



ORKUSTOFNUN
Jarðhitadeild

Karl Gunnarsson
Margrét Kjartansdóttir
Jón Eiríksson
Leifur Símonarson

**Rannsóknarborun
í Flatey á Skjálfanda
HOLA FL-1**

OS-84052/JHD-10
Reykjavík, desember 1984



ORKUSTOFNUN
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verknúmer 590050

Karl Gunnarsson
Margrét Kjartansdóttir
Jón Eiríksson
Leifur Símonarson

Rannsóknarborun

í Flatey á Skjálfanda

Hola FL-1

OS-84052/JHD-10
Reykjavík, desember 1984

ÁGRIP

Í Flatey á Skjálfanda var boruð 554ra m djúp hola árið 1982 til að kanna þykk setlög sem ætlað var að lögju undir eygni, og hvort þar mætti finna nokkur ummerki jarðolíu. Samfelldur kjarni var tekinn, og sýnir hann að setlög eru ríkjandi í jarðlögum undir eygni, svo djúpt sem séð verður. Tvö hraunlög eru í efstu 40 m, en aðeins eitt hraunlag fannst neðar í holunni, á tæplega 400 m dýpi. Jarðlögin eru líklega mynduð á fyrri hluta ísaldar (Pleistósen) og á Matuyama-segulskeiði, þ.e. eldri en 0,7 og yngri en 2,0 milljón ár. Þeim svipar til Breiðavíkurlaganna á Tjörnesi. Setlögin bera þess merki að vera mynduð í strandnánd, og eru mótuð af víxlverkun áflæðis og afflæðis, sem eru samfara endurteknum sveiflum milli jökul- og hlýskeiða. Steingervingar benda einnig til myndunar í köldum sjó. Mest ber á sandsteini, víða glerríkum, og siltsteini, en nokkuð er einnig af völubergi. Þoruhluti sandsteins og siltsteins er oftast hár, en lektin er slæm svo bergið er ekki efnilegt sem olíugeymir. Eðlisþyngd kjarnans er áætluð um $2,4 \text{ g/cm}^3$ að meðaltali. Hitastigull er um 50°C . Ljóst er af þessari rannsókn og öðrum, að verulega þykk setlög finnast undir og umhverfis Flatey. Olía myndast í setlögum, en engar vísbendingar um olíumyndun greindust þó í kjarnanum, né lífræn efni sem gætu ummyndast í oíu við hagstæðari skilyrði. Borholan er hins vegar of grunn til að skera úr um hvort olía hefur myndast á því dýpi, þar sem skilyrði eru hagstæðust.

EFNISYFIRLIT

	bls.
ÁGRIP	2
TÖFLU- OG MYNDASKRÁ	4
1 INNGANGUR	5
1.1 Borun	6
1.2 Rannsóknir	8
2 SETLAGASVÆÐI Á LANDGRUNNI NORÐURLANDS	9
3 JARÐLAGAGREINING BORKJARNA	13
3.1 Helstu niðurstöður	17
4 MÆLINGAR Á BORKJARNA	21
4.1 Lífrænt kolefni í kjarnanum	21
4.2 Poruhluti, lekt og eðlisþyngd	23
4.3 Mæling segulmögnunar	27
5 HITAÁSTAND BORHOLUNNAR	32
5.1 Úrvinnsla upphitunarmælinga	32
5.2 Mæling hitaferla	36
5.3 Niðurstöður hitamælinga	36
5.4 Um hitastigsjafnvægi setlaganna	39
5.5 Um hitafarssögu Flateyjarsetlaganna	40
6 NIÐURSTÖÐUR OG UMRÆÐA	43
6.1 Tillögur um frekari rannsóknir	44
HEIMILDASKRÁ	47
ABSTRACT IN ENGLISH	50
VIÐAUKAR:	
1 Jarðlagagreining kjarna úr holu FL-1	51
2 Borhola FL-1 í Flatey á Skjálfanda, gerð jarðlaga á dýptarbilinu 385-245 m.	63

TÖFLUSKRÁ

	Bls.
1 Efnagreiningar á basalhraunum úr borkjarna FL-1.	17
2 Þyngdarhlutfall lífræns kolefnis í kjarnasýnum.	22
3 Poruhluti og lekt sýna úr kjarna.	24
4 Meðalgildi poruhluta, lektar og eðlisþyngdar sýna eftir bergflokkum	24
5 Segulmælingar á sýnum úr borkjarna FL-1.	29
6 Meðalgildi seguleiginleika sýna úr kjarna.	31
7 Upphitunarmælingar og reiknað mat á berghita.	34
8 Skrá yfir hitamælingar í holu FL-1.	37

MYNDASKRÁ

1 Kort af Flatey á Skjalfanda.	6
2 Staðsetning borholu FL-1 - afstöðumynd.	6
3 Yfirlitskort af landgrunni Norðurlands.	7
4 Jarðlagasnið holu FL-1 og jarðeðlisfræðilegir mæliferlar.	14
5 Halli segulmögnunar í kjarnasýnum sem fall af dýpi.	30
6 Upphitunarferlar í holu FL-1.	35
7 Tvö dæmi um úrvinnslu upphitunarmælinga.	35
8 Þrjár hitastigsferlar úr holu FL-1.	38
9 Hitaferlar, botnhiti og reiknaður berghiti.	38
10 Reiknilíkan af upphitun setlaga.	42
11 Jarðlagasnið af dýptarbili 385-245 m í holu FL-1. (í Viðauka 2).	65

1 INNGANGUR

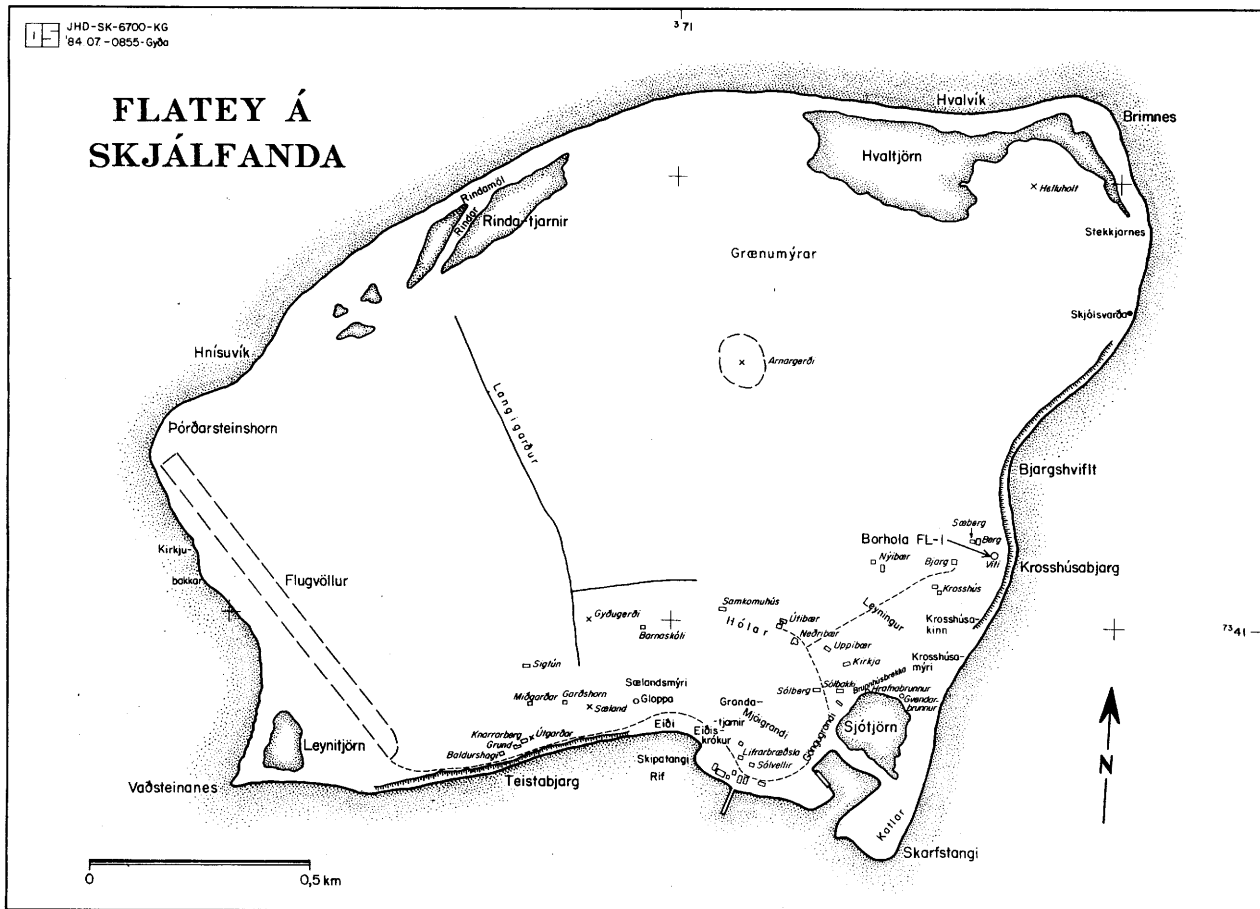
Í skýrslunni eru birtar niðurstöður rannsókna sem gerðar hafa verið í tengslum við borun rannsóknarholu FL-1 í Flatey á Skjálfanda. Borunin fór fram í september - október 1982. Holan er 554,4 m djúp og úr henni var tekinn samfelldur kjarni til greiningar. Markmið rannsóknarinnar var að kanna líkur á olíu í jarðlögum þessa svæðis. Verkið var unnið að tilhlutan "NHH" (Nefnd um hagnýtar hafsbotns-rannsóknir), sem starfaði þá á vegum Iðnaðarráðuneytisins, en Jarðhitadeild Orkustofnunar stjórnaði framkvæmdinni. Jarðboranir ríkisins sáu um borverkið. Bráðabirgðaskýrsla þar sem framkvæmdum og fyrstu niðurstöðum var lýst hefur áður komið út, (Karl Gunnarsson og Margrét Kjartansdóttir 1982).

Samkvæmt ríkjandi skoðun meðal sérfræðinga í olíuleit, er olíulinda einungis að vænta í þykkum setlagabunkum, og fyrsti þáttur olíuleitar er að finna og afmarka slíkar dældir fylltar setlögum. Setlög á Islandi og landgrunni þess virðast yfirleitt þunn og ekki líkleg til að mynda olíu. Síðasta áratug hafa þó komið fram æ gleggri vísbendingar um að undan Mið- Norðurlandi séu nokkuð þykk setlög. Jarðeðlisfræðilegar mælingar hafa einkum beint athygli manna að svæði sem liggur undan landi frá Skjálfanda vestur fyrir mynni Eyjafjarðar. Svæði þetta tekur yfir suðurhluta Grímseyjarsunds (grunnsins milli Grímseyjar og lands) og Eyjafjarðaráls. Þar virðist vera dalur fylltur setlögum, og er Flatey á austurhluta hans, syðst á Grímseyjarsundi. Þetta setlagasvæði er hér kallað Flateyjardældin eða Flateyjarsetlögin.

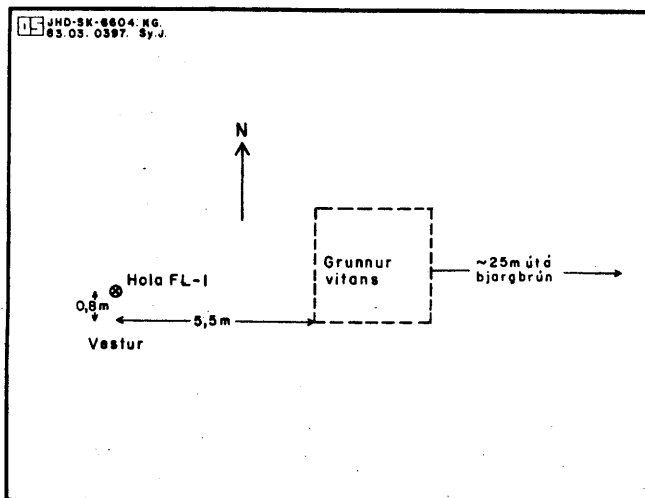
Nokkur aðdragandi var að þessu verki innan Orkustofnunar. Fyrst má telja þátttöku stofnunarinnar í þyngdarmælingum á landgrunninu, sem sýndu staðsetningu Flateyjardældarinnar (Guðmundur Pálmason 1974). Þá hafði stofnunin eftirlit með rannsóknum olíuleitarfyrirtækisins Western Geophysical Co. á svæðinu, sem sýndu að setlögin eru allt að 4 km að þykkt. Sumarið 1981 gerðu Orkustofnunarmenn svo yfirborðsathuganir í Flatey á vegum NHH, einkum jarðfræðirannsókn og þyngdarmælingar, sem voru hugsaðar sem undirbúningur fyrir borun (Lovísa Birgisdóttir 1982; Karl Gunnarsson og Margrét Kjartansdóttir 1982). Þessar rannsóknir og aðrar bentu sterklega til að undir Flatey væru þykk setlög, og að eyjan væri eini staðurinn þar sem hægt væri að bora í setlög Flateyjardældarinnar á þurru landi.

1.1 Borun

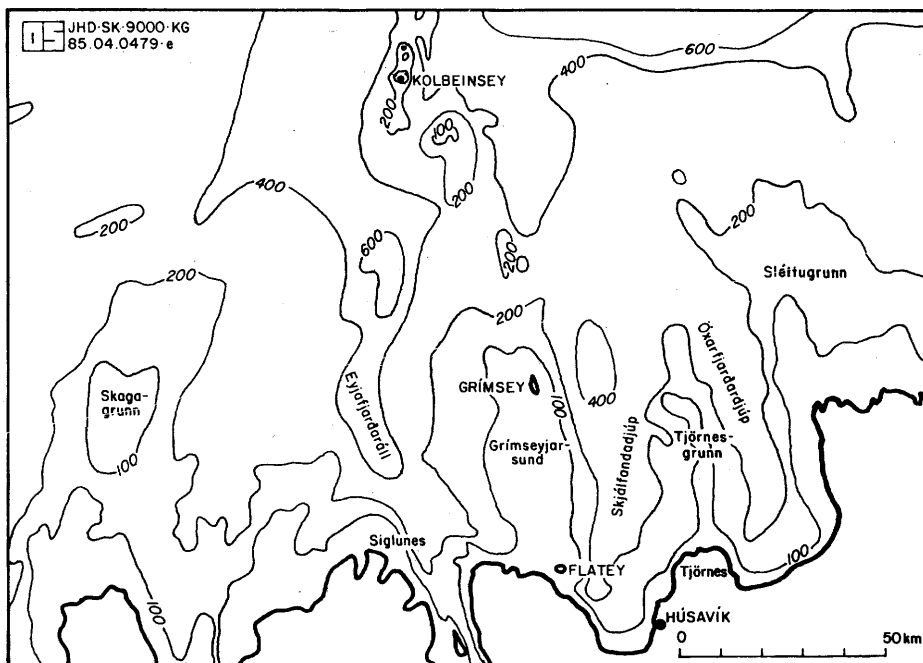
Borholunni var valinn staður við vitann á austurströnd eyjarinnar, sjá kort af eyggi á mynd 1, og nánar á mynd 2. Sjá einnig mynd 3, sem gefur yfirlit yfir landgrunnssvæðið úti fyrir Norðurlandi.



MYND 1. Kort af Flatey á Skjálfaöndu, teiknað eftir loftmynd. Borhóla FL-1 er 5 m vestan við vitann á austurströnd eyjarinnar.



MYND 2. Staðsetning borholu FL-1 við vitann á austurströnd Flateyjar.



MYND 3. Yfirlitskort af landgrunni Norðurlands.

Til verksins var notaður tiltölulega lítill jarðbor af gerðinni Craelius (nr. 1). Svokölluð "wireline"-aðferð var notuð við borunina, en með henni má ná upp samfelldum kjarna á fljótlegan hátt. Borinn var fluttur út í eyju 8. september 1982 með flóabátnum Drangi, og kom aftur til Akureyrar 21. október. Hinn eiginlegi bortími var um 31 dagur, en flutningur, undirbúningur og samantekt á borstað tók eina 11 daga. Framan af var aðeins dagvakt starfandi við borinn, en síðasta úthaldið (11 daga) var borað dag og nótt á tveimur vöktum. Meðal-afköst á 12 tíma vakt voru um 13,2 m, eða um 1 m/klst.

Holan var fódruð með 6" röri efstu 1,2 metrana. Steypt var í hana á eftirfarandi dýptarbilum: 1,2-8,5 m, 0,5-20,3 m, 24,0-51,6 m og 40,0-134,4 m. Vatnstap var nokkuð í þessum kafla holunnar. Setlögin boruðust yfirleitt vel og hratt með þeim demantsborkrónum sem notaðar voru. Holan virðist standa vel, og var enn opin nær í botn 10 mánuðum eftir lok borunar. Borstangir voru af NQ-gerð, en þær skila kjarna sem er 47,6mm að þvermáli, og bora 75,7 mm víða holu. Kjarnarörin voru 10 feta löng.

Kjarninn heimtist vel, eða úr um 96% holunnar, og mest tapaðist úr efstu 66 metrunum þar sem bergið er linast. Þar fyrir neðan náðist 99% kjarnans. Sums staðar er kjarninn þó sprunginn og kurlaður, líklega bæði vegna veikleika í berginu og átaka í borun og við meðhöndlun hans.

1.2 Rannsóknir

Undirbúningur rannsókna fólst m.a. í athugun á rannsóknaraðferðum við olíuleit, en bein reynsla á því sviði er takmörkuð hér á landi, enda þótt svipaðri tækni sé beitt í öðrum jarðlagarannsóknum. Reynt var að velja rannsóknaraðferðir sem gætu gefið hugmynd um þá meginþætti sem ráða myndun og samsöfnun olíu. Suma þætti verksins varð að gera erlendis, en einnig var reynt að virkja innlenda þekkingu eftir föngum, bæði innan og utan Orkustofnunar.

Segja má að rannsóknirnar séu þrenns konar, þ.e. jarðfræðileg greining kjarnans, jarðeðlisfræðilegar mælingar í holunni og svo ýmsar mælingar á kjarnasýnum. Meðan á borun stóð var kjarninn skrásettur, kjarnaheimtur mældar og berggerð greind. Þá var líka reynt að fylgjast með hvort vart yrði við olíubrák eða gas, sem ekki varð. Holan var mæld strax að borun lokinni, af Guðna Guðmundssyni og Steinari Þ. Guðlaugsyni. Í því skyni var mæligabíll fluttur í eyna. Með mælingunum má greina ýmsa eiginleika bergsins í veggjum borholunnar, t.d. poruhluta, eðlisþyngd og rafviðnám. Hiti holunnar var einnig mældur í lok borunar, auk þess sem mælt var reglulega í borhléum, bæði hitastigsferlar og upphitunarferlar í botni, svo betur mætti meta ótruflaðan hitastigul jarðlaganna. Þá var farið í eyna um 10 mánuðum eftir lok borunar, og hiti mældur í holunni.

Leitað var aðstoðar jarðvísindamanna við Háskóla Íslands við rannsóknir á kjarnanum. Jón Eiríksson var fenginn til að greina hluta kjarnans, einkum með tilliti til setlagagerðar og myndunaraðstæðna, og til að gera samanburð við setlög á Tjörnesi. Leifur Símonarson vann með Jóni við greiningu steingervinga. Skýrsla þeirra er birt hér sem viðauki 2. Leó Kristjánsson mældi segulmagn og segulstefnur í bergsýnum.

Sýni voru send á rannsóknarstofur tengdar olíuleitariðnaðinum í Noregi til að mæla magn lífrænna efna (kolefnis) í kjarnanum, og hvort vottur olíuefna fyndist. Þangað voru einnig send sýni til mælinga á poruhluta bergsins (þ.e. þeim hluta bergsins sem er holrúm) og lekt, sem eru þeir eiginleikar sem stjórna rennsli og varðveislu olíu í jarðlögum. Magnús Ólafsson (OS) efnagreindi sýni úr hraunlögum kjarnans. Lárus Guðjónsson (Utrechtháskóla) leitaði árangurslaust að leifum örvera í nokkrum sýnum. Kristinn Albertsson (HÍ) fékk sýni úr hraunlögum til að gera tilraun til aldursgreiningar með K/Ar-aðferð, en niðurstöður hafa ekki borist enn.

2 SETLAGASVÆÐI Á LANDGRUNNI NORÐURLANDS

Landgrunn Norðurlands er nokkuð ólíkt öðrum hlutum landgrunnins, og hefur óvenju fjölbreytta jarðlagabyggingu. Á síðasta áratug eða svo hafa verið gerðar ýmsar rannsóknir sem hafa sýnt fram á að þar eru þykk setlög til staðar, og beinist athygli þessa yfirlits einkum að upplýsingum þeim tengdum. Margt bendir til að flest sérkenni landgrunnins fyrir Norðurlandi séu tengd legu virka gosbeltisins í gegnum landið. Það gengur norður um Öxarfjörð og hliðrast þaðan vestur á Kolbeinseyjarhrygg, sem gengur norður úr landgrunninu á mótis við Siglunes. Belti þessi eða gliðunarsprungur eru á mótum jarðskorpuplatna, og þar á sér stað nýmyndun jarðskorpu með gliðnun sem samsvarar um 2 cm á ári í A-V stefnu. Þessir tveir hlutar gliðunarbeltisins tengjast með Tjörneshvambeltinu svokallaða, sem er margslungið kerfi brota og víxlhengja. Þar kemur fram víxl færslan sem verður vegna þess að jarðskorpuplattan norðan brotabeltisins færir 2 cm til austurs á ári miðað við plötuna sunnan við. Mynd 3 sýnir yfirlitskort af landgrunninu.

Jarðskjálftamælingar benda til þess að í Tjörneshvambeltinu sé nú einkum virkni á tveimur VNV-lægum víxlhengjum (Páll Einarsson og Sveinbjörn Björnsson 1979). Annað má kalla Flateyjarvíxlhengið, en það liggur frá Húsavíkurmisgengjunum, milli Flateyjar og lands, og vestur fyrir mynni Eyjafjarðar. Hitt heitir Grímseyjarvíxlhengið, og gengur úr mynni Öxarfjarðar og rétt norður fyrir Grímsey. Hið síðarnefnda virðist hafa meiri skjálftavirkni, og jarðskjálftar þar benda til hægra sniðgengis um misgengið.

Flateyjarmisgengið markar suðurjaðar brotabeltisins, en á því finnast einu skýru yfirborðsummerkin um A-V brot á svæðinu. Við Húsavík kemur það fram sem nokkur samsíða misgengi, og þar er fallið sunnanmegin. Frá Skjálfanda og út fyrir Eyjafjörð er fallið norðanmegin, og þar fylla Flateyjarsetin dældina upp að misgengisstálinu. Þessa brotalínu má að öllum líkindum rekja áfram vestur undir Skagagrunn, og ýmsar mælingar sýna merki þar um, enda þótt óbein séu. Þar eru þó engar vísbendingar um verulega þykk setlög. Einu ummerkin sem sjá má um Grímseyjarmisgengið eru N-S brot sem liggja skáhallt á stefnu áætlaðrar víxlhreyfingar, og nýleg eldvirkni finnst þar líka. Landslag hafsbotsins í brotabeltinu er einnig mótað af jarðlagahöggun með norðlægri stefnu. Þar eru áberandi þrjár sigdalir, Öxarfjörður eða Öxarfjarðardjúp, Skjálfandi eða Skjálfandadjúp og Eyjafjarðaráll. Milli þeirra eru rishryggirnir Tjörneshvambelti og Grímseyjargrunn (McMaster o.fl. 1977).

Brotakerfi það sem lýst er að ofan hefur verið túlkað þannig, að

Flateyjarvíxlgengið hafi verið virkt frá því að Tjörnesbrotabeltið myndaðist, eða í um 6 m. ár. Síðan hafi dregið úr virkni þess fyrir um 1 m. árum, þegar Grímseyjarbrotið myndaðist og tók við hlutverki þess (Kristján Sæmundsson 1979). Myndun brotabeltisins er talin orsakast af því að fornt gosbelti á vesturlandi hafi orðið óvirkt, og þá hafi eldvirkni og gliðnun lands færst yfir á beltið á austanverðu landinu. Af þessu leiðir að mikil hliðarfærsla hefur orðið um Tjörnesbrotabeltið, af stærðargráðunni 100 km, og að líkindum einkum um Flateyjarbrotið. Fyrir þessu vantar þó beinar sannanir. Grímseyjarbrotið er svo ungt að engin greinileg VNV-læg sprunga hefur myndast, nema e.t.v. í neðri hluta jarðskorpunnar. Líklega hafa N-S brotin, og jarðlagahöggun þeim tengd, myndast um svipað leyti og Grímseyjarbrotið varð til. Tjörnesið byrjaði að snarast til vesturs fyrir tæpum 2 milljónum ára (sjá hér síðar), og Grímsey, sem er snöruð til SV, er grágrýtismyndun frá svipuðum tíma (Kristján Sæmundsson, munnl. upplýsingar).

Upplýsingar um setlög á svæðinu eru heldur slitróttar, en nægja til þess að gera sér grófa mynd af útbreiðslu og þykkt þeirra. Ýmsar óbirtar hljóðendurkastsmælingar, einkum fullkomnar mælingar Western Geophysical 1978, eru notadrýgstar í þessu efni. Þá virðast flugsegulmælingar sýna vel útbreiðslu setlaganna (Vogt o.fl. 1980). Í stórum dráttum má lýsa útbreiðslu setlaga þannig, að beggja vegna Kolbeinseyjarhryggjar eru breiðar dældir fylltar setlögum, og þykkt þeirra er víða á bilinu 1-2 km. Vestari dældin virðist vera nokkuð meiri, einkum er augljóst að þar hefur setframburður hlaðið landgrunnsbrúnina mun lengra fram en austan við hrygginn. Frumorsökinn fyrir þessum setlagadældum er að berggrunnur landgrunnsins hefur sigið þar niður, en farg setlaga sem safnast í dældirnar eykur síðan sigið enn frekar. Þetta er greinilegt ef leiðrétt er fyrir áætluðum áhrifum setlagafargsins. Ef engin setlög hefðu sest til í dældunum, ætti hafsbotninn þar að standa 500-1000 m neðar en nú er, eða í svipuðu dýpi og úthafsbotninn norður af landinu. Varpa mætti hér fram þeirri tilgátu að sú jarðskorpa sem myndast hefur á Kolbeinseyjarásnum eftir að Tjörnesbrotabeltið myndaðist, þ.e. síðustu 6 milljónum ár, sé þynnri en önnur Íslandsskorpa, og líkist venjulegri úthafsskorpu. Hugsanlega stafar þetta af því að þverbrotabeltið virkar sem stífla á streymi kviku út frá miðju landsins.

Þriðja mikla setlagadældin er Flateyjarældin, en hún er þeirra þrengst og dýpst, og sést mjög vel í þyngdarmælingum (Guðmundur Pálmason 1974). Hún liggur undan landi á syðri hluta Grímseyjarsunds og Eyjafjarðaráls. Flatey er á austasta hluta dældarinnar. Suðurjaðar hennar er sérstaklega skarpur, og myndast af Flateyjarbrotinu. Þannig virðast setlögin hafa sest til í sigdal, sem myndast hefur á víxlgengi. Djúpir dalir eru reyndar algengir á víxlgengjum úthafshryggja,

en ósannað er hvort Flateyjardældin er dæmigerð fyrir slíkar myndanir. Endurkastsmælingar í vesturenda dældarinnar sýna allt að 4 km dýpi. Aðrar mælingar sjá of grunnt, t. d. mælingar Kjartans Thors (1982), en þær sýnda þó legu Flateyjarmisgengisins í yfirborðslögum og tengsl við Húsavíkurmisgengin.

Á Tjörnesi má finna setlagasyrpu sem ætla má að líkist setlögum landgrunnsins, og eru því mjög forvitnileg fyrir þessa rannsókn. Þau veita einnig upplýsingar um jarðlagahöggun í Tjörnesbrotabeltinu, enda er Tjörnes eina stóra svæðið sem hefur risið þar úr sæ. Setlögin þar eru að mestu leyti grunnsævismyndanir, en með talsverðu ívafi hraunlaga. Þau eru frá síðari hluta tertíer og fyrri hluta ísaldar. Þau eru samtals um kílómetri að þykkt, og hvíla á tertíerum hraunlögum. Neðri helmingi jarðlagastaflans eru svonefnd Tjörneslög. Þau eru setlög mynduð fyrir ísöld, gróft áætlað á tímabilinu fyrir 4-2,5 milljónum ára, en sýna þó að loftslag kólnaði á þessu tímabili. Ofan á Tjörneslögin leggst basaltmyndun, Höskuldavíkurhraunin, en þar ofar er svokölluð "Breiðavíkurgrúpa" setlaga sem inniheldur reyndar mikið af hraunlögum. Þessi jarðlög mynduðust á síðustu 2 milljón árunum, og í þeim eru merki um ein tólf jökulskeið (Kristinn Albertsson 1978; Jón Eiríksson 1981). Neðri hluti jarðlaganna, þ.e. Tjörneslögin, Höskuldavíkurbasaltið og Furuvíkurlögin, er samfelldur og hallar 5-10° til NV. Yngri jarðlög liggja mislægt á þeim, og hallar nokkuð til norðurs. Af þessu má álykta að fyrir tæplega 2 milljónum ára hafi nesið snarast til vesturs, og síðar meira til norðurs. Jafnframt því hefur spildan brotnað og misgengið í stalla um norðlæg brot með sigið austan megin. Misgengin eru mest austan í nesinu, þar sem þau mynda brúnir sigdalsins í Öxarfirði.

Húsavíkurmisgengin afmarka suðurenda rishryggjarins á Tjörnesi, og eru hluti af Flateyjarvíxlengingu, sem áður segir. Landið norðan við misgengin hefur lyfst, svo þar sér í berggrunninn sem er gerður úr basalhraunum frá tertíertíma. Boranir sunnan misgengjanna við Húsavík hafa gefið til kynna að þar séu setlög niður á rúmlega 1 km dýpi (Jens Tómasson o.fl. 1969), enda þótt sú túlkun hafi verið dregin í efa (Kristján Sæmundsson 1974). Þessar vísbendingar gefa ástæðu til að íhuga hvort setlagadæld hafi áður náð suður fyrir Flateyjarvíxlengingunni á þessum slóðum, og hvort þar megi einnig bora í svipuð setlög og eru á Tjörnesi og undir Flatey.

Undanfari borunar í Flatey var yfirborðskönnun á svæðinu, sem starfsmenn Orkustofnunar unnu. Jarðlög eyjarinnar voru skoðuð, og í ljós kom að þar sást í eitt eða tvö hraunlög og lítt hörnuð setlög undir (Lovísa Birgisdóttir 1982). Vægur halli er á jarðlögum til suðurs. Þessi jarðlög voru talin vera ísaldarmyndanir, og frábrugðin gamla tertíera hraunlagastaflanum, sem myndar fastalandið handan sundsins.

Einnig voru gerðar þyngdarmælingar í eyggi og uppi á landi í Flateyjardal. Þær leiða í ljós að jarðlögin undir Flatey eru mun eðlisléttari en hraunlagastaflinn sem myndar fastalandið, og að skil þessara myndana eru mjög skörp og brött og liggja milli lands og eyjar. Eðlilegast er að túlka þessar niðurstöður á þann hátt að undir Flatey sé setlagadæld, a.m.k. 2ja km djúp. Suðurjaðar hennar er skarpur og brattur og því líklega myndaður af miklu misgengi (Karl Gunnarsson og Margrét Kjartansdóttir 1982). Það þótti ljóst af þessum mælingum, að eyjan væri öll inni á setlagabunkanum, og því unnt að bora hvar sem væri á henni.

3 JARÐLAGAGREINING BORKJARNA

Jafnóðum og kjarninn kom upp úr holunni var hann lengdarmældur og kjarnaheimtur reiknaðar. Einnig var kjarninn strikaður með tveimur mislitum línum til þess að koma í veg fyrir að endaskipti gætu orðið á kjarnabútum. Sýni voru tekin til þunnsneiðagerðar og greininga á ummyndun, og til þess að gera á þeim ýmsar mælingar. Kjarninn var skoðaður í handsýni og einnig var notuð svarfsjá, einkum til að meta kornastærð fínkornóttara bergsins. Við kornastærðargreiningu setsins var reynt að hafa mörkin milli völubergs og sandsteins við 2 mm, sem næst 0,06 mm milli sand- og siltsteins, og 0,004 mm milli silt- og leirsteins (Udden-Wentworth kvarði). Mynd 4 sýnir jarðlagasniðið og jarðeðlisfræðilegar mælingar úr holunni, en í Viðauka 1 er lýsing á einstökum jarðlögum kjarnans.

Að lokinni borun voru gerðar ýmsar jarðeðlisfræðilegar mælingar í holunni, svo sem venja er við borun hola á jarðhitasvæðum. Slíkar mælingar þykja einnig ómissandi við olíuboranir. Mælingarnar voru gerðar um fjórum sólarhringum eftir að borun lauk, og til þess var mælingabíll fluttur út í eyjuna. Eftirfarandi stærðir voru mældar samfellt með dýpi:

Nifteindadreifing - mat á poruhluta bergsins.

Gamma-gamma - mat á eðlisþyngd bergsins.

Gammageislun - mat á geislavirkum efnum í bergi.

Viðnám - rafviðnám bergsins (16" og 64" skautabil).

Vídd holu - mæling mistókst að mestu.

Hiti - mæling hitastigs í borholuvökvanum.

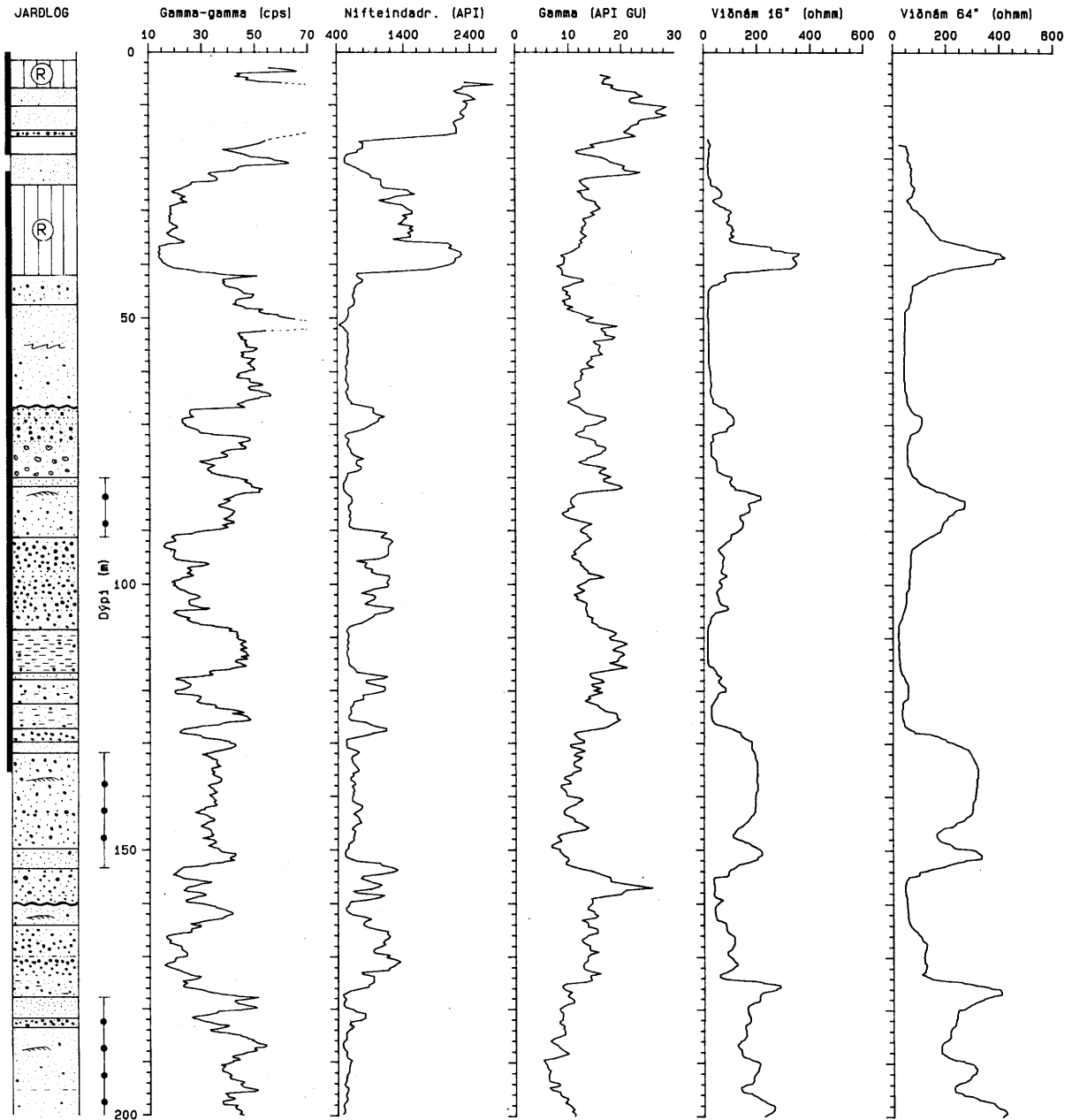
Mismunarhiti - hitamismunur yfir stutt dýptarbil.

Mælingarnar gengu vel, og virðast gefa markverðar niðurstöður. Undantekning er þó víddarmælingin, en hún heppnaðist einungis í efstu 50-100 metrunum vegna tæknilegra örðugleika. Á mynd 4 eru borholumælingarnar sýndar, og þar má bera þær saman við jarðlagasniðið. Mælingarnar eru ekki fullunnar, og hér er þeim einungis ætlað að sýna mismun milli jarðlaga og endurspegla jarðlagaskipunina sem greinist í kjarnanum. Þetta á einkum við um nifteindamælingu og gamma-gamma mælingu, en þær eru ekki kvarðaðar og kvarði þeirra er ólínulegur. Nifteindamælingin gefur vísbendingu um vetnisinnihald bergsins, sem er í þessu tilviki einkum vatn í porum en getur einnig verið bundið í ummyndunarsteindum. Gamma-gamma mælingin mælir meðaleðlisþyngd bergsins. Þessar tvær mælingar sýna andstæða hegðan, þ.e. þegar poruhluti eykst minnkar eðlisþyngd. Þar að auki eru mælingarnar, einkum gamma-gamma mælingin, mjög viðkvæmar fyrir holuvídd. Eins og áður segir misstókst víddarmæling holunnar og því gætu mælingarnar verið truflaðar á pörtum. Þó er líklegt að holan sé víðast hvar snyrtileg og jafnvíð. Vitað er um skáp á 6-12 m og 50-52 m dýpi. Einnig mætti túlka nokkra toppa í gamma-gamma mælingunni neðar í holunni sem áhrif frá útvíkkunum.

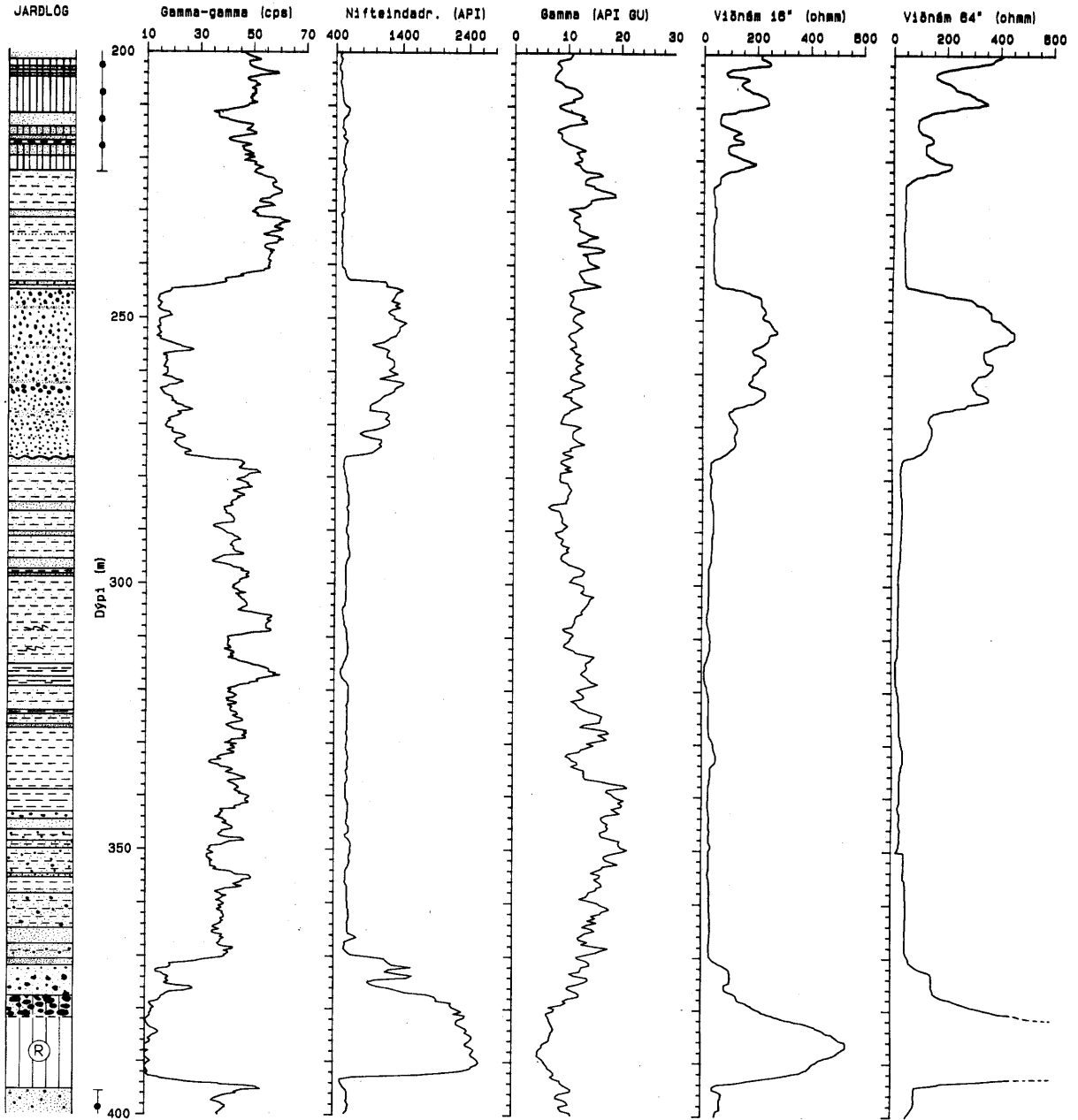
JHD-BJ-6700-MK
84.11.149B-T

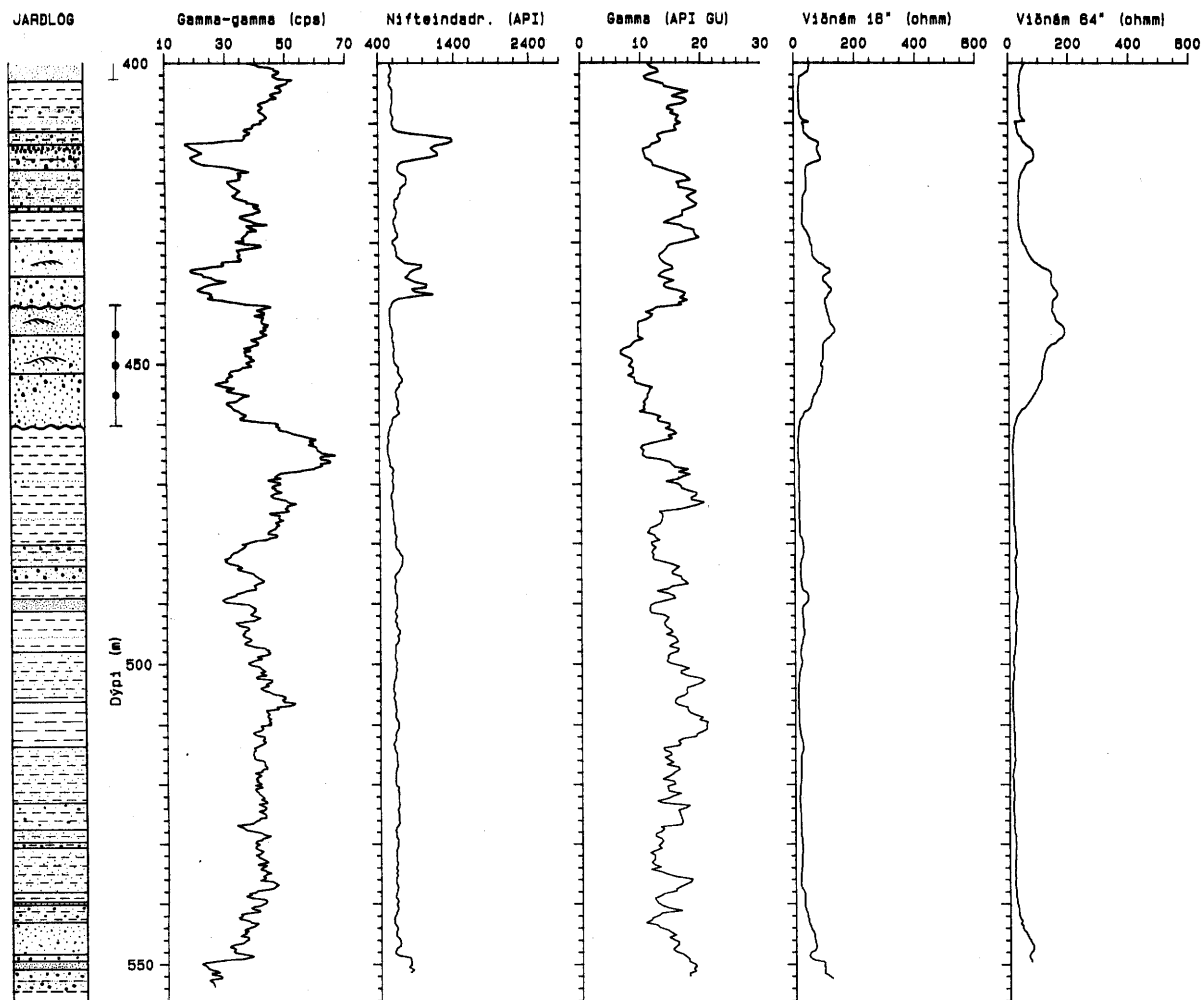
FLATEY Á SKJÁLFA NDA HOLA 1

JARÐLÓG OG BORHOLUMÆLINGAR



MYND 4. Jarðlagasnið holu FL-1, byggt á greiningu kjarna, og jarðfræðilegir mæliferlar úr holunni.





Skýringar við jarðlagasnið

- | | | | |
|--|--------------------------|--|--------------------------------------|
| | Ófugt segulmagnað basalt | | Kjarnaeyðing |
| | Vóluberg | | Skálöggun |
| | Sandsteinn | | Rofflötur |
| | Siltsteinn | | Glerríkur sandsteinn með malarlinsum |
| | Leirsteinn | | Steypa |
| | Túff | | |

3.1 Helstu niðurstöður

Gróft séð má flokka jarðlög kjarnans upp í hraunlög og setberg. Setberginu má síðan skipta upp í völuberg, sand- og siltsteinslög. Koma þá fyrir ákveðnar endurtekningar (syrpur) og má gera ráð fyrir að svipaðar aðstæður hafi verið ríkjandi við myndun þeirra.

Hraunlögin eru gleggstu merki um gosvirkni. Þau eru öll öfugt segulmögnuð og því eldri en 0,7 milljóna ára. Sýni úr öllum þremur hraunlögum kjarnans voru efnagreind af Magnúsi Ólafssyni, með örgreini Norrænu eldfjallastöðvarinnar. Niðurstöður eru sýndar í töflu 1, sem sýnir þyngdarhlutfall helstu tíu frumefna. Efnagreiningin sýnir að berggerðin er ólivín-póleiít. Það er athyglisvert að magn kalíums er mjög lítið. Af þeim ástæðum gæti reynst erfitt að mæla aldur bergsins með K/Ar-aðferð.

Samkvæmt Sveini Jakobssyni (1979) er magn kalíums mismunandi eftir eldgosasvæðum. Á Kolbeinseyjarhrygg er magn kalíums í gosbergi mjög lítið, en í gosbeltum landsins er það mjög breytilegt og getur orðið mjög mikið. Flatey er þannig sett, að hugsanlega gætu gosefni hafa borist að frá báðum þessum svæðum. Niðurstöður efnagreiningarinnar svara þó ekki neinu þar um, þar sem lítið magn af kalíum útilokar hvorugt svæðið.

TAFLA 1. Efnagreiningar á basalhraunum úr borkjarna holu FL-1.

	Dýpi				"Skekkju- mörk"
	3 m	40 m	391,5 m	393,5 m	
SiO ₂	48,6	49,3	48,5	48,9	0,6
TiO ₂	1,82	2,21	1,71	1,54	0,1
Al ₂ O ₃	14,3	15,6	14,3	14,5	0,3
FeO ^t	11,8	11,9	12,2	11,9	0,4
MnO	0,24	0,21	0,23	0,23	0,05
MgO	7,44	5,65	7,60	7,60	0,15
CaO	12,9	12,0	12,8	12,8	0,2
Na ₂ O	2,42	2,70	2,23	2,19	0,1
K ₂ O	0,18	0,15	0,13	0,09	0,05
P ₂ O ₅	0,15	0,18	0,18	0,15	0,05
Total	99,8	99,9	99,9	99,9	

Völubergslögin eru mismunandi og bera vitni um rof á jarðfræðilega ólíkum svæðum og einnig mismun á umhverfi og rofhraða við myndun. Nokkur laganna eru greinilega mynduð við rof á tertíerum hraunlögum, og önnur við rof á þykkum setlögum (sandsteinsvölur). Völur eru úr zeolíta- og leirfylltu basalti, rauðum millilögum, surtarbrandi og líparíti. Þunnar sandsteinslinsur eru algengar í völubergslögunum. Sem dæmi um þesskonar völuberg má nefna völubergið á 66,0-80,1 m dýpi og hluta af berginu á 153,5-177,8 m dýpi. Einnig eru í kjarnanum völubergslög þar sem smáar, lítið rúnnaðar völur eru á dreif í sand- og siltsteinsgrunni. Þessi völubergslög renna oft saman við sand- og siltsteinslög. Völubergslagið á 91,3-108,6 m dýpi er úr ferskum vel rúnnaðum basaltvölum. Lagið er dökkt og einsleitt og líklega myndað við rof á yngri basaltsvæðum. Þessu líkar eru linsur úr núinni basaltmöl, sem koma fyrir í glerríkum sandsteinslögum.

Glerríkir sandsteinskaflar eru fimm í holunni og merktir sérstaklega á jarðlagasniðinu (mynd 4). Glerríku sandsteinslögin gefa til kynna gos í sjó eða undir jökli. Þau gætu t.d. verið mynduð við framburð jökuláa í jökulhlaupi, og því tákna þau ekki nauðsynlega að upptök eldgosanna hafi verið nærri Flatey. Ummyndun glersins er mjög mismunandi mikil. Magn glers í lögunum er einnig mjög mismunandi, og sums staðar yfirgnæfandi. Hvort það tákni að gosupptök hafi verið skammt undan, eða hvort gosefnin hafi getað borist langa leið skal ekki fullyrt hér. Lögin eru oft sprungin með hvítum fyllingum. Um 20 m þykkt túfflag er í holunni neðan 200 m, og er það væntanlega til orðið vegna goss í nágrenninu.

Sand- og siltsteinslög mynda meginhluta kjarnans. Fimm sand- og siltsteinskaflar eru í holunni og eru tveir þeirra sýnu þykkastir. Verulegur hluti þessara laga er myndaður í sjó eða lónum. Ekki tókst að finna skeljar í þessum lögum við kjarnagreininguna úti í Flatey, en við síðari rannsóknir á hluta kjarnans (dýptarbil 245-385 m) fundust skeljar á 309-336 m dýpi, lífverur sem finnast hér aðeins í setlögum frá ísöld, yngri en 2ja milljóna ára. Skeljarnar sýna einnig að hafdýpi var ekki mikið. Nákvæmari lýsingu og umræðu um steingrevinga er að finna í Viðauka 2. Vel er mögulegt að steingervingar finnist víðar í kjarnanum. Þess má einnig geta að Lárus Guðmundsson við Ríkisháskólann í Utrecht, Hollandi, gerði tilraun til að finna örverur í tíu sýnum úr kjarnanum. Sýnin voru úr fínkornóttu bergi og valin af handahófi. Engir steingervingar fundust.

Mjög góð fylgni er milli jarðlagagreiningar og borholumælinga, og eðlisþyngdarmælingin (gamma-gamma) endurspeglar lagskiptingu kjarnans einna nákvæmast. Á henni má ráða að eðlisþunginn er því meiri sem magn basaltvalna í berginu eykst, og er mestur í basalhrauni. Í nifteindadreifingunni koma þéttari lögin svo sem basalt- og völubergs-

lögin vel fram en litlar sveiflur eru í fínni setlögnum. Hátt viðnám mælist í basaltlögunum og einnig í glerjaða sandsteininum og túffinu. Aftur á móti er það lágt í sand- og siltsteininum. Gammageislunin er veik og sýnir litlar breytingar. Helst er að sjá veikan mun á hraunlaginu þar sem geislunin er minnst og fíngerðasta siltinu þar sem geislunin er mest. Í jarðlögum sem oft er að finna á olíusvæðum meginlandanna, er leirsteinn oft áberandi vegna sterkrar geislunar. Fínkornótta bergið í holunni sýnir ekki slíka eiginleika, enda að mestu gert úr basaltmylsnu. Hér á landi er sterk geislun yfirleitt tengd súru gosbergi, sem kemur ekki fyrir í holunni.

Í kjarnanum má ef til vill sjá 5 syrpur af samspili fínni og grófari setlaga. Hér er átt við þess konar setlagasyrpur sem eru einkennandi fyrir ágang jökuls, áflæði og loks afflæði sem fylgir víxlun jökul- og hlýskeyða (Jón Eiríksson 1981; sjá einnig viðauka 2). Hér er kjarnanum skipt upp lauslega, þannig að kafli af fínkornóttu seti fylgi hverri syrpu. Líklegt er að það gefi lágmarksfjölda. Fyrsta syrpan (í öfugri tímaröð) inniheldur þá fínkornótta setið á 108-127 m dýpi, önnur syrpan fínkornótta setið á 223-245 m dýpi og sú þriðja fínkornótta setið á 277-345 m. Fjórdða syrpan inniheldur fínkornótta setið á 403-430 m og fimmta syrpan setið á 460-540 m dýpi. Í þriðju og fimmtu syrpanni er fínkornótta setið langþykkast. Völubergið er þykkast í efstu syrpanni. Það gæti husanlega verið leifar fleiri en einnar syrpu.

Á 66 m dýpi er líklega mislægi, þar eð kjarninn er mun betur samlímdur neðan þess dýpis en ofan. Þetta gæti bent til þess að jarðlögin ofan mislægisins séu verulega yngri en þau neðri. Jafnvel er hugsanlegt að áður en lögin ofar mislæginu settust til, hafi rofist talsvert ofan af setlagastaflanum.

Til þess að komast að aldri laganna má reyna samanburð við þekktar jarðmyndanir í nágrenninu, ef beinar aldursákvarðanir eru ekki fyrir hendi. Jarðlög á 245-385 m dýpi hafa verið rannsökuð nákvæmlega af Jóni Eiríkssyni og Leifi Símonarsyni (sjá viðauka 2) og þau borin saman við jarðlög á Tjörnesi, en þar eru þykkar setmyndanir frá tertíer og kvarter. Jón og Leifur benda á að samkvæmt þeirra niðurstöðum finnist samlíking milli fyrrnefnds kafla í holunni við svonefnda Hörgamyndun á Tjörnesi. Í Flateyjarholunni er þó öfugt segulmagnað hraunlag á tæplega 400 m dýpi en á Tjörnesi eru réttsegulmögnuð hraunlög í samsvarandi stöðu undir Hörgamynduninni. Þetta gerir þessa tengingu nokkuð vafasama, en þarf e.t.v. ekki að útiloka hana. Hugsanlega má halda áfram tengingum milli svæðanna og tengja túffið á um 200 m dýpi í holunni við þykkar túffmyndanir sem koma fyrir í svokallaðri Þrengingamyndun á Tjörnesi. Hraunlögin tvö efst í holunni samsvara þá ef til vill hluta af svonefndri Mánármyndun.

Neðsta fínkornótta syrpan í holunni á um 500 m dýpi gæti samsvarað hluta af Furuvíkurmyndun. Með þessum jarðlagatengingum er fremur vísað til þess að umhverfisáhrif hafi sett svipað mark á báða staðina, en að einstakar jarðlagaeiningar nái óslitnar á milli þeirra um 30 km veg. Ef þessar tilgátur eru réttar, er setlagabúnkinn 1-2 milljónir ára að aldri. Í jarðlagastaflanum á Tjörnesi koma ummerki um jökulberg fyrst fram fyrir um 2 milljónum ára, en þar undir eru hin eiginlegu Tjörneslög.

Nokkur sýni voru tekin til greininga á útfellingum. Gýrólít greindist í sprungu í glerríka sandsteininum á um 445 m dýpi. Gýrólít greinist stundum í jarðhitaholum og er þar yfirleitt í ólivín-þóleiíti eða móbergstúffi. Það greinist sjaldan ofar en í mesólít/skólesítbelti, sem táknar að í basalhraunlögum þarf a.m.k. 60-70°C hita til þess að það myndist. Þetta stangast nokkuð við aðrar ummyndunarsteindir í kjarnanum. Leir var greindur í sprungufyllingu af 396,65 m dýpi í hraunlaginu og reyndist hann vera smektít. Kabasít finnst einnig neðarlega í því hraunlagi. Í vöлубergslögunum eru víða örllitlir kabasít kristallar milli valanna. Kabasít er lághitazeólíti og er einkennissteind fyrir svokallað kabasítbelti. Það myndast ofan við, og við minni hita en mesólít/skólesítbeltið, og er talið hverfa við 70-80° (Hrefna Kristmannsdóttir, munnl. upplýsingar).

4 MÆLINGAR Á BORKJARNA

4.1 Lífrænt kolefni í kjarnanum

Í tengslum við olíuleit má ræða um tvenns konar form á lífrænu efni eða olíuefnum í jarðlögum, og í þessari rannsókn var leitað ummerkja beggja. Annars vegar eru leifar lífvera sem hafa geymst í jarðlögum (einkum leirsteini) þar sem þær settust til og varðveittust í súrefnissnaudu umhverfi. Þessi efni nefnast einu nafni kerógen þar til þau hafa grafist niður og hitnað svo, að þau umbreytast í olíu eða gas. Slíkur lífrænn steinn getur orðið að móðurbergi fyrir olíumyndun ef aðstæður eru heppilegar og nægjanlegt magn af lífrænum efnum er fyrir hendi. Hins vegar má finna í jarðlögum olíuefni sem hafa safnast saman, oft fjarri myndunarstað sínum. Ef verulegt magn nær að safnast saman í gropnu bergi, einkum sandsteini, myndast vinnsluhæfur jarðolíugeymir eða olíulind. Þegar við fyrstu athugun kjarnans þótti líklegt að lítið væri þar af lífrænu efni (kolvetnissamböndum). Hvorki varð vart við olíu eða gas, né heldur þann svarta leirstein sem oftast er talinn uppspretta og móðurberg olíumyndunar. Samt þótti rétt að fá öruggar tölulegar upplýsingar um þetta með því að mæla þyngdarhlutfall lífræns kolefnis í völdum sýnum. Í þeim mælingum er ekki greint á milli gerðar lífrænu efnasambandanna, né á hvaða þroskastigi olíumyndunar þau eru. Þessar mælingar eru tiltölulega einfaldar og ódýrar, og skera úr um hvort ástæða sé til að reyna þróaðri mæliaðferðir, svo sem mælingu þroskastigs kerógenefna og olíuframleiðsluhæfni ("Rock-Eval"). Einnig var athugað hvort vottaði fyrir olíuefnum í nokkrum sandsteinssýnum. Mælingarnar voru keyptar af IKU (Institutt for Kontinentalsökkelundersökelse) í Þrándheimi.

Sýni til kolefnismælinga, 24 að tölu, voru valin úr fíngerðasta siltsteininum á víð og dreif um kjarnann. Þverbrotnir bútar úr kjarnanum, 3-5 cm að lengd, voru sendir utan. Aðeins lítill hluti hvers sýnis eyddist í mælingu, og afgangar eru geymdir á Orkustofnun. Mæliniðurstöður eru í töflu 2, sem sýnir að setlöggin eru mjög snauð af lífrænu efni. Hlutfall lífræns kolefnis í berginu er að meðaltali 0,03 % af þyngd, og dreifingin er á bilinu 0,0-0,13 %. Þetta magn er svo lítið að það er á mörkum þess að vera mælanlegt, og þess má geta að oft er talið að móðurberg verði að hafa yfir 0,5 % kolefnishlutfall til að standa undir nafni. Það má telja útilokað að þessi setlög eða önnur svipuð annars staðar í setdældinni, hafi myndað olíu eða muni í nokkurn tíma. Það var einróma álit mælingamanna að ekki væri tilefni til að reyna frekari mælingar á lífrænum efnum þessa bergs.

Nokkur sandsteinssýni, sem talin eru upp í lok töflu 2, voru send til IKU til að kanna hvort einhver olíuefni væru í þeim. Einföld athugun (könnun í útfjólubláu ljósi, og "DCM", sem er sýrupróf) leiddi í ljós að svo er ekki. Þetta bendir til þess að aldrei hafi verið olíulind í þessum sandsteini, og að olía hafi ekki heldur seytilað í gegnum þessi jarðlög. Hér er rétt að geta þess að loftbólur stigu upp úr holunni á kafla. Sýni af þessu lofti brann ekki, og nokkuð víst er að það var einungis andrúmsloft sem fór niður með skolvatninu og út í bergið.

TAFLA 2. Þyngdarhlutfall lífræns kolefnis. (Sýnahópur FL-1-B, sandb. siltsteinn)

IKU no.	Dýpi (m)	% TOC	IKU no.	Dýpi (m)	% TOC
A-1124	51,50	0,00	A-1136	339,50	0,04
A-1125	54,50	0,01	A-1137	356,70	0,02
A-1126	57,50	0,00	A-1138	407,00	0,00
A-1127	63,50	0,04	A-1139	466,00	0,00
A-1128	74,90	0,00	A-1140	466,90	0,00
A-1129	112,45	0,02	A-1141	474,25	0,02
A-1130	115,90	0,05	A-1142	475,75	0,00
A-1131	125,60	0,13	A-1143	493,45	0,00
A-1132	228,65	0,01	A-1144	508,10	0,08
A-1133	232,10	0,04	A-1145	511,95	0,05
A-1134	318,00	0,00	A-1146	519,65	0,04
A-1135	331,80	0,05	A-1147	538,40	0,07

% TOC (Total Organic Carbon) er hlutfallsþyngd lífræns kols.

Sýni til athugunar á olíuefnainnihaldi (sýnahópur FL-1-C, sandsteinn) gáfu enga svörun við útfjólublátt ljós og "DCM". Þau eru af eftirfarandi dýpi:

248,50, 268,60, 277,20, 288,95, 305,95, 455,10 og 552,10 m.

Í stuttu máli er niðurstaða mælinganna sú, að engin olía sé, né hafi verið í jarðlagunum, og að bergið sé snautt af lífrænum efnum og geti því ekki orðið móðurberg. Þessi lýsing á við þann 550 m jarðlagastafla sem borað var í, en ekki er hægt að fullyrða um hvað neðar leynist. Þá er ekki vitað hversu langt jarðlagaeiningarnar ná til hliðar.

4.2 Poruhluti, lekt og eðlisþyngd

Í góðu geymslubergi verður poruhluti að vera hár, svo verulegt magn olíu rúmist í berginu, og lektin verður að vera nægjanleg til að hægt sé að draga olíuna út. Lektin er einnig mikilvæg að því leyti, að undir henni er komið hvort olía geti seytleað frá móðurbergi að geyminum. Ógegndræpt jarðlag, svokallað þakberg, verður að vera yfir geyminum og loka honum. Ekki stendur til að vinna olíu úr Flateyjarholunni, en samt þótti rétt að afla almennra upplýsinga um ofangreinda eðliseiginleika setlaganna, enda eru setlög Íslands og landgrunnsins lítt rannsökuð á þessu sviði sem og mörgum öðrum.

Hér við land kæmi sandsteinn einkum til greina sem geymsluberg, enda ekki líklegt að finna megi mikinn kalkstein. Til þess að sandsteinn geti virkað sem geymir þarf poruhluti hans að vera á bilinu 20-40%. Það þykir mjög gott ef lekt í sandsteinsgeymi fer yfir 1 D (Darcy), enda þótt lekt í þökkuðum sandi sé margfalt meiri, og verður að vera meiri en 100 mD (millidarcy) svo sémilegt þyki (Taylor 1977). Lektin minnkar í sandinum vegna útfellinga og límingar korna, og að auki hefur jafnvel lítið magn leirsteinda hamlandi áhrif á flæði. Dreifing í kornastærð sandsins leiðir til minni poruhluta og lektar.

Sýni voru send til norska rannsóknarfyrirtækisins GECO (Geophysical Company of Norway A/S), sem mældi þau með þeim aðferðum sem tíðkast í olíurannsóknum. Poruhlutfallið er fundið með því að mæla hversu mikið af helíumgasi rúmast í holrúmi bergstauts eftir þurrkun og lofttæmingu. Lekt er mæld með streymi gass í gegnum sýni. Með því að mæla streymið við mismunandi þrýstingsfall (3 gildi) má leiðrétta fyrir Klinkenbergáhrifum, þ.e. að reikna samsvarandi lekt fyrir vökva. Eðlisþyngd bergkorna er líka gefin upp, en hún er reiknuð út frá mælingu á poruhlutfalli og þyngd kjarnastautsins. Valin voru 25 sýni á víð og dreif um kjarnann og af öllum einleitum bergtegundum nema hraunlögum. Sneitt var hjá völuþergi og sprungum til að forðast misleit efni.

Niðurstöður mælinganna eru sýndar í töflu 3. Hafa ber í huga við túlkun gagnanna að sýnin eru aðeins tomma í þvermál, og langt er á milli þeirra. Æskilegt þykir að hafa um 0,3 m bil á milli sýna. Því er nokkur vafi á hversu vel þau sýna meðaleiginleika jarðlaganna. Hér er þó reynt að flokka niðurstöður eftir berggerð, og reikna meðalgildi. Þær upplýsingar er að finna í töflu 4, en vegna sýnafæðar verður að túlka þær með varúð. Eðlisþyngd blautra sýna, þ.e. ef porur eru fylltar vatni, er reiknuð og sýnd í töflunni.

TAFLA 3. Þoruhluti og lekt sýna úr kjarna FL-1.

Dýpi (m)	Lekt lár. (mD)	lóðr.	Þoruhluti (%)	Eðlisþyngd korna (g/cm ³)	Athugas.
051,00	ehm		37,8	2,81	ls
063,50	1,9		31,2	2,84	
088,80	0,285		20,4	2,53	
099,20	0,198		25,6	2,54	
114,30	ehm		34,3	2,69	ls
117,55	4,345		27,0	2,70	
137,50	0,732		23,6	2,54	
152,65	0,098		17,7	2,44	
163,15	3,365		29,7	2,58	
180,50	0,602		26,7	2,45	
193,70	0,504		21,1	2,42	
222,35	0,068		27,9	2,45	
296,70	1,332		29,1	2,79	
302,50	26,20		30,9	2,72	
311,50	0,121		32,4	2,75	
337,10	0,027	0,017	28,3	2,68	
342,40	0,016	0,009	31,3	2,72	
361,80	0,022		27,5	2,69	
430,10	0,067		22,0	2,68	
454,90	0,048		15,8	2,65	
466,00	0,086	ehm	38,2	2,56	ls
479,45	4,7		30,4	2,66	
500,15	1,153	0,043	30,3	2,62	
513,50	0,015		28,4	2,69	
545,60	0,339		23,7	2,54	

ehm: ekki hægt að mæla; ls: sprungið um lagskiptingu.

TAFLA 4. Meðalgildi þoruhluta, lektar og eðlisþyngdar sýna eftir bergflokkum.

Berggerð (sýnafj.)	Lekt (mD)	Þoruhluti (%)	Eðlisþyngd korna(g/cm ³)	Eðlisþyngd blaut
siltst.(8)	1,14	32,1	269	2,15
sa/si.st.(4)	13,1	31,1	2,73	2,19
sandst.(6)	1,58	24,6	2,66	2,25
túff (7)	0,355	23,3	2,48	2,14

Poruhluti virðist vera sémilega hár, en samt er hann heldur minni í sandsteini en siltsteini. Lektin er mjög lítil, að meðaltali aðeins um 2 mD (millidarcy), og gildin liggja á bilinu 0,015-26,2 mD. Lektin var mæld í lárétta stefnu, en einnig í lóðrétta stefnu í nokkrum tilvikum. Lóðrétta lektin virðist vera nokkru minni, svo sem algengt er. Öll sýnin eru svo þétt, að þau eru ónothæf sem geymsluberg, og sandsteinninn virðist að þessu leyti vera lítið frábrugðinn siltsteininum. Hér veldur líklega bæði blönduð kornastærð og útfellingar í berginu. Frekari smásjárathuganir þyrfti til að varpa ljósi á þessi atriði. Túff eða berg úr glerkenndu efni reynist einna síst, bæði hvað varðar poruhluta og lekt.

Það verður að hafa í huga við túlkun sýnamælinganna, að þær greina ekki þá lekt sem verður vegna grófgerðra opinna sprungna eða glufa í berginu. Að vísu virðast flestar sprungur vera fylltar útfellingum, en þegar þær mynduðust hafa þær aukið lekt, einkum í lóðrétta stefnu. Völu- og hnullungaberg getur einnig verið opið, og um það er dæmi í völungslaginu á 245-277 m dýpi. Slíkar myndanir sem eru líklega strandset, eru gjarnan vel aðgreindar í kornastærð hvort sem um hnullunga eða sand er að ræða, og gætu geymt olíu í verulegu magni.

Eðlisþyngd bergkornanna er að meðaltali nærri 2,7 g/cm³ í sandsteini, en um 2,4 í túffi. Þessar tölur eru nokkuð lágar í samanburði við eðlisþyngd korna í tertíerum basaltstafla, sem er um 3,0. Þetta gæti stafað af verulegu magni að léttari steindum í setlögum, t.d. zeólítum og gleri. Einnig gæti komið til að mæling á poruhluta gefi of lág gildi, sem veldur aftur því að þyngd korna er vanmetin. Slíkar skekkjur hafa komið fram í mælingum á basalti (Geirfinnur Jónsson og Valgarður Stefánsson 1982). Í töflu 4 er einnig gefin eðlisþyngd blauts bergs, sem ætti að vera mat á eðlisþyngd bergsins eins og það kemur fyrir í jörðinni. Þær tölur eru líklegri til að vera réttar þrátt fyrir skekkju í mælingu poruhluta, enda má gera ráð fyrir að leyndar holur í berginu séu fylltar vatni. Reiknuð eðlisþyngd vatnsmettaðs bergs reynist vera svipuð fyrir alla flokka töflunar, eða nærri 2,2 g/cm³.

Auk þeirra upplýsinga sem eðlisþyngdin gefur um gerð bergsins, kemur hún að notum við að túlka þyngdarmælingar, en þær hafa gefið mikilvægar upplýsingar við rannsókn setlaganna í Flateyjardældinni. Það er galli að þær mælingar á kjarnasýnum sem frá er sagt að framan, gefa einungis vísbendingar um hinn tiltölulega fínkornotta og léttu hluta jarðlagastafans. Til að bæta úr því var reynd súa aðferð að vega kjarnakassana, sem innihalda flestir rúmlega 8 m af kjarna. Kjarninn er víðast hvar mjög heillegur, og auðvelt er að áætla rúmmál grjótsins í hverjum kassa. Þannig má reikna eðlisþyngd alls kjarnans, þ.e. meðaltalsgildi fyrir rúmlega 8 m bil. Úrvinnsla úr þessum mælingum

gefur þær niðurstöður að meðaleðlisþyngd kjarnans er $2,31 \text{ g/cm}^3$, hraun hafa eðlisþyngd allt að $3,0$, massívt völuberg um $2,7$, en silt- og sandsteinn á bilinu $2,0-2,3$. Mælingar þessar eru gerðar nokkru eftir að borun lauk, eða ll dögum eftir að síðasti kjarninn kom upp. Því verður að ætla að kjarninn hafi verið farinn að þorna nokkuð og léttast, en varla mjög mikið vegna þess hve bergið er yfirleitt þétt. Ætla má að meðaleðlisþyngd kjarnans sé vart meiri en $2,4 \text{ g/cm}^3$, þegar leiðrétt hefur verið fyrir áætluðu vökvatapi. Þetta gildi er mjög svipað þeirri ágiskun sem lögð var til túlkunar þyngdarmælinga í Flatey og nágrenni (Karl Gunnarsson og Margrét Kjartansdóttir 1982). Þessi aðferð til mælinga á eðlisþyngd vatnsmettaðs bergs er mjög fyrirhafnarlítill, og gæfi líklega nokkuð nákvæmar niðurstöður ef kjarnar væru vegnir strax og þeir koma upp úr borholu. Óvissa er nokkur í þeim mælingum sem hér frá greinir, t.d. vegna breytilegrar þyngdar kjarnakassa, en hún er metin vart hærri en 5%.

Eðlisþyngd bergs má líka meta með borholumælingum, þ.e. gamma-gamma mælingu sem mælir meðaleðlisþyngd bergsins í holuveggjum. Einnig má gera mælingu á nifteindadreifingu, sem gefur mat á vetnisinnihald bergsins. Í okkar tilviki er vetnið einkum í poruvökvunum, en getur einnig verið bundið í ummyndunarsteindum. Báðar þessar mælingar voru gerðar í FL-1 (sjá einnig kafla 3), en ekki er hægt að birta hér tölu- legar niðurstöður, þar sem samband geislunarmælinganna við eðlisþyngd og poruhluta er ólínulegt og hefur ekki verið kvarðað. Þar að auki eru mælingarnar, einkum gamma-gamma mælingin, mjög viðkvæmar fyrir holuvídd, og þar sem víddarmæling holunnar mistókst, skapar það aukna óvissu, þó reikna megi með að holan sé lítið útvöskuð.

Sem áður segir hjálpa borholumælingarnar til að greina á milli mismunandi jarðlaga, og styðja við jarðfræðilega túlkun. Eðlisþyngdar- og poruhlutamælingarnar sýna innbyrðis samræmi og endurspeгла lagskiptinguna eins og hún greinist í kjarnanum. Stærri drættir jarðlagastafans koma glöggt fram, og furðu margir fíngerðari drættir koma í ljós. Áberandi er fylgni milli magns valna í berginu og aukinnar eðlisþyngdar, sem leiðir af þéttari þökkun vegna dreifingar í kornastærð, og e.t.v. einnig vegna þess að vöturnar eru gjarnan úr tiltölulega massívu basalti. Oft er erfitt að greina að sandstein og siltstein á grundvelli eðlisþyngdar, en það sýna mælingar á kjarnasýnum einnig. Góður kjarni fékkst úr holunni, og þar er fyrir hendi efniviður til að kanna samsvörun mælinga og berggerða. Slík könnun mundi styrkja greiningu jarðlaga við frekari boranir í setlagadældina, einkum ef kjarni næst ekki. Þessu verki hefur ekki verið sinnt að ráði. Tilraunir til að bera saman borholumælingarnar og mælingar á poruhluta og eðlisþyngd í sýnum gefa ekki nægilega sannfærandi samband. Þetta er að hluta til vegna þess að lagskipting í kjarnanum er víða svo ör og langt er á milli sýna, að sýnin gefa ekki rétta mynd

af meðalástandi bergsins eins og borholumælitækið nemur það. Önnur ástæða er sú að tilviljunarkennd óvissa í borholumælingunum er nokkuð stór, og úr því verður ekki bætt nema með tölrænni úrvinnslu. Þann lærdóm má af þessu draga, að samanburður við kjarnamælingar þarf að taka til stærri rúmmálseininga, annað hvort með þéttari sýnatöku eða með því að velja sýni úr bilum þar sem bergið er lítt breytilegt.

4.3 Mæling segulmögnunar

Með mælingum á segulmögnun í bergsýnum má finna styrk og stefnu fastrar segulmögnunar í berginu, og segulhrifsstuðul þess. Í okkar tilfalli er tilgangurinn einkum sá að ákvarða hvort jarðlögin mynduðust á tímasteiði með réttri eða öfugri segulstefnu, og hafa þannig möguleika á að tengja þau segultímakvarðanum. Þetta má gera ef gengið er út frá því að jarðlögin hafi segulmagnast svo til um leið og þau mynduðust. Mælingar á borkjarnanum gefa að vísu ekki stefnu í láréttu plani, þar sem ekki er vitað hvernig kjarnarnir sneru upphaflega í borholunni. Halli frá láréttu plani fæst hins vegar út frá mælingunni, og nægir til að segja til um hvort segulskautunin er rétt eða öfug (halli niður eða upp). Helstu óvissuþættir eru þeir að ef holan er ekki lóðrétt, eða ef jarðlög hafa snarast til, verður hallamæling skökk. Ekki er talið líklegt að slíkt sé verulega til ama í þessu tilvik.

Leó Kristjánsson við Háskóla Íslands tók upphaflega að sér að gera mælingar á nokkrum sýnum, einkum úr hraunlögum, en nokkur setlagasýni voru tekin með til reynslu. Rannsóknir á seguleiginleikum íslenskra setlaga eru takmarkaðar og því voru þessar mælingar nokkuð tilrauna-kenndar. Sýni voru valin úr fínkornóttu og einsleitu efni. Fordast var að nota völuberg, þar sem tilviljanakennd áhrif frá basaltvölu geta yfirgnæft eiginleika setsins. Mælingarnar á setsýnunum tókust vonum fram, og Leó mældi fleiri sýni, bæði við Háskóla Íslands og við Oregon State University. Alls heppnuðust mælingar á 36 sýnum, 11 úr hraunlögum en 25 úr setlögum. Sýnin voru meðhöndluð með riðstraumssegulsviði til hreinsunar á mjúkri segulmögnun, flest upp að 200 til 300 ö (örsted) styrk á hreinsunarsegulsviðinu, en sum 600 ö. Niðurstöður mælinganna eru sýndar í töflu 5, og helstu niðurstöður og athugasemdir Leós má taka saman á eftirfarandi hátt:

Flest sýnin, og þar með megnið af kjarnanum, eru öfugt segulmögnuð. Segulstefnurnar eru stöðugar og innbyrðis samræmdar, og líklegt er að þær séu upprunalegar. Halli þeirra er þó e.t.v. nokkuð minni en gengur og gerist í íslensku bergi. Rétt segulmögnun eða lágballa segulmögnun finnst þó líka víða í efstu 200 m kjarnans, þ.e. af dýpi 68,7, 74,0, 131,7, 143,0, 149,85, 151,5,

151,8, 153,0 og 179,25 m . Sum réttsegulmögnum sýnin eru fremur dauft segulmögnum og stefnan er nokkuð óstöðug, samanber sýni nærri 150 m dýpi, en önnur eru ákvörðuð með sambærilegu öryggi og öfugt segulmögnum sýnin. Af setsýnum var sterkust segulmögnum í fremur fínkornóttu bergi, t.d. í silti í völubergi af 74 m dýpi, túffi af 201,7 m, og silti af 425,4 m dýpi. Inhómógen segulmögnum af völdum bortækja kom fyrir í nokkrum sýnum, einkum ofarlega, en náðist að mestu úr með hreinsun með riðstraumsmeðferð.

Termómagnetískar mælingar (upphitun í lofti í sterku segulsviði) voru gerðar á þremur setlagasýnum, af 233,8, 342,55 og 511,6 m. Öll gáfu þau einungis Curie-hitastigið 570-580°C, sem bendir til að magnetít sé ríkjandi segulsteind. Til hins sama benda ferlar afsegulmögnum með riðstraumi upp að 600-800 ö í fimm sýnum. Samkvæmt mælingum á segulhrifstuðli er magn magnetíts 0,1-0,5 hundraðshlutar rúmmáls. Líklegt er að það hafi myndast úr títánómagnetíti við væga upphitun bergsins á sama hátt og í Surtsey (sbr. grein S. Gommé í Surtseyjarskýrslu IX), en þó í lengri tíma og/eða við hærri hita.

Einfaldast er að túlka segulstefnumælingarnar þannig, að jarðlögin hafi segulmagnast á tíma þegar öfug segulmögnum var ríkjandi, nema á tveimur skeiðum sem hafa rétta segulstefnu (sbr. mynd 5). Þessi réttsegulmögnum skeið eru á dýptarbilum 40,15-96,65 m og 124,42-201,7 m ef víðustu mögulegu mörkin eru valin (68,7-74,0 m og 131,7-179,25 m eru þrengstu dýptarmörk). Öfuga segulstefnan í efsta hraunlaginu sýnir að Flateyjarkjarninn er örugglega eldri en 0,7 milljón ár, en þá lauk síðasta öfuga segultímabili jarðsögunnar. Ekki er hægt að álykta á sama veg um hámarksaldur jarðlaganna, en vegna þess að jarðlagagerð og steingervingar benda til myndunar á ísöld er ólíklegt að aldurinn sé meiri en um 2 milljónir ára. Þetta þýðir að jarðlögin eru frá segultímanum Matuyama (2,4 til 0,7 millj. ára gömul), þegar öfug segulmögnum var ríkjandi (Kristinn J. Albertsson 1978). Þó voru á þeim tíma nokkur stutt tímasteið með réttri segulstefnu, Réunion (fyrir 2,11-2,00 millj. ára), Gilsá-Olduvai (eitt eða tvö, fyrir 1,88-1,54 millj. ára) og Jaramillo (fyrir 0,95-0,89 millj. ára). Mæligögnin eru því miður ekki þannig að hægt sé að tengja kjarnann óbyggjandi við þessi segulskaið. Enn fremur verður að íhuga þann möguleika að segulstefna þeirra sýna sem hafa rétta segulstefnu, hafi myndast fyrir minna en 0,7 milljón árum, þ.e. á Brunhes tíma, og sé því fölsk og ónothæf til tímaákvörðunar. Þetta kemur til af því að setlögin segulmagnast líklega vegna efnabreytinga sem háðar eru hita og tíma, og gæti segulstefnan því hafa myndast löngu síðar en lögin urðu til. Rétt stefna kemur einungis fyrir í setlögum ofan 200 m dýpis, og e.t.v. hafa þau jarðlög hvorki hitnað hratt né mikið.

TAFLA 5. Segulmælingar á sýnum úr borkjarna FL-1, Flatey.

Berggerð	Dýpi	k	I ₀	J ₀	I ₁₀₀	J ₁₀₀	I ₂₀₀	J ₂₀₀	Aths.
Hraun 1	2,4	2,9	87n	1,20	68u	0,24	68+3u	0,17	Sterkt bor-RM að 150 ö, annars stöðugt.
- " -	3,9	2,2	77n	1,91	46u	0,22	63+2u	0,09	Sterkt inhomog. bor-RM að 200 ö.
- " -	5,35	1,5	3u	0,76	63u	0,86	66+1u	0,28	Bor-RM að 150 ö.
Hraun 2	27,95	1,4	67u	8,4	68u	8,06	69+1u	5,34	Mjög stöðugt
- " -	33,6	1,8	69u	12,6	70u	11,4	70+1u	7,75	- " -
- " -	37,6	2,1	63u	10,7	68u	9,4	68+1u	5,75	- " -
- " -	40,15	1,2	73u	3,31	71u	2,26	70+1u	1,10	Stöðugt
Sandst.	68,7	1,0	36n	0,33	28n	0,08	07+6n	0,02	Of dauft f. 250 ö meðferð
Sandb.silt (öfugt?)	74,0	0,9	49n	1,17	48n	0,81	48+1n	0,54	Sterkt, stöðugt
Siltb.sandst.	96,65	0,5	61u	0,17	74u	0,19	71+1u	0,16	Stöðugt
- " -	124,42	1,0	35u	0,26	52u	0,20	52+2u	0,15	þolanlega stöðugt
Sandst.túff	131,7	0,3	66n	0,22	76n	0,17	80+1n	0,13	Stöðugt
Túff	143,0	0,2	44n	0,20	43n	0,11	37+1n	0,06	þolanlega stöðugt
Túff (glerk.sandst.)	149,85	0,2	60n	0,11	68n	0,03	67+7n	0,01	Of dauft f. 250 ö meðferð
Túff	151,5	0,3	36n	0,28	43n	0,11	33+6n	0,04	21+6n við 300 ö
Sandst	151,8		50n	0,12	50n	0,06	41+4n	0,04	Inhomogent en all stöðugt
Túff	153,0	0,3	16n	0,14	01n	0,06	27+7n	0,02	42+5n við 300 ö
- " -	179,25	0,4	54n	0,27	65n	0,16	71+2n	0,12	73+1n við 300 ö
- " -	201,7	0,2	64u	0,96	63u	0,89	62+1u	0,73	Stöðugt
- " -	207,25	0,45	65u	0,29	64u	0,21	66+2u	0,14	- " -
Silt	233,8	0,55	21n	0,03	10u	0,02	25+3u	0,01	Dauft, flöktandi
Sandb. silt	283,9		33n	0,12	46u	0,07	41+1u	0,055	þolanlega stöðugt ofan við 100 ö
Silt	337,2	1,1	12u	0,10	75u	0,10	82+2u	0,08	Bor+RM að 100 ö
- " -	342,55	1,1	55u	0,13	43u	0,11	40+2u	0,09	þolanlega stöðugt
Hraun 3	381,85	1,5	41u	2,30	49u	2,27	50+1u	1,86	Stöðugt
- " -	389,1	2,0	37u	2,69	44u	2,66	47+1u	2,11	Mjög stöðugt
- " -	386,6	1,5	47u	2,17	51u	2,19	52+1u	1,80	- " -
- " -	393,95	2,0	33u	2,84	44u	1,78	44+2u	0,71	Stöðugt
Siltb.sandst	410,6	1,3	77u	0,32	86u	0,32	83+1u	0,24	Mjög stöðugt
- " -	425,4	1,4	71u	1,09	77u	0,95	77+1u	0,64	- " -
Sandb.silt	442,5		70u	0,17	79u	0,16	84+1u	0,14	- " -
Silt	488,8		67u	0,31	69u	0,35	69+1u	0,29	- " -
- " -	504,9	1,25	66u	0,13	54u	0,13	50+1u	0,09	Stöðugt ofan við 50 ö.
- " -	511,6	0,9	53u	0,17	38u	0,21	33+1u	0,18	- " -
- " -	517,8	1,2	42u	0,45	45u	0,40	45+1u	0,25	Stöðugt
Sandb.siltst	541,7		67u	0,07	80u	0,14	76+1u	0,13	Stöðugt eftir brottnám VRM

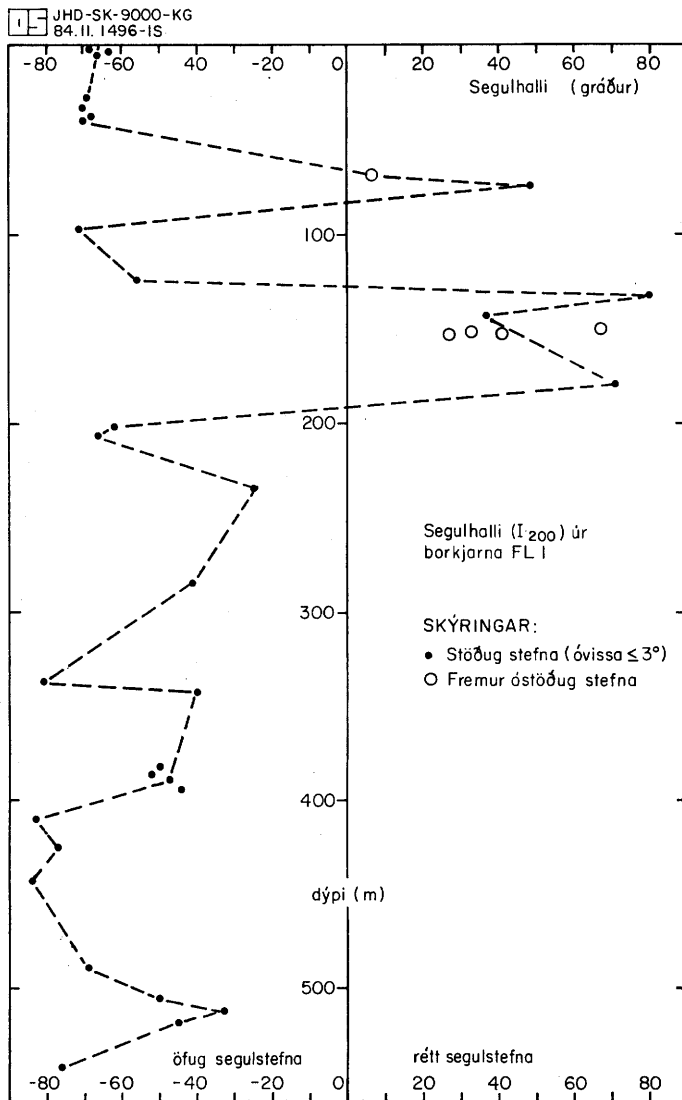
Skýringar við töflu 5

k: Segulhrifstuðull í 10^{-3} G/ö (vantar í mælingar gerðar við Oregon State University).

I: Segulhalli í gráðum, u táknar öfuga (upp) en n rétta (niður) segulstefnu.

J: Segulmögnunarstyrkur í Amp/m ($=10^{-3}$ Gauss)

I₀ og J₀ eiga við náttúrulega segulmögnun, en t.d. I₁₀₀, J₁₀₀ við segulmögnun eftir afsegulmögnun í 100 ö sveiflandi segulsviði. Mat á upprunarlegum segulhalla I₂₀₀, er fengið eftir afsegulmögnun í 200 og 250 ö (200 og 300 ö í mælingum frá O.S.U.). Övissan er áætluð út frá mismuninum eða með endurteknum mælingum.



MYND 5.

Halli segulmögnunar í kjarnasýnum sem fall af dýpi. Dregið eftir gögnum í töflu 6.

Þessar segulmælingar voru gerðar sem tilraun til að mæla setlög, og eru varla nógu margar né ýtarlegar til að örugg niðurstaða fáiast. Samt sem áður er árangurinn betri en vonir stóðu til, og bendir til að beita megi bergsegulmælingum meira við rannsókn setlaga hér á landi en tíðkast hefur, og mætti taka setlögin á Tjörnesi til athugunar. Ef aftur verður borað í Flateyjarsetin, ætti slík athugun að vera á áætlun. Frekari rannsóknir á þessu sviði verða einnig að byggja á samtengingu segulmælinga og nákvæmrar athugunar á berggerð, efna-samsetningar og setlagabyggingar.

Af mælingunum má draga nokkurn lærdóm um hvernig segulmögnun setlaganna er í náttúrunni, og hvort segulsviðsmælingar í skipum eða flugvélum yfir setlögum gætu komið að gagni. Í þeim tilgangi hafa

meðaltalsgildi fyrir ýmsar bergtegundir verið reiknuð eins og tafla 6 sýnir. Þar sést að hraunlögin hafa sterkasta segulmögnun, en magn þeirra er aftur á móti óverulegt. Hrifsegulmögnun er ríkjandi í silt- og sandsteini (Königsberg-hlutfall er minna en eining), en í túffi og öðru glerríku bergi er föst segulmögnun ríkjandi. Töluverðar andstæður í segulmögnun gætu því myndast á mótum þessara tveggja berggerða, og það gæti skapað segulsviðsfrávik, t.d. yfir misgengjum. Þannig er möguleiki á að segulmælingar geti sýnt strúktúra innan setlaga.

TAFLA 6. Meðaltalsgildi seguleiginleika sýna úr kjarna.

	k (10^{-3} G/Ö)	J_0 (A/m)	J_{200}	Q
Hraunlög	1,83 (11)	4,44 (11)	2,45 (11)	5,01 (11)
Túff	0,29 (8)	0,31 (8)	0,16 (8)	2,36 (8)
Silt/sandst.	1,02(12)	0,30(17)	0,18(17)	0,67 (12)

Skýringar: Q er Königsberg-hlutfall, hlutfall styrks fastrar segulmögnunar (J_0) og hrifsegulmögnunar ($k*0,52$). Tölur í sviga sýna fjölda gilda í meðaltali. Sjá einnig skýringar við töflu 5.

Að lokum má geta þess að við borunina var segulskautun hraunlaga kjarnans og handsýna úr yfirborðshrauni eyjarinnar athuguð með Fluxgate-mæli, eins og tíðkast að meðhöndla handsýni við jarðfræðikortlagningu. Niðurstöðum ber saman við rannsóknarstofumælingarnar á náttúrulegri segulmögnun, en ekki er fýsilegt að nota aðferðina á setlögin. Þessar athuganir benda einnig til að eitt og sama hraunlagið þeki yfirborð eyjunnar, en ekki tvö eins og tilgátur voru áður um (Lovísa Birgisdóttir 1982).

5 HITAÁSTAND BORHOLUNNAR

Nokkur áhersla var lögð á mælingu hitastigs í holunni enda er olíumyndun mjög háð hitastigi. Olía myndast og helst óskemmd á ákveðnu hitastigsbili, sem oft er nefnt olíuglugginn. Vegna þess að hitastig jarðar vex yfirleitt með dýpi, má líta á olíugluggann sem dýptarbil samsvarandi hitabilinu. Lífræn hráefni til olíumyndunar eru óþroskuð ofan þessa dýptarbils, en þar getur þó legið olía sem streymt hefur upp af meira dýpi. Neðan olíugluggans breytist olía í gas. Hita-
stigmörkin eru breytilegar stærðir, og eru einkum háð aldri olíumyndunarinnar, auk þess sem gerð lífrænu hráefnanna hefur nokkuð að segja. Því lengur sem olíumyndun stendur yfir, því lægri verða hitastigmörkin. Þessi hegðun efnahvarfanna hefur komið í ljós við rannsóknir á náttúrulegri olíumyndun, en tilraunir í rannsóknarstofum hafa ekki getað líkt eftir áhrifum óralangs tíma jarðsögunnar. Nýleg olíumyndun, af svipuðum aldri og Flateyjarsetlögin, þarf tiltölulega hátt hitastig, a.m.k. 110-120°C. Nýmynduð olía getur þolað hitastig allt að 200°C áður en hún breytist í gas (Tissot og Welte 1978). Vegna þess að olía myndast á löngum tíma, er ekki nóg að þekkja hitastigul eins og hann er í dag, heldur þarf vitneskju um hitafarssögu jarðlaganna. Beina hitastigsvísa er einungis hægt að fá með athugun á efni setlaganna, steindum eða lífrænum efnum. Einnig má reyna að líkja eftir hitaástandi setlagastafla að gefnum forsendum um eðlis-eiginleika efnisins, og sögu jarðлагаupphleðslu og hitaástands umhverfisins.

Meðan á borun stóð var reynt að fá mat á ótruflaðan hitastigul í jarðlögnum. Slíkt er æskilegt þar sem ávallt er hætta á að rennsli úr vatnsæðum trufla endanlegan hitastigsferil holunnar. Sú aðferð var notuð að mæla upphitunarferil í botni holunnar þegar hlé urðu á borun og dælingu skolvatns. Hitastigsferill holunnar var þá mældur um leið í lok borhléanna. Að lokinni borun var hitastigsferill mældur um leið og aðrar borholumælingar voru gerðar, og aftur um 10 mánuðum síðar.

5.1 Úrvinnsla upphitunarmælinga

Vatnsdæling samfara borun dregur varma úr berginu umhverfis borholuna og kælr það. Til þess að fá mat á ótruflaðan jafnvægishita bergsins má nota þá aðferð að mæla upphitunarferil í botni borholu í borhléum. Ýmsum aðferðum hefur verið beitt til að túlka slík gögn, því dæmið er flókið og einföld lausn liggur ekki fyrir. Hér er notuð hálf-empírísk aðferð eftir Albright (1975), og reikningarnir eru gerðir með tölvu-forritinu WELTEM (Halldór Halldórsson og Ólafur G. Flóvenz, 1981).

Í stuttu máli má segja að aðferðin geri ráð fyrir að á hverjum tíma sé upphitunarhraðinn í réttu hlutfalli við hitamismun holuvökva og ókælds bergs fjarri holunni, en að hlutfallsstuðullinn geti breyst á hægfare reglulegan hátt meðan á upphitun stendur. Á tímabili sem er stutt miðað við upphitunartíma, má því tákna hitastig sem fall af tíma með jöfnunni:

$$T(t) = T_{\infty} - (T_{\infty} - T_0) \exp(-C(t - t_0)),$$

þar sem

$T_0 = T(t_0)$, en t er upphafstími tímabilsins,

T_{∞} er ótruflaður berghiti,

C er tímastuðull, fasti fyrir tímabilið.

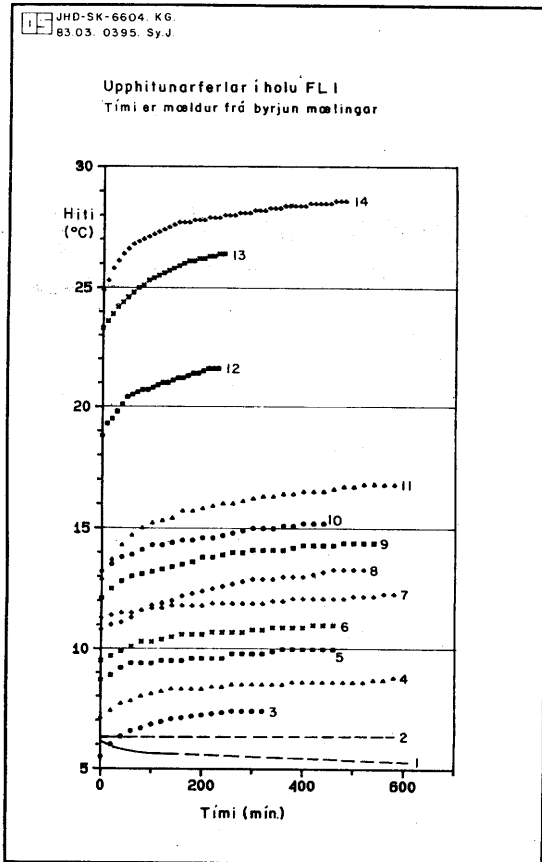
Útfærsla reikninganna er þannig að mælifelinum er skipt upp í stutta búta, sem mega skarast, og ferill með ofangreindu formi er felldur að hverjum búi. Þannig fæst safn af (T_{∞}, C) hnitum. Reynslan sýnir að þessi hnit taka breytileg gildi eftir staðsetningu á upphitunarferlinum. Samband þeirra virðist vera línulegt á þann hátt, að ef bein lína er lögð í gegnum hnitafnið sker hún T_{∞} -ásinn (þ.e. við gildi $C=0$) í gildi sem er nærri jafnvægishita.

Í fyrri hluta borunar, ofan 300 m dýpis, var einungis borað á daginn. Þá gafst tækifæri til að skrá upphitun í holubotni um nætur. Neðan þess dýpis var borað dag og nótt, og því þurfti að stöðva borinn til þess að ná mælingu. Þetta var einungis gert tvisvar, um 4 klst. í hvert skipti. Að lokinni borun fékkst síðan löng mæling í endanlegum botni. Alls urðu upphitunarmælingar 14, og þar af teljast 13 nýtanlegar. Allar upphitunarkúrfunar eru sýndar á mynd 6, þar sem hitastig er teiknað sem fall af tíma frá byrjum mælingar. Mynd 7 sýnir dæmi um úrvinnslu og túlkun tveggja mælinga, nr. 3 og 14, á 122ja og 554ra m dýpi. Þessi tilfelli gefa nokkuð trúlegar lausnir og eru með þeim betri. Athugið að í reikningunum eru reynd tímabil af mismunandi lengd, en heppileg lengd er matsatriði hverju sinni. Niðurstöður úrvinnslunnar ásamt öðrum viðeigandi upplýsingum um mælingarnar eru gefnar í töflu 7. Rétt að taka þessum niðurstöðum með nokkurri varúð. Form sumra upphitunarferlanna er talsvert óreglulegt, og lausnir sýna ekki sannfærandi línulega hegðan. Þá er einnig nokkur vafi á hvort allar mælingarnar séu nógu traustar vegna dynta í mælitækjum. Í mælingum 9, 10, og 11 var streymi úr holunni sem gæti haft verulega truflandi áhrif á upphitunina. Samt sem áður teljum við að lausnirnar séu nærri lagi, enda eru þær mjög í samræmi við aðrar hitaupplýsingar úr holunni. Af töflunni má sjá að þær gefa hitastig sem eru mjög svipuð, eða einungis lítið eitt hærri en hæsta melda botnhitastig á hverjum mælistað í holunni. Þessi niðurstaða er ekki

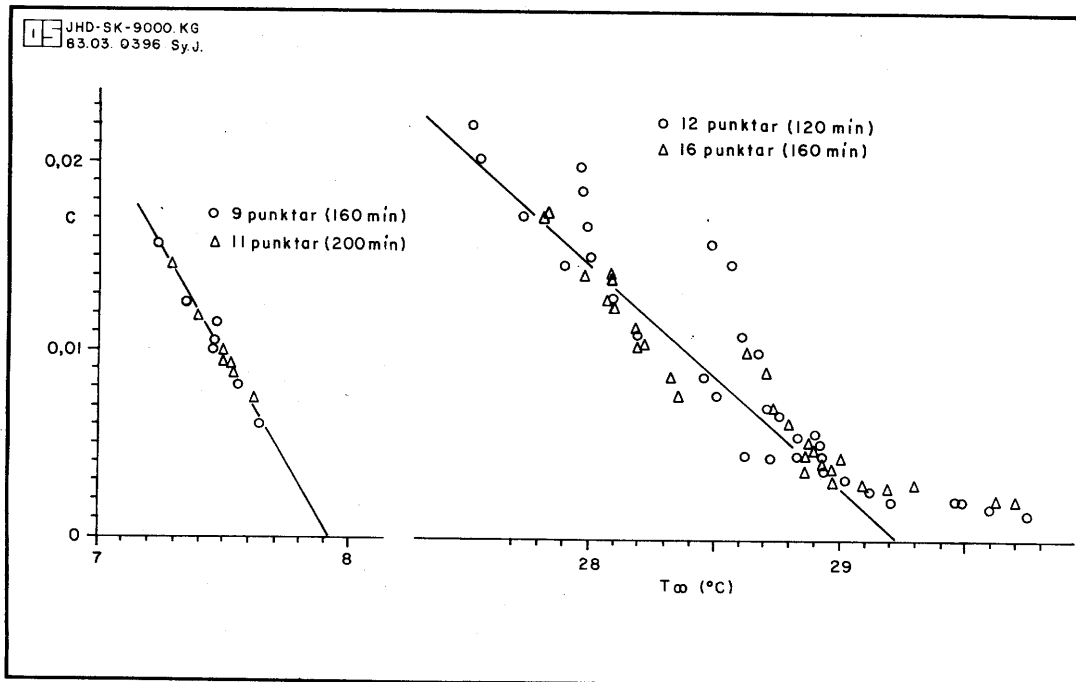
ólíkleg með hliðsjón af því hversu fljótt upphitunin hægir á sér (sjá mynd 6), enda er kæling tiltölulega lítil í þessari borun.

TAFLA 7. Upphitunarferlar reiknað mat á berghita.

Dags.	Upph.tími klst. mín.	Dýpi (m)	Hitastig (°C) í lok mæl. reiknað
2 16.-17.09.82	03 45	93,9	6,4 6,5
3 21.-22.	10 20	121,9	7,5 7,9
4 23.-24.	10 45	143,7	8,7 8,9
5 24.-25.	11 00	165,7	10,1 10,4
6 25.-26.	11 05	187,1	11,1 11,1
7 26.-27.	09 54	204,7	12,3 12,5
8 27.-28.	10 51	222,6	13,3 13,7
9 28.-29.	11 20	244,0	14,6 15,0
10 29.-30.	09 47	265,8	15,5 15,5
11 30.-01.10.82	09 56	296,4	16,8 17,1
12 09.	03 55	408,6	21,6 22,1
13 13.	04 03	512,4	26,5 28,2
14 15.-16.	11 29	554,4	28,6 29,2



MYND 6. Upphitunarferlar í holu FL-1, mældir í borhléum í holubotni á mismunandi dýpi (sjá töflu 7).



MYND 7. Tvö dæmi um spá um jafnvæghita samkvæmt úrvinnslu upphitunarkúrfa með forritinu WELTEM. Gröfin sýna að berg-hiti er líklega 7,9 og 29,2°C.

5.2 Mæling hitaferla

Hitastigsferlar voru oft mældir meðan á borun stóð, einkum í lok upphitunarmælinga eftir að holan hafði náð að jafna sig að nokkru eftir kælingu. Ýmist náðu þeir frá þáverandi botni holunnar upp í topp, eða aðeins yfir neðri hluta holunnar. Tilgangur þessara mælinga var einkum sá að fylgjast með hitabreytingum í holunni og hvort vatnsæðar kæmu fram. Um fjórum sólarhringum eftir að borun lauk var gerð hitamæling með útbúnaði borholumælingabílsins, og um 10 mánuðum síðar, 17. ágúst 1983, var gerð ferð í eyna og hitaferill mældur í holunni.

Tafla 8 er skrá yfir allar þessar mælingar, sem eru 19 talsins. Þar er gefið botnhitastig, sem er það gildi hveðrar mælingar sem er að líkindum minnst truflað af völdum kælingar. Nokkrar þær mælingar sem mældar eru eftir lengstu upphitunarhléin, og ættu því að vera næstar hitajafnvægi, eru sýndar á mynd 8.

5.3 Niðurstöður hitamælinga

Segja má að þrenns konar upplýsingar hafi fengist sem veiti vísbendingu um jafnvægishita bergsins:

- 1) Botnhiti á mismunandi dýpi.
- 2) Reiknaður berghiti samkvæmt upphitunarferlum.
- 3) Hitastigsferlar í lok langra borhléa og eftir lok borunar.

Allar þessar upplýsingar eru sameinaðar á mynd 9. Til þess að smágerðir drættir myndarinnar komi betur í ljós, er hitastigið teiknað sem frávik frá línu sem gengur í gegnum 0-gidi hitastigsássins og hefur halla $50^{\circ}\text{C}/\text{km}$. Mælingarnar virðast sýna innbyrðis samræmi, og gefa sennilega mynd af ótrufluðum hitaferli bergsins. Hitaferillinn sem mældur var 10 mánuðum eftir lok borunar hlýtur að vera mjög nærri hitajafnvægi, og er nærri því að falla saman við bestu gildi botnhitamælinga og reiknaðs berghita.

Kúrfan er ekki alveg línuleg, og sýnir um $45^{\circ}\text{C}/\text{km}$ hitastigul í neðsta hluta holunnar, en allt að $55^{\circ}\text{C}/\text{km}$ í efri hlutanum. Hugsanlegt er að skýra þennan mismun þannig að varmaleiðni bergsins sé heldur meiri í neðri hlutanum en þeim efri. Ekki eru fyrir hendi gögn til að skera úr þessu, en heldur mælir það á móti að poruhluti er tiltölulega mikill í silt- og sandsteinslögunum í neðri hluta holunnar, og að öðru jöfnu táknar það litla varmaleiðni. Einnig mætti hugsa sér að vatnsstreymi hefði nokkur áhrif á ferilinn. Þá væri líklegt að nokkur upphitun ætti sér stað fyrir miðri holu, og jafnvel einnig kæling í efstu 50 metrunum. Líklega væri eðlilegt að ætla að meðaltalslína í

gegnum mælikúrfuna sé besta lausnin. Sú lína gefur hitastigul nærri 50°C/km.

TAFLA 8. Skrá yfir hitamælingar í holu FL-1.

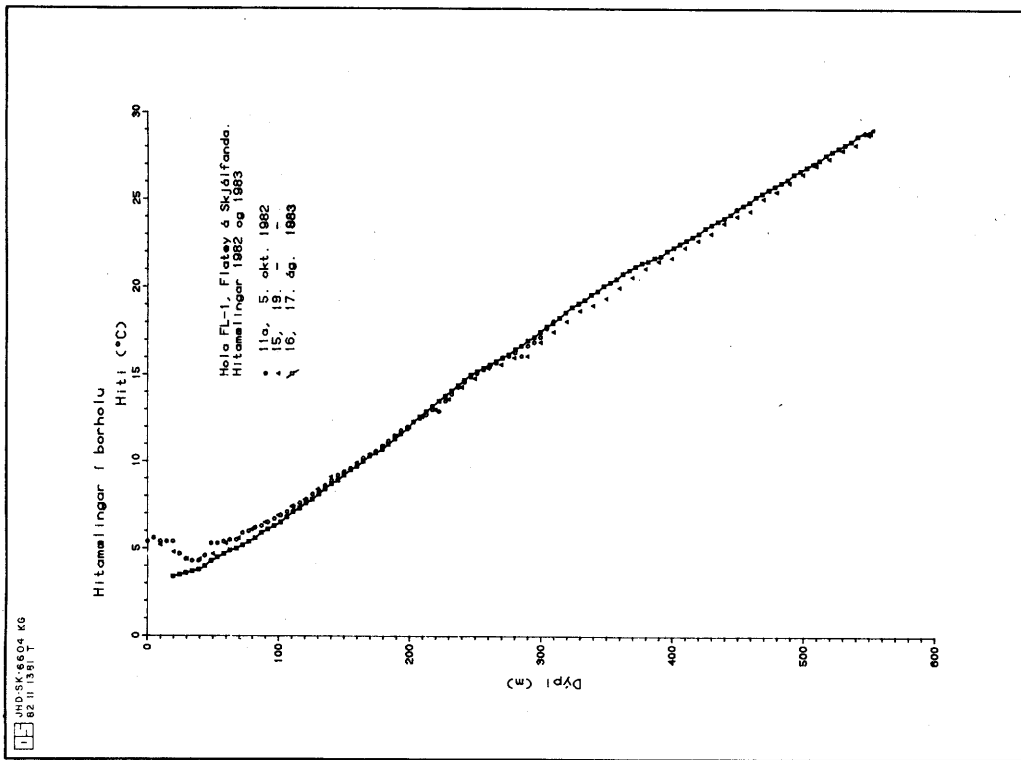
Mæling nr.	Tími mælingar dags.	kl.	Dýpisbil (m)	M.-bil (m)	Hlé (klst.)	Botnhiti (°C)	Athugasemdir
0	14.09.82	09	8,2- 32,4	5	12	1,9	Handrúlla
1	16. -	08	27,1- 66,3	10	12	5,3	
2	17. -	08	54,6- 93,9	10	11	6,4	
2A	21. -	12	12,6-100,1	10	96	6,5	
3	22. -	08	63,9-121,9	10	12	7,5	
4	24. -	08	17,5-143,6	10	12	8,7	
5	25. -	08	19,5-165,6	10	12	10,1	
6	26. -	08	33,6-187,1	10	12	11,1	
7	27. -	08	9,7-204,7	10	11	12,1	
8	28. -	08	126,2-222,6	10	12	13,3	
9	29. -	08	147,9-244,0	10	12	14,6	
10	30. -	08	120,8-265,8	10	11	15,5	
11	01.10.82	08	16,4-296,4	10	11	16,8	
11A	05. -	18	0,0-309,4	5	100	18,1	
12	09. -	16	3,9-408,6	10	5	21,6	
13	13. -	24	367,1-512,4	10	5	26,5	
14	16. -	12	6,7-554,4	10	15	28,6	
15	19. -	19	10,0-553,1	10	94	29,1	Mælingabíll
16	17.08.83	16	19,3-546,1	5	10 mán.	28,9	Handrúlla

Skýringar:

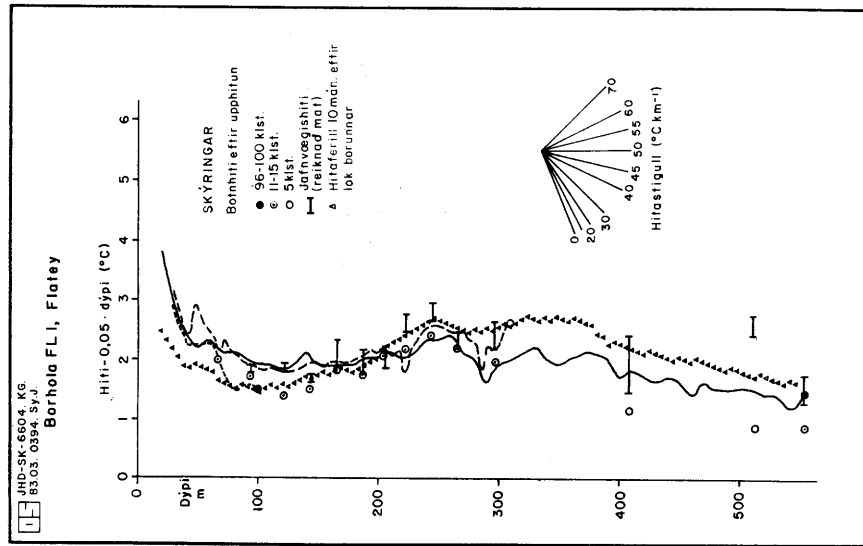
M.-bil er lengdarbil milli mælipunkta. Fyrir mælingar 0 til 14 er gildið ekki nákvæmt, um 2-4% of hátt.

Hlé táknar tímann frá því hætt er að skola holu, þar til mælt er.

Dýpisbil mælinga nær í botn í hverju tilviki.



MYND 8. Þrjár hitastigsferlar úr holu FL-1, sem mældir voru eftir löng upphitunartímabil.



MYND 9. Hitastig sem fall af dýpi í holu FL-1. Sýnt er frávik frá hitastiglini sem er 50 C/km. Þrenns konar upplýsingar eru sýndar á myndinni: merkustu hitastigsferlarnir, hæstu botnhitamælingar, og mat á berghita samkvæmt túlkun upphitunarmælinga.

5.4 Um hitastigsjafnvægi setlaganna

Tilgangur hitamælinganna er að afla upplýsinga um hitastigul og varma-
steymi, svo áætla megi hitastig djúpt í setlagastaflanum. Slíkir
reikningar gera oftast ráð fyrir að varmastreymi sé einungis með
varmaleiðni upp í gegnum jarðlögin, en að jarðvatnsstreymi hafi ekki
teljandi áhrif á hitaástandið. Jafnvel þótt varmaleiðni hafi ráðið
varmastreymi upp úr setlögum, er hægt að hugsa sér þær aðstæður sem
leiða til þess að hitastigull væri nú ekki í jafnvægi. Hér er um það
að ræða að upphleðsla setlaga hafi gerst svo hratt og nýlega, að þau
séu ekki enn komin í hitajafnvægi. Þetta má kanna með reiknilíkani
sem byggir á einföldum en raunhæfum forsendum, og niðurstöður slíkra
útreikninga fylgja hér á eftir.

Reikna má varmaflæði og hitastigsdreifingu í jörðu sem fall af tíma og
dýpi með því að leysa einvíðu varmaleiðnijöfnuna að gefnum ákveðnum
randskilyrðum. Gert er ráð fyrir að varmastreymi sé einungis með
leiðni varma, og að yfirborðshitastig og uppstreymi varma djúpt úr
jörðu séu fastar. Enn fremur er notað líkan sem er grundvallað á
mögulegri myndunarsögu Flateyjarsetlaganna. Við gerum ráð fyrir því
að örasta setlagaupphleðslan hafi átt sér stað á tímabilinu fyrir 2
til 1 milljón ára, og að þá hafi 2ja km þykk setlög hlaðist jafnt og
þétt upp, og hafi haldist óbreytt síðan þá. Lausnin er nálgun með
aðferð endanlegra mismuna, og til reikninganna var skrifað forritið
HEATn með aðstoð Tryggva Edwald.

Einnig verður að velja gildi fyrir varmaeiginleika jarðlaganna, þ.e.
varmaleiðni, k , varmarýmd á rúmeiningu, c , og varmadreifingarstuðul,
 a . Sambandi stuðlanna er lýst með jöfnunni $a=k/c$. Þar sem þessir
eiginleikar eru ekki mældir í Flateyjarsetunum verður að áætla þá.
Hér er einkum byggt á áætluðu meðalgildi fyrir varmaleiðni basaltjarð-
skorpu Íslands, sem er um $1.72 \text{ J/ms}^\circ\text{C}$ (Gunnar Böðvarsson, 1957;
Guðmundur Pálmason o. fl., 1979; Oxburg & Agrell, 1982). Líklegt er að
setlögin hafi annað gildi og minna. Við getum gert ráð fyrir að þau
hafi poruhlutfall 0,3 en hraunlagastaflinn 0,1, og að efni beggja sé
sambærilegt. Ef við gerum einnig ráð fyrir að eftirfarandi jafna
(Sass o.fl. 1971),

$$k = k_b^{(1-\phi)} k_v^\phi,$$

sé nothæf til að tákna hvernig varmaleiðni bergs er háð poruhluta (ϕ),
leiðni bergmassans (k_b) og poruvökvans (k_v), fæst gildið $1,44 \text{ J/ms}^\circ\text{C}$
fyrir varmaleiðni setlaganna. Ef valið er gildið $2,46 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3$ fyrir
varmarýmd basaltjarðskorpu, sem má svo leiðrétta á einfaldan hátt
fyrir annað poruhlutfall, fást gildin $0,7 \cdot 10^{-6}$ og $0,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ fyrir
varmadreifistuðla basalts og setlaga.

Niðurstöður fjögurra reiknilíkana eru kynntar á mynd 10a, sem sýnir hlutfallslegan hitastigul í yfirborðslögum sem fall af tíma, þar sem upphaflegum stigli er gefið einingargildi. Allar forsendur þeirra eru eins og að framan er greint, og einungis mismunandi gildi varmaeiginleika greina þau að. Í þremur tilfellanna eru varmaeiginleikar upphleðsluefnis og undirstöðu eins, og dreifistuðull hefur gildin $0,4 \cdot 10^{-6}$, $0,7 \cdot 10^{-6}$ og $1,0 \cdot 10^{-6}$. Þetta samsvarar basaltefni með poruhlutfalli 0,0, 0,1 og 0,3, og ætti að spanna alla möguleika. Mynd 10a sýnir að stigullinn lækkar í milljón ár þar til upphleðslu lýkur, en hækkar síðan aftur og stefnir að jafnvægi. Í þessum þremur samstæðu tilfellum er jafnvægishitastigullinn sá sami og var í jarðlögnum fyrir, og eftir tveggja milljón ára sögu (samsvarar nútíð) er hitastigull á bilinu 75-85% af upphaflegu gildi.

Í fjórða tilfellinu leggjast setlög með varmaleiðni $1,44 \text{ J/ms}^\circ\text{C}$ og varmadreifistuðul $0,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ofan á jarðskorpu með samsvarandi gildum 1,72 og $0,7 \cdot 10^{-6}$. Þetta tilfelli ætti að vera næst því að lýsa veruleikanum samkvæmt fyrrgreindu mati á eiginleikum basaltberggrunns og setlaga. Hér hækkar stigullinn mun hraðar en í fyrri dæmunum, og stefnir á gildi sem er 1,2 sinnum hærra en upphaflegur stigull. Þetta má orða á þann veg að hærri hitastigul þurfi til að reka sama varmaflæði upp um setlög, þar sem þau leiða varmann verr. Í vorri tíð væri stigullinn um 93% af upphaflegu gildi, en um 77% af endanlegum jafnvægisstigli í setlögnum.

Reiknilíkonin gefa möguleika á að enduskapa hitastigssögu setlaga á mismunandi dýpi. Dæmi um það er sýnt á mynd 10b þar sem sýnt er hvernig hitastig breytist með tíma og dýpi, fyrir tilfellið með dreifingarstuðli $0,7 \cdot 10^{-6}$. Jafnhitalínur sýna hitastig sem fall af tíma og niður á dýpi sem er upphaflega 2 km undir yfirborði, og þá er hitastigull 60°C . Síðan bætast 2 km af jarðlögum ofan á.

5.5 Um hitafarssögu Flateyjarsetlaganna

Hitamælingarnar sýna að hitastigullinn í holunni er nú nærri $50^\circ\text{C}/\text{km}$, og eru það góðar að ástæðulaust er að vantreysta þessu gildi. Aftur á móti geta ýmsar óséðar kringumstæður, einkum vatnsstreymi í jarðlögum eða sprungum, valdið því að ekki megi túlka hann sem jafnvægis-hitastigul svæðisins. Vatnsstreymi gæti verið eftir láréttum lögum eða lóðréttum sprungum, og orðið ýmist til að hækka eða lækka hitastigullinn. Ekki eru tók á að skera úr um þessi atriði, og í umræðunni hér á eftir verður ráð fyrir því gert að mælda gildið sé ótruflaður hitastigull sem endurspeglir varmastreymi upp um jarðskorpuna. Það hlýtur það að vekja athygli hversu lágur hann er, með því lögsta sem þekkist á landinu. Ef enn fremur er gert ráð fyrir að varmaleiðni

setlaganna sé minni en gildir almennt fyrir jarðskorpu landsins, og leiðrétt er fyrir þessum mismun, fæst gildið $42^{\circ}\text{C}/\text{km}$. Þetta gildi má bera saman við aðrar hitastigulsmælingar á landi, t.d. má nefna að á svæðinu suður af Flatey, frá Eyjafirði austur að gosbelti, vex hitastigull frá um 60 í $90^{\circ}\text{C}/\text{km}$.

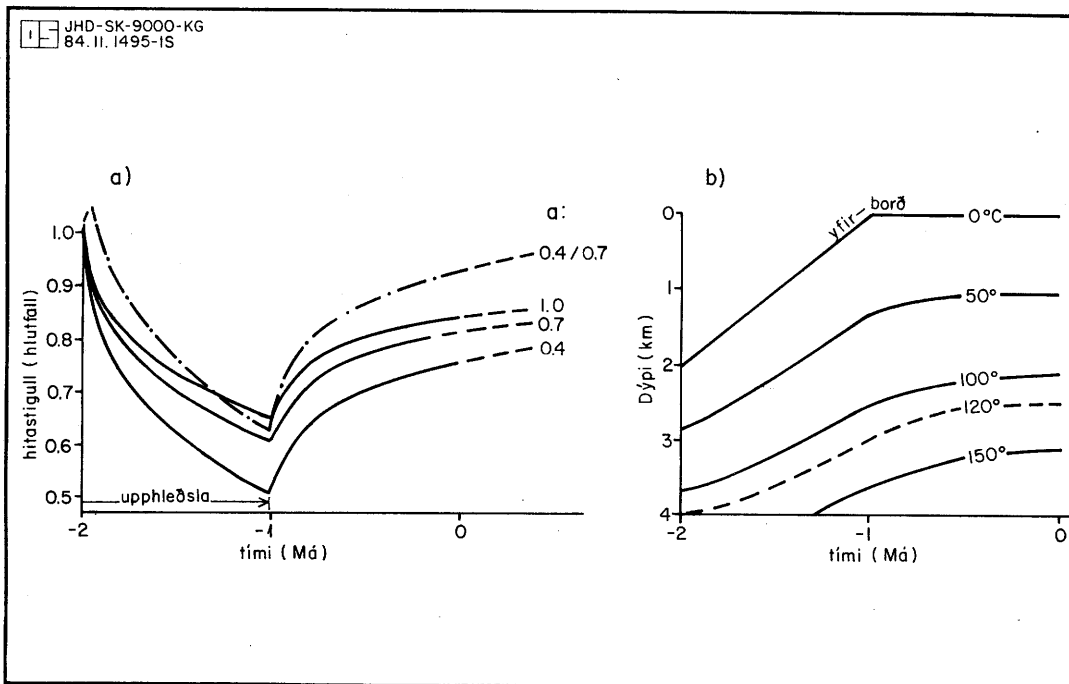
Eins og sýnt var í kafla 5.4 gæti komið til greina að hitastigull setlaganna hafi ekki enn náð að jafna sig eftir hraða upphleðslu. Þessir reikningar eru óvissir, enda háðir því að gefnar forsendur um varmaeiginleika og myndunarsögu setlaganna séu réttar. Mismunandi forsendur um varmaeiginleika gefa til kynna að núverandi gildi gæti verið á bilinu 75-93% af upphaflegum hitastigli berggrunnsins, og stærsta gildið á við raunsæjasta líkanið. Niðurstöður af þessum hugleiðingum eru þær að fráviknið sé of lítið og forsendur of óvissar til að réttlætandi sé að reikna leiðréttingar á jafnvægisstigul. Enn fremur verður að hafa í huga að ef rofist hefur tiltölulega nýlega ofan af jarðlagastaflanum, gæti það verkað til að hækka stigulinn.

Beinar ábendingar um fornt hitastig í setlögum eru fáar og fremur óvissar. Í olíuleitarrannsóknum eru slíkar upplýsingar oftast fengnar með athugun á ummyndun eða þroskastigi lífræns efnis, en slíku hráefni virðist ekki fyrir að fara í Flateyjarkjarnanum. Við rannsókn jarðhita hér á landi er stuðst við greiningu ummyndunarsteinda til að afla hliðstæðra upplýsinga. Eins og greint var frá í 3. kafla, fundust slíkar steindir í holunni, og kabasít er algengast. Af því má ætla að setin séu í kabasítbeltinu, en þar hefur hitinn ekki farið yfir $70-80^{\circ}\text{C}$. Þó stingur það nokkuð í stúf, að einnig finnst gýrólít sem finnst sjaldan ofar en í mesólít/skólesít belti, þ.e.a.s. við hærri hita en um 70°C . Ef greining gýrólitsins er rétt, og hiti hefur áður verið svo hár í neðri hluta holunnar, stangast það á við upphitunarlíkanið sem rætt var hér á undan. Líkanið gefur til kynna að hitastig hafi aldrei verið herra en nú, eða $20-30^{\circ}\text{C}$. Ýmsar ástæður gætu valdið þessu misræmi. Verulega þykkur jarðlagastaflinn gæti hafa rofnað ofan af Flateyjarsetlögum, 1-2 km að þykkt ef gert er ráð fyrir hitastigli svipuðum og nú er. Jarðhitavirkni gæti fyrrum hafa hækkað hitastigið. Loks er ekki óhugsandi að þessar hitastigsvísandi steindir hagi sér á annan hátt í setlögum en í hraunlagastafla, og því sé kvörðunin ekki gild.

Sýnt hefur verið fram á að líklega er varmastraumur upp úr setlögum heldur lítill miðað við það sem gerist á landinu. Varla er hægt að skýra það með miklum aldri jarðskorunnar, og líkleggra er að undir Flateyjarsetunum séu jarðskorpan og e.t.v. efri möttull óvenju köld. Án þess að reynt verði að útskýra þetta fyrirbæri, mætti setja fram þá tilgátu að staðsetning í Tjörnesbrotabeltinu valdi nokkru um. Jarðsigið sem myndaði setlagadældina má einnig skýra með kaldri og því

eðlisþungri jarðskorpu, enda þótt aðrar ástæður gætu einnig komið til.

Að lokum er rétt að meta hverjar takmarkanir hitastig setur hugsanlegri olíumyndun í setlögnum. Á mynd 10b er sýnt dæmi um mögulega hitastigssögu, sem nota má til að gefa hugmynd um þetta atriði. Þar er merkt 120°C jafnhitalína, sem nota má sem lágmarkshitastig fyrir nýlega fárra milljóna ára olíumyndun. Ef hitastigssaga jarðlaga á mismunandi dýpi er athuguð, sést að jarðlög sem nú eru á minna en 2,5 km dýpi hafa aldrei hitnað nógu mikið. Jarðlög á 3 km dýpi hafa verið eina milljón ára ofan við hitastigsmarkið en, tvær milljónir ára á 4 km dýpi. Þetta sýnir að hafi olía myndast í setlögnum, hlýtur móðurbergið að liggja á a.m.k. 3-4 km dýpi.



MYND 10. Reiknað líkan af upphitun setlaga.

a) Reiknaður hitastigull í yfirborði setlaga sem fall af tíma. Setlagabunki, 2ja km þykkur, hleðst upp jafnt og þétt á tímabilinu fyrir 2-1 milljónum ára. Gert er ráð fyrir mismunandi gildi hitadreifingarstuðla sem eru gefnir í einingunni $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

b) Jafnhitalínur sem fall af tíma og dýpi, þar sem dýpi er miðað við endanlegt yfirborð. Tilfallið með hitadreifingarstuðli $0,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ er notað.

6 NIÐURSTÖÐUR OG UMRÆÐA

Segja má að helsta niðurstaða borunarinnar sé staðfesting á því að undir Flatey á Skjálfanda eru þykk setlög, hluti af þeirri setfylltu dæld sem hér er nefnd Flateyjarældin. Aðrar jarðeðlisfræðilegar mælingar benda til að þykkt setlaganna sé á bilinu 2-4 km. Rannsókn á borkjarnanum sem náðist úr efstu 554 m setlagastaflans bendir sterklega til myndunar á fyrri hluta ísaldar (Pleistósen). Þessar niðurstöður eru jákvæðar fyrir olíuleit á Flateyjarsvæðinu að því leyti, að olíu er einungis að finna í þykkum setlagabunkum, og þannig jarðmyndanir eru sjaldgæfar hér á landi. Aftur á móti er árangur beinnar olíuleitar neikvæður, þar sem engin merki um olíu fundust í berginu né heldur nægilegt magn af lífrænu efni, sem gæti myndað olíu við hagstæð skilyrði.

Góður og heillegur kjarni náðist, sem gefur ekki aðeins möguleika á að greina berggerð, heldur einnig brot, mislægi og setbyggingu. Í kjarnanum eru setlög yfirgnæfandi, því aðeins tvö hraunlög eru við yfirborð og eitt á 400 m dýpi. Túff og glerríkur sandsteinn bera einnig vitni um eldvirkni, en óvíst er hvar gosvirknin var. Setlögin eru af ýmsum gerðum, en eru líklega öll mynduð í nánd við strönd. Þau eru að kornastærð frá fingerðum siltsteini upp í gróft hnullungaberg. Telja má öruggt, að setlögin séu frá ísöld. Þau bera vott um örar sveiflur í setmyndunarumhverfinu, sem stafar af breytilegu sjávarborði og líklega ágangi jökuls, samfara mörgum jökulskeiðum. Útlit setlaganna og tilvist skeljategunda af heimskautaslóð (t.d. jökultodda), benda til myndunar á ísöld og áhrifa jökla. Af samanburði við jarðlög á Tjörnesi má á þessum grunni ætla að hámarksaldur sé um 2 milljónir ára. Segulstefna kjarnans er að mestu öfug, en einnig virðast vera tvö rétt segulskeið. Erfitt er að tengja þau með nokkurri vissu við segultímakvarða. Þar sem hraunlögin á yfirborði hafa öfuga segulmögnun, fæst vissa fyrir því að lágmarksaldur þeirra, og þar með alls hraunlagastaflans, er 0,7 milljón ár, og að jarðlögin hafi líklega myndast á Matuyamatíma (fyrir 0,7-2,4 milljónum ára).

Jarðlögin virðast öll hafa myndast nærri sjávarmáli, þannig að jarðsig og upphleðsla hafa verið í jafnvægi. Það er athyglisvert að eftir því sem ofar dregur í jarðlagastaflanum verða fínkornótt setlög minna áberandi. Þetta getur stafað af ýmsum samverkandi þáttum, en freistandi er að túlka þetta svo að tektónískt sig hafi stöðvast á þessum tíma, og jafnvel snúist í ris. Hraunið á yfirborði sýnir að ekki hefur orðið verulegt sig síðustu 0,7 milljón árin, og mögulegt er að nokkur jarðlagabúnki hafi verið þar ofaná, en eyðst aftur. Þá má nefna þessu til stuðnings að Flatey liggur á tiltölulega nýlegum rishrygg, sem myndar grunnið á Grímseyjarsundi.

Mælingar á eðliseiginleikum kjarnans sýna að poruhluti silt- og sandsteins er hár, fer upp í rúmlega 30 %, en er nokkuð minni þar sem túff og gler er mikið. Lektin reynist aftur á móti mjög lítil, og því virðist góður sandsteinn til olúgeymslu vera sjaldgæfur. Opnasta bergið í holunni virðist vera hnúllungaberg myndað við strönd. Eðlisþyngd vatnsmettaðs silt- og sandsteins er um $2,2 \text{ g/cm}^3$ að meðaltali, en völuberg er þyngra, allt eftir magni basaltvalna. Meðaleðlisþyngd kjarnans er áætluð um $2,4 \text{ g/cm}^3$.

Hitastigull í holunni mældist um 50° C/km . Þetta gildi er nokkuð lágt miðað við hitastigul meginlandsins suður af. Enn meiri munur er á hitastreymi, þar sem varmaleiðni setlaganna er að öllum líkindum minni en í hraunlagastafla. Líkanareikningar sem byggja á varmaleiðni og hugsanlegri upphleðslusögu setlaganna gefa til kynna að hitastigullinn sé enn tæplega kominn í jafnvægi, þ.e. of lágur vegna þess að setlagabúnkinn hafi ekki náð að hitna að fullu. Kabasít er ráðandi ummyndunarsteind í kjarnanum, og í venjulegri hraunlagajarðskorpu landsins er myndun þess talin gerast við hitastig undir 70° C . Aftur á móti stangast það á að einnig finnst gýrolít, sem þykir benda til herra hitastigs. Rétt er að geta þess að ekki er fullvíst að ummyndunarsteindir gefi sömu upplýsingar um hitastig í setlögum og í hraunlagastafla. Samkvæmt ofangreindu er ekki ómögulegt að hitastig í neðri hluta holunnar hafi forðum verið 70° C eða herra. Hátt hitastig táknar auknar líkur á olíumyndun, og ýmsar kringumstæður gætu hafa valdið því, svo sem flæði jarðhitavatns eða að jarðlagastaflinn hafi áður verið þykkari en nú.

Ætla má að borunin hafi varla kannað meira en efsta fjórðung setlaganna undir Flatey. Erfitt er að geta sér til um gerð neðri hluta setlaganna eða aldur, og aldur berggrunnsins er einnig óþekktur. Setja mætti þó fram tvær tilgátur. Flateyjarkjarninn líkist efri hluta setlagasyrpannar á Tjörnesi, og vel er mögulegt að setlögnum neðar svipi einnig saman. Aldur elstu setlaga á Tjörnesi er líklega um 4 milljónir ára. Ekki er heldur hægt að útiloka að Flateyjarsetin séu eingöngu ísaldarmyndun, og vissulega væri svo ef hraunlagasyrpan sem kemur fram í Grímsey er sýnishorn af berggrunni undir setlögnum. Í því tilviki væri aldur alls setlagastaflans einhvers staðar á bilinu 1-2 milljónir ára.

6.1 Tillögur um frekari rannsóknir

Flateyjarkjarninn er óneitanlega nokkuð merkileg heimild um setlagamyndun við Ísland, og þess virði að hann sé rannsakaður nánar. Þó má ætla að nú sé nóg að gert til að afla nauðsynlegustu upplýsinga, svo meta megi olíulíkur. Ekki er brýnt að bæta miklu við nema nýjar

spurningar vakni, nýjar aðferðir komi í ljós, eða þörf sé frekari upplýsinga til að styðja framhald rannsóknar svæðisins. Nokkuð er óunnið við úrvinnslu jarðeðlisfræðilegra mælinga í borholunni, sem gætu orðið mikilvægar ef aftur verður borað í setlögina, einkum ef ekki verða tók á því að ná samfelldum kjarna. Aðrir aðilar gætu haft áhuga á að rannsaka kjarnann betur, og við Háskóla Íslands stendur Jón Eiríksson jarðfræðingur nú þegar fyrir áframhaldandi rannsókn á setgerð og setmyndunarsögu kjarnans.

Borunin og rannsókn kjarnans er liður í athugun á líkum á olíu í setlögum sem eru ekki einungis undir Flatey, heldur þekja stór svæði á landgrunninu. Hér verður lítillega minnst á mögulegar framhaldsrannsóknir á þessum setlögum. Djúpborun í Flatey yrði óneitanlega dýr rannsókn, enda þyrfti að bora djúpt niður (2-3 km) til að ná niður á hugsanlegt olíumyndunarbil, og nálgast botn setlagadældarinnar. Slíka borun þyrfti fyrst og fremst að skipuleggja sem heilsteypt og markvisst rannsóknarverkefni. Æskilegt væri að taka samfelldan kjarna til að fá sem mestar upplýsingar, t.d. um setmyndunarsögu og steingervinga, og til að fá basaltsýni til aldursgreiningar. Flatey virðist vera eina mögulega borstæðið á þerrlendi yfir þessum setlögum.

Könnun með hljóðendurkastsmælingum gæti gefið nákvæma mynd af útbreiðslu og lagskipan setlaga á svæðinu fyrir Mið-Norðurlandi, og tengslum þeirra við borholusniðið. Til þess eru fullkomnar (margrása) endurkastsmælingar hentugastar, en erlent rannsóknarfyrirtæki yrði að framkvæma þær. Þessar mælingar eru nokkuð dýrar, en gætu þó verið ódýrari en borun. Aðrar rannsóknarleiðir sem hægt væri að líta á sem undanfara endurkastsmælinga, t.d. hljóðbylgjubrotsmælingar og einfaldar endurkastsmælingar, gætu gefið hugmynd um útbreiðslu setlaga, og einnig kæmu segulmælingar til greina í því sambandi. Jarðskjálftamælingar gætu einnig komið þar við sögu, auk þess að þær sýna virk brotasvæði. Ýmiss konar jarðfræðirannsóknir á nálægum svæðum gætu veitt mikilvægar upplýsingar. Þá má geta þess að til eru mæligögn af svæðinu frá ýmsum aðilum, sem safna þyrfti saman, samhæfa og túlka. Þetta verk er í raun hafið, og vel er líklegt að það gefi mikilsverðar upplýsingar með tiltölulega litlum tilkostnaði.

Ef athugað er hvaða rannsóknir mættu helst gefa árangur í sambandi við olíuleit, gæti verið vænlegt að beina athyglinni að því hvort í jarðlögum landgrunnins sé berg með nægu magni lífrænna efna, en það er frumforsenda olíumyndunar. Einnig er vænlegt að kanna hvort lífræna efnið gæti hafa ummyndast í olíu, væri það til staðar, þ.e. hvort hiti og aldur jarðlaga nægi til þess. Erfitt er að skera úr fyrrnefnda atriðinu nema með því að sækja sýni með borunum. Aftur á móti mætti hugsanlega áætla aldur setlaga og hitaástand þeirra út frá yfirborðsrannsóknum og fræðilegum forsendum. Slíkar upplýsingar má nota til að

reikna líkan af hvernig olía gæti myndast, en slíkar aðferðir hafa notið vaxandi trausts síðustu árin. Eins og áður segir eru Flateyjar-setlögin að miklum hluta yngri en 2 millj. ára, og ólíklegt er að þau elstu séu eldri en 6 millj. ára. Þessi tími er á mörkum þess að vera nægur til að olía náði að myndast, nema við mjög háan hita, og þannig mætti takmarka hugsanleg olíuleitarsvæði, eða jafnvel útiloka alla möguleika.

Að lokum má þó fullyrða, að hvort sem olíuvon leggst með eða á móti hljóti djúpbörðun í Flatey á Skjálfanda að verða á dagskránni í framtíðinni sem vísindaleg rannsókn. Sýnt hefur verið fram á að undir eyggi er ein þykkasta, ef ekki athyglisverðasta, setlagasyrpa landsins sem bora má í á þurru landi.

HEIMILDASKRÁ

- Albright, J.N., 1975: A more accurate method for the direct measurement of earthtemperature gradients in deep boreholes. Proceedings. Second U.N. Symposium on the development and use of geothermal resources: 847-851.
- Carslaw, H.S. & Jaeger, J.C., 1947: Conduction of heat in solids. Oxford.
- Eldholm, O. & Windisch, C.C., 1974: Sediment distribution in the Norwegian- Greenland Sea. Bull. Geol. Soc. Am., 85: 1661-1676.
- Geirfinnur Jónsson & Valgarður Stefánsson, 1982: Density and porosity logging in the IRDP hole, Iceland. J.G.R., 87: 6619-6630.
- Gromme, S., 1982: Origin of natural remanent magnetization of the tephra from the 1979 Surtsey drill hole Iceland. Surtsey Progr. Rep. IX: 111-116.
- Guðmundur Pálmason, 1974: Insular margins of Iceland. Í: Burk, C.A. & Drake, C.L. (ritstj.): The Geology of Continental Margins. New York, Springer-Verlag: 343-360.
- Guðmundur Pálmason, Stefán Arnórsson, Ingvar B. Friðleifsson, Hrefna Kristmannsdóttir, Kristján Sæmundsson, Valgarður Stefánsson, Benedikt Steingrímsson, Jens Tómasson & Leó Kristjánsson, 1979: The Iceland crust: evidence from drillhole data on structure and processes. Í: Talwani, M., Harrison, C.G. & Hayes, D.E. : Deep drilling results in the Atlantic Ocean: oceanic crust, Maurice Ewing Ser., 2: 43-65, AGU, Washington, D.C.
- Gunnar Böðvarsson, 1957: Geothermal effects of the Pleistocene Glaciation in Iceland. Jökull, 7: 1-20.
- Halldór Halldórsson og Ólafur G. Flóvenz, 1981: Jafnvæghiti bergs reiknaður út frá upphitunarferli borholu. Greinargerð, OS-JHD HH-ÓGF-81/01.
- Jens Tómasson, Guðmundur Pálmason, Jón Jónsson & Sveinbjörn Björnsson, 1969: Jarðhiti við Húsavík. Orkustofnun, Jarðhitadeild.
- Jón Eiríksson, 1981: Lithostratigraphy of the upper Tjörnes sequence, North Iceland: The Breiðavík Group. Náttúrufræðistofnun Íslands, Reykjavík, 37 s.

- Karl Gunnarsson & Margrét Kjartansdóttir, 1982: Kjarnaborun í Flatey á Skjálfanda. Fyrstu niðurstöður. Orkustofnun, OS82126/JHD38 B.
- Kjartan Thors, 1982: Shallow seismic stratigraphy and Structure of the Southernmost part of the Tjörnes Fracture Zone. Jökull, 32: 107-112
- Kristinn J. Albertsson 1978: Um aldur jarðlaga á Tjörnesi. Náttúrufræðingurinn, 48: 1-8.
- Kristján Sæmundsson, 1974: Evolution of the Axial Rifting Zone in Northern Iceland and the Tjörnes Fracture Zone. Geol. Soc. Am. Bull., 85: 495-504.
- Kristján Sæmundsson, 1979: Outline of the geology of Iceland. Jökull, 29: 7-28.
- Lovísa Birgisdóttir, 1982: Ágrip af niðurstöðum jarðfræðikortlagningar á Flatey á Skjálfanda og Húsavík-Reykjahverfi. Orkustofnun, OS82018/JHD02 B.
- McMaster, R.L., Schilling, J.-G.E. & Pinet, P.R., 1977: Plate boundary within Tjörnes Fracture Zone on northern Iceland's insular margin. Nature, 269: 663-668.
- Oxburg, E.R. & Agrell, S.O., 1982: Thermal conductivity and temperature structure of the Reydarfjordur Borehole. J.G.R., 87: 6423-6428.
- Páll Einarsson, 1976: Relative location of earthquakes in the Tjörnes Fracture Zone. Soc. Sci. Islandica, Greinar 5: 45-60.
- Páll Einarsson & Sveinbjörn Björnsson 1979. Earthquakes in Iceland. Jökull, 29: 37-43.
- Sass, J.H., A.H. Lachenbruch and R.J. Munroe, 1971: Thermal conductivity from rocks from measurements on fragments, and its application to heat flow determinations. J.G.R., 76: 3391-3401.
- Sveinn Peter Jakobsson, 1979: Outline of the petrology of Iceland. Jökull, 29: 57-73.
- Taylor, J.C.M., 1977: Sandstones as reservoir rocks. Í: Hobson, G.D. (ed.): Developments in Petroleum Geology - 1: 147-196. Applied Science Publishers Ltd, London.

Tissot, B.P. & Welte, D.H., 1978: Petroleum Formation and Occurrence.
- A New Approach to Oil and Gas Exploration. Springer-Verlag,
Berlin Heidelberg New York.

Vogt, P.R., Johnson, G.L. & Leó Kristjánsson, 1980: Morphology and
magnetic anomalies north of Iceland. J. Geophys., 47: 67-80.

ABSTRACT

In 1982 a 554m deep borehole was drilled on the island Flatey, just off the north coast of Iceland. The purpose of the drilling was to investigate a sedimentary basin underlying the island, especially with reference to oil occurrence. The project was directed by the National Energy Authority, and founded by a committee instituted by the Ministry of Industry, concerned with the exploration of the natural resources of the insular shelf of Iceland. A continuous core was obtained, revealing a sequence of predominantly sedimentary rocks. Only two lava flows are found at the surface and one at 400 m depth. The strata are probably of early Pleistocene age, younger than about 2 m.y., and from Matuyama magnetic epoch of reverse polarity, i.e. older than 0.7 m.y. They are comparable to the "Breiðavík" sediments exposed on shore on Tjörnes Peninsula, some 30 km to the east. The sediments indicate formation in shallow marine or coastal environments, and are characterized by the repeated cycles of regressions and transgressions. Marine fossils indicate high-arctic conditions. The sediments are mostly sandstones and mudstones derived from volcanic material, but conglomerates are present in considerable amounts. The porosity of the sediments is generally high, but low permeability indicates that potential reservoir rock is scarce. Average density of the sequence is estimated to be 2,4 g/cm³. Present temperature gradient is about 50. This investigation has confirmed the existence of a sedimentary basin, which can be referred to as the Flatey Basin, and prior geophysical measurements indicate a considerable thickness of the sediments. These conditions are a prerequisite for the formation of oil, but significant traces of hydrocarbons were not detected in the core, and no potential source rocks were found. However, the results of the drilling cannot be considered conclusive as the depth where possible oil generation can occur was not reached.

VIÐAUKI 1

JARÐLAGAGREINING KJARNA ÚR HOLU FL-1

VIÐAUKI 1

JARÐLAGAGREINING KJARNNA ÚR HOLU FL-1.

Í lýsingunni sem hér fer á eftir og unnin var meðan á borun stóð úti í Flatey á Skjálfanda, er jarðlögum lýst þannig að byrjað er efst og síðan farið niður eftir kjarnanum. Hvorki er reynt að segja til um atburðarás við myndun setlaganna né í hvers konar umhverfi þau hafi myndast. Í kafla 3 eru aðferðir og skilgreiningar sem varða greininguna útskýrðar. Mynd 4 í aðaltexta sýnir jarðlagasniðið ásamt jarðeðlisfræðilegum mælingum úr holunni.

- 1,6- 6,8 m Basalthraunlag. Fersklegt meðalgrófkornótt basalt með dreifða plagióklas- og pyroxendíla, sem oft eru samvaxnir við ólivín. Sjá má iddingsít í ólivíninu. Textúr er granular og málmsteindirnar eru ójafnt dreifðar og óreglulega lagaðar. Neðst er hraunlagið frauðkennt. Það er öfugt segulmagnað.
- 6,8-10,3 m Sandsteinn. Kjarnaheimta er mjög léleg. Það sem upp kemur er sandur og 2-4 cm basaltbrot.
- 10,3-14,8 m Sandsteinn. Lítt harðnaður sandsteinn lagskiptur. Neðst er dökkur óharðnaður sandur.
- 14,8-16,0 m Völuberg. Sandsteinn með dreifðum smávölum. Neðst eru seólítafyllt basaltbrot.
- 16,0-19,3 m Skolvatn tapast, kjarni eyðist algjörlega.
- 19,3-25,1 m Sandsteinn. Mikið tapast af kjarnanum. Það sem upp kemur er grófur lítt harðnaður sandsteinn og siltsteinn.
- 25,1-42,0 m Basalthraunlag. Efst er líklega völuberg en kjarnaheimta er léleg. Basaltið er plagióklasríkt, ummyndað og meðalgrófkornótt með opna byggingu. Bergið er sprungið með smektít í sprungunum. Lagið er öfugt segulmagnað.
- 42,0-47,5 m Sandsteinn. Mikið vantar í kjarnann. Neðan við hraunlagið eru fáeinir cm af rauðbökuðum jarðvegi með smávölum. Þar neðan við er um 40 cm kolsvart lag. Þar undir er sandsteinn sem verður grófari er ofar dregur.

Dreif er af smávölum í sandsteininum og eru þar heldur stærri ofan til.

- 47,5-66,0 m Sandsteinn. Mikið vantar í kjarnann. Efst er lagskiptur sandsteinn. Á 53,4-55,8 m dýpi er fremur fínkornóttur blágrár sandsteinn með vöðlaðan strúktúr. Þar neðan við er ólagskiptur sandsteinn. Hann hefur víða brotnað upp en síðan sest til aftur. Dreif er af smávölum.
- 66,0-80,1 m Völuberg. Við efri mörk völubergsins er nokkuð greinilegur rofflötur. Völurnar eru rúnnaðar og af margslags uppruna. Neðan við 72,4 m dýpi eru grænleitar sandsteinsvölur ráðandi og er svo niður á 80,1 m dýpi. Á 74,5 m er 0,5 m þykkt sandsteinslag sem er fínkornóttara neðan til. Skálagaðar sandsteinslinsur (20-50 cm) koma fyrir. Neðri mörkin eru skýr.
- 80,1-81,8 m Sandsteinn. Skálagaður glerríkur sandsteinn. Glerið er ýmist ferskt eða ummyndað yfir í smektít. Í sandsteininum eru hallandi sprungur með hvítum útfellingum.
- 81,8-91,3 m Völuberg. Glerríkur sandsteinn með linsum af vel núinni basaltnöl.
- 91,3-108,6 m Völuberg. Vel núin basaltnöl ýmist með opna byggingu eða í sandsteinsgrunni. Völurnar eru úr áberandi fersku basalti og lítið sem ekkert er af vólum úr öðrum berggerðum. Á 96,3-99,3 m dýpi eru 10-30 cm lög af glerríkum sandsteini stundum með dreifðri fínni möl og lagskiptum sand- og siltsteini. Neðri mörk völubergsins eru óljós. Í neðstu 2 m fer vólum fækkandi og gler í millimassa hverfur, en sandsteinn verður ráðandi.
- 108,6-116,6 m Sandsteinn. Frekar fínkornóttur siltborinn sandsteinn sem virðist hafa brotnað upp eftir að hann harðnaði. Síðar hefur sandsteinninn sest til aftur án verulegrar tilfærslu. Ljósar útfellingar og grófkornóttari sandsteinn hefur fyllt glufurnar. Á 115,6-116,6 m dýpi er uppbotinn siltsteinn. Á dreif um lagið og við neðri lagmótin eru smávölur.
- 116,6-117,9 m Sandsteinn. Frekar grófkornóttur ólagskiptur sandsteinn. Á 116,8 m dýpi eru fáeinar smávölur.

- 117,9-122,5 m Völuberg. Fáar ójafnt dreifðar lítið rúnnaðar vökur í sand- og siltsteini. Völum fer fækkandi og þær smækka með dýpi. Neðri lagmótin eru óljós.
- 122,5-127,3 m Sandsteinn. Fremur fínkornóttur sandsteinn eða sandborinn siltsteinn með mjög dreifðum völum. Sandsteinninn hefur víða brotnað upp eftir að hann harðnaði, en við það hefur grófari sandsteinn með fíngræðri mól síast niður í glufurnar. Einnig eru ljósar útfellingar í sprungunum. Sandsteinninn er gjarnan ljósari í kringum brotin. Neðan við 125,1 m dýpi fer að bera á 1-2 cm lagskiptingu. Á 125,5 m dýpi er ávöl 15 cm basaltvala sem hefur sokkið í sandsteininn óharðnaðan og aflagað lagskiptinguna.
- 127,3-129,8 m Völuberg. Lítið aðgreint völuberg í sandbornum grunni. Vökur eru talsvert rúnnaðar og yfirleitt úr basalti en einnig úr sandsteini. Á 129,2 m dýpi eru glufur milli valanna. Völum fækkar í efstu cm og eru efri mörkin óljós, en neðri mörkin eru skýr.
- 129,8-131,9 m Sandsteinn. Þéttur ólagskiptur talsvert glerríkur sandsteinn. Neðri mörkin eru óljós.
- 131,9-153,5 m Sandsteinn og völuberg. Grófkornóttur og glerríkur sandsteinn með vel rúnnaðum basalt völum og malarlinsum. Mörkin á malarlinsunum eru óskýr. Sandsteinninn er víða skálagaður. Basaltglerið er talsvert ummyndað. Í neðstu 3,5 m er glerríki sandsteinninn nær einráður. Lagið er í heild einsleitt.
- 153,5-160,7 m Völuberg. Völubergið er lagskipt og byggt upp úr nokkuð rúnnaðum völum úr ýmsum berggerðum og eru vökur úr rauðum setlögum áberandi. Grunnur er víða hverfandi en einnig eru kaflar þar sem vökur sitja í sandsteinsgrunni eða þær eru mjög smágerðar. Á um 159 m dýpi eru 80 cm af ólagskiptum grófkornóttum sandsteini. Neðri lagmótin eru vel afmörkuð, hugsanlega rofflötur.
- 160,7-164,1 m Sandsteinn. Lítið aðgreindur skálagaður sandsteinn. Á um 30 cm kafla er mikið af smárri mól (<0,5 cm) í sandsteininum. Nokkuð er af fínlagskiptum böndum af silti og fínsandsteini.
- 164,1-177,8 m Völuberg. Efst og neðarlega eru 2 og 3 m af dreifðum

lítið rúnnuðum vólum í grænleitum siltbornum sandsteini. Á um 172 m dýpi eru nokkrir basalt-hnullungar. Annars staðar eru völnar þéttari. Þær eru úr mismunandi berggerðum og allvel rúnnaðar. Sums staðar má sjá hægfara breytingu í stærð valanna. Á um 170 m dýpi er 40 cm lag af skálöguðum sand- og siltsteini. Neðri mörk hans eru skýr. Einnig koma fyrir þunn lög af sand- og siltsteini. Svolítið fer að bera á glerjuðum grunni neðst.

177,8-201,6 m Sandsteinn og basaltmöl. Glerjaður skálaðaður vólóttur sandsteinn með malarlinsum lítt aðgreindum frá sandsteininum. Í þunnneið af 177,9 m dýpi er glerið talsvert ummyndað og aðeins örfá korn með ferskan glerkjarna. Um 20% glerkornanna eru dökk og ógegnsæ. Sandsteinninn hefur sprungið en nú eru þar hvítar sprungufyllingar. Kjarninn hefur ekki tilhneigingu til að springa um þessar fyllingar. Á 181,8-183,6 m dýpi er völubergslag úr mjög vel núinni smágerðri basaltmöl án verulegs millimassa. Sandsteinninn virðist að jafnaði grófkornóttari neðan 186 m dýpis.

201,6-222,6 m Túff. Í efri helmingi lagsins er kolsvart túff nær einrátt. Glerkornin eru ónúin, eins og sambrædd og aðeins ummynduð til jaðranna, og með nokkru af frumsteinabrotum sem eru líklega ættuð úr glerinu. Á 203 m og um 205 m dýpi eru tvö þunn sandsteinslög. Í neðri helmingi lagsins er einnig með túffinu siltsteinn og fínn og meðalgrófkornóttur sandsteinn stundum aðeins vólóttur. Í lagskiptingunni koma fram fíngerðar færslur (misgengi) og lagskiptingin er hreyfð. Efri og neðri mörk túffsins eru óskýr.

222,6-244,9 m Sandborinn siltsteinn. Mjög fínkornóttur sandsteinn eða sandborinn siltsteinn. Bergið er lagskipt ljósgrátt og svart. Sums staðar er lagskiptingin hreyfð. Á um 235 m dýpi er sandsteinslag, 10-20 cm þykkt. Á 241,1-244,2 m dýpi eru þunn sandsteinslög með siltsteininum. Á 243,4-244,2 m dýpi eru einnig lög af fremur grófum vólóttum sandsteini með siltsteinslögum. Í neðstu 70 cm er ljós siltsteinn með örpunnum sandsteinslögum.

244,9-277,0 m Völuberg. Talsvert lagskipt völuberg með núnum vólum. Völnar eru yfirleitt úr basalti. Stundum eru kaflar þar sem völnur eru flestar smáar, en annars

staðar ná þær allt að hnallungsstærð. Ýmist eru þær í sandsteinsgrunni eða millimassi er enginn. Sums staðar má til dæmis má sjá kabasít í holrúminu milli valanna. Á 267,6-269,4 m eru nokkur skálöguð sandsteins- og siltsteinslög. Rofflötur er við neðri mörk völu-bergsins.

277,0-278,3 m Sandsteinn. Lagið er þrískipt án glöggra skila. Efst eru 40 cm af meðalgrófkornóttum sandsteini. Þá eru 50 cm af lagskiptum fínum sandsteini og sandbornum siltsteini. Hann er sums staðar uppbotinn en hefur sest til aftur. Í neðstu 40 cm er ólagskiptur fínn sandsteinn.

278,3-285,0 m Sandborinn siltsteinn. Lagskiptur fínn sandsteinn og siltsteinn. Á 279,9-281,5 m er nær eingöngu siltsteinn. Á um 281,5 og 285,0 m dýpi eru 20-30 cm kaflar þar sem sandsteinninn er uppbotinn en hefur sest til aftur. Þar eru hvítar útfellingar.

285,0-286,7 m Sandsteinn. Nokkuð vel aðgreindur og að mestu ólagskiptur sandsteinn. Hann virðist hafa brotnað upp en síðan sest til aftur.

286,7-290,5 m Siltborinn sandsteinn. Meðalfínkornóttur sandsteinn og sandborinn siltsteinn, víða lagskiptur. Sprungur með hvítum fyllingum eru í kjarnanum.

290,5-291,4 m Sandsteinn. Meðalfínkornóttur sandsteinn töluvert mikið aðgreindur. Á einum stað er þó um 20 cm lóðgreint lag. Í honum er efst silt en neðar er grófur sandsteinn.

291,4-295,5 m Sandsteinn og sandborinn siltsteinn. Lagskiptur sand- og siltsteinn. Víða má sjá hvernig lagskiptingin hefur raskast vegna mismunandi eðlisþyngdar efnanna. Inn á milli eru 20-40 cm lög af meðalgrófkornóttum sandsteini.

295,5-297,5 m Sandsteinn. Ólagskiptur sandsteinn að því undanskildu að á 296,4-296,6 m dýpi er lóðgreint lag og á 297,1 m dýpi er 5-6 cm kafli með örfínum siltsteinsböndum.

297,5-298,3 m Siltsteinn. Ljósgrár lagskiptur siltsteinn.

- 298,3-298,9 m Sandsteinn. Frekar fínkornóttur lagskiptur sandsteinn.
- 298,9-315,2 m Sandborinn siltsteinn. Siltsteinninn er lagskiptur og er lagskiptingin víða talsvert hreyfð. Sums staðar er eins og lögin hafi gengið hvert inn í annað. Nokkur þunn dökk lög úr fínkornóttum sandsteini eru á þessu dýptarbili.
- 315,2-319,4 m Leirsteinn. Í efstu 2,4 m er ólagskiptur leirsteinn eða leirborinn siltsteinn. Neðar er brúnleitur ólagskiptur leirsteinn, og þar verður kjarninn gljáandi ef hann er strokinn.
- 319,4-323,9 m Sandborinn siltsteinn. Lagskiptur sandborinn siltsteinn með siltsteinslögum á milli. Lagskiptingin er allverulega hreyfð.
- 323,9-327,3 m Leirborinn siltsteinn. Ólagskiptur siltsteinn nokkuð fínkornóttur. Á 324,7-325,5 m dýpi og 326,6-327,3 er siltsteinninn allsandborinn.
- 327,3-339,0 m Siltsteinn. Svo til ólagskiptur siltsteinn. Í kjarnanum eru sprungur sem fylltar eru m.a. af kalsíti. Á einum stað er nokkurra cm sandsteinsgangur sem hliðrast til um sprungu í kjarnanum. Við neðri lagmótin eru nokkrar 2-4 mm smávölur.
- 339,0-343,1 m Leirborinn siltsteinn. Brúnleitur ólagskiptur siltsteinn.
- 343,1-344,5 m Siltborinn sandsteinn. Efri lagmótin eru óljós. Dreif er af (2-4 mm) möl í sandsteininum.
- 344,5-346,5 m Sandsteinn. Siltborinn sandsteinn með truflaða lagskiptingu. Lagið hefur sprungið og eru sprungurnar fylltar af kalsíti og kabasíti.
- 346,5-348,6 m Sandborinn siltsteinn með möl. Í efstu 15 cm eru 2-3 cm dreifðar smávölur en í næstu 80 cm er svo til engin möl. Í neðstu 80 cm eru 1-2% af kjarnanum <0,5 cm völur í sandbornum siltsteini.
- 348,6-350,0 m Sandborinn siltsteinn. Ólagskiptur grænleitur sandborinn siltsteinn. Í laginu er sprunga sem fyllt er af grófum sandi og útfellingum. Kjarninn hefur ekki

tilhneingingu til að brotna um sprunguna.

350,0-354,8 m Sandsteinn með mól. Smáar vökur af ólíkum uppruna sitja í grunnmassa úr siltbornum sandsteini. Nokkuð er af hvítum brotum sem gætu verið skeljaleifar. Um það bil 10-15% af kjarnanum eru vökur. Neðri lagmótin eru glögg.

354,8-355,5 m Sandsteinn. Lagskiptur sandsteinn með lögum af sandbornum siltsteini. Efri lagmótin gætu verið rofflötur.

355,5-358,5 m Siltsteinn. Grænleitur siltsteinn algjörlega ólagskiptur. Í neðri helmingi lagsins verður siltsteinninn talsvert sandborinn.

358,5-364,9 m Sandborinn siltsteinn með smávöllum. Efri mörk lagsins eru óljós en 1-5% af kjarnanum er órúnuð mól (<0,5 cm). Í kringum stöku stein má sjá hringmynstur, þ.e. vökurnar hafa sokkið í setið meðan það var ennþá óharðnað.

364,9-370,6 m Sandsteinn. Lagskiptur sandsteinn og sandborinn siltsteinn. Á 367,7 m dýpi er 20 cm vala vel rúnuð sem hefur sokkið í sandsteininn og aflagað lagskiptinguna. Á milli eru kaflar með lítilli lagskiptingu.

370,6-371,9 m Sandsteinn. Lagskiptur sandsteinn með þunnum lögum af sandbornum siltsteini einkum ofan til.

371,9-381,8 m Völuberg. Í efsta 1,5 m eru smáar vökur í sandsteinsgrunni. Þar fyrir neðan eru allt að 15 cm hnellingar úr tvenns konar basalti. Annars vegar er grátt plagióklas- og pyroxendílótt basalt, hins vegar dílaust ljóst basalt. Á milli er smágerð mól af mismunandi uppruna. Á 377,8 m tekur við dílótt, útfellingalaust og þétt basalt. Af og til er basaltið uppbrotið og eru víða tvær gerðir af seti í sprungunum. Ekki er alltaf hægt að tengja basaltbrotin með vissu yfir glufurnar. Því eru þessir hnellingar taldir með völuberginu en ekki basaltlaginu undir.

381,8-395,0 m Basalthraunlag. Grátt fínkornótt fersklegt basalt. Það er plagióklasdílótt. Basaltið er talsvert sprungið einkum efst. Tvennskonar sprungur eru ráðandi, hallandi og láréttar. Setfyllingar eru nær eingöngu í hallandi sprungum iðulega tvennskonar grænleitur

vaxkenndur leir og grátt silt. Í þessu greindist smektít. Basaltið er blöðrótt í neðstu 60 cm og eru blöðrurnar fylltar kabasíti og opal. Undir hraunlaginu er 30 cm af óbökuðum sandbornum siltsteini.

395,0-395,3 m Sandborinn siltsteinn. Óbakaður 30 cm sandborinn siltsteinn.

395,3-403,0 m Sandsteinn. Talsvert grófkornóttur nokkuð glerkenndur sandsteinn. Glerið er mjög ummyndað og virðist binda setkornin saman. Nær ljóðrétt sprunga sem nær yfir 2 m kafla, sprungan er fyllt með ljósri útfellingu. Einnig eru þversprungur fylltar með dökkum siltsteini. Í sandsteininum vottar víða fyrir skálögun. Sandsteinn er örlítið vólóttur. Á 399,9 m dýpi og þar fyrir neðan er sandsteinninn heldur fínkornóttari. Á tæplega 402 m dýpi hefur sandsteinninn brotnað upp en síðan sest til aftur.

403,0-411,3 m Siltsteinn. Að mestu leyti brúnleitur lítið sandborinn siltsteinn. Í efstu 110 cm er lagskiptur dökkur og ljós siltsteinn. Á tæplega 408 m dýpi er 30 cm hrærigrautur af vólóttum sandsteini (völur 2-4 mm) og siltsteini. Mörk linsunnar eru óljós. Á um 409-410 m dýpi er finn sandsteinn með siltsteininum.

411,3-413,5 m Sandsteinn. Sandsteinninn er svolítið skálaga. Um mitt lagið er siltvöðl með sandsteininum á um 20 cm kafla. Við efri lagmótin er sandsteinninn aðeins vólóttur.

413,5-417,8 m Völuberg. Talsvert núíð lítið aðgreint völuberg með sand- og siltsteins grunn. Í neðri helmingi lagsins verða völur smærri og kantaðri. Völur eru um 5% af rúmmáli kjarnans. Rétt við efri lagmót vólubergsins er 30 cm völulaus sandsteinn. Neðri mörkin eru óljós.

417,8-424,7 m Völuberg. Dreifðar völur í lítt aðgreindum sand- og siltsteinsmassa. Völnar eru allar smáar og um 1-2% af rúmmáli kjarnans. Sandborni siltsteinninn virðist víða hafa brotnað upp en síðan sest til aftur og er grófari vel aðgreindur sandsteinn í glufunum. Í neðsta metranum er vólóttur sandsteinn.

424,7-429,6 m Siltsteinn. Sandborinn grænleitur siltsteinn lítið lagskiptur. Á 426,3-427,0 m er sandsteinn með siltsteininum.

- 429,6-440,9 m Völuberg. Í efstu 6 m lagsins er grófkornóttur skálagaður allt að því vólóttur sandsteinn. Á um 431 m dýpi er völubergslinsa. Í neðri hlutanum verður sandsteinninn að smágerðu völubergi yfirleitt í sandsteinsgrunni. Sums staðar er grunnur nær enginn. Völurnar eru mjög vel núnar. Sandsteinslög koma fyrir í völuberginu. Rétt neðan við efri mörk völubergsins er basalhnullungur.
- 440,9-445,2 m Sandsteinn. Meðalfínkornóttur skálagaður mjög glerríkur sandsteinn. Á 442 m dýpi er 30 cm lóðgreint völuberg með stærstu völlum <0,5 cm. Sandsteinninn hefur sprungið og eru sprungurnar nær láréttar með hvítri fyllingu. Samkvæmt röntgengreiningu reynast fyllingarnar vera Ca-silikatið gýrólít. Efri mörk lagsins eru mjög skörp (hugsanlega rofflötur).
- 445,2-460,7 m Sandsteinn og völuberg. Sandsteinninn er grófkornóttur skálagaður vólóttur og glerjaður. Á 451,5-456,0 m dýpi eru malarlinsur ráðandi í sandsteininum og glermagnið minna. Fyrir neðan malarlinsurnar tekur aftur við vólóttur sandsteinn. Glervirðist ekki vera jafn ríkjandi og áður en áferðin er hin sama. Neðri mörk lagsins eru einkar skörp.
- 460,7-480,2 m Siltsteinn. Yfirleitt fínlagskiptur siltsteinn. Lagið er röndótt, og eru rendurnar dökkar og ljósar. Ýmist eru þau dökku grófkornóttari eða þá að þau eru samþjappaðri úr fínkornóttara efni. Þau korn sem sjást með berum augum eru oddhvöss glerbrot. Á um 469 m dýpi er vel afmarkað lag af sandbornum siltsteini eða fínum sandsteini og annað á um 476 m dýpi.
- 480,2-486,3 m Völuberg. Við efri lagamótin er uppbrotið siltsteinslag og örfáar smávölur. Neðan við 481 m er sandsteinn og siltborinn sandsteinn og lítið sem ekkert af smávöllum. Frá 483,7 m dýpi og niður í botn lagsins eru 5-10% af rúmmáli kjarnans smávölur. Þær sitja í óreglulegum grunni úr sand- og siltsteini.
- 486,3-506,1 m Siltsteinn og fínn sandsteinn. Fíngerð lagskipting af siltsteini, sandbornum siltsteini og mjög fínkornóttum sandsteini er allsráðandi. Lagskiptingin er á köflum, einkum í efri hluta lagsins hreyfð og vöðluð

- og þá gjarnan með dökkum leirflyksum. Einnig örlar á lóðgreiningu í fínkornótta sandsteininum. Á 489,1-491,1 m dýpi er ólagskiptur sandsteinn og annað 20 cm lag á 491,5 m dýpi. Í neðstu m er setið mjög ljóst með dökkum leirflyksum eða hugsanlega súru gleri.
- 506,1-513,6 m Siltsteinn. Mjög fínkornóttur og fínlagskiptur siltsteinn. Lögin eru ljósgrá og dökkgrá. Dekkri hlutinn er fínkornóttari og víða leirkenndur. Hverfandi lítið er af kornum sem ná efri mörkum kornastærðar siltsteins.
- 513,6-529,7 m Sand- og siltsteinn. Dökk og ljós sand- og siltsteinslög. Efst eru 20-30 cm ólaglskipt sandsteinslög með 5-10 cm fínlagskiptum siltsteinslögum á milli. Á 523 m dýpi má sjá <0,5 cm vödur á dreif í lagskipta sand- og siltsteininum og afmynda þær lagskiptinguna mjúklega ofan og neðan við. Í neðstu m lagsins er lagskiptingin og siltsteinn á undanhaldi og svolítið ber á vöðli.
- 529,7-530,6 m Völuberg. Dreifðar smáar kantaðar vödur í sand- og siltsteinsgrunni. Vödurarnar eru 1-5% af rúmmáli kjarnans.
- 530,6-540,1, Sandsteinn. Að mestu ólagskiptur siltsteinsborinn sandsteinn. Ljós sandborinn siltsteinn er víða vöðlaður saman við sandsteininn. Á 538,0-538,6 m dýpi er fínkornóttur brúnleitur siltsteinn, en neðan við hann er brúnleitur sandborinn siltsteinn.
- 540,1-549,4 m Sandsteinn. Grófkornóttur sandsteinn. Í neðsta m er kornastærð hans um og yfir 2 mm. Í um það bil 3 efstu metrunum er lagskiptur fín- og grófkornóttur sandsteinn og sandborinn siltsteinn. Á 543,0-549,4 m dýpi er grófkornóttur ólagskiptur sandsteinn.
- 549,4-550,8 m Sandsteinn. Meðalfínkornóttur sandsteinn með talsverðu af grænleitum ummynduðum kornum hugsanlega gler. Neðst er 5 cm fínsandsteinslag.
- 550,8-554,4 m Völuberg. Bergið er gert úr smágerðum rúnnuðum völlum sem sitja í sandsteinsgrunni. Þær eru yfirleitt úr basalti en einnig úr sandsteini. Sandsteinsvödurarnar eru aflangar og liggja í sömu stefnu í kjarnanum. Í völuberginu eru 5-30 cm kaflar þar sem grófur sandsteinn án greinilegra skila er ríkjandi.

VIÐAUKI 2

**BORHOLA FL-1 Í FLATEY Á SKJÁLFANDA
GERÐ JARÐLAGA Á DÝPTARBILINU 385-245 M**

**Jón Eiríksson og
Leifur A. Símonarson
Raunvísindastofnun Háskólans
1983**

BORHOLA FL-1 Í FLATEY Á SKJÁLFANDA,

GERÐ JARÐLAGA Á DÝPTARBILINU 385-245 M.

Markmið

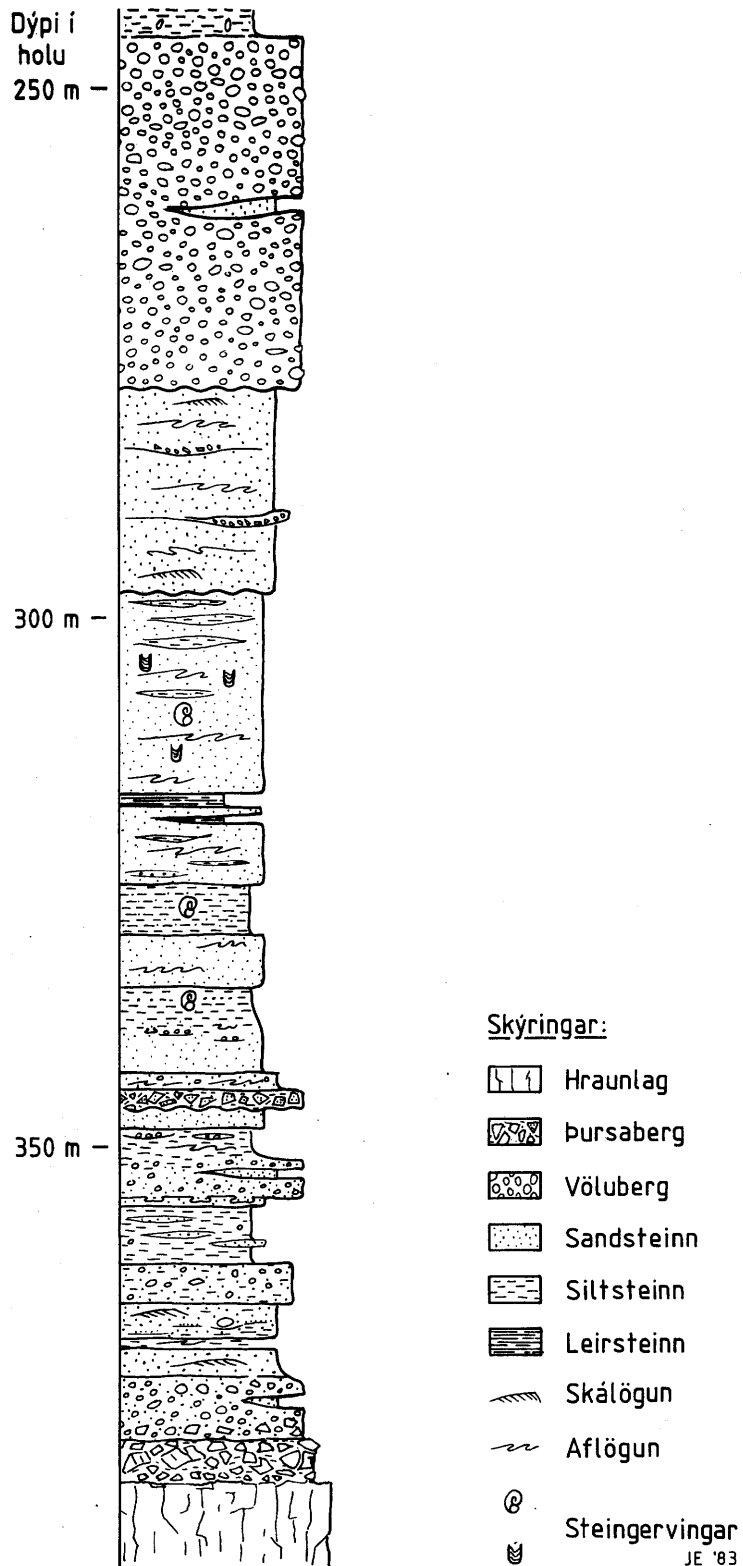
Tilgangur þessa verks er að svara spurningum um uppruna setsins næst undir Flatey á Skjálfanda, þannig að hægt sé að gera sér grein fyrir líklegri víðáttu setmyndana og hverju búast megi við, ef borað verður dýpra. Reynt er að svara þessum spurningum með því að rannsaka þá eiginleika setsins, sem geta leitt í ljós hvernig þau mynduðust í upphafi. Ef hægt er að greina setmyndunarumhverfi verða spár um heildarlögun setlaganna öruggari en ella, og einnig er þá auðveldara að spá fyrir um lóðrétta röð jarðlaga. Einnig eru jarðlögin undir Flatey borin saman við jarðlög á Tjörnesi við austanverðan Skjálfanda, en þar eru þykk setlög, bæði frá kvarter og tertíer.

Rannsóknaraðferðir

Borholukjarninn er samfelldur á bilinu 385-245 m, en nokkuð brotinn á köflum. Neðstu þrjár metrarnir eru úr storkubergi, en allt hitt er setberg. Allur kjarninn á þessu bili var skoðaður. Grunn-eiginleikar setsins voru metnir í handsýni og í smásjá í kjarna-geymslu Orkustofnunar, og fékkst þannig mynd af kornastærð, samsetningu grófasta hlutans, lögun korna og afstöðu. Borholan sker allmörg mismunandi setlög, og voru byggingareinkenni hvers og eins skráð. Sérstaklega var leitað að steingervingum, bæði jurta og dýra, og fundust nokkrar samlokutegundir og einnig för eftir lífverur. Líklega leynast mun fleiri steingervingar í kjarnanum, enda er aðeins ytra borð hans sýnilegt berum augum. Halda mætti leitinni áfram með röntgenmyndatökum. Steingervingar og brot úr þeim voru plokkuð úr kjarnanum og hreinsuð til greiningar undir smásjá.

Á jarðlagasúlunni (mynd 11) er setið flokkað eftir grófleika, enda gefur kornastærð oft hugmynd um orku umhverfisins, og lóðréttar breytingar á henni geta auðveldað umhverfisgreiningu. Stuðst er við Udden-Wentworth kornastærðarkvarðann (Pettijohn 1975), en þar eru mörkin milli malar (völubergs) og sands (sandsteins) við 2 mm, milli sands og silts (siltsteins) við 0,063 mm og milli silts og leirs (leirsteins) við 0,0039 mm. Í kjarnanum eru mjög örar breytingar á kornastærð, þannig að við teiknun súlunnar var mörgum smáatriðum sleppt, en aðaleinkenni hverrar lagasyrpu koma fram í textanum.

IE JHD-SK-6604. JE
85.04.0476.



MYND 11. Jarðlagasnið af dýptarbili 385-245 m í holu FL-1

Lýsing og túlkun jarðlaga

Þótt greinileg merki um hrun og ýmis konar röskun jarðlaga séu í þeim hluta kjarnans, sem hér verður fjallað um, þykir ekki ástæða til að ætla annað en að elstu lögin séu neðst og þau yngstu efst. Allvíða sjást merki um að stíft set hefur brotnað upp og hrunið eða skriðið til áður en það hefur harðnað og orðið að bergi en sú hreyfing virðist hafa verið fyrst og fremst lárétt. Nokkur bratt hallandi misgengi og sprungur eru einnig á þessum kafla, og nemur færslan aðeins nokkrum sentimetrum, þegar hægt er að festa hendur á henni, en annars verða ekki teljandi breytingar á gerð jarðlaga við sprungurnar. Þess vegna er ekki ástæða til að búast við stórum misgengjum um þær. Í kjarnanum eru mörg og greinileg merki um afmyndun mjúks sets. Þar er bæði um að ræða fellingar með lághalla ásafleti, sem myndast hafa við sig og kviksandshreyfingar. Hvort tveggja bendir til hraðrar setmyndunar, en vera má, að jarðskjálftar hafi dregið úr stöðugleika setsins af og til og hleypt af stað hruni.

Hér á eftir fer lýsing á jarðlögum á bilinu 385-245 m, og er byrjað neðst.

385,0-381,8 m. Basalt.

Lýsingin byrjar í efri hluta basaltlags, en stuðlun og kornastærð benda til þess að þetta sé hraunlag, sem runnið hafi á þurru landi.

381,8-377,9 m. Þursaberg.

Lagamót basalts og þursabergs eru við 381,8 m. Af basaltinu tekur við um 40 cm þykkt þursaberg og hallar samskeytunum um 50

Þursabergið er gert af 0,2-4 cm köntuðum steinum, sem eru allir úr sams konar bergi og hraunlagið undir. Við botninn er lagskifting í grunni samsíða undirlaginu, og þar liggja þunnar linsur eða bönd úr siltsteini, en einnig tilfluttir klumpar úr sama efni innan um sandsteinsmylsnu. Við 381,4 m tekur basalt við aftur, sennilega stór hnellingur eða stuðull úr hraunlaginu undir. Hann er sprunginn að neðan og greinilega brotinn upp, þannig að hann sker sig engan veginn glögg frá þursaberginu undir. Í hnellingnum eru sprungur, fullar af sams konar siltkenndu efni og finnst í klumpum og linsum undir. Annar hnellingur nær upp í um 380 m, og er sá mjög maskaður efst og leysist upp í þursaberg.

Steinvölur í efstu tveim metrunum eru enn að mestu leyti úr sams konar basalti, en þó fer nú að bera á vólum úr annars konar bergi. Steinvölnar sitja í grunnu úr siltsteini og sandsteini, og í grunninum eru einnig klumpar úr leir og silti.

Að minnsta kosti tveir möguleikar koma til greina við myndun þursabergs af þessu tagi. Algengt er að einsleitt brotaberg finnist við misgengisfleti. Slík þursabergslög liggja að sjálfsögðu eins og misgengisflöturinn, og í þeim eru gjarnan skrið- og þrústifletir. Bergbrotin eru köntuð og ættuð úr misgengisveggjunum. Sú staðreynd að núnum vólum úr fjarættuðu bergi fer fjölgandi upp á við í þursaberginu, ásamt því að uppruna þess bergs er ekki að finna ofan við þursabergið (handan við hugsanlegt misgengi), bendir eindregið gegn þessum myndunarhætti. Hins vegar er auðsætt, að efsti hluti hraunlagsins hefur orðið fyrir álagi og maskast. Nærtækast er að gera ráð fyrir, að jökull hafi skriðið yfir hraunlagið og valdið skerálagi á botninn. Siltið, sem nú finnst á milli bergbrota, hefur þá að nokkru leyti myndast við mölun smærri korna milli stærri, en vel er hugsanlegt, að hluti þess (t.d. sá hluti, sem nú sést í afmörkuðum klumpum) hafi verið fyrir í sprungum og glufum í hraunlaginu sem hálfharðnaðar sprungufyllingar. Núnar og hálfnúnar steinvölur, sem liggja ofarlega í þursaberginu, hafa þá borist þangað í jökulísnum og við botn hans. Samkvæmt þessari túlkun er þursabergið að hluta til uppbrotið hraunlag og að hluta til botnurð. Greinilegt er, að vatn hefur leikið um efsta hluta þursabergsins, og efri mörk þess eru ekki skörp.

377,9-371,9 m. Völuberg

Sæmilega aðgreint, smágert (1-5 cm) völuberg með stöku hnallungi og sandbornum grunni. Völurnar eru flestar úr basalti, og ber mest á fersklegu, ljósleitu basalti, sem líkist undirlaginu, en ummyndað basalt er innan um, og einnig völur úr setbergi, bæði móbergsríku og sandsteinskenndu. Talsvert ber á hvítum leirsteinsvólum. Efra borð völubergsins er ekki skarpt, heldur minnkar kornastærðin smám saman niður í sand á um 5 cm kafla. Í miðju völuberginu er 5 cm þykk grófsandsteinslinsa.

Óhætt er að fullyrða að völubergið hafi sest til í straumvatni, sennilega undir ís eða framan við jökuljaðar.

371,9-369,1 m. Sandsteinn

Grófur til meðalgrófur, vel aðgreindur, skálagður sandsteinn með teygðum og þvældum fínsandsteinslögum inn á milli. Við 369,7 m er sprunga eða misgengi með 68halla, fyllt siltsteini og sandsteinsbrotum. Sandsteinninn er sennilega af sama toga og völubergið undir, en myndaður við lægri straumhraða.

369,1-368,3 m. Siltsteinn

Siltsteinn með þvældum sandsteinslinsum. Þegar hér er komið sögu hefur svæðið verið komið á kaf í vatn, sennilega lón framan við jökul. Út í lónið hefur borist mikið af eðju með gruggugu jökul-

vatni. Sandlinsurnar hafa líklega borist út í lónið með botnstraumum.

368,3-365,0 m. Sandsteinn

Neðstu 15 cm eru úr flatt lagskiftum, fínum til meðalgrófum sandsteini, en síðan aflagast lagskiftingin við 20 cm hnullung, sem sýnilega hefur skolið ofan í mjúkan sand. Fleiri smærri steinar eru rétt ofan við hnullunginn. Slíkir hnullungar í lónaseti eru almennt skýrðir þannig, að þeir hafi borist með ís, annað hvort lagnaðarís eða jökulís, sem rekið hafi út á lónið og bráðnað. Ofar tekur aftur við allvel aðgreindur, lagskiftur sandsteinn. Lagskiftingu hallar í gagnstæðar áttir, en það gæti bent til að hún stafaði af flutningi sands í öldum eftir botni með sjávarfalla-straumum. Breytileikinn gæti þó allt eins stafað af breytilegum botnstraumum undan jökulsporði. Ef fyrri túlkunin er rétt, hefur rif aðskilið lónið frá hafi, og það kann þá að hafa verið ferskt eða hálf salt.

365,0-361,0 m. Völuberg

Illa aðgreindur hrærigrautur úr silti, sandi og möl. Völurnar eru á stangli og sitja í óreglulega lagskiftum sand- og siltsteini. Hugsanlegt er, að hér sé á ferðinni illa farin hvarflög. Sú breyting verður smám saman upp á við, að sandur og möl þverra en siltið verður ríkjandi.

361,0-355,5 m. Siltsteinn

Nokkuð sandborinn siltsteinn. Á stöku stað eru örþunn lög úr hreinum sandi, vel aðgreind. Hér er annað hvort um fok að ræða, eða sandstrengi, sem skolast hafa inn yfir botn lónsins í brimum. Efra borð þessa siltsteins er glöggt, en án rofflatar.

355,5-354,8 m. Sandsteinn

Fremur illa aðgreindur, mjög fínn, skáþynnóttur sandsteinn til siltsteinn. Þetta lag ber vitni um hægfara vaxandi orku umhverfisins, en það gæti t.d. stafað af því að sandrif framan við lónið hafi færst innar. Glöggt efra borð.

354,8-350,6 m. Völuberg

Smáger, fremur illa aðgreint völuberg, völurnar 0,5-3 cm í þvermál og sitja í grunni úr fínsandi. Við botn lagsins eru engin merki um svörfun, en fargför sýna, að undirlagið hefur verið mjúkt. Flestar völurnar eru úr ummynduðu basalt. Þær stærstu eru mjög vel núnar. Rétt ofan við 352,0 m er 40 cm linsa af völóttum sandsteini. Við 350,6 m breytist völubergið smám saman í siltstein, þannig að umhverfið verður orkuminna á ný. Þetta gæti hafa stafað af því að ós í sandrifinu hafi flust til eða að vatnsborð eða sjávarborð hafi hækkað.

350,6-348,4 m. Siltsteinn

Í siltsteininum er flókið kerfi af afmynduðum sandsteinslinsum og sprungufyllingum úr vel aðgreindum, meðalgrófum sandsteini. Æðarnar eru oft um 1 mm þykkar. Auðsætt er, að sandurinn hefur sest á mjúka eðju og sokkið ofan í hana. Hugsanlegt er, að þetta sé rifsandur, sem flust hefur inn yfir lónbotninn í stormum. Við 348,7 m eru skörp lagamót, þar sem 22 cm lóðgreint lag úr smámöl og sandi tekur við. Síðan kemur aftur 15 cm þykkur hreinn siltsteinn.

348,4-346,4 m. Sandsteinn

Vel aðgreindur, mjög fínn sandsteinn með linsum af grófari sandi. Aðgreining versnar efst.

346,4-344,6 m. Þursaberg

Efst í sandsteininum undir fer að bera á smávölum og flygsum úr leir, en við 346,4 m tekur við þursaberg úr köntuðum brotum úr sandsteini og siltsteini. Lághalla misgengi og fellingar með bratta ásafleti sjást í kjarnanum. Siltsteinn fyllir út í glufur milli sandsteinsbrota, sem eru gerð úr vel aðgreindum, grófum til meðalgrófum sandi. Seinni tíma smámisgengi með færslu, sem nemur 1-2 cm sést á þessum kafla. Sprungan er nærri lóðrétt, opin, og í henni útfellingar.

Sennilega hefur þetta 2 m þykka þursabergslag og e.t.v. hluti af laginu ofan á orðið til við hrun eftir botni. Efnið hefur verið farið að stífna áður en það hrundi fram.

344,6-343,0 m. Sandsteinn

Illa aðgreindur sandsteinn með smávölum. Öll lagamót eru afmynduð.

343,0-337,2 m. Sandsteinn

Neðsti hlutinn virðist ólagskiftur, en ofar eru linsur úr grófari sandi og smámöl, m.a. með köntuðum leirsteinsflygsum, og eru roffletir við botninn. Við 340,0 m er sandsteinninn fínlagskiftur, og skiftast á um 1 cm þykk lög úr fínsandi og mjög fínum sandi. Í heild verður lagið fínkornaðra upp á við, og við 338,6 m er siltsteinslag. Efsti hlutinn einkennist af 10 cm þykkum lóðgreindum fínsandsteinslögum með fargföllum við il.

Allt þetta lag hefur sest til í vatni eða sjó, og hefur setmyndun verið ör. Efsti hlutinn er iðustramaset, og minnkandi kornastærð bendir til að annað hvort vatnsdýpi eða fjarlægð til upprunastaðar sets (strönd eða ísjaðar) hafi aukist.

337,2-335,0 m. Siltsteinn.

Neðri mörk þessa lags eru ekki skörp, og mjög lítil eðlismunur á setmyndun við lagamótin, setið verður einungis fínna í korninu. Lóðgreind lög halda áfram, og er botn hvers lags úr sandi, en siltið tekur við ofar. Setið er talsvert sprungið, og eru sandsteinsgangar í sumum sprungunum, og einnig eru greinileg merki um láréttar skriðhreyfingar í setinu. Við 337,1 m og e.t.v. við 335,6 m eru steinvölur, sem falið hafa ofan í mjúkt set, e.t.v. úr bráðnandi ísjökum.

Við 335,4 m fannst Portlandia (Yoldiella) lenticula (Möller), ein hægri og ein vinstri skel. Skeljarnar hanga saman á hjörinni og eru nær heilar. Við 335,1 m fannst Mya (Mya) truncata Linné, ein vinstri og hægri skel, samfastar en brotnar. Einnig fannst þar Portlandia sp., fjögur brot, eitt þeirra með hluta af hjörinni. Allra efst í laginu eru farsteingervingar, merki um starfsemi lífvera án varðveittra líkamshluta eða merkja um þá.

Lag þetta hefur myndast í fremur rólegu umhverfi í sjó eða sjávarlóni.

335,0-330,0 m. Sandsteinn

Mjög fínn sandsteinn með þvælda lagskiftingu og blending af silti og grófari sandi. Efst í laginu verður siltsteinn smám saman yfirgnæfandi.

Þetta sandsteinslag er túlkað sem iðustramaset, en jafnframt hefur silt botnfallið úr gruggugum sjó.

330,0-325,2 m. Siltsteinn

Meginhluti þessa lags er siltsteinn, en aðeins neðsti metrinn eða svo er tiltölulega hreinn. Ofar eru lóðgreind lög, þar sem fínn sandur er neðst en silt ofar. Setmyndunin er af sama toga og í laginu undir, en nú ber meira á botnfalli eðju.

Í þessu lagi fundust eftirtaldir steingervingar: (327,4 m) cf. Portlandia (Portlandia) arctica (Gray), eitt brot af kviðrönd. (329,0 m) Portlandia (Portlandia) arctica (Gray), ein hægri skel

næstum því heil og sér í aðra undir henni. (329,1 m) Bivalvia sp., tvö ógreinanleg brot, líklega af Taxodonta (Nucula eða Portlandia). (329,2 m) Portlandia sp., eitt brot af framenda.

Vafalaust er hér um sjávarset að ræða, og tegundirnar benda til lágs sjávarhita og nándar við jökul. Setmyndunin hefur sennilega farið fram í firði eða hálfsoötu jökullóni, sem kelft hefur út í.

325,2-317,8 m. Sandsteinn

Mestur hluti þessa lags er mjög fínn sandsteinn, en siltsteinslinsur eru innan um. Öll lagskifting er mjög afmynduð og víða sjást merki um hrún og skrið. Við 321,0 m er brot úr steingervingi. Á bilinu 319,2-319,4 er ólagskiftur, grábrúnn leirsteinn. Síðan tekur fínsandsteinn með leir- og siltlinsum við á ný.

317,8-316,6 m. Leirsteinn

Einsleitur brúnn siltkenndur leirsteinn.

316,6-297,5 m. Sandsteinn

Erfitt er að flokka þetta lag eftir kornastærð. Það er að mestu gert af fínum sandi og silti, og hefur allt myndast á sjávarbotni. Setmyndun hefur verið allbreytileg og mishröð. Lóðgreind lög (iðustraumaset) eru áberandi í neðri hlutanum, en ofar er lagskifting öllu ógreinilegri, bæði vegna mjúkrar afmyndunar og lífrænnar truflunar, en mikið er af farsteingervingum í laginu. Einn steingervingur var greindur, (309,2 m), Portlandia sp., eitt brot með hjör og annað hjararlaust. Efsti hluti þessa lags er um 80 cm þykkur siltsteinn.

297,5-276,9 m. Sandsteinn

Við botn lagsins er rofflötur án mjúkrar afmyndunar. Undirlagið hefur verið farið að stífna, þegar svörfunin átti sér stað. Neðsti hluti sandsteinsins er skálagaður og er efnið jafnkorna. Ofar skiftast á hrein sandsteinslög og kaflar, þar sem skiftast á lög úr siltsteini og fínsandsteini. Í laginu eru nokkrir eindregnir roffletir, og ofan við þá þunnar völubergslinsur, þar sem brot úr staðbundnu seti eru áberandi. Umhverfið er greinilega orðið orku-meira, og farið er að bera á svörfun í farvegum á stað látlausrar upphleðslu sets. Setmyndun hefur þó verið ör ennþá, þar sem skilyrði voru hagstæð, og allmikið ber á mjúkri afmyndun og kviksandsæðum. Efsti hluti lagsins er 45 cm þykkur, vel aðgreindur sandsteinn.

Hugsanlegt er, að ströndin hafi nú aftur færst fram, e.t.v. vegna jafnvægisleitni í lok jökulskeiðs, og að vaxandi kornastærð setsins upp á við endurspegli það (afflæði).

276,9-245,2 m. Völuberg

Efsta lagið, sem athugað var, er völuberg úr mjög vel núinni möl og ávölum hnellingum, sem mynda vel aðgreinda grind, sem sums staðar hefur verið opin (enginn grunnur). Flestar eru völnar úr basalti, en setbergsvölur og völnur úr líparíti finnast einnig. Skálagaðar sandsteinslinsur koma fyrir.

Varla getur farið á milli mála, að hér er um strandset að ræða.

Niðurstöður

Ásýnd þeirra setlaga, sem lýst var hér að framan svipar mjög til jarðlaga í sjávarhömrum í Breiðuvík á Tjörnesi. Sú atburðarás, sem lesa má úr borholukjarnanum frá 385-245 m er einnig sambærileg við þá, sem greind hefur verið í þeim hópi ísaldarlaga, sem kenndur hefur verið við Breiðuvík (Jón Eiríksson 1979, 1981). Dæmigerð syrpa í Breiðuvíkurhópnum byrjar á jökulbergslagi frá jökulskeiði. Ofan á því hvílir völuberg frá lokum jökulskeiðsins, en þá kemur jökullóna- og sjávarset, fyrst tiltölulega fíngert (silt) með framandsteinum, en ofar kemur svo sandsteinn og völuberg, og loks hraunlag. Seinast töldu jarðlöggin eru talin hafa myndast á hlýskeiði. Auðsætt er, að túlkun borholukjarnans hér að framan leiðir til svipaðrar niðurstöðu um atburðarás í stórum dráttum.

Helstu ferli, sem hafa einkennt setmyndunarumhverfið eru framskið jökulíss, rennandi vatn, botnfall úr grugglausn, ísjakabráðnun, iðustraumar, botnstraumar (sjávarfalla- og öldustraumar), brim, mjúk og snemmæ afmyndun, hrun og skrið, og svo starfsemi lífvera.

Atburðarásin virðist hafa verið á þessa leið. Hraunlagið ber engin merki um hraða kælingu og virðist hafa runnið á íslausu þurrlendi, annað hvort á hlýskeiði eða hlýindakafla ísaldar. Jökull skreið síðan yfir svæðið í átt til sjávar, skóf og bramlaði hraunlagið á jökulskeiði eða kuldakafla, en hopaði svo burt. Sjávarstaða hækkaði í kjölfarið, en í fyrstu var lón milli úthafsins og hopandi jökulsins. Jökulvötn fluttu set út í lónið, sem var opið til sjávar, og varð smám saman salt. Síðasti kafli þessarar sögu er svo afflæði á ný, ströndin færist fram aftur, en staðnæmist

allengi um það bil, sem Flatey er nú. Hnullungakambur myndast meðfram ströndinni, en það gæti bent til þess að þarna hafi verið stutt í klettótta strönd, t.d. í firði eða við botn flóa.

Áflæði (transgression) er oft tengd við svörfun lands fremur en setmyndun. Þegar strandlínan færast hægt inn yfir fast land er gert ráð fyrir að brimöldur og straumar sverfi niður brimprep eða strandflöt. Til þess að set safnist fyrir nálægt strönd og varðveitist samfara áflæði þarf annað hvort að verða "eustatísk" hækkun sjávarborðs eða tektónískt landsig. Hvorttveggja í senn mundi auka líkurnar á varðveislu heillegrar áflæðissyrpu.

Almennt má gera ráð fyrir, að lóðrétt setlagaröð við áflæði verði fínkornaðri upp á við, nema ef rif myndast undan ströndinni. Þá getur setið orðið grófara aftur á kafla, vegna þess að um leið og ströndin færast innar, fylgir rifið á eftir inn yfir lóneðjuna á bak við (Kraft 1978).

Af steingervingum fundust aðeins fáeinir tegundir af samlokum og voru flestar þeirra allvel varðveittar og yfirleitt með hægri og vinstri skeljar samfastar. Þær virðast því lítt hreyfðar og hafa að öllum líkindum grafist í setið í orkulitlu umhverfi. Nokkrar skeljar eru brotnar, en með brotin á sínum stöðum (in situ) og má því gera ráð fyrir að þær hafi brotnað undan fargi setsins, sem lagðist ofan á. Í kjarnanum eru mörg greinileg dæmi um samþjöppun (compaction) setsins eftir myndun, t.d. sandsteinsgangar, sem hafa lagst í fellingar með lárétt ásaplön.

Tegundirnar eru dæmigerðar eðjubotnstegundir, sem grafa sig lítið eitt niður í botninn utan strandbeltis, en strandtegundir fundust ekki í fánunni. Tegundirnar tilheyra botndýrasamfélagi, sem ber kaldan svip, á mörkum Hallloku- og Jökultoddusamfélags. Jökultodda, Portlandia (Portlandia) arctica (Gray), er háarktísk tegund og lifir í sjó, þar sem hitastig er um eða undir 0 allt árið. Hún lifir því í mun kaldari sjó en nú er hér við land. Við Grænland lifir hún einkum á 10-50 m dýpi inni í fjörðum og á austurströndinni lifir hún í kalda sjónum suður að Kangerdlugssuaq, en er óþekkt frá Jan Mayen. Við Austur-Grænland lifir jökultodda einkum þar sem skriðjökull ná í sjó fram eða ár renna til sjávar og fæðuframboð er í lágmarki og selta í lægra lagi (Thorson 1934, Ockelmann 1958).

Í íslenskum jarðlögum hafa jökultodda og Portlandia (Yoldiella) lenticula (Möller) aðeins fundist í setlögum frá ísöld, sem eru yngri en 2 milljón ára. Þó að erfitt sé að draga ályktanir út frá svo fáum tegundum, er hinu ekki að leyna, að fánunni svipar mjög

til fánunnar í elsta sjávarsetinu í vestanverðri Breiðuvík, í s.n. Hörgamyndun. Má því gera ráð fyrir, að lindýrafáan í 309-336 m dýpi í FL-1 kjarnanum sé frá einhverju hlýskeiði eða lokum jökulskaiðs á fyrri hluta ísaldar.

Lokaorð

Túlkun og umhverfisgreining hér að framan er byggð á einum borholukjarna. Ekki leikur vafi á, að setið hefur hlaðist upp nálægt strönd í kjölfar hopandi jökuls á ísöld. Það sem öðru fremur einkennir slíkt setmyndunarumhverfi er breytileiki til hliðar í umhverfinu. Afrennsli af landi og ís er gjarnan óreglulegt bæði í tíma og rúmi. Þessvegna er tæplega hægt að búast við að einstakar seteiningar nái nema nokkur hundruð metra til fáeina kílómetra til hliðar, nema þegar um botnurð eða fjöruaset er að ræða. Varðandi lóðréttar breytingar er þess að geta, að í Flateyjarkjarnanum eru seteiningar þykkari en gengur og gerist um samsvarandi einingar í Breiðuvíkurrópnum. Á því gætu verið margar skýringar, til dæmis meira framboð á seti, hraðari áflæði (örara tektónískt sig, betri varðveislumöguleikar, skjól frá úthafi) o.fl. Í jarðlagastaflanum á Tjörnesi eru jarðlög frá Matuyama segulskeiðinu tæplega 400 m þykk, og þar eru efstu syrpuðar myndaðar ofansjávar, þannig að þær eru tiltölulega þunnar. Á Tjörnesi eru um 500 m þykk setlög undir jarðlögum frá Matuyama, svokölluð Tjörneslög, sem hvíla á tertíeru basalti.

HEIMILDIR

- Eiríksson, J. 1979: The Breidavík Group on Tjörnes, North Iceland: Lithostratigraphy and Late Cainozoic glaciations. Óbirt doktorsritgerð við University of East Anglia, 1-347.
- Eiríksson, J. 1981: Lithostratigraphy of the upper Tjörnes Sequence, North Iceland: The Breidavík Group. Acta Naturalia Islandica 29, 1-37.
- Kraft, J. C. 1978: Coastal stratigraphic sequences. Í: R. A. Davis, Jr. (ritstj.), Coastal sedimentary environments, 361-383. Springer, New York.
- Ockelmann, W. K. 1958: The zoology of East Greenland. Marine lamellibranchiata. Meddelelser om Grönland 122(4), 1-256
- Pettijohn, F. J. 1975: Sedimentary rocks. 3. útg. 1-628. Harper & Row, New York.
- 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.