn DGU, að ekki þýði að leita lífrænna leifa í bergi til frekari rannsókna ef heildarmagn lífræns kolefnis í sýni er minna en 1-2%. Svo sem fram kemur í töflu 4 og á mynd 15 sést að lífrænt efni mældist svo lágt í sýnunum (0,02-0,05%) að frekari rannsóknir á lífrænum leifum í sýnunum voru ástæðulausar. Nær öruggt má því telja að uppruni gassins sé ekki í þeim jarðlögum sem skorin eru af holunni. Lífrænt gas berst auk þess með jarðhitavatninu í aðalvatnsæð holu 4, á 370 m dýpi, svo líklegast er að uppruna þess sé að leita neðar.

Tafla 4. Heildarmagn lífrænna efna (TOC) í seti.

Dýpi (m)	TOC (%)	Dýpi (m)	TOC (%)
106,0	0,0280	369,8	0,0281
150,0	0,0437	392,6	0,0472
196,0	0,0242	416,2	0,0176
250,0	0,0170	418,7	0,0183
298,0	0,0282	434,9	0,0203
327,8	0,0351	436,8	0,0220
330,6	0,0181	441,6	0,0139
333,1	0,0281	443,4	0,0138
342,6	0,0324	444,1	0,0187
353,6	0,0302	445,8	0,0140

Staðsetning vatnsæða er sýnd með örvum við hlið jarðlagasniðsins (mynd 15). Staðsetning vatnsæða og ummyndun eru oft rædd samtímis, því nýjar steindir og/eða aukning á magni ummyndunnarsteinda tengist oft vatnsæðum eða vatnsæðakerfum. Ummyndun í efstu 200 m holunnar er fremur lítilfjörleg. Efstu 50 m setsins eru ósamlímdir og ummyndunarsteindir sjást varla. Helst má sjá lítilsháttar oxun (ryðmyndun). Neðan 50 m dýpis er setið það samlímt að hægt er að tala um sandstein, og virðist samlímingarefnið vera smektít-leirsteindir og einhver járnnoxíð (ryð: límonít, göttít). Á u.þ.b. 100 m dýpi fara ljósar zeólítaæðar að sjást, og á 130 m dýpi er áberandi aukning í zeólítum. Trúlega er sú aukning tengd kröftugri vatnsæð sem er á 135-145 m dýpi í holu 3 sem er rétt í 30 m fjarlægð frá holu 4. Í holu 4 er getið um rennlisaukningu (vatnsæðar) á 132 m dýpi og 150 m dýpi (rennsli 2,6 l/s), og eru þær vatnsæðar trúlega tengdar vatnsæðinni í holu 3. Á 208 m dýpi var rennsli í holu 4 mælt 8,8 l/s í borun en að öðru leyti er vatnsæða ekki getið í borskýrslu, enda urðu engin vandræði af völdum vatnsæða meðan á borun stóð. Á hitamælingum úr holu 4 sjást vatnsæðakerfi á 130-150 m dýpi, 180-190 m dýpi og loks á 240-260 m dýpi.

Kabasít og analísím greindust með röntngreiningu (XRD: röntgen diffraction), auk þess sem þráðóttur zeólíti (thomsonít ?) sést líka. Þessir zeólítar myndast við fremur lágan hita og gætu verið í jafnvægi við núverandi jarðhitavatn, ásamt smektíti sem var greint á 50 m bili með XRD, frá 50 m dýpi allt niður í 300 m dýpi. Dreifing kabasíts og thomsoníts var könnuð sérstaklega (með XRD) en steindirnar fundust einungis í ofangreindum sýnum.

Á u.þ.b. 200 m dýpi virðist steindasamfélagið breytast lítillega. Þar verða kalsítæðar meira áberandi, leirinn verður heldur grænleitari og þýrt fer að sjást, auk klínoptilólíts (alkali-ríkt afbrigði af heulandít). Breytingin í leirsteindum kemur fram í XRD-greiningunum því þar greinist svellandi klórít (corrensít) auk smektíts.

Nærri 300 m dýpi er ásýndarbreyting í zeólítasamfélaginu. Samkvæmt handsýnisgreiningu virtust þráðóttir zeólítar (skólesít/mesólít og mordenít) og heulandít og laumontít verða algengir. Það fékkst þó ekki staðfest með ítarlegri röntngreiningu, sem einungis sýnir klínoptilólít og mordenít, og er sú niðurstaða sýnd á mynd 15. Nýmyndun zeólíta á kostnað gamalla zeólíta er hugs-

anleg skýring á mismun handsýnis- og röntngreininga, sem e.t.v. mætti staðfesta í þunnisneiðum, en samkvæmt röntngreiningunum fæst nokkuð sérstæð mynd af dreifingu og gerð zeólítana (mynd 16). Hún sýnir í aðalatriðum fjórar gerðir zeólíta, analsím, klínoptilólít, mordenít og wairakít. Sammerkt með öllum þessum steindum nema wairakít er það að vaxtarhiti eða kjörhiti þeirra er illa þekktur. Aðalatriði er hins vegar að allar þessar steindir finnast sem sprungufyllingar í kjarnahluta holunnar, sem er 120-150°C heitur, og ekki er annað að sjá en að a.m.k. klínoptilólít og mordenít sé nýmyndað.

Auk þeirra finnast svo kvars, kalsít og blandlagsleir neðan 300 m dýpis. Reynsla frá íslenskum háhitasvæðum bendir til að steindasamfélagið wairakít-kvars-blandlagsleir myndist ekki við lægri berghita en um 200°C. Það bendir til að berghiti í holu 4 hafi komist yfir 200°C um einhvern tíma, en núverandi berghiti í nágrenni aðalvatnsæðarinnar á 370 m dýpi er rétt um 150°C. Sú niðurstaða er athyglisverð því hún bendir til að jarðhitasvæðið við Skógarlón eigi meira skylt við háhitasvæði en lágghita. Reynt var að staðfesta að hitastig neðan 300 m dýpis hafi komist yfir 200°C með því að mæla hitastig í vökvabólum í kristöllum.

Mælingar tókust í tveim sýnum, í báðum tilvikum í kalsíti. Fyrri sýnið er frá 413,2 m dýpi. Þar mældist vökvabóluhiti í einni bólu 206°C, í annari 238° og í 6 öðrum milli 230-240°C. Mælingar á samrunahita (T-homogenization) í vökvabólum byggir á því að kristallinn sem inniheldur vökvabólur er hitaður upp í þar til gerðum klefa í smásjá og fylgst er með því hvernig loftbóla í vökvannum smáminnkar þar til hún hverfur á endanum, og er það hitastigið sem mælt er. Reiknað er með að vökvi sem lokast inni í holrými í kristal meðan kristallinn er að vaxa við einhvern háan hita og þrýsting í jarðhitakerfi fylli út í allt holrýmið sem hann lokast inni í. Við kólnun niður í yfirborðshita dregst vökvinn saman og myndast þá einskonar loftbóla eða lofttóm (vacuum) inni í vökvaryminu. Með mælingum á vökvabóluhita er þessu ferli einfaldlega snúið við með hitun þar til vökvinn fyllir út í allt holrýmið, og er sá hiti talinn svara til myndunarhita kristallsins.

Hitt sýnið sem náðist að mæla á þennan hátt er frá 421,3 m dýpi. Þar mældist samrunahitinn í nokkrum vökvabólum gefa: 228°C, 239°C, 242°C, 245°C, 247°C og 248°C. Vökvabóluhitinn í kalsíti neðan 400 m gefur þannig til kynna að kalsítið hafi fallið út í jarðhitavatni sem var á hitabilinu 200-250°C, og styður það hitamatið út frá steindasamfélaginu kvars-wairakít-blandlagsleir, þ.e. > 200°C eins og sagt var að ofan. Hvort tveggja bendir því til að jarðhitasvæðið við Skógalón sé háhitasvæði, og er það mikilvæg nýjung í rannsóknum á þessu svæði. Áður hölluðust menn frekar að því að jarðhitasvæðið við Skógalón ætti meira skylt við lágghitasvæði en háhita, og væri einskonar affallsvatn frá háhitasvæðinu við Bakkahlaup sem liggur nokkrum km sunnar í sprungubeltinu. Sú ályktun var dreginn af yfirborðsummerkjum og samsetningu heita vatnsins sem fram til þessa hefur ekki sýnt nein skýr einkenni háhitavökva, nema e.t.v. sá vökvi sem kemur úr holu 4 (sjá kafla 6).

Velta má fyrir sér afleiðingum þess á hugsanlega jarðöflu ef jarðhitasvæðið við Skógalón reynist vera háhitasvæði fremur en lágghitasvæði. Háhitinn gæti stafað af innskotavirkni í rótum gosbeltisins, sem rifnaði upp til norðurs úr Kröflu sprungukerfinu fyrir u.þ.b. 1 miljón ára (kafla 3). Vitað er út frá Kröflu- og Mývatnseldum (Björnsson, 1985) að sprungukerfið rifnar upp á u.þ.b. 300 ára fresti, a.m.k. síðustu árhundruðin, og hraunkvika fyllir í sprungurnar. Í kjölfar Kröfluelda 1975 rifnaði jörð í Öxarfirði og jarðhitavirkni jókst vísða.

Í fljótu bragði virðast áhrif háhitavirkni á lífrænt efni í setlögnum geta verið tvíþætt. Annars vegar getur hár eða hækkandi hiti hugsanlega hraðað myndun jarðöflu úr óþroskuðum lífrænum leifum, og þannig verið ein af frumorsökum fyrir lífræna gasinu. Hins vegar getur of hár hiti, t.d. í næsta nágrenni kvikuinnskots, á myndunarstað eða í forðabergi með gamalli jarðöflu, leitt til þess að jarðöflan "brynni yfir" og eyðilegðist, en í því felst að flóknar efnakeðjur brotna niður í einfaldari efnasambönd og að lokum í methan-gas (CH<sub>4</sub>) og hreint grafit. Við það myndi olfusvæði breytast í verðminna gassvæði.

Gassvæðum sem myndast hafa af jarðolífu er skipt í tvennt, blaut eða þurr gassvæði, og eru þau fyrrnefndu (wet fields) einskonar millistig milli olfu- og gassvæða. Í ljós hefur komið við ísótópa-greiningar á jarðgasinu við Skógalón að lífræna gasið flokkast ýmist inn á svið þurr-gass eða blautgass en ekki á olfusvið (sjá kafla 7). Það gæti bent til að hugsanleg jarðolía undir Skógalónssvæðinu hafi yfirhitnað. Í því gæti falist að "óskemmd" jarðolía myndist annars staðar á Öxarfjardarsvæðinu, ef jarðolífu er þar að finna yfirleitt. Hugsanlegt er einnig að lífræna gasið sé upprunnið í surtarbrandi sem er að kolast, eða úr upphituum surtarbrandi svipuðum þeim sem leiddi til lítilsháttar jarðolífumyndunnar á Lónsöræfum (Sveinn Jakobsson og Guðmundur Ó. Friðleifsson, 1989). Í gasgreiningunum (kafla 7) hefur verið kappkostað að reyna að komast að uppruna gassins, en sú leit er torveldar þar sem ekki náðust sýni til efnagreininga af lífrænum leifum á upprunastað, eða af tilfluttri jarðolífu.

### 5.3 Sprunguathugun og holrými

Tækifæri gafst til að mæla halla, þykktir og þéttleika sprungna í borkjarnanum samhliða ummyndunarathugun. Jafnframt var virkur poruhluti nokkurra setsýna mældur og hann borinn saman við óbeina mælingu á vatnsinnhaldi bergsins, sem mælt var með svokallaðri neutron-neutron mælingu (n-n mælingu) og framkvæmd með öðrum borholumælingum (kafla 6).

Mynd 16 sýnir yfirlit yfir fjölda sprungna í hverjum kjarnametra. Gögnin eru háð kjarnaheimtu sem sýnd er til samanburðar, ásamt virkum poruhluta og heildar poruhluta. Á myndinni sést að nákvæmra gagna um sprungur er helst að vænta á bilinu 325 m til 360 m, þar sem kjarnaheimta er nærri 100 %, og svo frá 390-400 m og 408-426 m.

Meðalfjöldi sprungna í hverjum kjarnametra á bilinu 325-360 m er 1,5 sprunga/m. Á myndinni sést að svipaður sprungufjöldi er í hverjum lengdarmetra neðar í holunni, þó ekki sé það reiknað út vegna lélegri kjarnaheimtu. Niðurstaðan er því sú að 1 - 2 sprungur finnast að meðaltali í hverjum lengdarmetra í setlagastaflanum, a.m.k. á því dýptarbili sem kjarnaborunin nær yfir.

Vidd sprungna var mæld eða metin samhliða skoðun. Sprunguvíddin er breytileg frá < 0,1 mm upp í 7 mm. Um 44% eru < 0,1 mm, 70% < 1 mm, og um 90% eru < 2 mm. Þannig mældust rétt um 10% sprungna vera víðari en 2 mm. Allar nema ein af víðustu sprungunum eru á bilinu 344 m til 355 m, rétt ofan við aðalvatnsæðina í holunni sem er á 360-370 m dýpi.

Meðalþykkt allra sprungna í kjarnanum ofan 360 m reiknast vera tæpur 1 mm, en úr heillega kjarnahlutanum neðan 390 m dýpis rétt um 0,25 mm. Þó meðalfjöldin sé 1-2 sprungur/m, þá má líka sjá á mynd 16 að sprungunum fjölgar heldur er nær dregur vatnsæðinni á 360 m dýpi. Gögnin benda því til að bæði sprunguþéttleiki og sprunguvíddir aukist er nær dregur vatnsæðinni, sem í þessu tilfalli er í normalmisgengi sem hefur um 70° halla. Þannig mælast fleiri sprungur og víðari í berghlutanum sem sígur niður en hinum sem stendur eftir.

Áhrif sprungna og sprunguþéttleika á lekt er umtalsverð svo sem eftirfarandi dæmi sýnir. Poruhluti og lekt setlagana (permeability) var mælt í fjölmörgum sýnum (kafla 6). Meðalporuhluti reyndist vera 38% og meðallekt 0,1 mD (milliDarcy), og er sú lekt sambærileg við lekt í leir sem þykir léleg, svo notað sé skiljanlegt mál. Ástæðuna má e.t.v. rekja til samlímingar setkornanna vegna jarðhitaummyndunar, en samkvæmt þunnsneiðagreiningum er samlímingarefnið fyrst og fremst úr leir. Opnar sprungur í setlögnum myndu breyta lektargildunum umtalsvert. Til dæmis hefur sprunga sem er 0,1 mm á breidd lektina 100 mD, sem er þúsund sinnum betri lekt en í berginu sjálfu. Sprunga sem er 1 mm á vídd hefur lektina 100 D, sem er miljón sinnum betri lekt en í berginu, og loks hefur 5 mm sprunga lektina 10.000 D. Af þessu má ráða að heildarlektin í gegnum setlagastaflann margfaldast eftir því sem sprungum fjölgar og gliðnun eykst. Lektargildi sprungna skiptir þó ekki miklu máli nema sprungurnar séu nægjanlega langar og að þær myndi samhangandi net.

Sprungurnar eru aðallega af þrem gerðum, þ.e. reglulegar sprungur (halli 30-80°), misgengisprungur (halli 65-85°) og svo óreglulegar togsprungur (70-90°) sem oft eru endasleppar. Fyrri tvær gerðirnar eru yfirleitt breiðari en togsprungurnar. Vel má ímynda sér að allar sprungugerðir hafi myndast samtímis. Þannig má greina ákveðið mynstur á bilinu 340-360 m, sem sýnir að togsprungurnar hafa myndast næst misgengissprungunum báðumegin, á svona 2-3 m kafla, en reglulegu sprungurnar á 2-3 m bili mitt á milli togsprungnanna. Þess má geta að strik og halli reglulegu sprungnanna er breytilegt, og er ekki óalgengt að sjá snúning í striki upp á 90° í sprungum af þessari gerð í sama kjarnabútnum. Nokkuð virðist þó einsýnt út frá þessum athugunum að sprungurnar myndi samhangandi net.

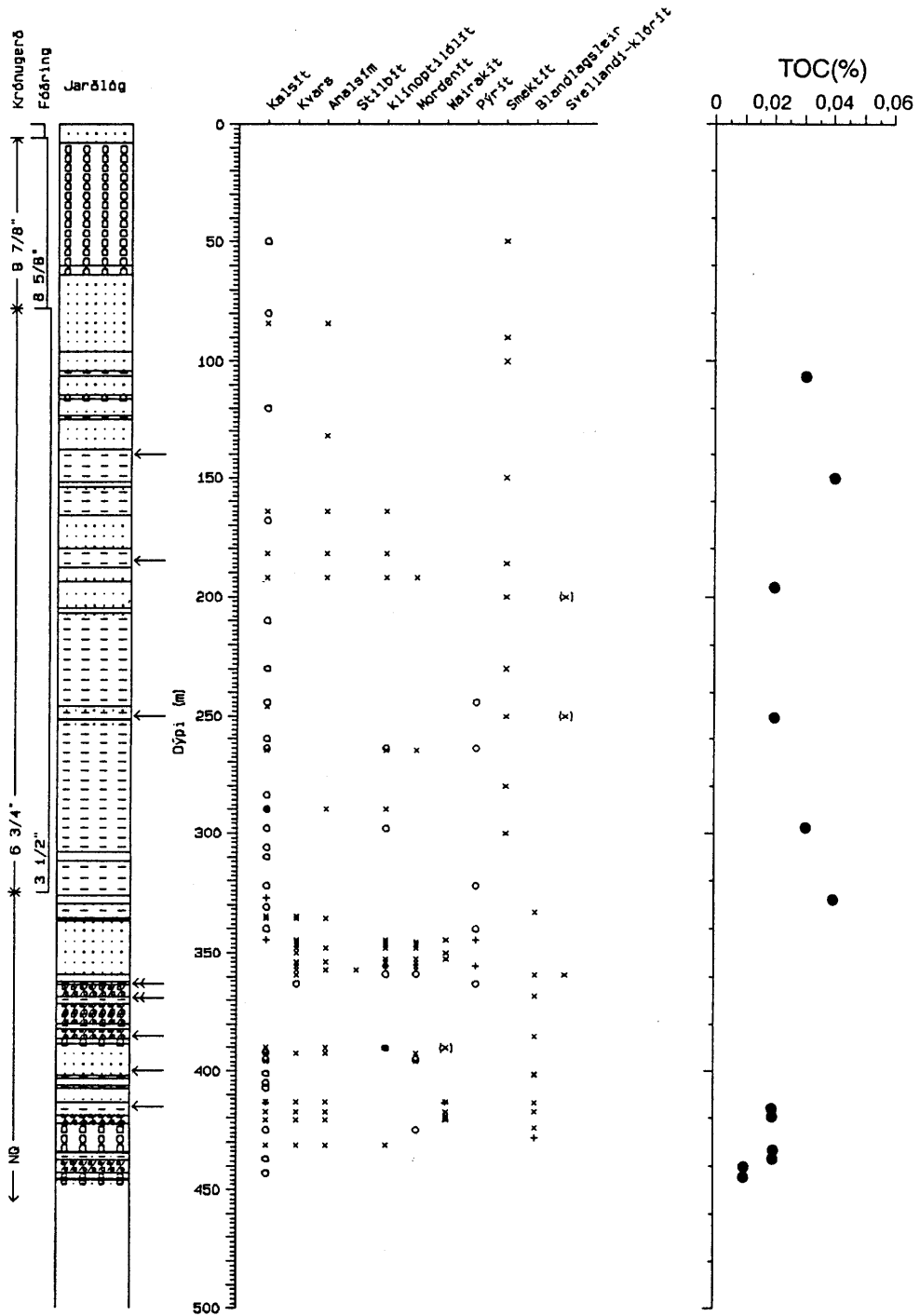
Færslur um misgengjasprungurnar sem hér um ræðir eru litlar, nema e.t.v. á misgenginu í 360 m, en þar rétt ofan við má finna holrými í kjarnanum sem myndaðist í misgengisbreksfu. Í holrýminu, sem er hálfyllt, sést að zeólítarnir skólesít og heulandít eru eldri en mordenít, auk þess sem breksfan virðist hafa hreyfst a.m.k. tvisvar þar sem holrými myndað við seinni hreyfinguna er innfyllt af mordeníti og steind sem svipar til laumontíts (líklega klínoptilólít skv. röntgengreiningum). Fleiri vísbendingar um misgamlar sprungufyllingar má tóna til, en beinhörð gögn þar sem sprunga sker sprungu eru af skornum skammti. Ummyndunarröðina kalsít + wairakít -> kalsít virðist mega sjá á rúmlega 390 m dýpi og neðar, staðfest með þunnisneiðaathugun. Svo og mordenít-wairakít -> kalsít, auk þess sem tvær kynslóðir kalsítútfellinga virðast vera varðveittar. Loks finnst röðin: rauður leir -> leir-zeólítar -> kalsít á rúmlega 400 m dýpi. Í heildina tekið benda gögnin til að lághitazeólítar (skólesít/mesólít-heulandít) hafi myndast á undan mordeníti, kvarsi, wairakít og kalsíti, sem síðan er fylgt eftir af kalsíti, klínoptilólíti og mordeníti.

Röntgengreiningar voru gerðar á fjölmörgum sprungufyllingum í kjarnahluta holunnar (mynd 17). Enginn marktækur munur kom fram á milli mismunandi gerða sprungna og ummyndunarsteindanna sem fylla þær, sem styður þá hugmynd að allar sprungugerðir hafi myndast í sama spennusviði gliðunnar og sigs. Hins vegar kemur fram ákveðin tvískipting í steindasamsetningu sprungnanna ofan og neðan aðalvatnsæðarinnar á 370 m.

Í efri hópnum finnst mordenít-klínoptilólít-analsím-kvars. Athyglivert er að kalsít finnst ekki í þessum hóp nema í efsta sýninu. Neðri hópurinn einkennist hins vegar af kalsíti-kvarsi-wairakíti en analsím, klínoptilólít og mordenít eru sjaldgæfari. Þessi niðurstaða bendir til að klínoptilólít, mordenít og analsím séu næst því að vera í jafnvægi við jarðhitavatnið í aðalvatnsæðinni, sem líkast til er þá undirmettuð með tilliti til kalsíts. Líklegast eru svo kvars og wairakít eldri og væntanlega frá þeim tíma sem vatnið var rúmlega 50°C heitara.

Svo er að sjá á berginu, einkum í brotabergi, að berglektin næst misgenginu sem skorið var í 360-370 m dýpi við aðalvatnsæðina hafi aukist öðru hvoru, og þá væntanlega mest í kjölfar hreyfinga á misgenginu. Í dag eru flestar sprungurnar þar fylltar eða hálfylltar af ummyndunarsteindum og lektin lítil nema í misgenginu sjálfu, sem lekur vel.

JHD JFR 6702 GÓF  
92.06.0320 T



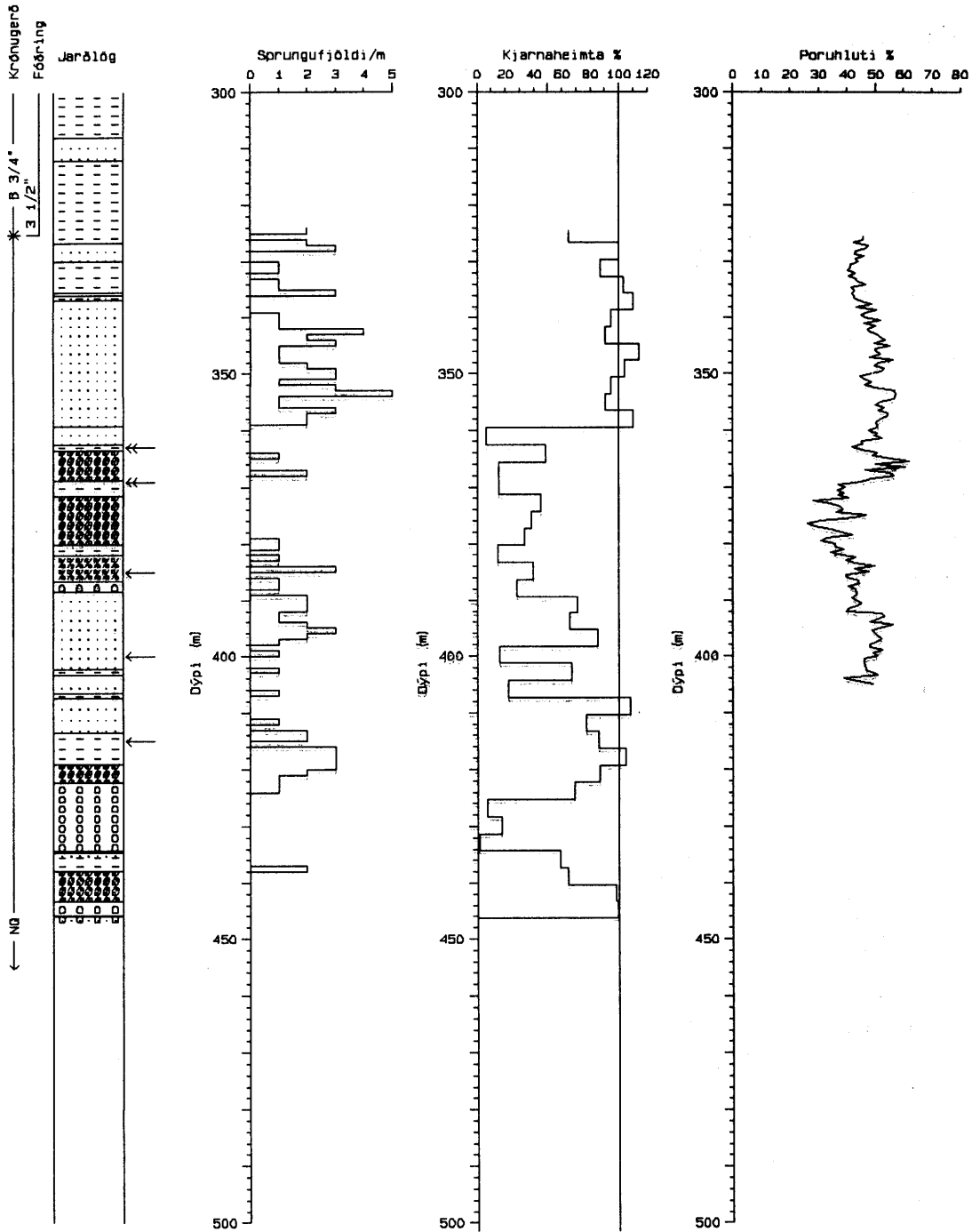
Skýringar við jarðlagasnið



← : Litil vatnsæð      ← : Meðal vatnsæð

Mynd 15. Jarðlög, ummyndunarsteindir og TOC í holu 4.

JHD JFR 6702 GÓF  
92.07.0361 T



Skýringar við jarðlagasnið



Völuberg



Eðjusteinn



Sandasteinn



Dausberg

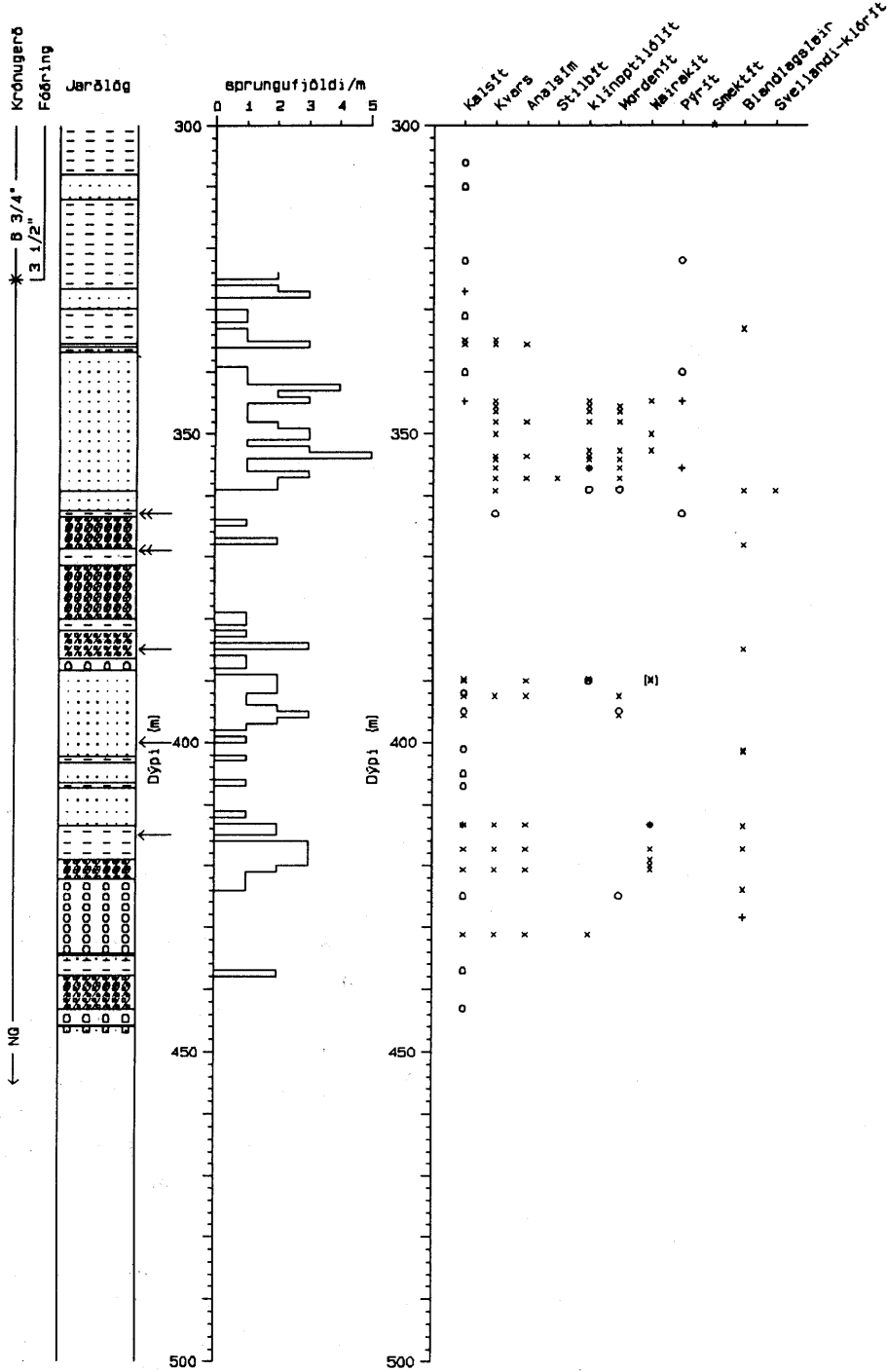
← : Lítil vatnsæð

←← : Meðal vatnsæð

Mynd 16. Sprungufjöldi, kjarnaheimta og poruhluti í kjarna.



JHD JFR 6702 GÓF  
92.07.0362 T



Skýringar við jarðlagasnið



Völuberg



Eðjustein



Sandsteinn



Dausberg

← : Lítil vatnsæð

←← : Meðal vatnsæð

Mynd 17. Sprungufjöldi og ummyndunarsteindir í kjarna.



## 6. BORHOLUMÆLINGAR

Allar borholumælingar sem gerðar hafa verið í holum 1, 2, 3 og 4 í landi Ærlækjarsels, eru tilgreindar í töflu 5. Þetta eru alls 50 mælingar og þar af eru 33 hitamælingar. Aðrar mælingar sem gerðar hafa verið í holunum eru mælingar á vídd og halla þeirra ásamt jarðeðlisfræðilegum mælingum á jarðlögum við holurnar, svokallaðar jarðlagamælingar (viðnám, nifteindadreifing og gammageislun). Allar mælingar eru númeraðar í gagnagrunni Orkustofnunar og er þetta númer sýnt í dálki "Mælingarnúmer" í töflu 5. Þegar vitnað er til ákveðinnar mælingar er númer hennar sett innan sviga í texta. Flestar mælinganna eru gerðar í eða stuttu eftir borun en 3 hitamælingar eru til úr holu 3 fjórum mánuðum eftir borlok. Hér á eftir verður fjallað nánar um þessar mælingar.

### 6.1 Hitamælingar

Nokkur fjöldi hitamælinga er til úr holum 1, 3 og 4 og eru flestar þeirra mældar með thermistor. Ein hitamæling er til úr holu 2 en þar sem holan er fjarri hinum holunum verður ekki fjallað um hana hér. Hér á eftir verður litið á hitamælingar úr holum 1, 3 og 4, staðsettar vatnsæðar og reynt að áætla berghita jarðhitakerfisins út frá þeim hitamælingum sem eru ótruflaðar af rennsli. Listi yfir vatnsæðar í holunum er birtur í töflu 6 og upplýsingar um þau hitastig og dýpi sem notuð voru til áætlunar á berghita eru í töflu 7. Allar hitamælingar úr holunum eru birtar á myndum 18-23.

Sex hitamælingar eru til úr holu 1, allar mældar 3-5 vikum eftir borlok með thermistor. Hæsti hiti mældist 107,6°C á 70 m (# 6075).

Úr holu 3 eru til sautján hitamælingar, 13 voru mældar í borun en 4 eftir borun (tafla 5), og voru þær flestar mældar með thermistor.

Nokkur fjöldi vatnsæða er í holunni og til að átta sig á staðsetningu þeirra er best að skoða mælingar frá 21. ágúst 1988. Þann dag er holan mæld eftir að hafa staðið lokuð yfir nótt (# 2035). Á þessari mælingu sést að dýptarbilið 150-200 m er mun kaldara en aðrir hlutar holunnar. Ekki mun hafa tapast mikið skolvatn í borun á þessum kafla (Lúðvík S. Georgsson o.fl., 1989; Borskýrslur) þannig að þetta lága hitastig er ekki kæling af borun. Þessi kaldi kafla hitnar þegar holan er í rennsli, en kólnar standi hún lokuð (Sjá mælingar frá 30. des 1988 (# 2042 og # 2043) og mælingar 20. og 21. ágúst 1988 (# 2034 og # 2035)). Þegar opnað var fyrir holuna um kl. 08:40 þennan dag gaf hún um 25 l/s og kemur þetta vatn að mestu úr æðum á 120-140 m eða rétt neðan fóðringar (# 2036), en lítilsháttar kemur neðar úr holunni. Byrjað er að dæla köldu vatni á holuna kl. 9 og hún hitamæld í áðælingu (# 2038) og kemur þá í ljós að áðælingin fer að stærstum hluta út í æðar á 120-130 m og 200-210 m dýpi en eitthvað lítið fer niður í 230 m, en þar er neðasta æðin í holunni. Samkvæmt þessum mælingum má því ætla að æðar séu á 120 m, 130 m, 200 m, 210 m og 220 m, en stærstu æðarnar eru á 120-130 m dýpi.

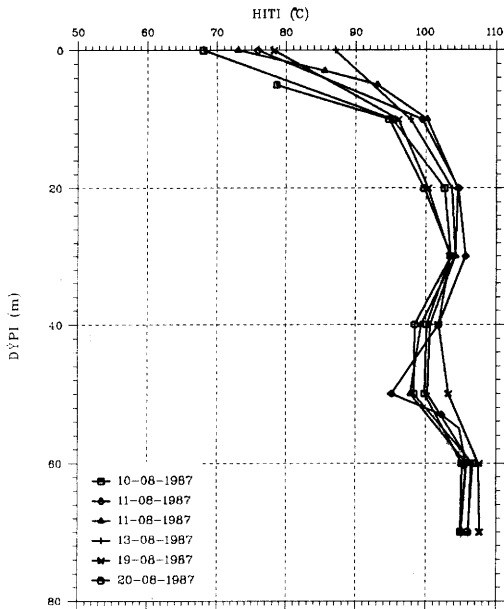
Níu hitamælingar eru til úr holu 4 og voru þær allar mældar eftir að holan var fóðruð í 325 m. Átta þeirra eru mældar í borun en ein eftir borun og eru aðeins 2 mældar með thermistor. Mælingar á holunni í rennsli sýna að vatnið kemur að mestu úr æð í 370 m (# 10825). Þegar dælt er á holuna skilar dælingin sér niður í 370 m, 385 m, 400 m og 415 m. Ekki eru til mælingar á holunni eftir borun sem eru ótruflaðar af rennsli. Lekastaðir í holunni eru í 370 m, 385 m, 400 m og 415 m en stærsta æðin er á 370 m dýpi. Í holunni er kaldur kafla eins og í holu 3 en hér er hann nálægt 190 m og mælist hitinn vera um 35°C. Í borskýrslu er getið um að rennsli hafi aukist í 131 m og að það hafi aukist upp í 2,6 l/s í 150 m. Í 208 m er það orðið 8,8 l/s. Síðan urðu breytingar á rennsli á 368-371 m dýpi.

Tafla 5. Yfirlit um allar borholumælingar í holum í landi Ærlækjarsels.

Staður	Staðar nafn	Svæðisnafn	Svunta	Mæling	Dags	Upph dýpi	Loka dýpi	Mæli tæki	Mælinga menn
62551	ÆR-01	Ærlækjarsel	11173	Hiti (°C)	10-AUG-87	.0	70.0		GÓF
			11174	Hiti (°C)	11-AUG-87	.0	70.0		GÓF
			11175	Hiti (°C)	11-AUG-87	.0	70.0		GÓF
			11176	Hiti (°C)	13-AUG-87	.0	70.0		GÓF
			6075	Hiti (°C)	19-AUG-87	.0	70.0	RH	GÓF
			6076	Hiti (°C)	20-AUG-87	.0	70.0	RH	GÓF
62552	ÆR-02	Ærlækjarsel	6078	Hiti (°C)	01-SEP-87	5.0	90.0	RH	GÓF
			6079	Selta (ppm)	01-SEP-87	5.0	90.0	RH	GÓF
62553	ÆR-03	Ærlækjarsel	7473	Hiti (°C)	14-AUG-88	.0	50.0	R47454	GjG/BS
			2030	Hiti (°C)	20-AUG-88	.0	200.0	RH	Bormenn
			2031	Hiti (°C)	20-AUG-88	.0	320.0	RH	Bormenn
			2032	Hiti (°C)	20-AUG-88	.0	216.0	RH	Bormenn
			2033	Hiti (°C)	20-AUG-88	.0	318.0	RH	GÓF
			2034	Hiti (°C)	20-AUG-88	.0	318.0	RH	GÓF
			2035	Hiti (°C)	21-AUG-88	.0	317.0	RH	GÓF
			2036	Hiti (°C)	21-AUG-88	.0	317.0	RH	GÓF
			2037	Hiti (°C)	21-AUG-88	.0	317.0	RH	GÓF
			2038	Hiti (°C)	21-AUG-88	.0	317.0	RH	
			7467	Hiti (°C)	21-AUG-88	.0	320.0	R47454	JH/BS
			7468	R16" (Ohmm)	21-AUG-88	.0	320.0	R47454	JH/BS
			7469	CBL (%)	21-AUG-88	.0	113.0	R47454	JH/BS
			7470	Nifteindir (API nu)	21-AUG-88	.0	320.0	R47454	JH/BS
			7471	Holuvídd (mm)	21-AUG-88	.0	320.0	R47454	JH/BS
			7472	Hiti (°C)	21-AUG-88	.0	320.0	R47454	JH/BS
			11017	R64" (Ohmm)	21-AUG-88	.0	320.0	R47454	JH/BS
			11018	Gamma (API gu)	21-AUG-88	.0	320.0	R47454	JH/BS
			2039	Hiti (°C)	23-AUG-88	10.0	320.0	RH	GÓF
			2040	Hiti (°C)	05-SEP-88	.0	322.0	R24585	BS/GrB
			6039	Halli (° frá lóði)	05-SEP-88	30.0	300.0	R24585	BS/GrB
			2041	Hiti (°C)	19-DEC-88	5.0	300.0	RH	Heimamenn
			2042	Hiti (°C)	30-DEC-88	180.0	299.0	RH	Heimamenn
			2043	Hiti (°C)	30-DEC-88	120.0	200.0	RH	Heimamenn
62554	ÆR-04	Ærlækjarsel	10731	Hiti (°C)	01-OCT-91	10.0	318.0		Bormenn
			10741	Hiti (°C)	08-OCT-91	.0	353.0	RH	Bormenn
			10784	Hiti (°C)	16-OCT-91	.0	420.0	R47454	JH/GuH
			10785	Nifteindir (API nu)	16-OCT-91	.0	420.0	R47454	JH/GuH
			10786	Gamma (API gu)	16-OCT-91	.0	420.0	R47454	JH/GuH
			10787	Gamma-Gamma (cps)	16-OCT-91	.0	420.0	R47454	JH/GuH
			10788	Halli (° frá lóði)	16-OCT-91	200.0	400.0	R47454	JH/GuH
			10797	Hiti (°C)	16-OCT-91	.0	420.0	R47454	JH/GuH
			10789	Hiti (°C)	17-OCT-91	.0	419.5	R47454	JH/GuH
			10790	Nifteindir (API nu)	17-OCT-91	.0	419.5	R47454	JH/GuH
			10791	Gamma (API gu)	17-OCT-91	.0	419.5	R47454	JH/GuH
			10792	Gamma-Gamma (cps)	17-OCT-91	.0	419.5	R47454	JH/GuH
			10793	Holuvídd (mm)	18-OCT-91	.0	419.5	R47454	JH/GuH
			10794	Hiti (°C)	18-OCT-91	.0	419.5	R47454	JH/GuH
			10795	Hiti (°C)	18-OCT-91	360.0	360.0	R47454	JH/GuH
			10796	Hiti (°C)	18-OCT-91	.0	420.0	R47454	JH/GuH
			10825	Hiti (°C)	25-OCT-91	.0	410.0	R24585	GrB/GuH
			10834	Þrýstingur (Bar)	25-OCT-91	.0	400.0	R24585	GrB/GuH

19 May 1992 hs  
L= 62551 Oracle

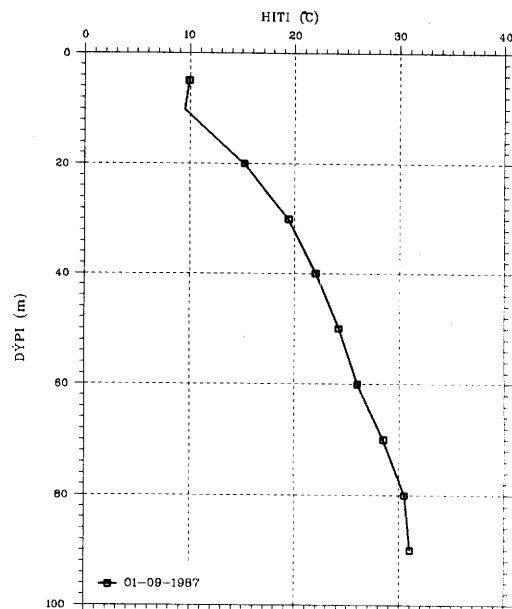
**Erilækjarsel  
Höla ÆR-01  
Hitamælingar**



Mynd 18. Hitamælingar í ÆR-01.

19 May 1992 hs  
L= 62552 Oracle

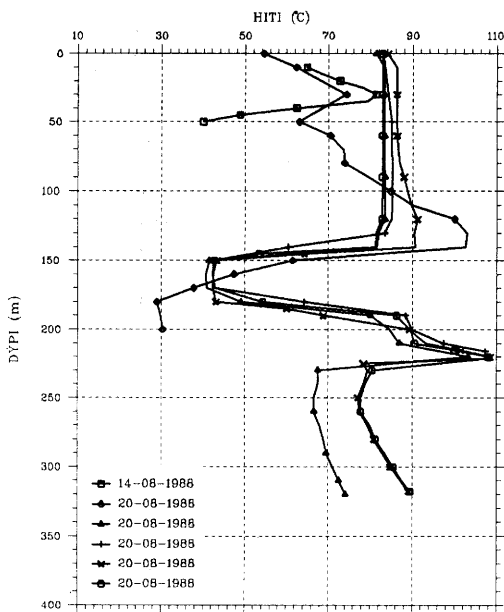
**Erilækjarsel  
Höla ÆR-02  
Hitamæling**



Mynd 19. Hitamælingar í ÆR-02.

19 May 1992 hs  
L= 62553 Oracle

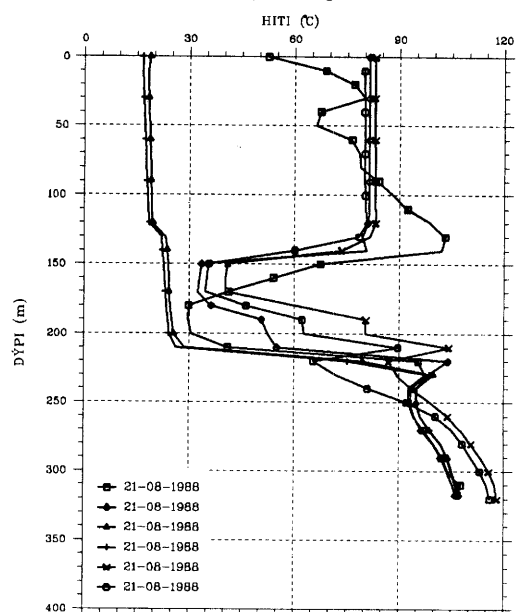
**Erilækjarsel  
Höla ÆR-03  
Hitamælingar 14 og 20 ágúst 1988**



Mynd 20. Hitamælingar í ÆR-03.

19 May 1992 hs  
L= 62553 Oracle

**Erilækjarsel  
Höla ÆR-03  
Hitamælingar 21 ágúst 1988**

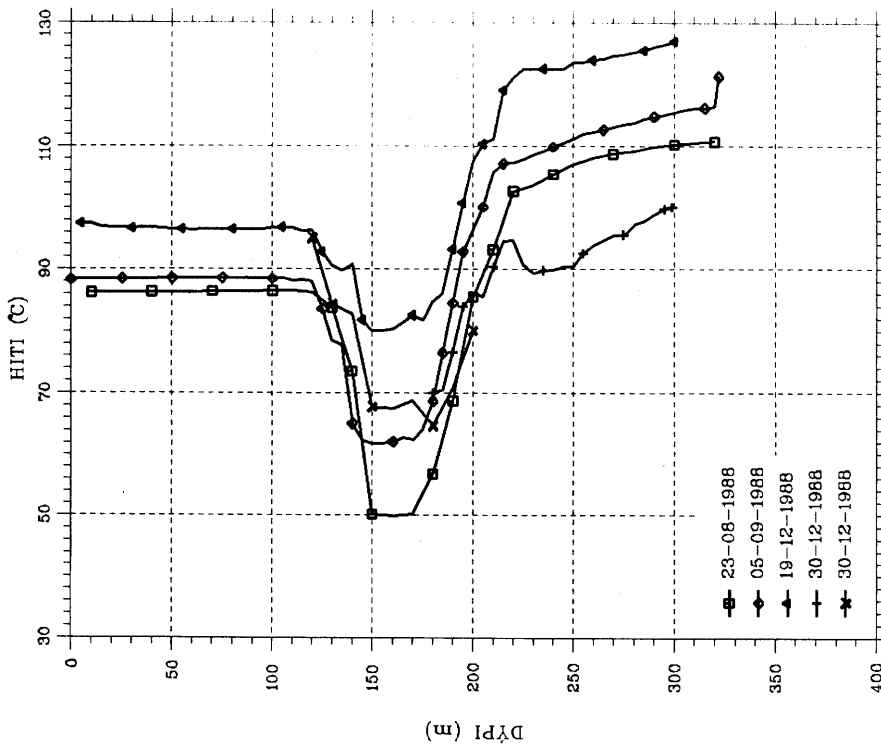


Mynd 21. Hitamælingar í ÆR-03.

19 May 1992 hs  
L= 62553 Oracle

**Ærlækjarsel  
Hola ÆR-03**

**Hitamælingar eftir 21 ágúst 1988**

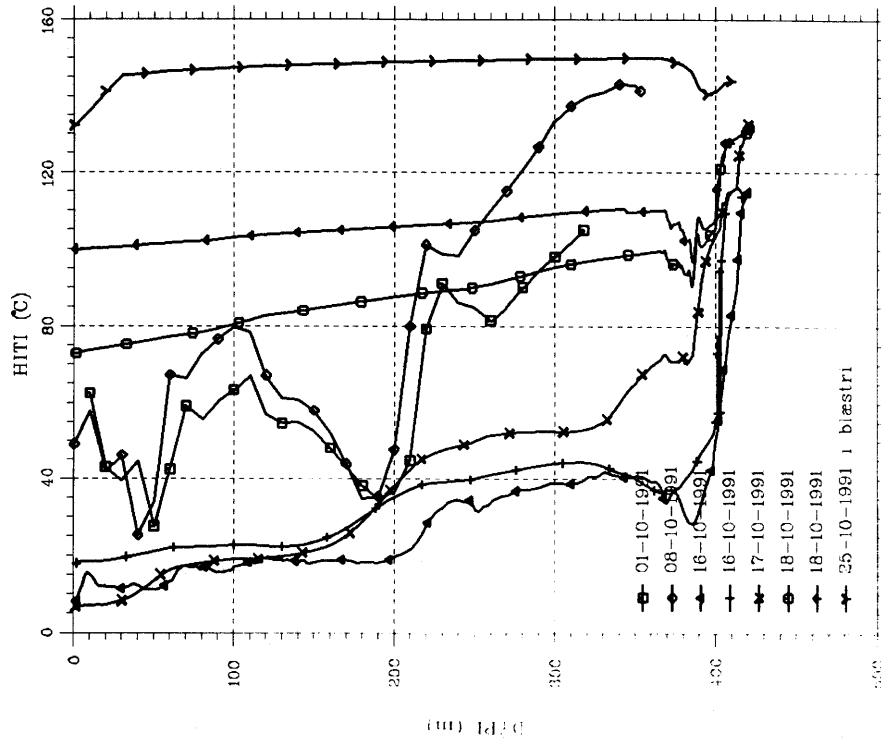


**Mynd 22. Hitamælingar í ÆR-03.**

19 May 1992 hs  
L= 62554 Oracle

**Ærlækjarsel  
Hola ÆR-04**

**Hitamælingar**



**Mynd 23. Hitamælingar í ÆR-04.**

Tafla 6. Vatnsæðar í holum 3 og 4.

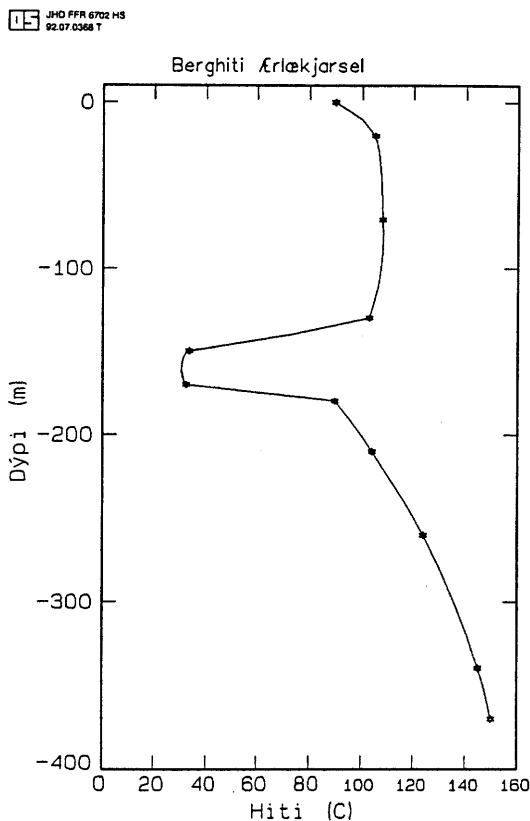
Hola	Dýpi m	Athugasemdir
ÆR-03	120 - 130	Stærstu æðarnar
ÆR-03	200 - 220	Koma vel fram í ádælingu
ÆR-03	230	Lítill æð. Sést í ádælingu
ÆR-04	370	Stærsta æðin
ÆR-04	385	Kemur vel fram í ádælingu
ÆR-04	400	Kemur vel fram í ádælingu
ÆR-04	415	Lítill æð. Sést í ádælingu

## 6.2 Berghiti

Til að áætla berghita í jarðhitakerfinu var farið yfir hitamælingar í holum 1, 3 og 4 og reynt að finna hita í þeim þar sem hann er ótruflaður af rennsli eða ádælingu. Flestar mælinganna eru truflaðar af rennsli og því verður þessi ágiskun á berghita nokkuð ónákvæm. Í holum 3 og 4 eru dýptarbil þar sem hiti er mun lægri en annars staðar í holunum, Þessi dýptarbil eru 150-180 m í holu 3 þar sem hiti er um 30°C en nálægt 190 m í holu 4, en þar mældist hiti um 35°C. Þetta bendir til láréttis rennslis á um 30-40°C heitu vatni á svæðinu, en þetta er ekki nákvæmt eins og áður er getið. Hitastigin sem stuðst er við eru tekin saman í töflu 7 og þess getið í hvaða mælingu þau eru tekin og við hvaða aðstæður var hitamælt. Síðan var mjúkur ferill brúaður gegnum punktana með tölvuforriti, sem ætla má að liggja nærri berghita á svæðinu. Ferillinn er sýndur á mynd 24.

Tafla 7. Hiti í borholum til áætlunar á berghita.

Hola	Dýpi m	Hiti °C	Athugasemdir	Mæling
ÆR-01	0	90	Hola lokuð í nokkra daga, 25 dagar eftir borlok	(# 11174)
ÆR-01	20	105	Hola lokuð í nokkra daga, 25 dagar eftir borlok	(# 11174)
ÆR-01	70	108	Hola lokuð í nokkra daga, 1 mán eftir borlok	(# 6075)
ÆR-03	130	103	Holan stendur lokuð eftir næturhlé	(# 2035)
ÆR-03	150	33.5	Holan opnuð eftir næturhlé	(# 2036)
ÆR-03	170	32.3	Holan opnuð eftir næturhlé	(# 2036)
ÆR-03	180	29.8	Holan stendur lokuð eftir næturhlé	(# 2035)
ÆR-03	210	104.1	Mælt með thermistor	(# 7467)
ÆR-03	260	124	Mælt eftir sjálfrennsli í 2 mánuði	(# 2041)
ÆR-04	340	145	Mælt í borun ( fiskun )	(# 10741)
ÆR-04	370	150	Mælt eftir 6 daga í blæstri	(# 10825)



Mynd 24. Berghiti í jarðhitakerfinu við Skógalón.

### 6.3 Jarðlagamælingar

Eins og fram kemur í kaflanum um kjarnaborun var tekinn kjarni úr holunni á dýptarbilinu 329,5-444,4 m. Sýni úr kjarnanum voru send til Geological Survey of Denmark til frekari rannsóknna. Þá voru gerðar jarðlagamælingar í holum 3 og 4 og verður fjallað um þær í þessum kafla og árangur þeirra borinn saman við niðurstöður mælinga á kjarnanum.

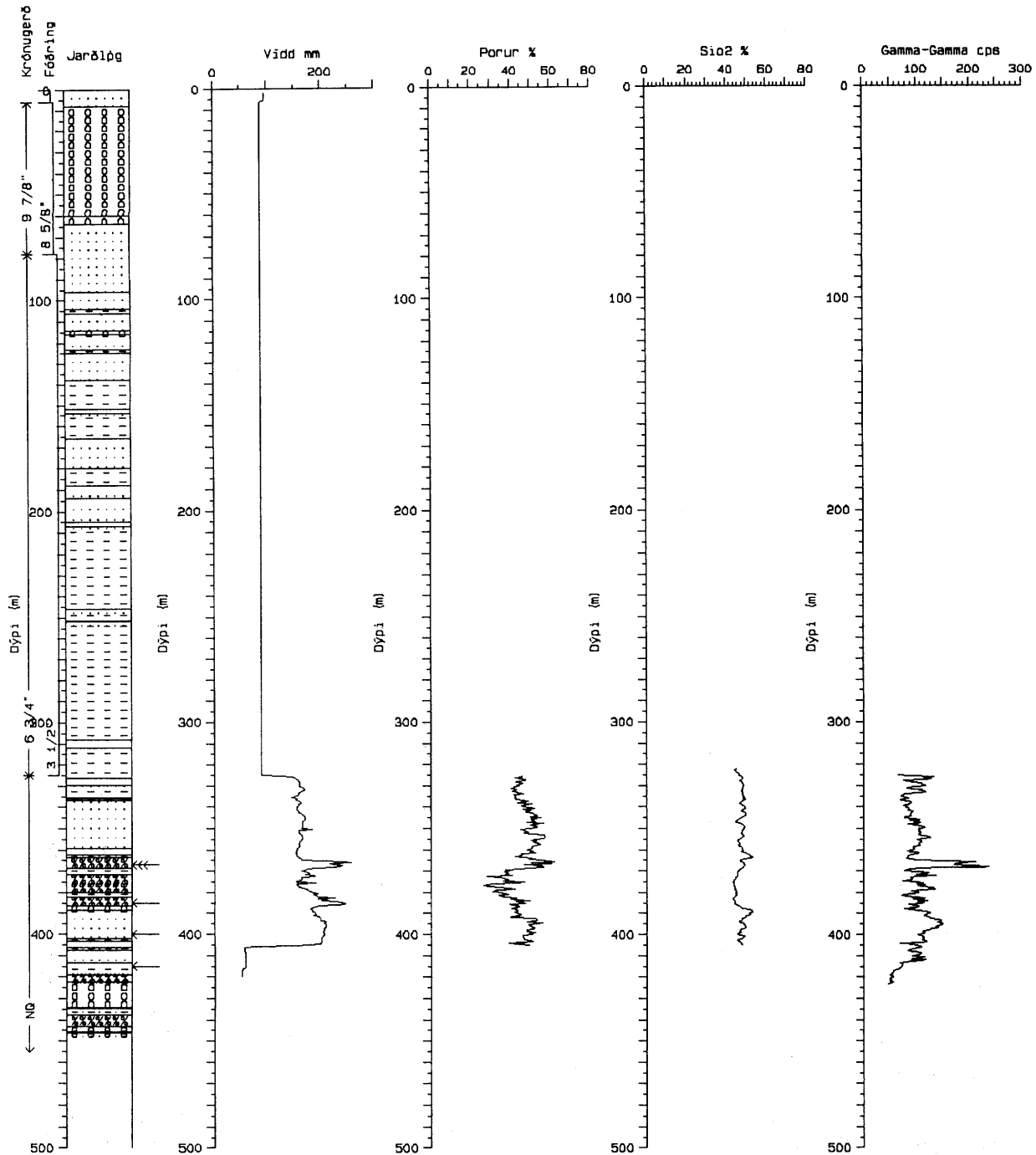
Mælingar á jarðlögum voru gerðar þann 21. ágúst 1988 í holu 3 og 16. - 18. október 1991 í holu 4. Áður hefur verið fjallað um mælingarnar í holu 3 í skýrslu Orkustofnunar (Lúðvík S. Georgsson o.fl., 1989) en hér verður litið á mælingar úr holu 4 og niðurstöður þeirra bornar saman við mælingar úr holu 3 þar sem það er hægt. Engar jarðlagamælingar eru til úr holum 1 og 2. Í töflu 5 er að finna allar mælingar sem til eru úr holunum. Niðurstöður jarðlagamælinga úr holum 3 og 4 eru birtar á myndum 25 og 26 ásamt jarðlagagreiningum úr holunum.

Jarðlagamælingar voru gerðar í holu 4 í lok borunar. Holan var þá 419,5 m djúp og fódruð í 325 m, þannig að opni hluti holunnar er aðeins tæpir 100 m. Mælingar gengu nokkuð vel nema að ekki náðist að viðnámsmæla holuna vegna bilana í tækjum og í víddarmælingu tókst ekki að mæla fyrir neðan 405 m þar sem borleðja var á botni holunnar og ekki hægt að opna víddarmælinn þar.

Víddarmæling sýnir að holan er slétt og felld frá fódruðu niður í 365 m en þar fyrir neðan tekur við kafi niður í 388 m þar sem holuvídd er breytileg. Þessu mjög vel saman við jarðlagagreininguna en á þessum kafla holunnar er leirsteins völuþing. Á þessum kafla eru tveir skápar í 367 m og 385 m. Allur opni hluti holunnar er yfir 6" að þvermáli en hann er boraður með 3" krónu. Í neðsta hluta holunnar eru holuveggirnir sléttari en þar er holan nokkru víðari.

JHD FFR 6702 HS  
92.07.0363 T

Ærlækjarsel  
Hóla ÆR-04



Skýringar við jarðlagasnið



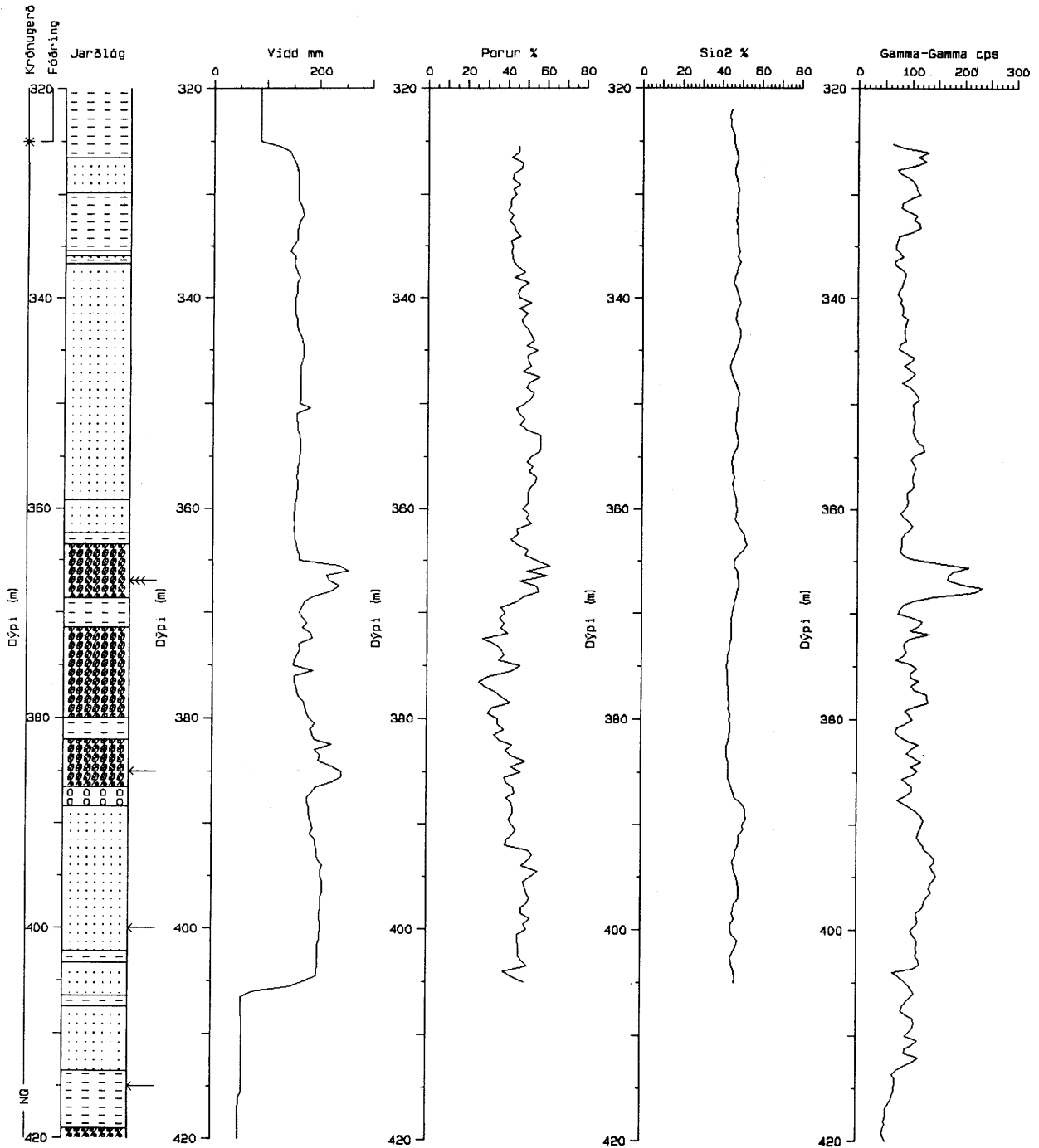
← : Lítil vatnsæð

← : Meðal vatnsæð

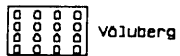
Mynd 25. Jarðlagamælingar úr holu 3.

JHD FFR 6702 HS  
92.07.0364 T

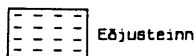
# Ærlækjarsel Hóla ÆR-04



Skýringar við jarðlagasnið



Völuberg



Eðjusteinn



Sandsteinn



Dausberg

← : Litil vatnsæð

← : Meðal vatnsæð

Mynd 26. Jarðlagamælingar úr holu 4.



Út frá víddarleiðréttri nifteindamælingu er hægt að reikna út vatnsmagn í berginu eða poruhluta. Það er hlutfall allra holrýma í berginu sem eru full af vatni á móti heildarrúmmáli þess. Poruhlutinn reiknast vera á bilinu 26-62 % í opna hluta holunnar (meðaltal 45,8 +/- 6.5 %). Hæstur er poruhlutinn í leirsteins völubergs lagi á bilinu 363-368 m, en mun lægri í samskonar bergtegund á bilinu 371-380 m. Það virðist því vera nokkuð mikil dreifing í poruhluta í þessari bergtegund. Ástæðuna má eflaust rekja til þess að á 367 m er aðalvatnsæð holunnar og eru sprungur fleiri og víðari á því dýpi.

Með Gamma-Gamma mælingu er hægt að áætla eðlisþyngd bergsins (*bulk density*) en þar sem mælingin er næmest í næsta nágrenni við mælipróbuna, verður próban að vera þétt út við holu-vegginn. Þar sem næmni mælingarinnar minnkar verulega í 5 - 10 cm fjarlægð frá mælipróbunni, gefur mælingin innan í fódringu ekki marktæka niðurstöðu, en fódringin er 3 1/2" að utamáli og holan var boruð með 6 3/4" borkrónu. Fjarlægðin frá mælipróbu út í berg er breytileg eftir því hvernig fódringin liggur í holunni og hvar mælipróban er innan í fódringu, þannig að hlutur bergsins í mælingunni er breytilegur og ekki hægt að leiðrétta fyrir þeim breytingum.

Í opna hluta holunnar er hún útvöskuð eins og fram kemur á víddarmælingu í holunni og erfitt að tryggja að mælipróban sé þétt úti í holuvegg. Það veldur því að útreiknuð gildi á eðlisþyngd eru heldur ekki marktæk í þessum hluta holunnar.

Kíslisýruinnihald bergsins er reiknað út frá víddarleiðréttri Nat-Gammamælingu og virðist það breytast lítið í holunni. Kíslisýruinnihaldið er á bilinu 42-58 % en meðaltalið í opna hluta holunnar er 46,7 +/- 2 %. Rétt er að geta þess að útreikningur á kíslisýru byggir á reynsluformúlu sem gildir fyrir kristallað íslenskt berg.

## 6.4 Hallamælingar

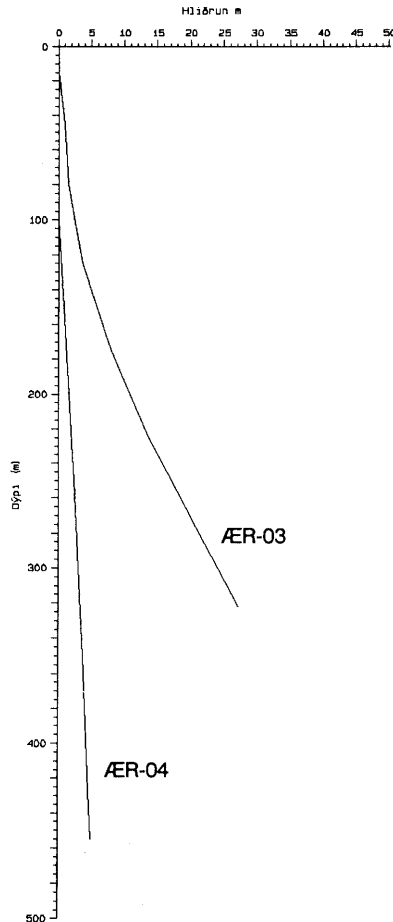
Á hallamælingum úr holum 3 og 4 kemur fram að holu 3 hallar nokkuð eða allt upp í 8°. Út frá hallamælinu er reiknuð út hliðrun frá lóðlínunni og er hún því komin nálægt 27 m frá lóðlínunni í 320 m dýpi. Holu 4 hallar aftur mjög lítið eða innan við 1° og er því hliðrun hennar innan við 5 m á 455 m dýpi. Í töflu 8 eru mæligildin úr hallamælingunum og á mynd 27 er sýnd hliðrun holanna frá lóðlínunni.

Tafla 8. Hallamælingar í holum 3 og 4.

Hola	Dýpi m	Halli °
ÆR-03	30	1.8
ÆR-03	60	1
ÆR-03	100	2.8
ÆR-03	150	5
ÆR-03	200	6.5
ÆR-03	250	8
ÆR-04	200	0.9
ÆR-04	300	0.8
ÆR-04	400	0.7

JHD FFR 6702 HS  
92.06.0322 T

Ærlækjarsel  
Holur ÆR-03 og ÆR-04  
Hallamælingar



Mynd 27. Hliðrun hola 3 og 4 frá lóðlínu.

## 6.5 Mælingar á kjarna

Úr kjarnanum voru boruð sýni þvert á kjarnann sem voru 1,9 cm (0,75") að þvermáli og voru þau höfð um 2,8 cm að lengd. Á þessum sýnum eru síðan gerðar ýmsar mælingar hjá DGU og fundin lekt, virkur poruhluti (effective porosity) og eðlisþungi (tafla 9).

Lektin er mæld með streymi á gastegund í gegnum sýnið. Virkur poruhluti er mældur með aðferð sem byggir á Boyle's lögmáli en með henni fæst hlutfall opinna og samtengdra holrúma á móti heildarrúmmáli sýnisins, en ekki er tekið tillit til lokaðra holrúma. Hér eftir verður notað virkur poruhluti fyrir "effective porosity" og poruhluti fyrir "total porosity".

Rétt er að taka fram að með eðlisþyngd er átt við eðlisþyngd á bergi og því vatni sem bundið er í berginu (bulk density) en með bergeðlisþyngd er átt við eðlisþyngd bergsins án vatns (grain density eða matrix density). Eðlisþyngd er fundin út frá heildarrúmmáli, þyngd og virkum poruhluta.

Mælingar á kjarnanum eru gerðar samkvæmt staðli (API RP 40, 1960) en einnig má finna lýsingu á slíkum mælingum í skýrslu Orkustofnunar (Ómar Sigurðsson o.fl., 1988).

Niðurstöður úr mælingum á kjarnabútunum eru teknar saman í töflu 9, en þar koma fram bergeðlisþyngd (grain density) og eðlisþyngd (bulk density) kjanabútanna auk lektar og poruhluta.

Tafla 9. Niðurstöður mælinga á kjarnasýnum.

Kjarni nr	Dýpi m	Lekt mD	Virkur poruhluti %	Eðlis þyngd g/cm <sup>3</sup>
P1	329.45	0.054	42.11	2.873
P2	339.80	0.053	38.46	2.726
P3	347.77	0.036	37.86	2.649
P4	350.98	0.034	40.31	2.656
P5	368.58		40.11	2.730
P6	395.50	0.037	41.34	2.729
P7	404.10	0.072	36.03	2.757
P8	411.00	0.268	40.75	2.807
P9	415.60	0.310	38.51	2.809
P10	437.70	0.061	36.00	2.840
P11	438.90	0.027	24.26	3.000

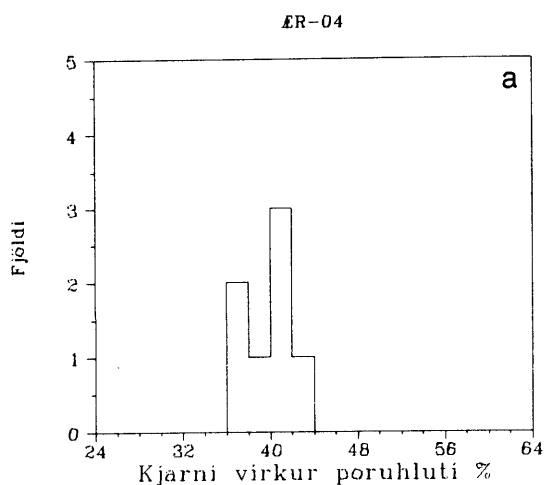
## 6.6 Samanburður á kjarna og mælingum

Við samanburð á niðurstöðum mælinga á kjarnabútum og borholumælingum er vert að hafa í huga að kjarnabútarnir eru örsmáir miðað við það rúmmál bergsins sem nifteindamælingin mælir. Poruhluti (total porosity) bergsins sem fenginn er úr nifteindamælingu liggur á bilinu 26-62 % á því dýptarbili sem mælingin nær yfir (325-405 m) og er meðaltalið 45,8 +/- 7 %. Virkur poruhluti

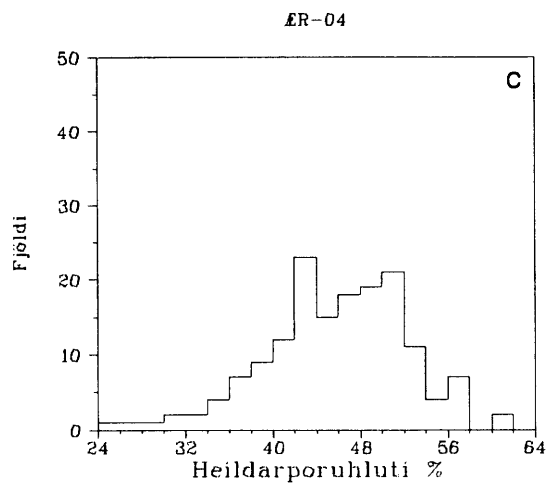
Tafla 10. Samanburður á virkum poruhluta í kjarna og poruhluta í nifteindamælingu.

Sýni nr.	Dýpi m	Virkur poruhluti Kjarna %	Poruhluti N-N mæling %	Mismunur	%
P1	329.5	42.11	42.7	0.7	1.5
P2	340	38.46	46.2	7.7	20.1
P3	348	37.86	51.1	13.2	34.9
P4	351	40.31	46.0	5.7	14.1
P5	368.5	40.11	48.17	8.1	20.1
P6	395.5	41.34	48.52	7.2	17.4
P7	404.1	36.03	38.8	2.8	7.8

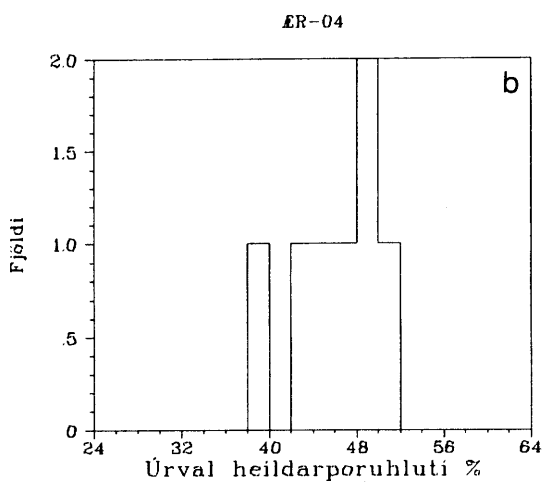
sem mældur er úr kjarnasýnunum liggur hins vegar á bilinu 24-44 % og er meðaltalið 37,8 % en kjarninn er tekinn úr dýptarbilinu 329,5-438,9 m. Poruhlutinn úr nifteindamælingunni á því dýpi sem kjarninn var tekinn er borinn saman við virkan poruhluta sem fenginn er úr kjarnanum í töflu 10 og súlurit fyrir dreifingu hvoru tveggja birt á mynd 28. Á myndinni eru einnig sýnd súlurit fyrir dreifingu poruhluta N-N mælinga í opna hluta holu 3 og 4. Á mynd 29 er sýndur samanburður á virkum poruhluta og heildarporuhluta ásamt jarðlagagreiningu úr holunni.



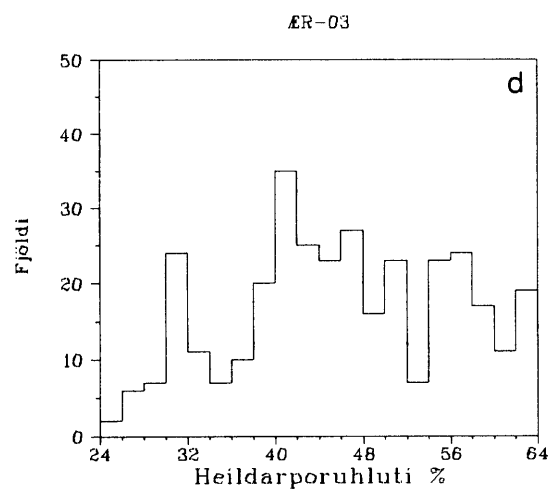
Dýpi: 326-405 m  
Meðalgildi: 39.5  
Staðalfrávik: 2.12



Dýpi: 326-405 m  
Meðalgildi: 45.9  
Staðalfrávik: 6.47



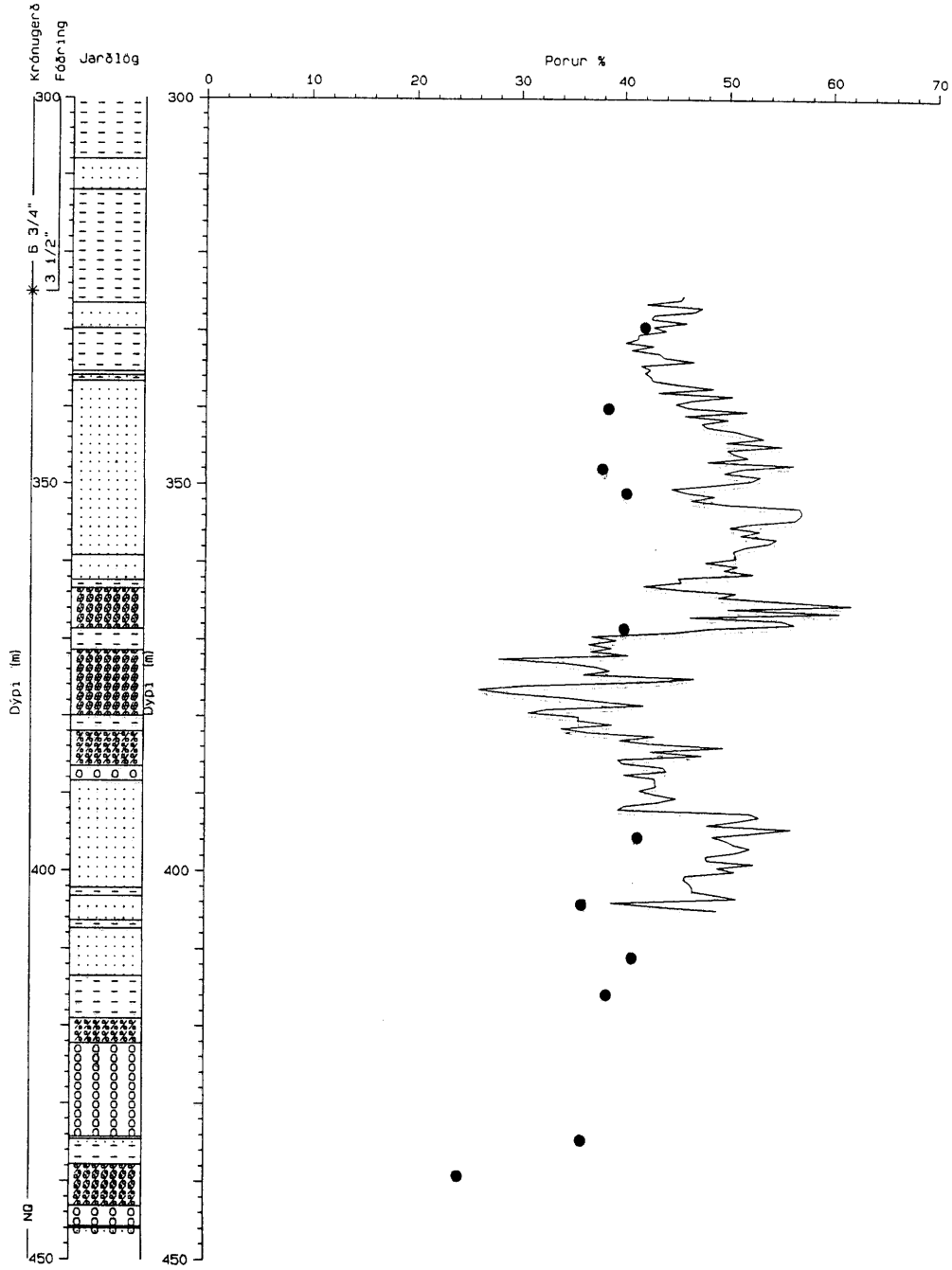
Dýpi: 326-405 m  
Meðalgildi: 45.9  
Staðalfrávik: 4.05



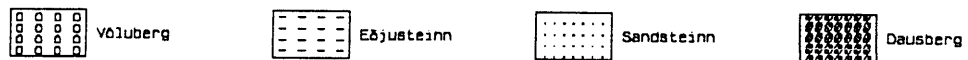
**Mynd 28. Virkur poruhluti og heildarporuhluti í kjarna.**  
a) Dreifing virks poruhluta í kjarna  
b) Dreifing heildarporuhluta í kjarnatökudýpi  
c) Dreifing heildarporuhluta í ÆR-04  
d) Dreifing heildarporuhluta í ÆR-03

JHD FFR 6702 HS  
92.06.321 T

### Ærlækjarsel Hóla ÆR-04 Poruhluti Kjarni - Mæling



Skýringar við jarðlagasnið



← : Litill vatnsæð

←← : Meðal vatnsæð

Mynd 29. Jarðlög og poruhluti í hól 4.

Það kemur glögg fram að poruhluti er mun hærri í nifteindamælingunni en virkur poruhluti úr mælingum á kjarna. Mismunurinn liggur í að gropuhlutfall kjarnans tekur aðeins til opinna holrýma í kjarnanum en poruhluti mælir allt vatn í berginu bæði í opnum og lokuðum holrýmum. Ef litið er á meðaltal poruhluta úr nifteindamælingunni á þeim dýpum sem kjarninn var tekinn, kemur í ljós að það er það sama og meðaltalið úr öllum opna hluta holunnar.

## 6.7 Eðlisþyngd kjarnans

Til að skoða eðlisþyngd kjarnans voru valdir heillegir bitar úr kjarnanum, einn úr hverjum kassa. Mælt var rúmmál og þungi hvers búts og reiknuð út eðlisþyngd. Þessar mælingar eru teknar saman í töflu 11.

Tafla 11. Mælingar til að reikna eðlisþyngd á kjarnabútum.

Dýpi m	Lengd cm	Þvermál cm	Þungi g	Eðlisþyngd g/cm <sup>2</sup>	Jarðlög
329.5	24.8	4.76	825	1.87	Siltsteinn
334.3	21.2	4.76	750	1.99	Sandsteinn
342.2	21.5	4.70	750	2.01	Finn siltsteinn
347.9	16.0	4.80	550	1.90	- " -
350.6	26.5	4.75	870	1.85	- " -
368.4	13.0	4.65	425	1.92	Siltsteinn
384.0	21.0	4.76	1025	2.69	Basalthnullungar
387.0	10.0	4.70	350	1.93	Völuberg
397.3	11.6	4.40	325	1.54	Lagsk. siltsteinn
411.1	9.0	4.60	250	1.53	- " -
411.2	14.5	4.50	410	1.56	- " -
416.4	20.5	4.50	785	2.11	Siltsteinn
422.5	11.0	4.50	420	2.11	Völuberg
423.8	11.5	4.70	550	2.64	Basalt blöðrótt
438.8	7.0	4.40	250	1.97	Völuberg
441.6	7.5	4.50	250	1.84	- " -
443.0	7.5	4.60	300	2.21	- " -
444.4	8.5	4.70	340	2.21	- " -

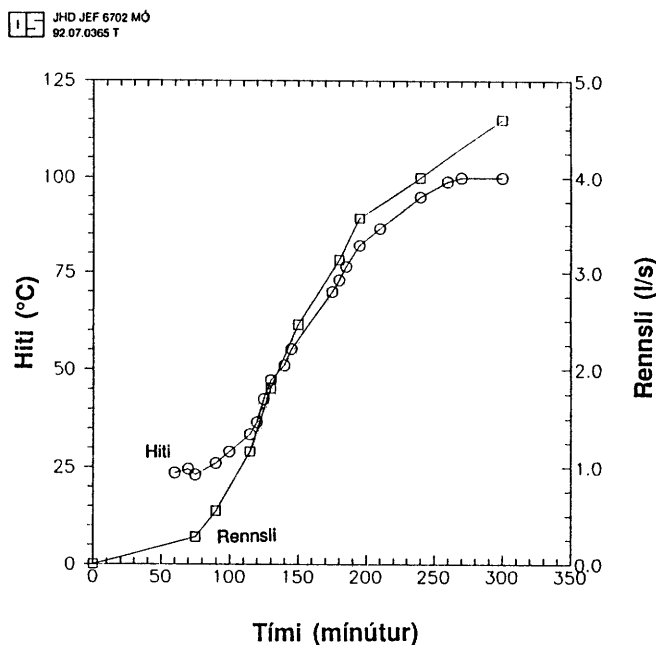
Í töflu 11 kemur fram að eðlisþyngd setsins, eins og það kemur úr blautt úr holunni, mældist á bilinu 1,5-2,7 g/cm<sup>3</sup>.

Brotstyrkur setlaga var kannaður með svonefndri keilupressu á nokkrum kjarnabútum á tveimur dýptarbilum (Birgi Jónsson, 1992). Á efra bilinu, 332,5-351 m, reyndist einása brotgildi vera 16-20 MPa, en á neðra bilinu var það hærra og að meðaltali 34 MPa. Til samanburðar hefur algengasta steypa til húsbygginga (S-200) styrkleika rúmlega 20 MPa eftir 28 daga hörðnun.

Viddarmæling holunnar sýnir að kjarnahluti hennar er allstaðar meiri en 6", þrátt fyrir að holan hafi verið boruð með 3" krónu. Líkleg ástæða fyrir þessu er vatnsrof vegna af mikillar vatnsdælingar til að varna því að holan færi í gos þar sem gosvari á holutoppi var óvirkur lengst af. Eftir að holan hafði vikkast svona mikið þurfti stöðugt að auka dælingu til að fá nægan straumhraða til að bera borsvarf til yfirborðs. Þegar hægt var á dælingu eða hún stöðvuð um stundarsakir, gæti borsvarf hafa sest að borkrónu og neðstu stöngum. Þetta gæti hafa orsakað stangarbrot, sem átti sér stað þegar borun var hætt. Einnig liggur í augum uppi að það getur ekki verið hollt fyrir 3" borstangalengju að skrönglast innan í 6-8" vðri holu.

## 7. SÝNATAKA OG EFNAGREININGAR

Jarðborinn Hrímnir fór af holu 4 að morgni föstudagsins 18. október. Þá var búið að gera ýmsar mælingar í holunni niður í gegnum borstangir og eftir að borinn fór var nokkrum mælingum bætt við. Greint er frá niðurstöðum þessara mælinga í kafla 6. Þegar borinn var farinn af holunni var komið fyrir sýnatöku- og mæliútbúnaði á holutoppi og farið að fylgjast með hitnun hennar. Örlít- ið fór að vætla úr holunni kl. 13:45 og var vatnið kalt, enda búið að dæla miklu magni af köldu vatni á hana. Réttum fjórum klst. síðar var hiti vatnsins kominn í 100°C og rennsli í tæpa 5 l/s. Á mynd 30 er sýnt hvernig holan hitnaði og rennsli úr henni jókst á fyrstu klst. eftir að ádælingu var hætt. Ekki voru tæk á að fylgjast lengur með holunni að þessu sinni og vegna mikils skolvatns var ekki talin ástæða til sýnatöku fyrr en að tveimur dögum liðnum.



Mynd 30. Hiti og rennsli úr holu 4.

Tvö heilsýni (vatn+gas) voru tekin úr holu 4. Það fyrra var tekið 20. október, tveimur dögum eftir að vatn fór að renna úr holunni, og var það tekið beint af holutoppnum. Holan var þá komin í kröftugan blástur. Lokunarþrýstingur mældist 2,5 bar-g og hiti á holutoppi 128,5°C. Ekki reyndist unnt að mæla rennsli. Seinna sýnið var tekið 25. október með líttilli söfnunarskilju, eins og úr háhitaholu. Holutoppsþrýstingur mældist 2,6 bar-g og hiti á holutoppi 132°C. Allnokkrir tilburðir voru hafðir við rennslismælingar, en þrátt fyrir það reyndist erfitt að ná raunhæfum magnþölum. Þrýstimælingar í holunni við mismunandi rennsli og ófullkomnar magnmælingar við holutopp gáfu þó til kynna að afköst holunnar væru að minnsta kosti 10 kg/s af 100°C heitu vatni. Að lok- inni sýnatöku var holunni lokað og holutoppsbúnaður fjarlægður þannig að vatn og ís gætu leikið um holuplanið að vild án þess að skemma holutoppinn. Einnig var settur vegdúkur yfir planið til þess að verja það vatnságangi.

### 7.1 Efnasamsetning vatns

Í töflu 12 eru sýndar niðurstöður efnagreinga á vatni úr holu 4 og til samanburðar eru sýndar nið- urstöður efnagreinga á vatni úr holum 1 og 3 við Skógalón.

Tafla 12. Efnasamsetning vatns úr holum við Skógalón (mg/l).

Hola	ÆR-04	ÆR-04	ÆR-03	ÆR-01
Dagsetning	91-10-20	91-10-25	89-10-02	87-09-13
Númer	91-0189	91-0209	89-0087	87-0119
Staður	holutoppur	skilja	holutoppur	holutoppur
Hiti á holutoppi (°C)	128,5	132	96	98
Þrýstingur við söfnun (bar-g)	0,8	1,3	-	-
Sýrustig (pH/°C)	6,9/22	8,6/22	7,9/24	9,5/15
Kísill (SiO <sub>2</sub> )	199	214	129	139
Natríum (Na)	1151	1222	833	1250
Kálfum (K)	70	67	43	77
Kalsíum (Ca)	187	185	154	259
Magnesium (Mg)	2,93	0,63	0,42	0,18
Járn (Fe)	-	0,009	0	<0,025
Mangan (Mn)	-	0,014	0	<0,05
Ál (Al)	-	0,045	0,023	-
Karbónat (CO <sub>2</sub> (t))	21,6	5,1	24,3	12,4
Súlfat (SO <sub>4</sub> )	151	150	97	138
Brennisteinsvetni (H <sub>2</sub> S)	<0,03	<0,03	0,07	<0,05
Klóríð (Cl)	2070	2110	1534	2460
Flúoríð (F)	0,11	0,12	0,28	0,65
Uppleyst efni	4007	4085	2709	4630
δD (‰ SMOW)	-	-	-100,4	-
δ <sup>18</sup> O (‰ SMOW)	-11,1	-11,1	-10,9	-10,0

- : ekki greint

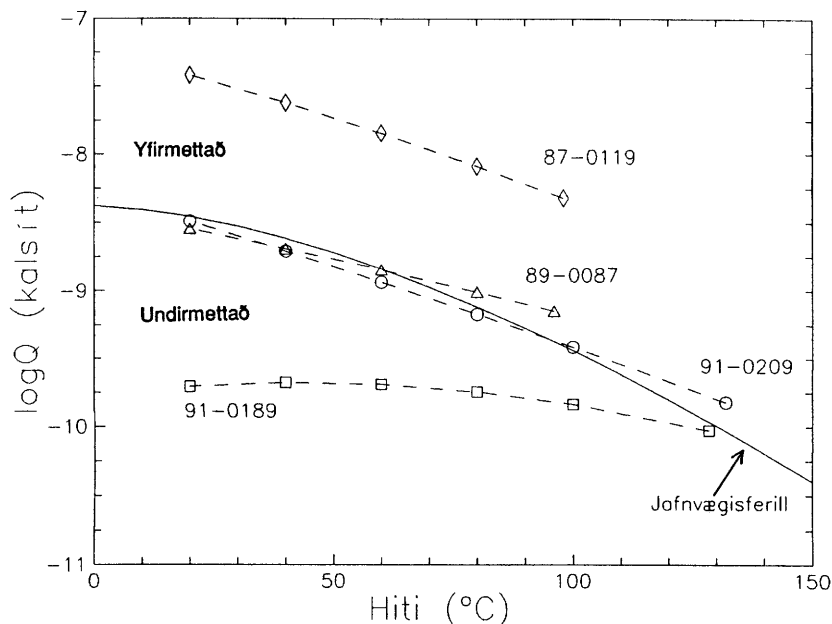
Vatnið úr holu 4 er nokkuð salt og efnaríkt líkt og vatn úr öðrum holum við Skógalón. Samanburður á efnagreiningum vatns úr holunum sýnir að jarðhitakerfið við Skógalón er greinilega lagskipt hvað efnastyrk varðar. Það er í ágætu samræmi við athuganir á jarðlögum úr holunum og hitamælingar, eins og fram hefur komið í köflum hér að framan. Hola 1 er grynnst (70 m) og úr henni kemur saltasta vatnið. Stærsta æðin í holu 3 er á 140 m dýpi, og gefur hún vatn með minni seltu, en mikil kæling kemur fram í holunni skammt neðan við æðina. Hola 4 er dýpsta holan og aðalæð hennar er á 370 m dýpi. Þar hefur selta jarðhitavökvans aukist á ný.

Útreikningar á mynd 31 sýna að kalsíum-karbónat jónamargfeldi vatns úr holum 3 og 4 fellur nánast á mettunarferil kalsíts, miðað við hita á holutoppi. Aftur á móti reiknast vatn úr holu 1 verulega yfirmettað m.t.t. kalsíts. Útreikningar sýna einnig að kalsíum-karbónat jónamargfeldi vatns úr holum 3 og 4 fylgja nánast mettunarferli kalsíts við kólnun, en vatn úr holu 1 reiknast alltaf yfirmettað m.t.t. kalsíts. Í þessu tilliti er þó talsverður munur á sýnunum tveimur úr holu 4. Þar kemur fram, að sýni 91-0189, sem var tekið beint af holutoppi tveimur dögum eftir að sjálfrennsli hófst úr holunni, verður verulega undirmettað m.t.t. kalsíts við kólnun. Aftur á móti fellur sýni 91-0209, sem var tekið með líttilli sýnatökuskilju fimm dögum síðar, nánast á mettunarferilinn. Þetta misræmi stafar aðallega af mismunandi sýrustigi og karbónatstyrk þessara tveggja sýna og verður að telja að sýni 91-0209 gefi réttari mynd af ástandi vatnsins, þar sem safnað var í sitt-hvoru lagi vatni og gufu og síðan reiknuð heildarefnasamsetning vökvans.

Efnahiti vatns úr holum við Skógalón hefur verið metinn eftir ýmsum leiðum og mest áhersla lögð á vatn úr holu 4. Reynslan hefur sýnt að efnahiti sem byggir á jafnvægi við kalsedón (Fournier, 1977) hefur gefið hvað bestar upplýsingar um hita í lághitakerfum hér á landi. Samkvæmt honum reiknast efnahiti vatns úr borholum við Skógalón á bilinu 115-160°C (tafla 13). Í



JHD JEF 6702 MÓ  
92.07.0366 T



Mynd 31. Kalsítmettun vatns úr holum við Skógalón.

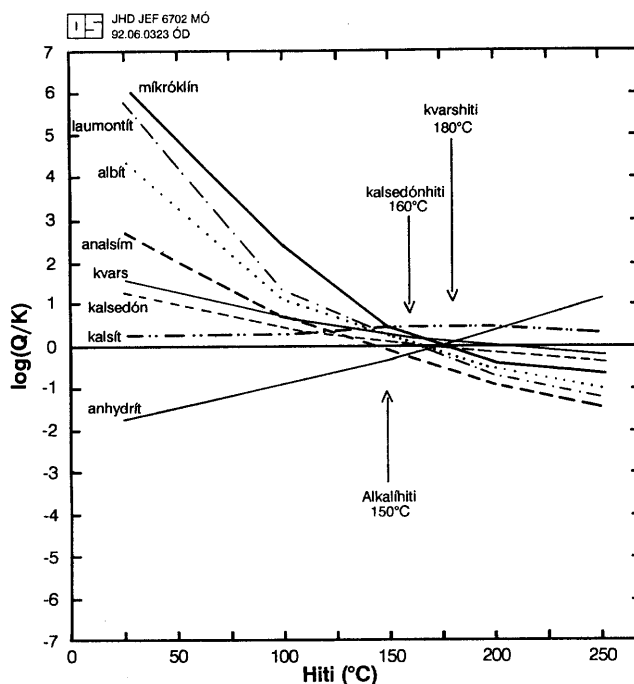
kerfum hefur aftur á móti verið stuðst við kvarshita (Fournier og Potter, 1982) og alkalfhita (Stefán Arnórsson ofl., 1983) og hafa þeir einnig verið reiknaðir út fyrir jarðhitann við Skógalón, vegna þess að greining á ummyndun í holu 4 gefur ákveðnar vísbendingar í þá átt að þar geti verið um háhitasvæði að ræða.

Tafla 13. Efnahiti vatns úr holum við Skógalón.

Hola	ÆR-01	ÆR-03	ÆR-04
Sýni	87-0119	89-0087	91-0209
Kalsedónhiti (°C)	115	125	160
Kvarshiti (°C)	140	150	180
Alkalfhiti (°C)	150	135	150

Útreiknaður alkalfhiti gefur áþekkar niðurstöður og kalsedónhitamælirinn fyrir vatn úr holum 3 og 4 en talsvert hærri hita fyrir vatn úr holu 1. Mismunur þessi stafar trúlega af því, að alkalfhitamælirinn er ónákvæmur við lágan hita, alla vega innan við 100°C, auk þess sem selta vatnsins raskar þeim efnajafnvægjum sem alkalf-jónirnar taka þátt í. Kvarshitamælirinn sýnir talsvert hærri hita en hinir tveir og samkvæmt honum er jafnvægishiti vatns í holu 4 um 180°C.

Þegar efnahiti í jarðhitakerfum er ákvarðaður er í raun verið að finna við hvaða hita jónamargfeldið Q fyrir eitthvað ákveðið efnajafnvægi er jafnt leysnimargfeldinu K, þ.e.  $\log(Q/K)=0$ . Með forritunum SOLVEQ og WATCH má reikna út hlutfallið  $\log(Q/K)$  fyrir ýmis efnajafnvægi, sem fall af hita. Mynd 32 sýnir nokkra slíka ferla fyrir steindir sem eru algengar í jarðhitakerfum. Sýnt hefur verið fram á (Reed, 1982; Reed og Spycher, 1984; Tole, 1988) að líklegur jafnvægishiti jarðhitavökva sé einmitt þar sem flestir ferlarnir skera hitaásinn, þ.e. við þann hita þar sem



Mynd 32. Jafnvægi nokkurra steinda við vatn úr holu 4.

$\log(Q/K)=0$ . Á mynd 32 kemur fram að flest þau efnajafnvægi sem til greina koma fyrir vatn úr holu 4 skera hitaásinn á bilinu 160-190°C.

Þessar vangaveltur um hita í jarðhitakerfinu við Skógalón benda því til þess, að jafnvægishtiti vatns úr holu 4, sem tekur nær allt sitt vatn úr einni æð á 370 m dýpi, liggja á hitabilinu 160-190°C. Þetta er þá hiti þess jafnvægis sem nú ríkir milli borholuvökvans og grannbergsins. Hann segir svo aftur á móti ekkert um það hvort jarðhitakerfið er að hitna eða kólna.

## 7.2 Efnasamsetning gass

Gassýni úr holunum þremur við Skógalón hafa verið send til efnagreininga hjá British Geological Survey í Wallingford á Englandi, þar sem gasgreinir Orkustofnunar ræður ekki við greiningar á þeim lífrænu gösum sem fundist hafa. Niðurstöður átta efnagreininga eru sýndar í töflu 14, þar af tveimur sýnum úr holu 4, þremur úr holu 3 og þremur úr holu 1. Auk þess hefur gas úr holum við Skógalón verið efnagreint á efnarannsóknarstofu Orkustofnunar, og hefur niðurstöðum borið ágætlega saman við niðurstöður mælinganna frá Wallingford, þ.e.a.s. fyrir þær gastegundir sem greindar hafa verið á báðum stöðum.

Í töflu 14 sést að aðalgastegund jarðhitagassins úr holunum við Skógalón er köfnunarefni ( $N_2$ ) og er rúmmálshlutfall þess á bilinu 85-95%. Aðrar gastegundir eru súrefni og argon ( $O_2 + Ar$ ), sem að hluta til geta verið andrúmsloftsmengun við sýnatöku, vetni ( $H_2$ ) og koldíoxíð ( $CO_2$ ) auk metans ( $CH_4$ ) og annarra kolvatnsefna, sem nánar verður fjallað um í kafla 7.3 hér á eftir.

Jarðhitagasi má í stórum dráttum skipta í tvo hópa, líkt og jarðhitasvæðum. Annars vegar er háhitagas og hins vegar er lághitagas. Lághitagas er að meginuppistöðu köfnunarefni, en háhitagas er aftur á móti samsett af koldíoxíði, sem er aðalgastegundin, vetni og brennisteinsvetni. Í báðum hópum má stundum greina metan. Jarðgas, sem fundist hefur t.d. við Lagarfljót og er ekki tengt jarðhita er nánast hreint metan og ölkeldum fylgir koldíoxíð. Við nánari skoðun á gasinu við

Tafla 14. Efnasamsetning gass úr holum við Skógalón (rúmm-%)\*).

Hola Númer Staður	ÆR-04 91-0209 skilja	ÆR-04 91-0189 h-toppur	ÆR-03 90-0237 200m	ÆR-03 89-0087 h-toppur	ÆR-03 88-0149 h-toppur	ÆR-01 89-0088 h-toppur	ÆR-01 88-0211 h-toppur	ÆR-01 87-0119 h-toppur
N <sub>2</sub>	86,20	92,80	81,00	93,50	95,90	92,80	93,80	94,60
O <sub>2</sub> +Ar	0,1	0,10	18,40	1,10	1,80	1,20	1,70	2,70
H <sub>2</sub>	0,07	0,25	0,06	0,02	0,02	0,07	0,23	0,00
He	-	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,03	0,00
CO <sub>2</sub>	7,88	0,91	0,05	0,02	0,05	0,00	0,05	0,04
CH <sub>4</sub>	5,70	5,80	0,45	5,20	3,60	5,60	4,00	2,22
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,082	0,120	0,015	0,230	0,150	0,300	0,200	0,218
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,074	0,083	0,002	0,047	0,050	0,057	0,092	0,156
i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,0088	0,0110	-	0,0066	0,0088	0,0076	0,0164	0,0251
n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,0240	0,0310	0,0034	0,0093	0,0110	0,0100	0,0208	0,0280
neo-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	-	-	-	0,0002	-	0,0030	-	-
i-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,0019	0,0052	0,0001	0,0016	0,0035	0,0027	0,0123	0,0147
n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,0042	0,0170	-	0,0018	0,0058	0,0036	0,0152	0,0132
i-C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0,00010	0,00067	0,0001	finnst	-	finnst	-	-
n-C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0,00100	0,00600	-	-	-	-	-	-
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	0,01950	0,00440	-	-	-	-	-	-
ΣC <sub>2+</sub>	0,216	0,278	0,021	0,297	0,229	0,384	0,357	0,455
δ <sup>13</sup> C <sub>CH4</sub>	-	-	-25,6	-31,9	-29,6	-29,9	29,0	-22,5
δD <sub>CH4</sub>	-	-	-	-138	-	-154	-	-

\*) Öll sýnin voru greind hjá BGS í Wallingford, Englandi  
h-toppur = holutoppur 1): o/oo PDB 2): o/oo SMOW  
- : ekki greint og/eða fannst ekki

Skógalón kemur í ljós, að í flestum sýnunum er rúmmálshlutfall köfnunarefnis um 93-95%. Þó skera tvö sýni sig talsvert úr. Annað var tekið á 200 m dýpi úr holu 3 við erfiðar aðstæður og bendir mikið magn súrefnis og argons til andrúmsloftmengunar við sýnatökuna. Hitt er seinna sýnið úr holu 4. Það var tekið með líttilli sýnatökuskilju, eins og gert er úr háhitaholum. Í því sýni greinist umtalsvert magn af koldíoxíði, og bendir það eindregið til þess að háhitaáhrifa sé farið að gæta í borholuvökvanum. Hér að framan hefur komið fram að hiti í aðalvatnsæð holunnar er rúmlega 150°C. Einnig hefur komið fram að ummyndunarsteindir gefa til kynna að hiti í jarðlögum við Skógalón hafi komist yfir 200°C og að jarðhitasvæðið sé frekar í ætt við háhitasvæði en lág-hitasvæði. Að þessu samanlögðu bendir því margt til þess að hér sé um kólnandi jarðhitakerfi að ræða.

Rúmmálshlutfall metans (CH<sub>4</sub>) hefur yfirleitt verið á bilinu 2-6%, nema í sýni því sem tekið var á 200 m dýpi í holu 3 og talið er mengað af andrúmslofti. Aftur á móti reiknast magn þyngri kolvatnsefna en metans (ΣC<sub>2+</sub>) á bilinu 0,2-0,5%. Af þessu má ráða að lífrænu gösin eru í miklum minnihluta, en mestu skiptir að þetta er í fyrsta sinn sem kolvatnsefnisgös, önnur en metan, greinast í gasi hérlendis.

Útreikningar á hita í jarðhitakerfum, sem byggir á efnasamsetningu jarðhitagass, hafa á undanförunum árum verið talsvert notaðir til að meta hita í háhitakerfum út frá niðurstöðum efnagreininga á sýnum sem tekin hafa verið úr gufuaugum á yfirborði (Stefán Arnórsson og Einar Gunnlaugsson, 1985). Slíkur efnahiti á vart við á jarðhitasvæðinu við Skógalón, en til gamans hefur verið reiknaður út gashiti fyrir annað sýnið úr holu 4 (91-0209) og reyndist hann á bilinu 190-260°C, eftir því við hvaða gastegund eða hlutfall gastegunda var miðað. Út frá þessu má e.t.v. draga þá ályktun, sem er í samræmi við niðurstöður greininga ummyndunarsteinda og efnahita

vatnsins, að jarðhitasvæðið við Skógalón sé meira í ætt við háhitasvæði en lághitasvæði.

Nýlega hefur verið bent á nýjan gashitamæli, sem byggir á hlutfallinu metan/etan í jarðhitagasi. Mælirinn var próaður við jarðhitarannsóknir á gliðnunarbeltinu í Austur Afríku og gaf góða raun þar (Darling og Talbot, 1991/1992). Niðurstöður útreikninga fyrir sýnin úr holu 4 gefa til kynna að jafnvægisþiti fyrir gasið úr holunni liggja á bilinu 200-220° (Darling, persónulegar upplýsingar 1992), og bendir það einnig til háhitasvæðis við Skógalón, ef trúá má þessum nýja gashitamæli. Útreikningar miðaðir við niðurstöður gasgreininga úr hinum holunum tveimur við Skógalón gefa lægri hita, 175-180°C úr holu 3 og 150-170°C úr holu 1.

### 7.3 Lífrænt gas við Skógalón

Hér á undan hefur nokkuð verið fjallað um efnasamsetningu vatns og gass úr borholum við Skógalón. Í þessum kafla verður aðaláhersla lögð á efnasamsetningu lífræna gassins og ísótópa-samsetningu þess. Eins og fram hefur komið þá er köfnunarefni aðalgastegund jarðhitagassins við Skógalón, en auk metans hafa greinst eftirtalin kolvatnsefni: etan, própán, isó-bútan, n-bútan, neo-pentan, isó-pentan, n-pentan, isó-hexan, n-hexan og benzen. Yfirlit um heiti lífrænna efna og efnaformúlur þeirra má sjá í töflu 15.

Tafla 15. Heiti lífrænna efna og efnaformúlur þeirra.

Efnaformúla	Heiti
CH <sub>4</sub>	metan
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	etan
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	própán
i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	isó-bútan
n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	n-bútan
neo-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	neo-pentan
i-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	isó-pentan
n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	n-pentan
i-C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	isó-hexan
n-C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	n-hexan
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	benzen

Til að bera efnasamsetningu gassins saman við efnasamsetningu lífræns gass annars staðar frá, t.d. náttúrulegs jarðgass, hefur efnasamsetning þess verið umreiknuð á þann hátt að öll gös önnur en þau lífrænu hafa verið dregin frá og heildarmagn lífrænu gasanna þannig sett á 100%. Tafla 16 sýnir efnasamsetningu gass úr holum við Skógalón eftir að hún hefur verið umreiknuð á þennan hátt.

Út frá efnasamsetningu sýnis sem var tekið 25. október (91-0209) og niðurstöðum mælinga í holunni við lok borunar, hefur verið reynt að meta magn þess gass sem streymir úr holu 4. Við matið er gert ráð fyrir að gufuhluti sé 5%, gasmagn var mælt 0,055 lgas/kg renni og heildarrensli 10 kg/s. Út frá þessum upplýsingum má áætla heildargasrensli frá holunni 0,5 l/s eða 47500 l/sólarhring. Þar af eru kolvatnsefnisgös 2140 l/sólarhring og kolvatnsefni önnur en metan (þ.e. ΣC<sub>2+</sub>) 240 l/sólarhring.

Í ítarlegri grein hefur Schoell (1980) flokkað náttúrulegt jarðgas af mismunandi uppruna á grundvelli efna- og ísótópasamsetningar viðkomandi gass. Fjallað var um flokkun Schoell í kafla 2 (mynd 2). Þar kemur fram að í ungu og óþroskuðu gasi sem myndast við rotun lífvera er metan

Tafla 16. Efnasamsetning lífræns gass (rúmm-%).

Hola Númer Staður	ÆR-04 91-0209 skilja	ÆR-04 91-0189 h-toppur	ÆR-03 90-0237 200m	ÆR-03 89-0087 h-toppur	ÆR-03 88-0149 h-toppur	ÆR-01 89-0088 h-toppur	ÆR-01 88-0211 h-toppur	ÆR-01 87-0119 h-toppur
CH <sub>4</sub>	96,513	95,554	95,584	94,640	95,530	93,635	91,826	83,003
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1,388	1,977	3,207	4,186	3,980	5,016	4,591	8,151
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1,253	1,367	0,425	0,855	1,327	0,953	2,112	5,833
i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,149	0,181	-	0,120	0,234	0,127	0,377	0,939
n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,406	0,511	0,722	0,169	0,292	0,167	0,478	1,047
neo-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	-	-	-	0,004	-	0,050	-	-
i-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,032	0,086	0,021	0,029	0,093	0,045	0,282	0,550
n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,071	0,280	-	0,033	0,154	0,060	0,349	0,494
i-C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0,002	0,011	0,021	finnst	-	finnst	-	-
n-C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0,017	0,099	-	-	-	-	-	-
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	0,330	0,073	-	-	-	-	-	-
ΣC <sub>2+</sub>	3,649	4,584	4,400	5,396	6,079	6,419	8,189	17,012
δ <sup>13</sup> C <sub>CH<sub>4</sub></sub> <sup>1)</sup>	-38,9	-40,0	-26,6	-31,9	-29,6	-29,9	-29,0	-22,5
δD <sub>CH<sub>4</sub></sub> <sup>2)</sup>	(-92)	(-97)	-	-138	-	-154	-	-

h-toppur = holutoppur 1): o/oo PDB 2): o/oo SMOW

nánast eina kolvatnsefnið ( $\Sigma C_{2+} < 0,05\%$ ). Gas sem fundist hefur við Lagarfliót er af þessum toga. Við frekari þroskun lífræna efnisins myndast lengri kolefniskeðjur og styrkur annarra kolvatnsefna eykst ( $\Sigma C_{2+} > 5\%$ ). Á þessu stigi myndast fyrsta olfan. Við áframhaldandi þroskun lengjast kolefniskeðjurnar enn, og föst efni myndast. Að lokum kemur síðan að því, að gasmyndun minnkar og gasið verður að langmestu leyti metan á ný ( $\Sigma C_{2+} < 5\%$  og oftast  $< 1\%$ ). Við þessar aðstæður breytast kolvatnsefni, önnur en metan, yfir í metan við svokallaða sundrun ("cracking") og að lokum yfir í grafit.

Hlutfall stöðugra ísótópa kolefnis (<sup>12</sup>C/<sup>13</sup>C) í metani er háð uppruna þess og hefur það verið notað til að greina í sundur metan úr mismunandi umhverfi. Þannig er δ<sup>13</sup>C í metani sem ættað er úr möttli jarðar hátt, að meðaltali nærri  $-7\%$ . Aftur á móti er δ<sup>13</sup>C í metani af lífrænum toga lágt, yfirleitt á bilinu  $-60$ — $-100\%$ . Hitamyndað gas hefur δ<sup>13</sup>C á milli þessara tveggja flokka, oftast á bilinu  $-25$ — $-50\%$ . Þessi skipting er sýnd nánar á mynd 33. Þar eru jafnframt sýndar niðurstöður fyrir sýni úr holunum við Skógalón og glögglega kemur í ljós að samkvæmt þessari flokkun telst gasið vera hitamyndað.

Í grein sinni birtir Schoell (1980) einnig niðurstöður fjölda ísótópamælinga á náttúrulegu jarðgasi. Á grundvelli þeirra hefur hann þannig flokkað gas eftir uppruna sínum og borið saman við þá flokkun sem greint var frá hér að ofan.

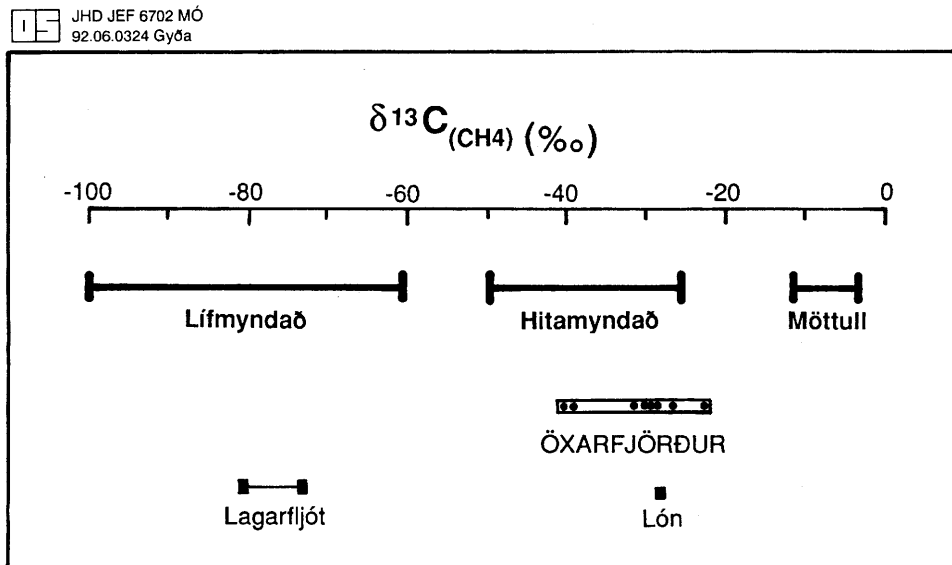
Mynd 34 sýnir hvernig mismunandi flokkar náttúrulegs jarðgass greinast í sundur á grundvelli hlutfalls kolefnisísótópa (δ<sup>13</sup>C) og vetnisísótópa (δD) í metani. Þar kemur fram að flokkarnir B, M, T og TT greinast vel í sundur. Í kafla 2 og á mynd 2 hefur verið fjallað um flokkun Schoell (1980) á kolvatnsefnisgösum. Þar kemur fram að þeim má í aðalatriðum skipta í tvo flokka; lífmyndað gas (B) og hitamyndað gas (T). Nokkrar tegundir gasa falla í hvorugan flokkinn og eru þau flokkuð undir blandaðan uppruna (M). Ennfremur má flokka gösin eftir því hvort uppruninn er hafrænn (m) eða landrænn (h). Niðurstöður tveggja sýna úr Öxarfirði hafa verið færðar inn á myndina og í ljós kemur að annað sýnið fellur í TT(h) hópinn (hitamyndað, af landrænum toga), en hitt fellur milli TT(h) og TT(m) (hitamyndað, af hafrænum toga).

Myndir 35 og 36 sýna vensl styrks kolvatnsefna annarra en metans ( $\Sigma C_{2+}$ ) og δ<sup>13</sup>C annars vegar og δD hins vegar. Þar hafa sérstaklega verið merkt svæðin T, TT(h) og TT(m). Niðurstöður frá Öxarfirði hafa verið færðar inn á báðar myndirnar og þar sést að þær falla í TT flokkinn, ýmist í TT(h) eða TT(m).

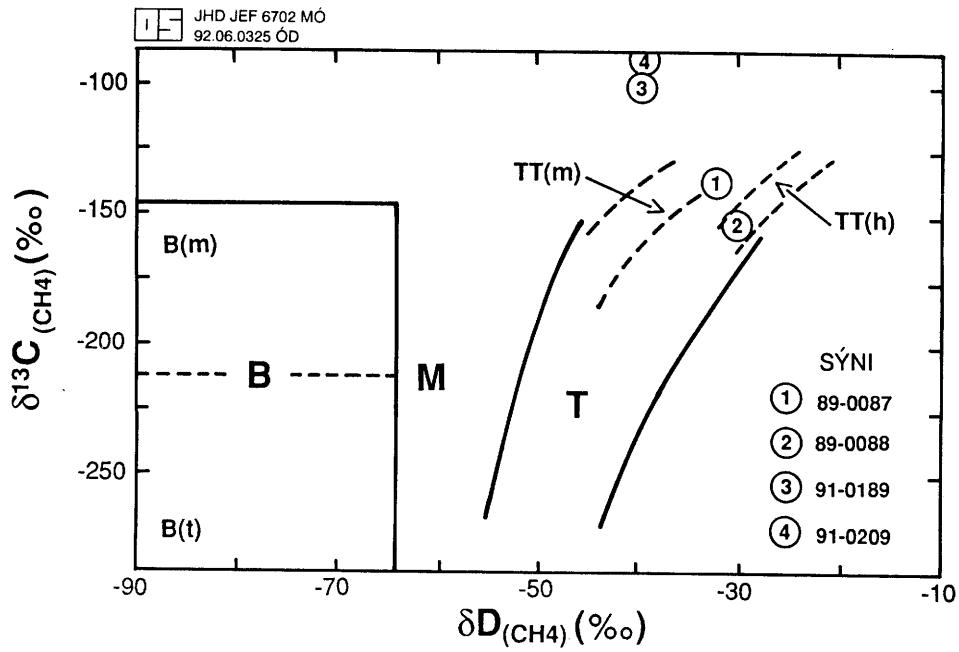
Nakai o.fl. (1974) hafa athugað samband milli vetnisísótópa ( $\delta D$ ) í metan-gasi og grenndarvatni þess á olfu- og gassvæðum í Japan. Schoell (1980) gerði svipaða athugun á jarðgasi af ýmsum uppruna. Niðurstöður beggja athugana eru á sama veg, nefnilega þann að greinilegt samband reynist vera milli vetnisísótópa í metani og grenndarvatni þar sem metanið er lífmyndað. Mynd 37 sýnir þettasamband og hafa sýnin úr Öxarfirði verið færð inn á myndina. Greinilega sést að þau falla langt utan þeirrar línu sem best lýsir sambandi  $\delta D_{CH_4}$  og  $\delta D_{grenndarvatn}$ . Aftur á móti falla sýnin frá Lagarfljóti nærri línunni, enda er gasið við Lagarfljót ungt og óþroskað lífverugas.

Á grundvelli flokkunar Schoell (1980) er því ljóst að kolvatnsefnin í gasinu úr holunum við Skógalón í Öxarfirði eru hitamyndað, en ekki er unnt að skera úr því hvort lífræna leifarnar voru myndaðar í sjó (hafrænt) eða á landi (landrænt). Jafnframt er ljóst að gasið flokkast ýmist með olfugasi eða kolagasi eða milli þessara tveggja flokka. Niðurstöður mælinga á heildarmagni lífræns kolefnis (TOC) í setlögnum sem holan skar, sýndu að ólíklegt verður að telja að lífræna gasið hafi myndast í þeim. Styrkur TOC var jafnframt svo lágur að ekki var unnt að gera nauðsynlegar mælingar á lífrænum leifum til að fá úr því skorið hvort lífræna efnið er af hafrænum eða landrænum uppruna.

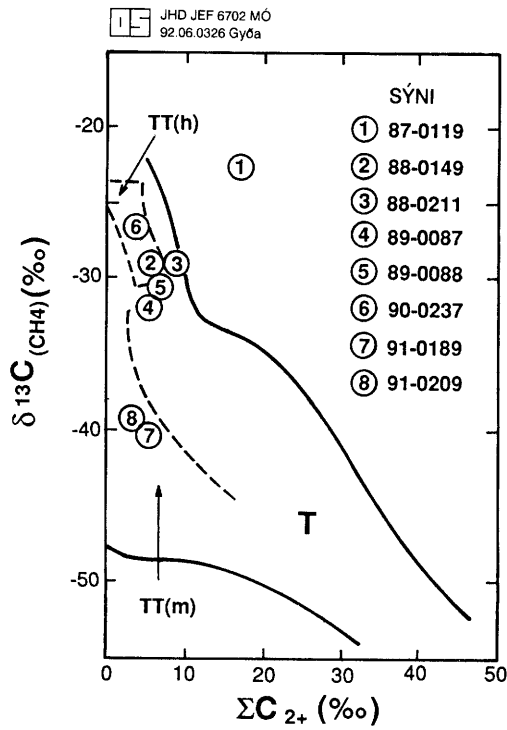
Gerð var tilraun til þess að aldursgreina gasið úr holu 4 og fyrstu niðurstöður benda til þess að  $^{14}C$ -aldur þess sé hærri en 20000 ár og líklega miklu hærri (Árný Erla Sveinbjörnsdóttir, persónulegar upplýsingar 1992). Ef þessi athugun er rétt, þá bendir hún til þess að gasið sé myndað neðan 350 m dýpis, þar sem talið er líklegt að setlöggin niður á það dýpi séu myndað á síðustu 10.000 árum.



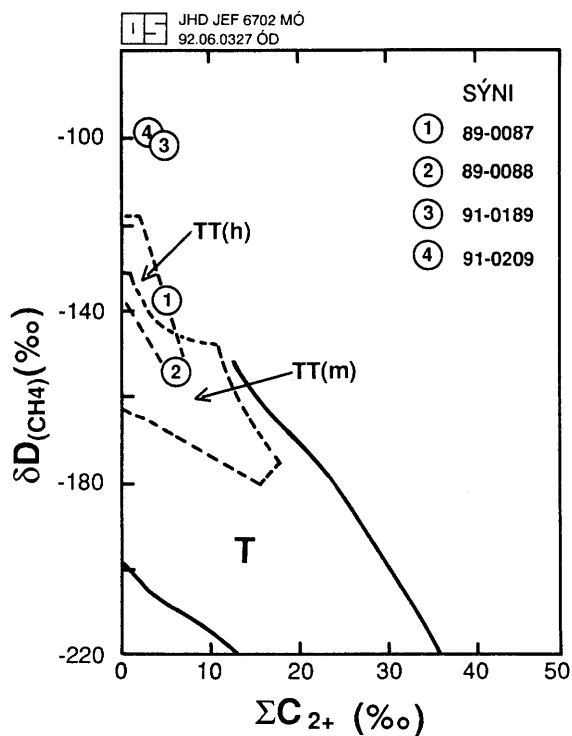
Mynd 33.  $\delta^{13}C$  í metani af mismunandi uppruna.



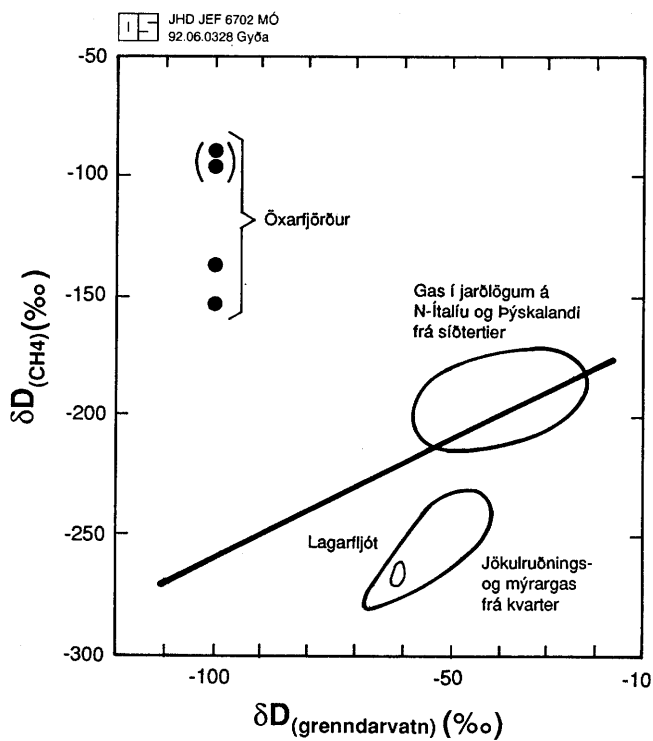
Mynd 34. Samband  $\delta^{13}\text{C}$  og  $\delta\text{D}$  í metangasi af mismunandi uppruna.



Mynd 35. Samband  $\delta^{13}\text{C}$  í metani og heildarmagns kolvatnsefna.



Mynd 36. Samband  $\delta D$  í metani og heildarmagns kolvatnsefna.



Mynd 37. Samband  $\delta D$  í metani og grenndarvatni.



## HEIMILDIR

- Albertsson, K. J., 1976: K/Ar ages of Pliocene-Pleistocene glaciations in Iceland with special reference to the Tjörnes sequence, Northern Iceland. Ph.D. thesis, University of Cambridge, 268 s.
- Albertsson, K. J. og Eiríksson J., 1989: K/Ar ages of Rocks from the Flatey borehole in the Off-shore Skjálfandi Basin, North Iceland. *Jökull*, 38, 55-60.
- Allen, P.A og Allen, J.R., 1990: Basin Analysis. Principles and Applications. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 451 s.
- Arnórsson, Stefán, Einar Gunnlaugsson og Hörður Svavarsson, 1983: The chemistry of geothermal waters in Iceland. III. Chemical geothermometry in geothermal investigations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 47, 567-577.
- Aronson, J.L. og Sæmundsson, K. 1975: Relatively old basalts from structurally high areas in Central Iceland. *Earth & Plan. Sci. Letters*, 28, 83-97.
- Ármannsson, H., Benjamínsson, J. & Jeffrey, A.W.A. 1989: Gas changes in the Krafla geothermal system, Iceland. *Chem. Geol.*, 76, 175-196.
- Bárðarson, G.G. 1925: A stratigraphical survey of the Pliocene deposits at Tjörnes, in northern Iceland. *K. Dan. Vidensk. Selsk., Biol. Medd.*, 4, (5), 118 s.
- Birgir Jónsson, 1992: Setlög í Öxarfirði. Brotstyrksprófanir á kjarna úr borholu ÆR-04. Orkustofnun, greinargerð BJ/92-01.
- Björnsson, Axel, 1985: Dynamic of crustal rifting in NE Iceland. *J. Geophys. Res.*, vol. 90, 10151-10162.
- Cotman, R.M. 1979: Potassium-argon evidence for shifting of the Axial Rift Zone in northern Iceland. M.S. ritgerð, Case Western Reserve Univ., Cleveland, Ohio, 79 s.
- Darling, W.G. og Talbot, J.C., 1991: Evaluation and development of gas geothermometry for geothermal exploration in the East African rift system. *British Geol. Surv. Technical report WD/91/72*, 35 s.
- Des, Marais, D.J., Donchin, J.H., Nehring, N.L. og Truesdell, A.H. 1981a: Molecular carbon isotopic evidence for the origin of geothermal hydrocarbons. *Nature*, 292, 826-828.
- Des, Marais, D.J., Stallard, M., Nehring, N.L. og Truesdell, A.H. 1981b: Molecular and carbon isotopic variations of geothermal hydrocarbons as a function of their depth of production. *EOS*, 62, 1061.
- Didyk, B.M. og Simoneit B.R.T., 1989: Hydrothermal oil of Guaymas Basin and implications for petroleum formation mechanisms. *Nature*, vol. 342, 65-69.
- Einarsson, P. 1976a: Relative location of earthquakes in the Tjörnes Fracture Zone. *Vísindafélag Ísl.*, Greinar, 5, 45-60.
- Einarsson, P. og Björnsson S. 1980: Earthquakes in Iceland. *Jökull*, 29, 37-43.
- Einarsson, T. 1958: A survey of the area Tjörnes - Bárðardalur in Northern Iceland, including paleomagnetic studies. *Vísindafélag Ísl.*, Rit, 32, 79 s.

- Einarsson, Th., Hopkins D. M. og Doell R. R. 1967: The stratigraphy of Tjörnes, northern Iceland, and the history of the Bering Land Bridge. Í: Hopkins D.M. (ritstj.), The Bering Land Bridge. Stanford, Stanford University Press, 312-325.
- Eiríksson, J., 1979: The Breidavík Group on Tjörnes, North Iceland. Lithostratigraphy and Late Cainozoic glaciations. Óbirt Ph.D. ritgerð, University of East Anglia, Norwich, 347 s.
- Eiríksson, J. 1981: Tjörnes, North Iceland: A bibliographical review of the geological research history. Jökull, 30, 1-20.
- Eiríksson, J. 1985: Facies analysis of the Breidavík Group sediments on Tjörnes, North Iceland. Acta Nat. Isl., 31, 56 s.
- Eiríksson, J., Gudmundsson, A.I., Kristjánsson, L. og Gunnarsson, K. 1990: Paleomagnetism of Pliocene-Pleistocene sediments and lava flows on Tjörnes and Flatey, North Iceland. Boreas, 19, 39-55.
- Flóvenz, Ó. G. og Gunnarsson K. 1991: Seismic crustal structure in Iceland and surrounding area. Tectonophysics 189, 1-17.
- Fournier, R.O., 1977: Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. Geothermics, 5, 41-50.
- Fournier, R.O. og Potter R.W.II, 1982: A revised and expanded silica (quartz) geothermometer. Geotherm. Resources Counc. Bull., 11, 3-12.
- Gold, T. 1979: Terrestrial sources of carbon and earthquake outgassing: J. Petrol. Geol., 1, 1-19.
- Gold, T. 1980: The question of methane emanation in Iceland. Grein, send með bréfi til Leós Kristjánssonar, 3 s.
- Gold, T. 1983: Deep Earth gas - an energy revolution? In: Premises for Deep Gas in Sweden, Vattenfall Gas Proj. G. 2. Swedish State Power Board, Vällingby. Rep. No. 2, 15 - 38.
- Gold, T. og Soter, S. 1980: The deep-Earth-gas hypothesis. Sci. American, 242, 154-161.
- Gold, T. og Soter, S. 1982: Abiogenic methane and the origin of petroleum. Energy Exploitation and Exploration, 1, 89-104.
- Gunter, B.D. og Musgrave, B.C., 1971: New evidence on the origin of methane in hydrothermal gases. Geochim. Cosmochim. Acta, 35, 113-118.
- Halldór Ármannsson og Sigmundur Einarsson 1987: Gas í Lagarfljóti. Orkustofnun, OS-87035/JHD-09, 25 s.
- Jancin, M., Young K. D., Voight B., Aronson J. L. og Saemundsson K. 1985: Stratigraphy and K/Ar ages across the west flank of the Northeast Iceland Axial Rift Zone, in relation to the 7 Ma volcano - tectonic reorganization of Iceland. J. Geophys. Res., 90, 9961-9985.
- Jansen, E. og Sjöholm, J., 1991: Reconstruction of glaciation over the past 6 Myr from ice-borne deposits in the Norwegian Sea. Nature, 349, 600-603.
- Jeffrey, A.W.A. og Kaplan, I.R. 1988: Hydrocarbons and inorganic gases in the Gravberg - 1 well, Siljan Ring, Sweden. Chem. Geol., 71, 237 - 255.
- Jón Benjamínsson, 1985: Nýjar orkulindir á Austurlandi? Morgunblaðið 22. janúar.
- Jón Jónsson, 1967: Skýrsla um gas í Lagarfljóti og víðar. Raforkumálastjóri, Jarðhitadeild, 11 s.

- Jónsson, G., Kristjánsson, L. og Sverrisson, M. 1991: Magnetic surveys of Iceland. *Tectonophysics* 189, 229-247.
- Karl Gunnarsson 1980: Hafsbótinn umhverfis Ísland. Prúnarsaga og setlagamyndanir. Yfirlitsskýrsla um stöðu rannsókna. Orkustofnun, OS-80025/JHD-14, 79 s.
- Karl Gunnarsson 1985: Hafsbótismælingar við Jan Mayen og Norðurland 1985. Orkustofnun, OS-85099/JHD-55 B, 34 s.
- Karl Gunnarsson 1988: Hafsbótansrannsóknir 1987. Yfirlitsskýrsla. Orkustofnun, OS-88004/JHD-01 B, 10 s.
- Karl Gunnarsson og Margrét Kjartansdóttir 1982: Kjarnaborun í Flatey á Skjálfanda. Fyrstu niðurstöður. Orkustofnun, OS-82126/JHD-38 B, 16 s.
- Karl Gunnarsson, Margrét Kjartansdóttir, Jón Eiríksson og Leifur A. Sfmónarson 1984: Rannsóknarborun í Flatey á Skjálfanda. Hóla FL-1. Orkustofnun, OS-84052/JHD-10, 75 s.
- Kristinn J. Albertsson 1978: Um aldur jarðlaga á Tjörnesi. Náttúrufræðingurinn, 48, s.
- Kristjánsson, L., 1980: The shelf around Iceland. *Jökull*, 29, 3-6.
- Laier, T. 1990: The Siljan deep well hydrocarbon gas results. IAEA deep gas meeting, Hannover., 8 s.
- Lovísa Birgisdóttir 1982: Ágrip af niðurstöðum jarðfræðikortlagningar á Flatey á Skjálfanda og Húsavík - Reykjahverfi. Orkustofnun, OS-82018/JHD-02 B, 24 s.
- Lúðvík S. Georgsson, Guðmundur Ómar Friðleifsson, Magnús Ólafsson, Ómar Sigurðsson og Þórólfur H. Hafstað, 1989: Skilyrði til fiskeldis í Öxarfirði. Ferskvatn, jarðsjór, jarðhiti og rannsóknarboranir. Sérverkefni í fiskeldi 1987 og 1988. Orkustofnun, OS-89041/JHD-08, 61 s.
- Lyon, G.L. og Hulston, J.R. 1984: Carbon and hydrogen ion composition of New Zealand geothermal gases. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 48, 1161-1171.
- Magnús Ólafsson, Guðmundur Ómar Friðleifsson, Ólafur G. Flóvenz, Sverrir Þórhallsson og Axel Björnsson, 1990: Tillaga um rannsókn á jarðgasi í Öxarfirði. Orkustofnun, greinargerð, MÓ-GÓF-ÓGF-SP-AB-90/01, 2 s.
- Mankinen, E. A. og Dalrymple, G.B. 1979: Revised geomagnetic polarity time scale for the interval 0-5 m.y. B. P. J. *Geophys. Res.*, 84, 615-626.
- McMaster, R.L., Schilling J-G.E. og Pinet P. R. 1977: Plate boundary within Tjörnes Fracture Zone on northern Iceland's insular margin. *Nature*, 269, 663-668.
- Nakai, N. Yoshida, Y. og Ando, N., 1974: Isotopic studies on oil and natural gas fields in Japan. *Chikyu Kagaku* 718, 87-98.
- Nehring, N.L. og Truesdell, A.H., 1978: Hydrocarbon gases in some volcanic and geothermal systems. *Geothermal Res. Counc. Tran.*, 2, 483-486.
- Norton, P.E.P. 1975: Paleoecology of the Mollusca of the Tjörnes sequence, Iceland. *Boreas*, 4, 97-110.
- Nunns, A.G., Talwani, M., Lorentzen, G.R., Vogt, P. R., Sigurgeirsson, T., Kristjánsson, L., Larsen, H.C. og Voppel, D. 1983: Magnetic anomalies over Iceland and surrounding seas. (Text to accompanying map). Í: Bott M.H.P., Saxov S., Talwani M. og Thiede J. (ritstj.), *Structure and development of the Greenland-Scotland Ridge. New methods and concepts.* New York, Plenum, 661-678.

- Ómar Sigurðsson, Ásgrímur Guðmundsson og Hjálmar Eysteinnsson, 1988: Nesjavellir. Kjarnar úr holu NJ-17. Orkustofnun, OS-88010/JHD-05 B, 33 s.
- Panichi, C., Ferrara, G.C. og Gonfiantini, R., 1977: Isotope geothermometry in the Larderello geothermal field. *Geothermics*, vol. 5, 81-88.
- Páll Einarsson 1976a: Nákvæm staðsetning skjálfta á Axarfjarðarsvæðinu. *Skjálftabréf*, 7, 4-5.
- Páll Einarsson 1976b: Skjálftaupptök á Norðurlandi á tímabilinu 13.2. - 9.3. 1976. *Skjálftabréf*, 9, 4-5.
- Páll Einarsson 1983: Jarðskjálftar á Íslandi árið 1982. *Skjálftabréf*, 54, 4-10.
- Páll Einarsson 1984: Jarðskjálftar á Íslandi árið 1983. *Skjálftabréf*, 58, 5-14.
- Pálmason, G. 1974: Insular margins of Iceland. Í: Burk C.A. og Drake C.L. (ritstj.), *The geology of continental margins*. New York, Springer-Verlag, 375-379.
- Powell, R.D., 1984: Glacimarine processes and inductive lithofacies modelling of ice shelf and tidewater glacier sediments based on Quaternary examples. *Marine Geology* 57, 1-52.
- Reed, M. H., 1982: Calculation of multicomponent chemical equilibria and reaction processes in systems involving minerals, gases and aqueous phases. *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 46, 513-528.
- Reed, M. H. og Spycher N., 1984: Calculation of pH and mineral equilibria in hydrothermal waters with application to geothermometry and studies of boiling and dilution. *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 48, 1479-1492.
- Ruddiman, W.F. og McIntyre A., 1973: Time-transgressive deglacial retreat of polar waters from the North Atlantic. *Quaternary Research*, 3: 117-130.
- Saemundsson, K. 1978: Fissure swarms and central volcanoes of the neovolcanic zones of Iceland. Í: Bowes D. R. og Leake B. E. (ritstj.), *Crustal evolution in northwestern Britain and adjacent regions*. *Geol. Jour. Spec. Issue*, 10, 415-432.
- Saemundsson, K. 1986: Subaerial volcanism in the western North Atlantic. Í: Vogt P.R. og Tucholke B.E. (ritstj.), *The Geology of North America. Volume M. The Western North Atlantic Region*. Geological Society of America, 69-86.
- Schoell, M. 1980: The hydrogen and carbon isotopic composition of methane from natural gases of various origins. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 44, 649-661.
- Sveinbjörn Björnsson 1976: Jarðskjálftar á Íslandi. *Náttúrufræðingurinn*, 46, 110-133.
- Sveinbjörn Björnsson og Páll Einarsson 1981: Jarðskjálftar. *Jörðin skalf ok pipraði af ótta*. Í: *Náttúra Íslands*. 2. útg., Reykjavík, Almenna bókafélagið, 121-155.
- Sveinn P. Jakobsson og Guðmundur Ó. Friðleifsson 1989: Jarðbik í holufyllingum í Skyndidal, Lóni. *Náttúrufræðingurinn*, 59, 169-188.
- Sykes, L.R. 1967: Mechanism of earthquakes and nature of faulting on the mid-ocean ridges. *J. Geophys. Res.*, 72, 2131-2153.
- Saemundsson, K. 1974: Evolution of the Axial Rifting Zone in Northern Iceland and the Tjörnes Fracture Zone. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 85, 495-504.
- Saemundsson, K. 1980: Outline of the geology of Iceland. *Jökull*, 29, 7-28.

- Talwani, M. og Eldholm O. 1977: Evolution of the Norwegian - Greenland sea. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 88, 969-999.
- Thoroddsen, Th. 1906: *Island. Grundriss der Geographie und Geologie. Petermanns Mitt., Ergänzungs.* 152-153. Gotha, Justus Perthes, 358 s.
- Thors, K. 1982: Shallow seismic stratigraphy and structure of the southernmost part of the Tjörnes Fracture Zone. *Jökull*, 32, 107-112.
- Thorson, G. 1934: Contributions to the animal ecology of the Scoresby Sound fjord complex (East Greenland). Hydrography by H. Ussing. *Meddelelser om Grönland*, 100(3), 1-68.
- Till, R. 1974: *Statistical methods for the earth scientist. An introduction.* London, MacMillan, 154 bls.
- Tole, P.M. 1988: Geochemical sampling, laboratory analysis, and mineral equilibria calculations for fluids from selected areas in Iceland. Geothermal Training Programme, Reykjavík, Iceland. Report 7, 52 s.
- Vogt, P. R., Johnson G. L. og Kristjánsson L. 1980: Morphology and magnetic anomalies north of Iceland. *J. Geophys. Res.*, 47, 67-80.
- Walker, G.P.L. 1975: Excess spreading axes and spreading rate in Iceland. *Nature*, 255, 468-471.
- Walker, R.G. 1979: Facies and facies models. 1. General introduction. Í: Walker R.G. (ritstj.), *Facies models. Geoscience Canada Reprint Series*, 1, (1. útg.) 1-7.
- Ward, P.L. 1971: New interpretation of the geology of Iceland. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 82, 2991-3012.
- Ward, P.L., Pálmason, G. og Drake, C. 1969: Microearthquake survey and the Mid-Atlantic Ridge in Iceland. *J. Geophys. Res.*, 74, 665-684.
- Ward, P.L. og Björnsson, S. 1971: Microearthquakes, swarms and the geothermal areas of Iceland. *J. Geophys. Res.*, 76, 3953-3982.
- Welhan, J.A. og Craig, H. 1983. Methane, hydrogen and helium in hydrothermal fluids at 21°N, East Pacific Rise. In: P.A. Rona, K. Boström, L. Laubier og K.L. Smith Jr. (Editors), *Hydrothermal processes at seafloor spreading centers, NATO-AIR vol. Plenum, New York.*
- Young, K.D., Jancin, M., Voight, B. og Orkan, N.I. 1985: Transform deformation of the Tertiary rocks along the Tjörnes Fracture Zone, North Central Iceland. *J. Geophys. Res.*, 90, 9986-10010.

## ENGLISH SUMMARY

In the autumn of 1991 an exploratory borehole was drilled at Skógalón in the Öxarfjörður region, North Iceland, with the purpose of studying the origin of organic gas which had been detected in earlier drillholes in the area. The drilling operation turned out to be partly unsuccessful as the hole only reached 450 m depth instead of the originally planned 700 m. A fairly continuous core was obtained from the lowest 123 m.

According to geophysical prospecting lava successions are not to be expected until at 700 m depth in the research area, and the drillhole penetrated exclusively a sedimentary formation. The uppermost section of the sediments consists of layers of coarse sand and conglomerate from an outwash delta of the glacier river Jökulsá á Fjöllum. Below this, extending down to 140 m depth are fine sandy layers considered to have piled up in an estuary. Next in the sequence are layers of mud and silt as well as thin layers of fine sand, thought to have been transported along the sea floor with turbidity currents. Core sampling began at 325 m below which the sedimentary analysis is more accurate than in the section above. The uppermost part of the core consists of fine-grained sand and silt mixed with single boulders, with numerous signs of turbidity currents, mudflows and slumping. Further down more complex layering ensues, indicating an unstable environment. At 350 m depth the first indication of glaciation is seen in the sedimentary formation in diamictite, formed on a sea floor below an ice sheet. This is again underlain by muddy sediments deposited in front of a delta, and finally clayish sediment formed some distance offshore. The lowermost part is composed of conglomerate and diamictite, formed during glaciation. The oldest sediments are probably no more than a few hundred thousand years old. Occasional marine fossils and some shell fragments are found in the sedimentary succession.

The highest temperature observed in the drillhole is about 150°C, at 370 m depth, and the well may yield some 10 kg/s of 100°C hot water. The temperature in the geothermal system at Skógalón indicated by geothermometry ranges from 160-190°C. Part of the secondary mineralogy and homogenization temperatures in fluid inclusions, however, suggest that the geothermal system is more akin to a high-temperature system than the low-temperature system it has been considered to be hitherto. An evolutionary sequence is believed to be present involving early assemblages of low-temperature zeolites ( $\leq 100^\circ\text{C}$ ) and smectite succeeded by mixed layer clays of smectite-chlorite and quartz and wairakite ( $\geq 200^\circ\text{C}$ ), followed by apparently stable assemblages of morденite, clinoptilolite and calcite. This sequence indicates heating and subsequent cooling. The core is fairly jointed, especially near the fault at 360-370 m depth, but on average 1-2 joints are observed in each meter of core. Three types of joints are recognised, i. e. regular joints, faults and tension cracks. All types seem to be formed in the same stress field of rifting and subsidence. TOC (Total Organic Carbon) was measured in all potential layers down the well. The TOC-value was invariably low ( $< 0.02-0.05\%$ ). Thus, further tests on organic remains were not attempted.

Total porosity of the sediments calculated from neutron-neutron values proved to be variable ranging from 26% to 62%, being highest in the diamictite at 360-370 m depth near an aquifer in a fault. Effective porosity also turned out to be fairly high, or 25-42%. The permeability is generally close to 0.03--0.07 mD, but an order of magnitude higher at 410-415 m depth.

The gas detected in boreholes at Skógalón is primarily nitrogen, but the total measured volume of natural gases other than methane ranges from 0.2-0.5 %. The following hydrocarbons have been observed: Methane, ethane, propane, iso-butane, n-butane, neo-pentane, iso-pentane, n-pentane, iso-hexane, n-hexane and benzene. The isotopic ratios of the gas strongly indicate a thermogenic origin for the hydrocarbons. Whether the gas is of marine or terrestrial origin, however, is not known. The result from the drilling of well ÆR-04 suggests the origins of the gas are to be sought for in deeper layers.