ORKUSTOFNUN
Jarðhitadeild

Karl Gunnarsson
Einar Kjartansson
Knútur Árnason
David Abensour
Yngve Kristoffersen

AUÐLINDAKÖNNUN Í ÖXARFIRÐI

Endurkastsmælingar á Öxarfjarðarsöndum með Víbróseis-aðferð

OS-96001/JHD-01
Reykjavík, júlí 1996

ORKUSTOFNUN
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verknr. 505 300
/hval/ax/skyrsla/endurkast.t

Karl Gunnarsson
Einar Kjartansson
Knútur Árnason
David Abensour
Yngve Kristoffersen

AUÐLINDAKÖNNUN Í ÖXARFIRÐI

Endurkastsmælingar á Öxarfjarðarsöndum með Víbróseis-aðferð

OS-96001/JHD-01

Reykjavík, Júlí 1996

ISBN 9979-827-65-3

ÁGRIP

Á undanförnum áratug hefur Orkustofnun séð um rannsóknir á jarðhita í Öxarfirði og Kelduhverfi, bæði með yfirborðsrannsóknum og borunum. Á þessu svæði hafa einnig verið gerðar ýmsar aðrar rannsóknir, svo sem bylgjubrotsmælingar á vegum Vísindaakademíu Sovétríkjanna, og mælingar á umbrotunum samfara Kröflueldum. Í ljós hefur komið að setlög eru allþykk undir söndunum við botn Öxarfjarðar og þar er mikinn jarðhita að finna norðan við Bakkahlaup og við Skógalón, í sprungubelti Kröflueldstöðvarinnar. Boranir við Skógalón á árabilinu 1987-91 leiddu einnig í ljós örlítinn vott af lífrænu gasi sem reyndist vera af því tagi sem fylgir olíumyndun, en um uppruna þess, myndunarstað og magn er ekki vitað. Fundur þessa gass varð hvati til þess að reyna nýjar aðferðir við könnun setlaganna, og var lagt í að gera tilraun með endurkastsmælingar sumarið 1993, með sérstakri fjárveitingu frá Iðnaðarráðuneytinu. Notuð voru tæki frá Háskólunum í Bergen og Glasgow, sem voru þá til staðar á landinu vegna vísindarannsókna, og menn frá þessum stofnunum komu við sögu í mælingunum og frumúrvinnslu þeirra. Aðferðin er svokölluð margrása upptaka, með 60 rásum eða nemahópum á 1500 m löngum kapli, en hljóðmerki var framleitt með "vibroseis" trukki.

Mældar voru tvær línur sem fylgja vegum hjá bæjunum Skógum og Ærlækjarseli, og ná þær yfir eystri jaðar Kröflu-sprungubeltisins, sem gliðnaði og seig á 5 km breiðu belti í umbrotum 1975-76 og 1978. Endurkastsmælingarnar sýna jarðlagagerð á dýptarbilinu 70-1000 m í besta tilviki. Setlög eru ríkjandi á þessu bili, og sjá má hvernig misgengi og sig í sprungubeltinu hafa afmyndað þau. Mesta sigið fylgir í störum drátt-um sprungubeltinu, en greina má margbreytileg brotkerfi sem sýna að brotavirkni hefur færst til í gegnum söguna. Ekkert sést í þessum stafla sem bendir til hrauna eða innskota. Setlögunum er hér skipt í þrjár syrpur eftir endurkastseinkennum og hljóðhraða, og finna má líklega jarðfræðilega túlkun á þessari jarðlagaskiptingu með samanburði við upplýsingar úr 450 m djúpri borholu við Skógalón.

Efst er einsleit syrpa með óljósum endurkastsflötum, hraðinn er um 1500 m/s, og samsvarar hún lausum árframburði sandanna, og liggur botninn á 50 til 220 m dýpi. Þar undir er syrpa sem er víðast 160-200 m þykk. Hljóðhraði er vaxandi með dýpi, en um 2400 m/s að meðaltali, og greinileg endurköst fylgja toppi, botni og innri lagskiptingu. Syrpan er gerð úr samanlímdum sjávarsetlögum, en undir henni jökulberg. Þessi setlög hafa sest til í sjó við áflæði eftir að jökull hörfaði í lok ísaldar fyrir um 10.000 árum. Með tímanum hefur fjörðurinn grynnkað, setlögin orðið grófari og að síðustu hafa áreyrar lagst yfir grynningarnar. Myndin af þriðju lagsyrpunni og neðstu er heldur óglögg, en einkenni endurkastanna benda til setlaga, fremur en hraunlaga. Til hins sama bendir hljóðhraðinn sem er milli 3000-4000 m/s, en hann segir líka að setlögin séu vel samlímd. Efra borð þessarar syrpu er við jökulberg sem táknar lok ísaldar, og fleiri jökulbergslög má sjá í kjarna úr borholu við Skógalón (ÆR-04), sem fer 100 m niður í syrpuna. Dýpi niður á þessi lagamót mælist á bilinu 270-400 m, en grynnkar að líkindum enn meir til suð-austurs. Setlaga-kennd endurköst má rekja mest niður á um

700-1000 m dýpi, en ekki er að sjá afdráttarlaust botn-endurkast. Hljóðhraðamælingar benda þó til þess að undir þessu dýpi geti setlög trauðla verið í miklu magni, og að þar taki við hraunlög. Ætla má að setlögin í þriðju syrpu séu ísaldarmyndanir, og hugsanlega ekki eldri en einnar milljónar ára.

Beinar upplýsingar um jarðhita eða jarðgas er varla að sjá í gögnunum, enda er það ekki eðli endurkastsmælinga, en þó má ætla að veruleg brotalöm undir Skógum og Skógalóni tengist jarðhitanum. Þessi brot hreyfðust ekki í Kröflueldum. Óvenju greinileg lagskipting í 1. syrpu á þessum slóðum gæti einnig tengst ummyndun vegna jarðhita eða stafað af gasvotti. Mælingar af þessu tagi munu gagnast við jarðhitaleit, í þeim tilgangi að kortleggja setlagaþykkt og staðsetja misgengi í jörðu. Niðurstöður sýna að ólíklegt verður að teljast að til staðar sé verulegt magn af lífrænum sjávarsetlögum, or er því ekki er að vænta mikilla olíulinda. Samkvæmt núverandi þekkingu er líklegast að gasið myndist úr surtarbrandi fyrir áhrif jarðhita í neðri hluta setlaganna, eða þar neðar í hraunlögum. Auk þessa hlýtur að vera hætt við því að gas og olía sleppi fljótlega upp úr jörðunni vegna sívirkra brota á svæðinu.

ÞAKKARORÐ

Við framkvæmd mælinganna var notið hjálpar Yngve Kristoffersen, prófessors frá Bergenháskóla, ásamt Carlos Aranda, Rick Blakner og Bjørge Kristoffersen. Frá Háskólanum í Glasgow kom David Abensour, og David K. Smythe prófessor er einnig þakkað samstarf við leigu á tækjum og umsjón með frumúrvinnslu mælinganna. Aðstoðarmenn við mælingar frá Orkustofnun voru: Egill Axelsson, Benedikt Halldórsson, Bjarni Einarsson og Gunnar Ólafsson.

EFNISYFIRLIT

ÁGRIP 3
ÞAKKARORÐ 4
EFNISYFIRLIT 5
MYNDASKRÁ 6
TÖFLUSKRÁ 6

1. INNGANGUR 7

2. FRAMKVÆMD MÆLINGANNA 7
   2.1 Staðsetning lína 9
   2.2 Framkvæmd mælinga 12

3. ÚRVINNSLA 12
   3.1 Hraðagreiningar 14

4. JARÐFRÆÐILEGT YFIRLIT 20
   4.1 Svæðisyfirlit 20
   4.2 Kröfluprungubeltið 21
   4.3 Bylgjubrotsmælingar 22
   4.4 Setlög í borholum 23
   4.5 Jarðhiti og gas 24

5. TÚLKUN MÆLINGANNA 25
   5.1 Túlkun á endurkastssniðum 25
      5.1.1 Lína AX93-2 27
      5.1.2 Lína AX93-1 30
   5.2 Samanburður endurkastssniða og borholu ÆR-04 34

6. SAMANTEKT OG UMRÆÐA 37
   6.1 Niðurstöður um jarðlagagerð 37
   6.2 Endurmat fyrri rannsókna 38
   6.3 Leit að jarðhita og gasi 42

7. HEIMILDIR 43

SUMMARY IN ENGLISH 45

MYNDASKRÁ

1. Yfirlitsmynd fyrir láglendi Öxarfjarðar 10
2. Línur endurkastsmælinganna, vegir, sprungur og misgengi, og hola ÆR-04 11
3. Unnið (stakkað) endurkastssnið af línu AX93-1 15
4. Unnið (stakkað) endurkastssnið af línu AX93-2 16
5. Dæmigert hraðafall úr hraðagreiningum um miðbik á línu AX93-1 17
6. Niðurstöður hraðagreininga á línu AX93-1, á formi sniða með jafngildislínum 18
7. Niðurstöður hraðagreininga á línu AX93-2. Sjá texta við Mynd 6 19
8. Túlkun á línu AX93-2 26
9. Túlkun á línu AX93-1 28
10. Kort af mælilínum með innfærðu dýpi (metrar) niður á flöt "B" 32
11. Kort af mælilínum með innfærðu dýpi (metrar) niður á flöt "C" 33
12. Samanburður á jarðlagagreiningu úr borholu ÆR-04 og túlkun á línu AX93-1 36
13. Snið frá Tjörnesi yfir Öxafjörð, og uppkast af hugmyndum um brotakerfi 40
14. Hugmyndalíkön af brotakerfum í Öxarfirði 41

Mælisnið (tvö brotin kort) í vasa innan á bakkápu

TÖFLUSKRÁ

1. Staðsetning línu 1 8
2. Staðsetning línu 2 9
3. Framvinda mælinga 10
4. Yfirlit um tölvuvinnslu endurkastsgagna 13

1. INNGANGUR

Rannsóknir á jarðhita í Öxarfirði og Kelduhverfi hófust að marki árin 1984 og 1985 með söfnun vatnssýna og viðnámsmælingum. Á árunum 1987 og 1988 vann Orkustofnun áfram að rannsóknum á jarðhita og ferskvatni í Öxarfirði í þeim tilgangi að kanna aðstæður til fiskeldis (Lúðvík S. Georgsson o.fl. 1989 og 1993). Gerðar voru bylgjubrotsmælingar í samvinnu Orkustofnunar og Vísindaakademíu Sovétríkjanna til þess að kanna bergið undir söndum og setlögum þeim sem hylja svæðið, og gera aðstæður sérstakar á þessum slóðum. Nokkrar holur voru boraðar, og við þær rannsóknir fannst óvænt vottur af lífrænu jarðgasi í borholu við Skógalón. Gasið reyndist vera af því tagi sem fylgir olíumyndun. Til að kanna uppruna þess var boruð þar 450 m djúp rannsóknahola 1991, sem náði þó ekki niður úr setlögunum (Magnús Ólafsson o.fl. 1992).

Fundur þessa gass varð hvati til þess að reyna nýjar aðferðir við könnun setlaganna, og komu þá fyrst og fremst til greina endurkastsmælingar af því tagi sem tíðkast við olíuleit í setlagadældum. Einnig var ástæða til að reyna aðferðina með tilliti til jarðhitaleitar á söndunum, því hvergi annars staðar á landinu er að finna jarðhitakerfi í þykkum setlagabunkum.

Vorið 1993 veitti Iðnaðarráðuneytið Orkustofnun samþykki fyrir 4,5 Mkr fjárveitingu til að standa straum af kostnaði við endurkastmælingar í Öxarfirði (Ólafur G. Flóvenz og Einar Kjartansson, 1993). Svo vel vildi þá til að mælitæki til slíkra mælinga höfðu verið flutt til landsins til vísindarannsókna í Kröflu og því hagstætt að nota tækifærið til mælinga á setlögum Öxarfjarðar. Mælingarnar voru gerðar samsumars, og skýrsla þessi fjallar um framkvæmd, úrvinnslu og túlkun þeirra, ásamt hugleiðingum um nýja drætti í jarðlagagerð svæðisins sem þær hafa leitt í ljós.

2. FRAMKVÆMD MÆLINGANNA

Mælingar voru gerðar í byrjun júlímánaðar 1993. Notuð voru tæki frá Háskólunum í Bergen og Glasgow. Háskólinn í Bergen lagði til tvo 16 tonna "vibroseis" trukka og skráningartæki af gerðinni Texas Instruments DFS-V. Trukkarnir eru tæki til að framleiða jarðsveiflur með hristurum, og koma í stað sprenginga. Skráningartækin skrá allt að 60 rásir af jarðsveiflugögnum samtímis á stafrænu formi á segulbönd. Háskólinn í Glasgow lagði til nema (geofóna) og kapla.

Við mælingarnar vann 10 manna flokkur. Á vegum Háskólans í Bergen komu Yngve Kristoffersen, Carlos Aranda, Rick Blakner og Bjørge Kristoffersen, frá Glasgow kom David Abensour og frá Orkustofnun Einar Kjartansson, Egill Axelsson, Benedikt Halldórsson, Bjarni Einarsson og Gunnar Ólafsson. Yngve og Rick höfðu umsjón með víbróseis búnaðinum, Carlos og David sáu um skráningu gagna og Einar sá um landmælingar með GPS búnaði, jafnframt því að vera verkefnisstjóri.

Þann 29. júní var farið með mælitæki að Lundi í Öxarfirði þar sem mælingamenn höfðu aðsetur meðan á mælingum stóð. Þann dag varð það óhapp að stimpilstöng brotnað í aflvél annars víbroseis trukksins með þeim afleiðingum að hann nýttist ekki til mælinga. Næstu tveir dagar voru notaðir til að undirbúa mælingar sem síðan stóðu yfir dagana 2.-10. júlí. Tafla 3 greinir nánar frá framvindu mælinganna.

Tafla 1: *Staðsetning línu 1.*

Hæll	WGS-84		Lambert		AMS	
	Breidd N	Lengd V	Vestur	Norður	Norður	Austur
102	66°10.253'	16°33.988'	435358	631329	7340027	28 429215
110	66°10.145'	16°33.925'	435306	631130	7339827	28 429257
120	66°10.005'	16°33.835'	435233	630871	7339564	28 429318
130	66°09.879'	16°33.711'	435135	630639	7339328	28 429405
140	66°09.754'	16°33.575'	435027	630409	7339093	28 429501
150	66°09.616'	16°33.545'	434998	630153	7338837	28 429518
160	66°09.478'	16°33.512'	434968	629896	7338579	28 429536
170	66°09.365'	16°33.340'	434833	629689	7338366	28 429661
180	66°09.256'	16°33.116'	434661	629491	7338160	28 429824
190	66°09.156'	16°32.891'	434487	629309	7337970	28 429988
200	66°09.039'	16°32.693'	434334	629095	7337749	28 430131
210	66°08.928'	16°32.501'	434184	628892	7337539	28 430271
220	66°08.796'	16°32.533'	434203	628646	7337294	28 430241
230	66°08.654'	16°32.515'	434183	628382	7337030	28 430248
240	66°08.514'	16°32.472'	434144	628123	7336769	28 430274
250	66°08.372'	16°32.463'	434132	627859	7336505	28 430274
260	66°08.237'	16°32.529'	434176	627607	7336256	28 430218
270	66°08.111'	16°32.663'	434271	627371	7336024	28 430111
280	66°07.975'	16°32.646'	434252	627118	7335771	28 430118
290	66°07.843'	16°32.657'	434255	626872	7335526	28 430103
300	66°07.715'	16°32.675'	434263	626636	7335290	28 430084
310	66°07.580'	16°32.683'	434263	626383	7335038	28 430072
320	66°07.463'	16°32.489'	434113	626171	7334818	28 430212
330	66°07.357'	16°32.266'	433939	625976	7334616	28 430376
340	66°07.283'	16°31.981'	433722	625844	7334473	28 430588
350	66°07.169'	16°31.826'	433601	625636	7334260	28 430699
360	66°07.070'	16°31.614'	433436	625454	7334071	28 430854
370	66°06.952'	16°31.435'	433297	625239	7333849	28 430983
380	66°06.848'	16°31.233'	433140	625050	7333653	28 431131
390	66°06.743'	16°31.025'	432978	624858	7333454	28 431283
400	66°06.635'	16°30.828'	432825	624661	7333250	28 431426
410	66°06.523'	16°30.644'	432682	624456	7333038	28 431560
420	66°06.409'	16°30.469'	432545	624246	7332822	28 431687
430	66°06.290'	16°30.303'	432415	624029	7332599	28 431806
440	66°06.170'	16°30.143'	432289	623809	7332374	28 431921
450	66°06.050'	16°29.987'	432166	623588	7332147	28 432033
460	66°05.937'	16°29.800'	432020	623381	7331934	28 432169
470	66°05.853'	16°29.547'	431826	623230	7331773	28 432356
480	66°05.755'	16°29.323'	431652	623051	7331587	28 432520
490	66°05.654'	16°29.108'	431486	622868	7331396	28 432678
500	66°05.545'	16°28.919'	431339	622669	7331190	28 432815
510	66°05.425'	16°28.778'	431227	622449	7330965	28 432917
511	66°05.413'	16°28.764'	431216	622426	7330941	28 432927

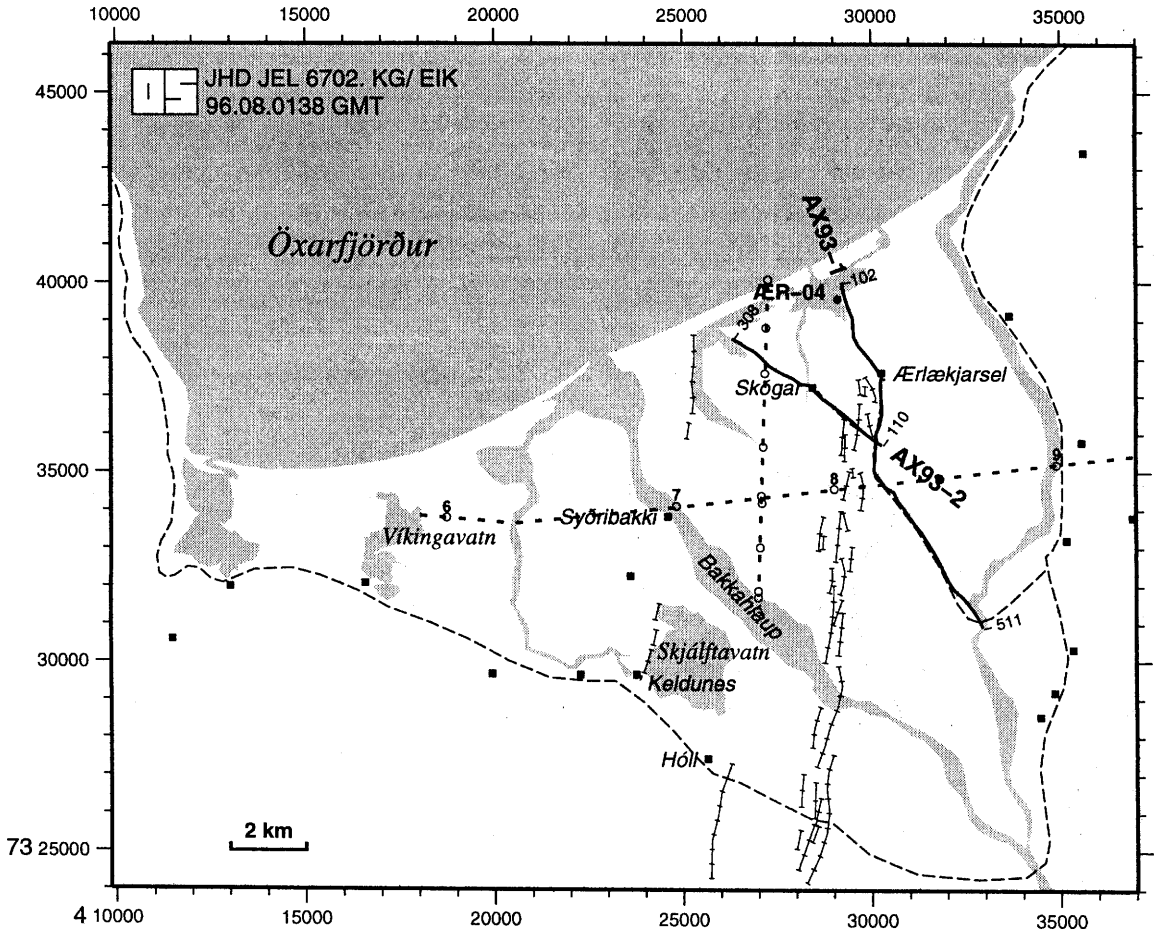
2.1 Staðsetning lína

Tvær línur voru mældar. Lína ÆR93-1 liggur eftir veginum frá Sandá (Jökulsá), fram hjá Ærlækjarseli og norður að Skógalóni, en ÆR93-2 eftir afleggjaranum að Skógum, og nokkuð lengra í sömu stefnu. Mælilínur voru merktar með hælum sem reknir voru niður með 25 metra millibili. GPS staðsetningartæki var síðan notað til að mæla staðsetningu á 64 stöðum á línunum. Að jafnaði voru um 250 metrar milli staðsetninga. Þetta var gert með þeim hætti að GPS móttakari var tengdur við tölvu sem notuð var til að taka meðaltal af staðsetningum í minnst 15 mínútur. Með þessu er áhrifum "selective availability" á GPS staðsetningar að mestu eytt. Síðan var aðferð minnstu kvaðrata notuð til að reikna staðsetningu fyrir alla hæla þar sem meðal annars er reiknað með því að mælihælarnir séu jafndreifðir eftir línunum. Áætlað er að skekkjan í þessum staðsetningum sé að jafnaði innan við 10 metrar. Hælanúmer eða stöðvar eru hér á eftir oftast kallaðar "skotpunktastöðvar" eða "skotpunktar", og skammstafaðar "SP". Staðsetning mælilínanna tveggja er sýnd á yfirlitskorti á 1. mynd og nánar á skotpunktakorti á 2. mynd, sem sýnir SP- eða hælanúmer.

Staðsetningarnar á 10. hverjum hæl eru gefnar í töflum 1 og 2, sem breidd og lengd miðað við WGS-84. Til hagræðis eru einnig gefin hnitum í "Landshnitum" (Lambert keiluvörpun fyrir Ísland með miðju í 65. breiddarbaug og 18. lengdarbaug, viðmiðun Hjörsey 1955. Skurðpunkti þessara bauga gefin hnitin (500000,500000)). Einnig er gefin hnit í UTM kerfinu sem notað er á kortum í mælikvarða 1:50,000 sem Army Map Service, Corps of Engineers, U.S. Army, gaf út 1950, en þau eru merkt á myndir 1 og 2.

Tafla 2: *Staðsetning línu 2.*

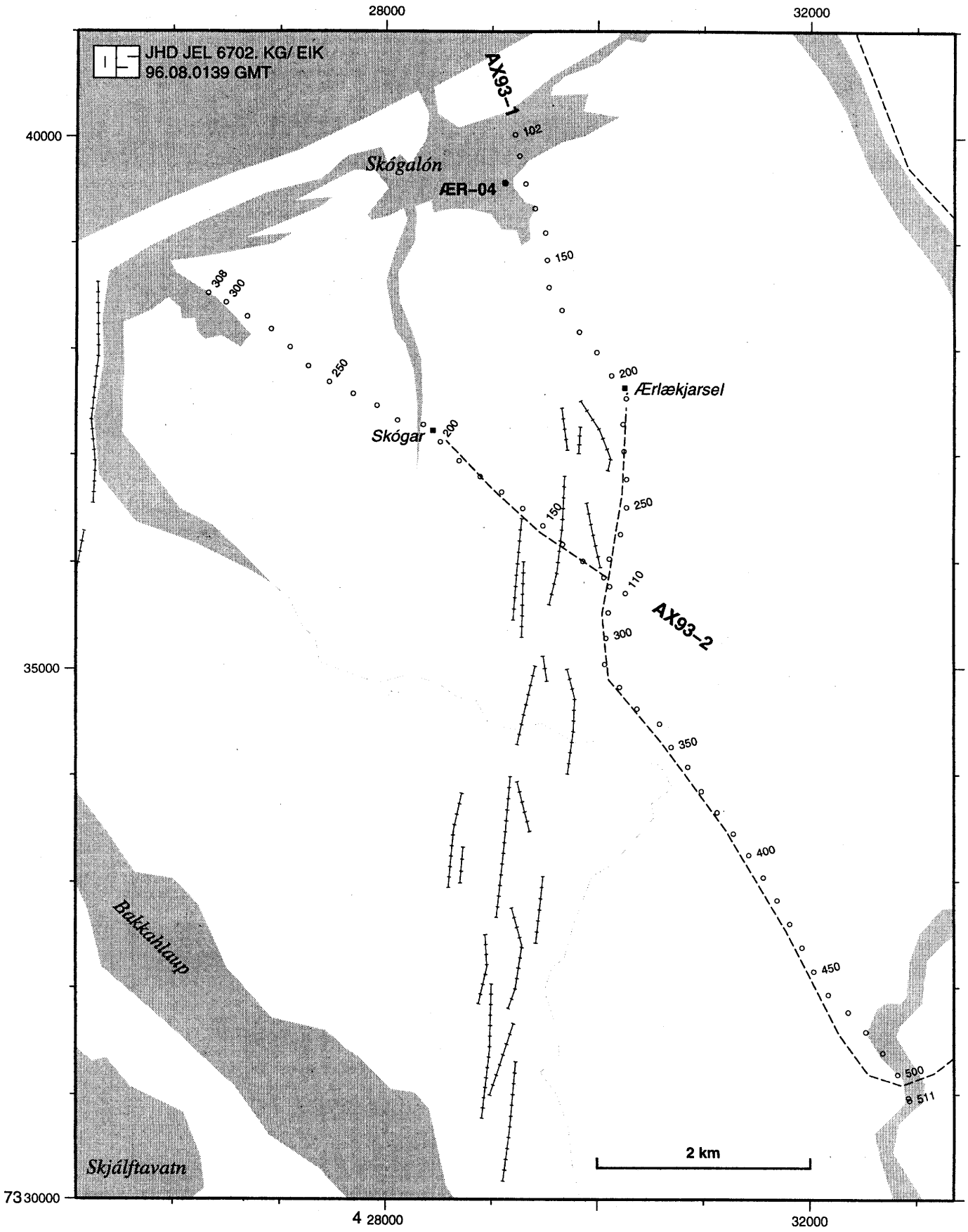
Hæll	WGS-84		Lambert		AMS	
	Breidd N	Lengd V	Vestur	Norður	Norður	Austur
120	66°08.019'	16°32.722'	434312	627199	7335855	28 430063
130	66°08.096'	16°32.993'	434519	627338	7336003	28 429863
140	66°08.179'	16°33.254'	434719	627487	7336162	28 429670
150	66°08.269'	16°33.503'	434910	627650	7336334	28 429487
160	66°08.354'	16°33.761'	435108	627804	7336497	28 429297
170	66°08.432'	16°34.033'	435315	627945	7336647	28 429096
180	66°08.507'	16°34.310'	435528	628079	7336792	28 428891
190	66°08.585'	16°34.578'	435732	628220	7336941	28 428693
200	66°08.679'	16°34.820'	435919	628390	7337120	28 428515
210	66°08.768'	16°35.040'	436088	628552	7337290	28 428354
220	66°08.786'	16°35.362'	436330	628580	7337330	28 428113
230	66°08.860'	16°35.627'	436533	628713	7337472	28 427917
240	66°08.917'	16°35.930'	436764	628813	7337582	28 427692
250	66°08.972'	16°36.233'	436993	628910	7337691	28 427467
260	66°09.049'	16°36.501'	437198	629050	7337840	28 427269
270	66°09.143'	16°36.737'	437379	629221	7338019	28 427096
280	66°09.231'	16°36.978'	437564	629379	7338187	28 426919
290	66°09.291'	16°37.282'	437795	629486	7338304	28 426694
300	66°09.359'	16°37.549'	437999	629609	7338436	28 426496
308	66°09.404'	16°37.773'	438169	629689	7338524	28 426330



Mynd 1. Yfirlitsmynd fyrir láglendi Öxarfjarðar. Brotnar línur eru vegir, en hakalínur tákna sprungur og misgengi frá umbrotunum 1975-85. Endurkastslínur eru merktar með breiðu striki, en bylgjubrotslínur Rússa með breiðri brotinni línu.

Tafla 3. *Framvinda mælinga.*

Dagur	Lína	Mælistöðvar	
		Frá	Til
2/7	1	119	126
3/7	1	127	192
4/7	1	193	353
5/7	1	254	317
6/7	1	318	397
7/7	1	398	464
8/7	1	465	511
8/7	2	118	129
9/7	2	130	182
10/7	2	183	244



Mynd 2. Línur endurkastsmælinganna eru merktar með hringjum fyrir 10. hvert SP-númer. Brotnar línur eru vegir, en hakalínur eru sprungur og misgengi frá umbrotunum 1975-85. Staðsetning borholunnar ÆR-04 er merkt með svörtum punkti.

2.2 Framkvæmd mælinga

Endurkastsmælingarnar fóru þannig fram að á hverjum tíma var nemum komið fyrir á rúmlega tveggja kílómetra löngum kafla eftir línunni. Nemarnir voru tengdir saman í grúppum, 12 saman, og hver grúppa þakti 25 m bil milli hæla. Þannig voru rúmlega 2 metrar milli nema. Veður var óhagstætt allan tímann sem mælingar stóðu yfir, norðanátt og eitthver úrkoma hvern dag. Við prófanir í upphafi mælinga kom í ljós að truflanir af völdum úrkomu og vinds voru mun minni ef nemarnir voru þaktir með einni eða tveimur skóflufyllum af sandi. Eftir þetta voru nemarnir alltaf huldir sandi.

Skráningartækjum var komið fyrir í sendibíl. Hafa mátti allt að 120 nemarásir tengdar um mælikapalinn inn í bíl. Hver rás samsvarar nemagrúppu. Sérstakur rofi var notaður til að velja þar úr þeim 60 rásir sem tengdar voru við skráningartækin og teknar upp samtímis fyrir hvert skot eða "hristun". Upptökutími miðaðist við að ná 6 s skráningu. Á línu 1 var hristarinn yfirleitt 100-125 metrum á undan (sunnan við) fyrstu rásina sem var skráð, en á eftir á línu 2. Víbróseistrukkurinn færði sig eftir línunni og hristi á 2,5 m bili. Við 10. hvert skipti, þ.e. á 25 metra fresti við hverja nýja mælistöð, var rofanum breytt þannig að nemaröðin sem tengd var við skráningartækin færðist um eitt bil eða 25 m.

Bil milli einstakra endurkastspunkta (cdp eða "common depth point") er hálft minnsta bil nema eða skotpunkta, þ.e. 1,25 m. Frumgögnin í upptöku voru þannig 30-föld fyrir hvern cdp-punkt.

3. ÚRVINNSLA

Með úrvinnslu er átt við tölvuvinnslu frumgagnanna, en niðurstaða þeirrar vinnu er endurkastssnið undir mælilínum. Það er síðan túlkað sem jarðlagasnið, með hliðsjón af hjóðhraða og öðrum upplýsingum um jarðlagagerð.

Mæligögnin voru skráð á hefðbundin tölvusegulbönd, það er 2400 feta langar spólur af hálfs þumlungs breiðum segulböndum með níu rásum og þéttleika 1600 bpi. Gögnin voru skráð samkvæmt SEG-C staðli "Society of Exploration Geophysicists". Þetta format er ekki læsilegt með þeim tækjum sem til eru hér á landi, en Glasgow-háskóli tók að sér að afrita böndin yfir á SEG-Y staðal, form sem lesa má á Orkustofnun. Þessari vinnu lauk í september 1994, og þá fyrst var hægt að hefja vinnu við þann hluta úrvinnslunnar sem Orkustofnun sá um.

Fyrsta stig vinnslunnar er að "korrelera" líkan hristaramerkisins við gögnin, en þessi aðgerð breytir þessum langa hala af sveiflum í skarpan topp, sem samsvarar einu skoti. Tímafrekur þáttur úrvinnslunnar var að fara yfir gögnin og taka frá gölluð eða vafasöm gögn. Í ljós kom bilun sem virtist valda því að rofinn sem velur rásir til skráningar stóð á sér að hluta þannig merkin skráðust ekki inn á rétta gagnarás, merki frá tilteknum nemahópi skráðust á fleiri en einar rás eða að merki frá tveim eða fleiri nemahópum blönduðust inn á sömu gagnarásina. Vegna þessa var ekki hægt að nota nokkurn hluta

gagnannna í frekari úrvinnslu, þar á meðal fjórar rásirnar næst víbróseis-bílnum fyrir megið að gögnunum. Þetta veldur því að næsta rás við sveiflugjafann er í um 200 m fjarlægð, og því eru upplýsingar um efsta hluta jarðlagastaflans lakari en ella væri.

Í úrvinnslunni var annars beitt tiltölulega einföldum og hefðbundnum aðferðum. Vinnslurunan fyrir stakkinn er gefin með stöðluðum enskum hugtökum í töflu 4, og sambærilegar upplýsingar eru á merkimiða lausu sniðanna. Eins og fyrr segir var bilið milli einstakra cdp-punkta (endurkastspunkta eða "common depth point") hálft bil milli hrististaða, þ.e. 1,25 m, og frumgögnin 30-föld fyrir hvern cdp-punkt. Þetta er óþarflega mikil upplausn miðaða við eiginlega upplausn merkisins og auk þess sem hvert einstakt merki er veikt. Því var ákveðið að flokka gögnin í stærri hópa með 5 m cdp-bil. Þannig verða cdp-hóparnir fjórfalt stærri eða 120-faldir, en í reynd þó nokkru minni vegna þess að grisja verður gögnin.

Tafla 4: *Yfirlit (á ensku) um tölvuvinnslu endurkastsgagna.*

PROCESSED BY:		Orkustofnun, Reykjavík Iceland	
DEMULTIPLEX:		To SEG-Y by University of Glasgov	
CORRELATION:		Individual sweeps correlated.	
EDITING:		Corrupt traces killed	
NMO:		Velocity analysis at 1.5 km intervals.	
MUTE:		Inside and outside.	
STACK:		CDP bins:	5 m
		Nominal fold:	120
Filter:		Low-cut transition:	5-10 Hz
AGC:		Window length:	500 ms
Trace mix:	5 traces		
DISPLAY		Variable area.	
		Horizontal scale:	1:10000

Eftir stökkun eru gögnin síuð þannig að orka með lága tíðni neðan 7 Hz er drepin niður. Engin hátíðnisía var notuð, enda er engin hátíðni í merkinu, og hátíðnisuð kemur ekki fram eftir stökkunina. Orka merkissins virðist liggja mest á bilinu 20-30 Hz, og er það nokkuð óháð dýpi. Merki hristarans á aftur á móti að innihalda orku allt að 80 Hz. Ekki er með öllu ljóst hvort háa tíðnin kemur fram í frum-skráningu, eða hvar eða hvers vegna hún tapast. Engin "deconvolution" var notuð, því merkið þótti ekki svara slíkri vinnslu vel. Ekki var gerð mígrasjón á sniðið, og þykja gögnin of gloppótt eða ójöfn til að tryggja að slík vinnsla virki vel. Að lokum var gerð blöndun ("mix") með þríhyrningsvægi milli 5 rása í sniðinu til að slétta áferðina, og minnkar þetta lárétta upplausn í 10-20 m.

Einna mest var lagt í að hraðagreina endurköstin, til þess að finna rétt hraðaföll fyrir stökkunina, og er í næsta undirkafla greint frekar frá þeim niðurstöðum. Þá var val á afskurði (mute) utan og innan í cdp-hópum metið nákvæmlega, þannig að allar upplýsingar komi fram, en sem minnstar truflanir fylgi með. Nokkrir erfiðleikar sýndu sig í þessu efni, einkum í því að taka varð með heldur slök gögn á tiltölulega fjarlægum rásum svo grynnsti hluti sniðanna kæmi fram. Þetta er vegna þess að rásirnar næst hljóð-

gjafa töpuðust. Óæskileg áhrif þessa sést í teygingu bylgjunnar (óeðlilega lágri sýndartíðni), einkum ofar 200-300 ms í línu 1.

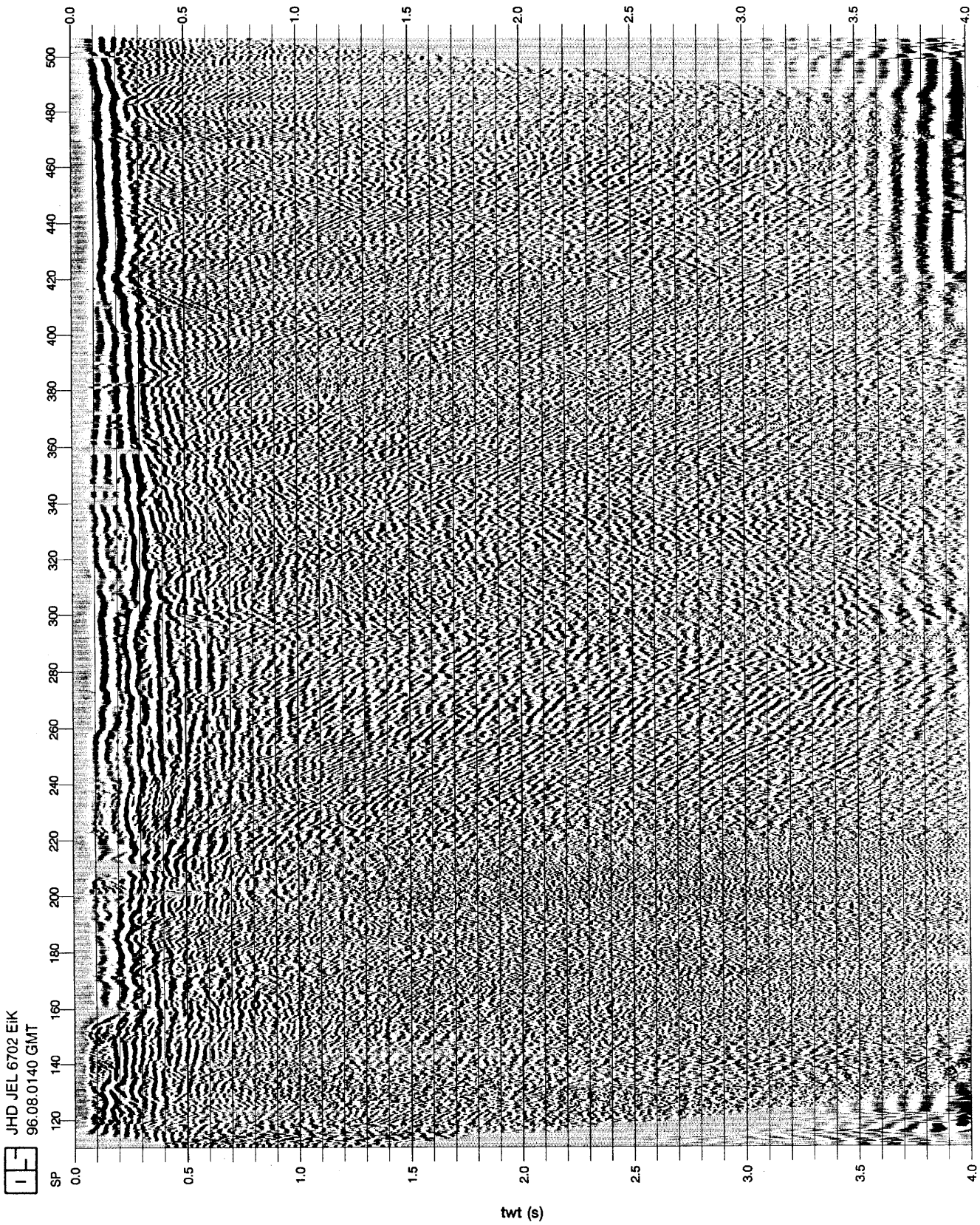
Segja má að tekist hafi að ná úr gögnunum nokkrum upplýsingum frá dýptarbili 0,1-1,0 s, eða þar um bil. Efsti hlutinn er óskýr vegna galla í skráningu, og líklegt er að orku skorti í merkið fyrir dýpri hluta sviðsins, enda var einungis einn víbrator virkur. Þá eru gögnin með ýmsum einkennum sem benda til falinna galla í skráningu, svo ekki er hægt að meta þau sem fyrsta flokks. Þau nægja hins vegar til að meta gildi aðferðarinnar á söndum Öxarfjarðar, og sýna að hún á þar vel við. Myndir 3 og 4 sýna unnin endurskastssnið fyrir línurnar tvær. Þessar myndir gefa hugmynd um stóra drætti í þessum sniðum, en meðfylgjandi laus snið í stærri kvarða (1:10.000 í lengd) og sem sýna einungis efstu 1,7 sekúndurnar eru notuð til nákvæmra túlkana.

3.1 Hraðagreiningar

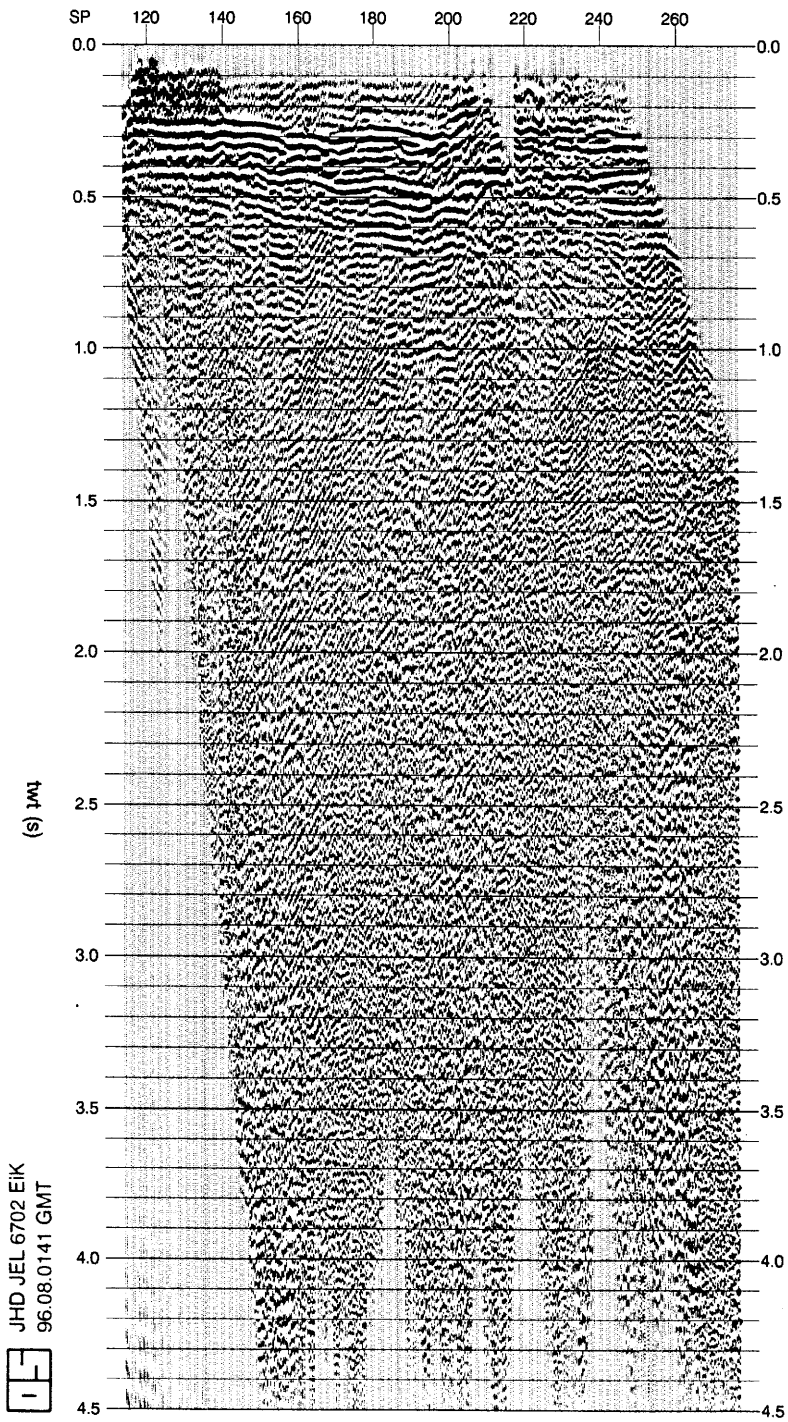
Góð tölvuvinnsla endurkastsmælinga með mörgum rásum er að miklu leyti undir því komin að finna megi þokkalega nákvæmt hraðalíkan, þ.e. hraða sem fall af staðsetningu og dýpi (tíma) í sniðinu. Ef hraðinn er verulega skakkur verður það til þess að nmo-leiðréttingar mistakast og endurköstin "stakkast" ekki. Heppileg hraðaföll má oft leiða út frá sjálfum frumgögnunum en það er undir því komið að einstakir cdp-hópar sýni greinileg endurköst. Gögnin sem hér eru til umfjöllunar eru erfið viðureignar og gefa ein og sér ekki ótvíræðar niðurstöður um hraðasviðið. Samt sem áður má segja að í stórum dráttum hafi fengist hafi nokkuð öruggt líkan, því svo vel vill til að nákvæmar bylgjubrotsmælingar voru áður gerðar á svæðinu, og styðjast má við niðurstöður þeirra til að takmarka mögulegar lausnir. Sovétskir vísindamenn gerðu mælingarnar árið 1989 (sjá umfjöllun í 4. kafla).

Á mynd 5 er línurit sem sýnir dæmigert hraðafall um miðbik línu AX93-1. Svokallaður stökkunarhraði fæst úr hraðagreiningu endurkastsmælinganna, en hann er einskonar veginn meðalhraði frá yfirborði niður á endurkstsflöt, nær jafngildur "rms-hraða". Að þessu gefnu má reikna svokallaðan "bilhraða" sem sýndur er sem tröppufall á línuritinu. Hann er meðalhraði á dýptarbilinu milli tveggja greindra endurkasta, og samsvarar raunverulegum hljóðhraða í berginu. Til samanburðar er sýnt hraðafall úr bylgjubrotsmælingum Rússa úr nágrenninu. Föllin eru mjög sambærileg, enda er endurkastshraðinn valinn með hliðsjón af Rússamælingunum, og neðri hluti hraðafallsins byggir eingöngu á þeim.

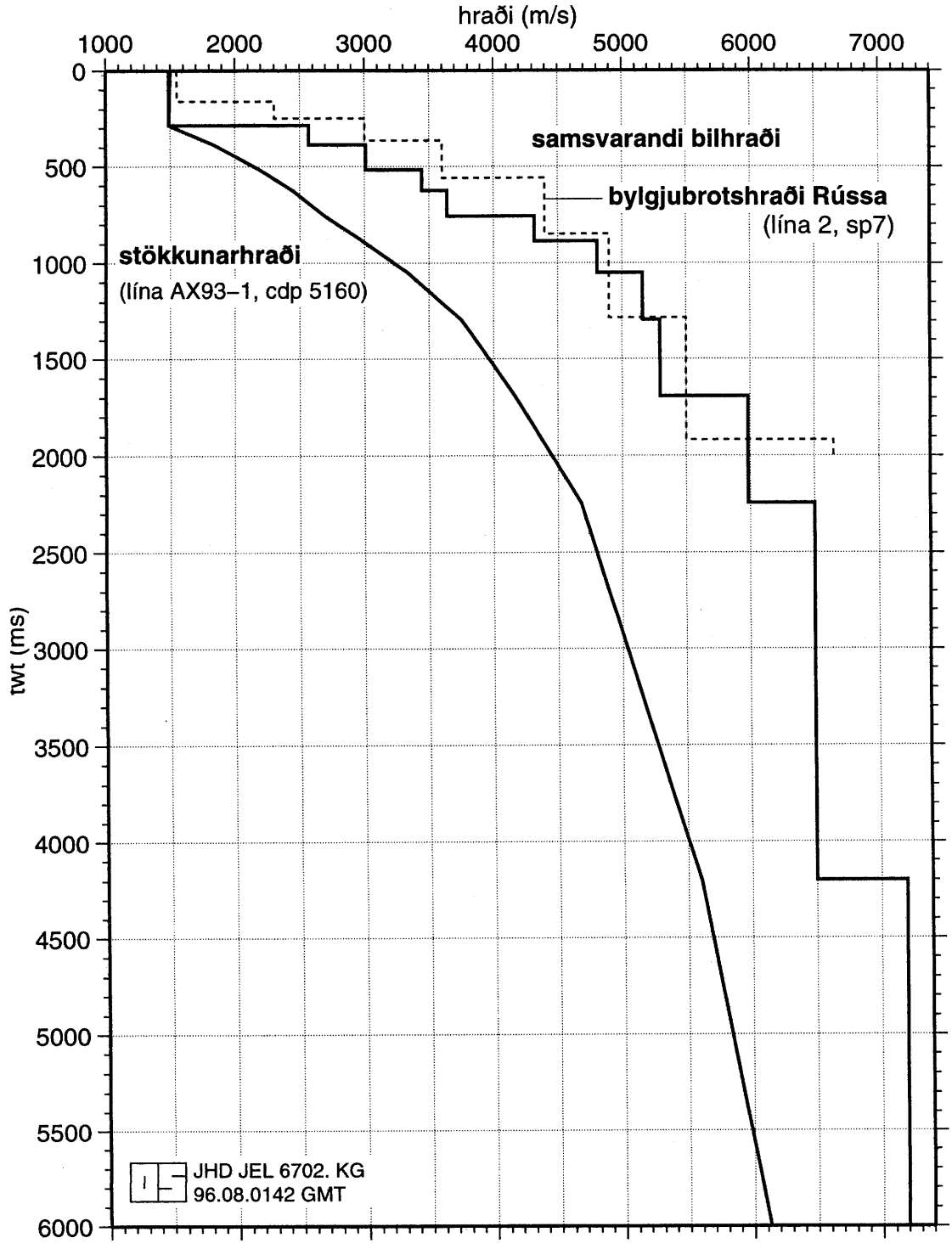
Á myndum 6 og 7 eru sýnd hliðstæð hraðasnið fyrir línur AX93-1 og AX93-2, teiknuð með jafngildislínum. Í lið a) er líkanið fyrir stökkunarhraðann. Þríhyrningsmerkin ofan við sýna staðsetningu hraðagreininganna sem myndin byggir á, en þær voru valdar úr greiningum sem gerðar voru á 220 cdp (275 m) bili eftir línunum. Brotna línan sýnir lauslega hversu djúpt má greina endurköst og hraða, en það er í besta falli niður í 700-900 ms (niður undir 1000 m dýpi). Þar undir er hraðafallið tilbúið, og hefur því ekki sjálfstætt heimildargildi. Einnig verður að ætla að minniháttar breytileiki milli staða í sniðinu sé ekki ætíð marktækur. Liður b) sýnir bilhraða reiknaðan út frá lið a). Í þessu tilviki er litið á stökkunarhraða sem samfellt mjúksveigt fall, hann brúaður og bilhraði reiknaður fyrir stutt skref í endurkaststíma. Bilhraðinn verður á þennan hátt einnig samfellt fall. Í lið c) er þetta sama bilhraðasvið sýnt sem fall af dýpi, en í hraðafallinu sjálfu felast upplýsingar til að umreikna endurkaststíma í dýpi.



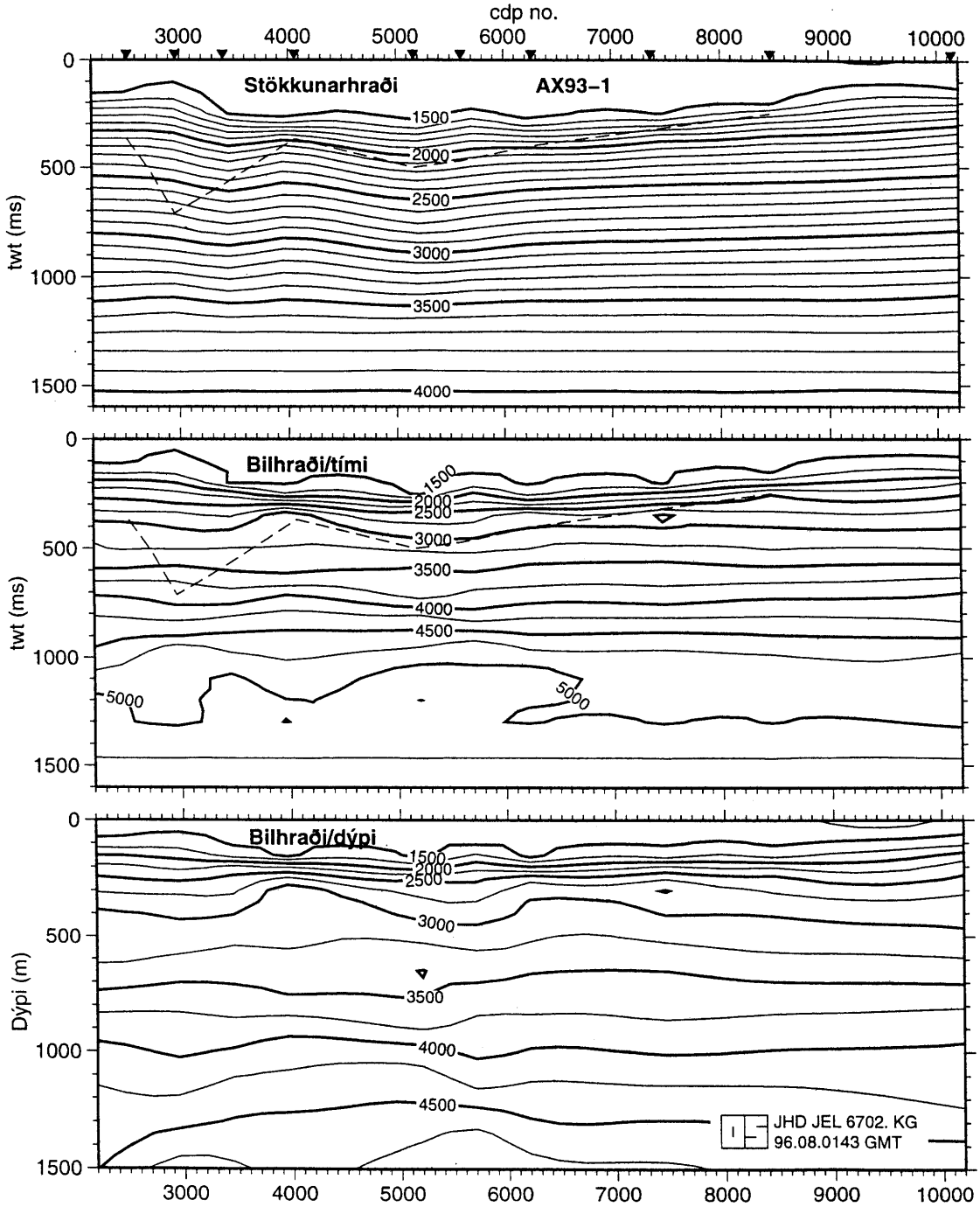
Mynd 3. Unnið (stakkað) endurkastssnið af línu AX93-1.



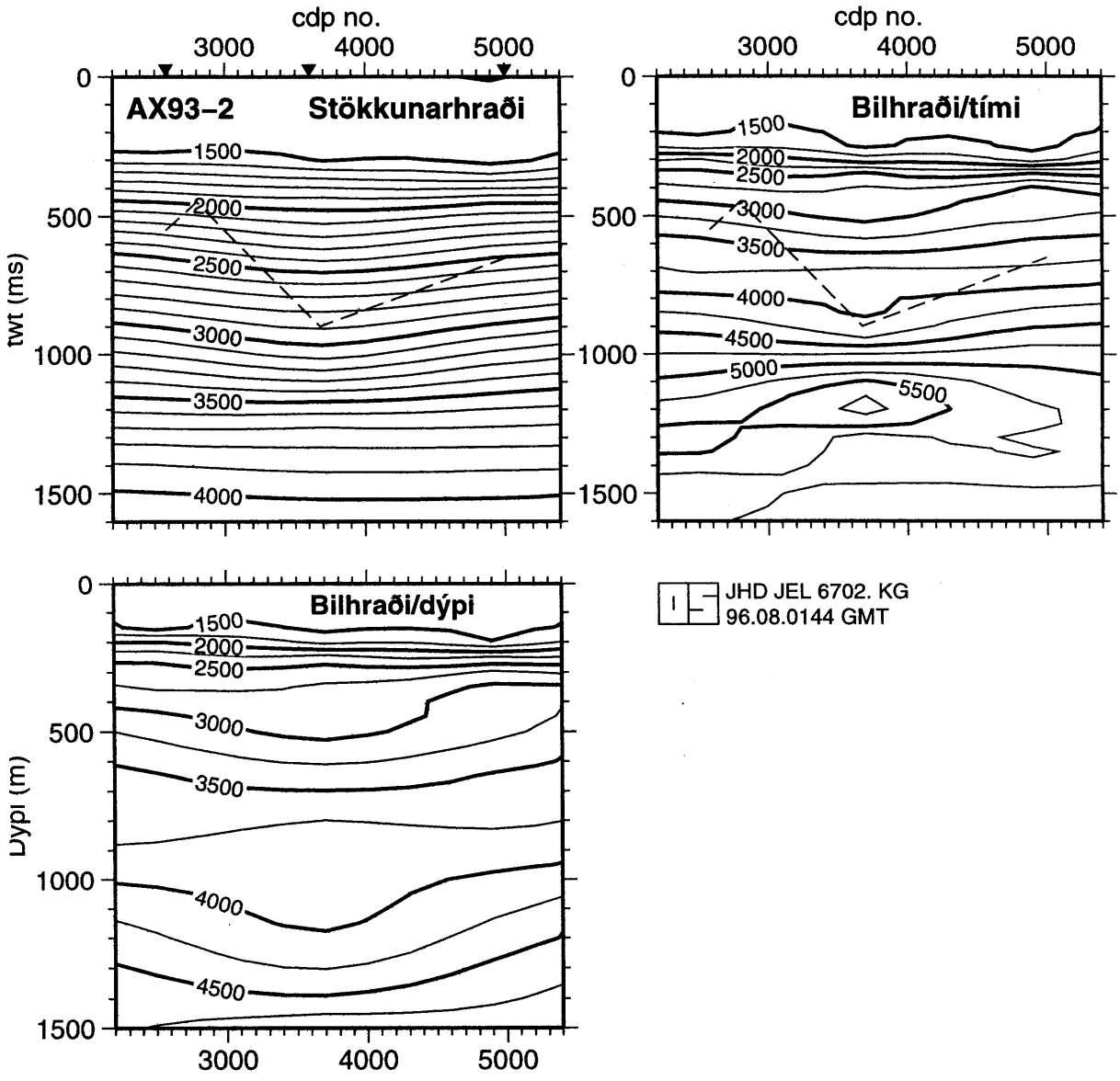
Mynd 4. Unnið (stakkað) endurkastssnið af línu AX93-2.



Mynd 5. Dæmigert hraðafall (stökkunarhraði) úr hraðagreiningum um miðbik á línu AX93-1, og samsvarandi bilhraði reiknaður út frá því. Til samanburðar eru sýnt hraðalíkan úr bylgjubrotsmælingum Rússa í nágrenningu.



Mynd 6. Niðurstöður hraðagreininga á línu AX93-1, á formi sniða með jafngildislínum. Einingar eru metrar á sekúndu. Lárétti ásinn sýnir cdp-númer, sem samsvara 1,25 m í lengd (SP-númer = cdp-númer/20). a) Stökkunarhraði sem fall af endurkaststíma (twt: two-way-time). Staðsetning hraðagreininganna er sýnd með örvum. Tengt er á milli einstakra greininga með mjúksveigðum fleti. Brotna línan sýnir neðri mörk eiginlegra hraðagreininga, en neðan þeirra voru hraðaföllin áætluð. b) Útreiknaður samfelldur bilhraði samkvæmt sviðinu í a), en í c) er sama hraðasviðið teiknað sem fall af reiknuðu dýpi. Bilhraði samsvarar eiginlegum hraða í jarðlögunum.



Mynd 7. Niðurstöður hraðagreininga á línu AX93-2. Sjá texta við Mynd 6.

4. JARÐFRÆÐILEGT YFIRLIT

4.1 Svæðisyfirlit

Láglendið fyrir botni Öxarfjarðar, sem hér er til rannsóknar, einkennist af víðáttumiklum söndum sem eru setframburður Jökulsár á Fjöllum. Þessi setlög hafa fundið legurými í víðum sigdal sem myndar Öxarfjörð og tengir norðurenda eldgosa- og gliðnunarbeltisins á Norðurlandi við Tjörnesbrotabeltið, sem er þverbrotabelti sem tengist til norðvestur við gliðnunarás Kolbeinseyjarhryggjar. Talið er að Tjörnesbrotabeltið hafi myndast þegar jarðskorpugliðnun á norðanverðu landinu færðist frá gosbelti í Húnavatnssýslum, sem dó þá út, yfir á núverandi belti á Norð-austurlandi (Kristján Sæmundsson, 1974; 1978; 1979; 1986). Ætlað er að þetta hafi gerst fyrir um 4-6 Má (milljón árum), og nýrri rannsóknir benda til þess að hærri talan sé nær lagi (Kristján Sæmundsson, 1986). Þá stóðust endar gliðnunarstykkjanna á landinu og norðan þess ekki á, og því myndaðist þverbrotakerfi þar á milli fyrir Norðurlandi. Reyndar er talið að fyrr hafi verið gosbelti á Norðausturlandi, þar sem m.a. Austfjarðabasaltið myndaðist, en óljóst er hvort eða hvernig gliðnun á því belti tengdist norður um.

Ætlað er að eftir hliðrun gosbeltisins hafi sú brotalína fyrst orðið virk, sem nú má greina í framhaldi af Húsavíkurmisgengjunum til vestur milli Flateyjar á Skjálfanda og lands allt fyrir suðurenda Eyjafjarðaráls, og kalla má Flateyjarmisgengið. Þar hefur orðið sniðgengi þannig að jarðskorpuflekinn norðanvið færðist austur á bóginn. Svo varð breyting á fyrir um 1-1,5 Má þegar rekbeltið á Norðurlandi rifnaði áfram til norðurs um Sléttu og Öxarfjörð, og síðan í nokkrum skástígum sprungubeltum úr mynni Öxarfjarðar vestur og norður fyrir Grímsey yfir að Kolbeinseyjarhrygg. Þannig má ætla að hreyfingin um Flateyjarmisgengið hafi staðið í svo sem 5 Má, og hafi öll færsla jarðskorpuflekanna komið þar fram, hefur hliðrunin orðið einir 100 km. Þessi kenning hefur mikil áhrif mögulega jarðskorpugerð undir Öxarfirði, því þótt Húsavíkurmisgengin sjáist nú enda í sprungukerfinu frá Þeistareykjum í útjaðri gosbeltisins á Norð-Austurlandi, má ætla að áður hafi brotalínan gengið austar og þvert fyrir endann á gosbeltinu. Á þeim tíma hefur svæðið sem nú samsvarar Öxarfirði og söndunum verið norðan við þverbrotalínuna og hliðrast austur. Af þessu leiðir að jarðskorpan undir Öxarfirði gæti að grunni til verið mjög gömul, en einnig að líkum umbreytt af brotum og innskotum samfara þeirri gliðnun sem þar hefur orðið síðustu milljón árin. Þessar spurningar eru eitt viðfangsefni þessarar skýrslu.

Tjörnesbrotabeltið einkennist af sigspildum sem ganga í norðlæga stefnu, sem eru einkum Eyjafjarðaráll, Skjálfandadjúp og sigdalurinn í Öxarfirði. Sigdalurinn er 25 km breiður og afmarkast af fjalllendi að austan og vestan en af lágum heiðum að sunnan. Tjörnes er rishryggur sem afmarkar sigdalinn að vestanverðu, og rís í 4-6 stórum stöllum upp í 300-400 m hæð utan til, en í 600 m hæð sunnan til. Í sigstöllunum sést, að tertíer blágrýtislög með þekju af hraunlögum og setlögum frá fyrri hluta ísaldar hafa sigið niður til austurs, undir fjörðinn. Nákvæmur aldur blágrýtislaganna er óviss, en geislavirknisaldur þeirra mælist á bilinu 4-10 Má. Þessar jarðmyndanir eru helsta áþreifanlega vísbendingin um að gömul jarðskorpa frá tertíertíma gæti mögulega legið undir firðinum. Á vestanverðu Tjörnesi eru þykkustu sjávarsetlög á Íslandi sem sjást á þurru landi, og eru líklega allt að 4-5 Má gömul, en þau yngri eru frá ísöld (Jón Eiríksson, 1981). Surtarbrandslög er að finna í setlögunum frá því fyrir ísöld.

Í fjalllendinu austan við Öxarfjörð sést eingöngu móberg og grágrýti frá ísöld (yngra en 3 Má) sem nær út á Melrakkasléttu. Þannig er sýnilegt að framlenging gosbeltisins til norðurs var ekki takmörkuð við Öxarfjörð, en óljóst er hversu mikil gliðnun fylgdi þessari eldvirkni á Sléttu, eða hvort hún hefur tengst við þverbrot í Tjörnesbrotabeltinu.

Þrjú sprungubelti ganga frá eldstöðvakerfum í suðri norður um láglendið í Öxarfirði, og er hvert um 5 km breitt. Beltið sem kennt er við Þeistareyki liggur út vestanvert Kelduhverfi, Kröflubeltið austanvert á miðri sléttunni og Fremrinámabeltið út sveitina austan Jökulsár. Í öllum sprungubeltum eru ummerki um mikla eld- og brotavirkni, en þó virðist eldvirkni í Kröflubeltinu ekki hafa náð norður í Öxarfjörð. Engin eldvirkni er sjáanleg í botni sigdalsins, þ.e á söndunum og utar, en nútímahraun hafa runnið sunnan af heiðum og fram á setfyllinguna.

4.2 Kröfluprungubeltið

Endurkastsmælingarnar, sem skýrsla þessi fjallar um, taka yfir austurjaðar Kröflubeltisins, og er því ástæða til að fjalla nokkuð ýtarlega um það. Þetta svæði virðist einnig vera helsta jarðhitasvæðið og þar hafa mestar rannsóknir verið gerðar. Umbrotahrinur einstakra eldstöðvakerfa ríða gjarnan yfir með 100-150 ára millibili, og þeim fylgir gliðnun á sprungubeltunum (t.d. Kristján Sæmundsson 1978). Umbrot voru síðast á Kröflusprungubeltinu í Kröflueldum 1975-1985 (Axel Björnsson, 1985; Páll Einarsson, 1991). Á norðurhluta beltissins var einkum hreyfing í tveimur hrinum, um áramótin 1975-76 og aftur í janúar 1978. Ummerki á söndunum eftir þessar hrinur voru kortlagðar af Oddi Sigurðssyni. Í fyrra skiptið brotnaði svæði sem nær frá stað um 5 km sunnan við þjóðveg norður undir strönd, en í seinni hrinunni svæði sunnan úr heiði og norður að Bakkahlaupi. Svæðin sköruðust því að þó nokkrum hluta. Lengdarmælt var yfir sprungubeltið og hæðarmælt var eftir þjóðveginum. Samanlögð gliðnun reyndist vera rúmir 4 m en heildarsigið rúmir 2 m (Oddur Sigurðsson, 1980). Grófir drættir sprungukerfisins eru sýndir á myndum 1 og 2, og eru þær upplýsingar sóttar í skýrslu Lúðvíks S. Georgssonar o.fl. (1993), þar sem gefið er yfirlit um athuganir á yfirborðsummerkjum og greint frá síðari athugunum á þeim.

Norðurhluti Kröflusprungubeltisins er um 5 km breið sigdæld sem stefnir N5-10°A. Nyrstu sprungurnar sjást milli Skóga og Ærlækjarsels að austanverðu, en út undir fjörukamb að vestanverðu. Athyglisvert er að vesturjaðar sprungubeltisins er lítið sprunginn og er þar nánast ein röð af sprungum sem er þó ekki samfelld. Hins vegar er austurjaðarinn sums staðar rúmur kílómetri á breidd og er samfellt sprungustykki norður að Ærlækjarseli. Í miðri sigspildunni frá síðustu hrinu má sjá enn eitt sprungustykkið, nærri liggur hjá bænum Hóli. Þau brot hreyfðust ekki í þessum síðustu umbrotum, en gætu hafa markað vesturjaðar sigdalsins í einhverjum hrinum fyrri alda.

Ummerki umbrotanna, sprungurnar og misgengin, bera með sér að hreyfingin sem átt hefur sér stað er hrein gliðnun, og sig á miðhluta sprungubeltisins. Þarna finnast siggengi, sigdældir eða sigdalir (graben) og opnar sprungur. Á söndunum sáust sprungurnar enn merkilega vel, 6-8 árum eftir að þær mynduðust. Í sprungustykkinu í austurjarðri beltisins má finna sigdældir af mismunandi stærð, frá fáum metrum á breidd upp í 300-400 m. Sigstallar voru allt að 4 m, en algengt að finna 0,3-1 m sig. Einstakir sigstallar eru allt að 1,5 km á lengd.

Jarðhita er víða að finna í sveitinni, en einkum í tengslum við sprungubeltin. Öflugustu jarðhitasvæðin eru innan Kröflusprungubeltisins og þar jókst hitinn um skeið á yfirborði eftir umbrotin á árunum 1975-1984. Yfirborðshiti er mestur við Skógalón og þar eru sjóðandi hverir á yfirborði. Einnig er hiti við Skógakíl og nokkru sunnar á miðjum sandi á austurbakka Bakkahlaups. Niðurstöður viðnámsmælinga gefa ákveðið til kynna að á öflugasta jarðhitavirknin sé undir Bakkahlaups-svæðinu (Lúðvík S. Georgsson o.fl., 1993). Lágt viðnám teygir sig upp undir yfirborð, en neðan 300-600 m dýpis mælist aftur hátt viðnám. Þessi viðnámsgerð er er talin einkennandi fyrir háhitasvæði, og er hátt viðnám undir lágu talið tengjast ummyndunarsteindunum klóríti og epidóti. Þetta er vísbending um að jarðhitakerfið hafi á lífsferli sínum náð háum hita, a.m.k. 250°C hita. Efnafræðilegar mælingar á jarðhitavatni benda einnig til að hiti sé hár í jarðhitakerfinu, og jafnvel einnig við Skógalón, en þar er djúpviðnám reyndar lágt.

Mælingar á samfelldri útgeislun jarðskjálftaorku sýna áberandi mikla útgeislun á litlu svæði suðaustantil í háhitasvæðinu við Bakkahlaup, rétt við virk misgengi Kröflusprungubeltisins. Það gæti bent til mikillar jarðhitavirkni þar, varmanáms eða suðu.

Efsti hluti jarðhitakerfisins við Bakkahlaup er í setlögum. Slíkt er einstætt meðal íslenskra háhitasvæða og ber því að gæta varúðar við að yfirfæra reynslu af öðrum háhitasvæðum á það. Líklegt er að varmagjafi háhitasvæðisins sé kólnandi innskot í jarðskorpunni. Þessi varmagjafi glæðist reglulega með nýjum kvikuinnskotum frá Kröflueldstöðinni. Talið er að í síðustu Kröflueldum hafi kvika í tvígang borist norður í Öxarfjörð samfara jarðskjálfta- og umbrotahrinunum (Páll Einarsson, 1991). Í kjölfar þeirra umbrota jókst jarðhitavirkni mikið á svæðinu, en ekki er augljóst hversu mikið það stafar af kvikuinnskotum eða hvort aukin lekt í sprungum sé orsökin.

4.3 Bylgjubrotsmælingar

Sumarið 1987 voru gerðar bylgjubrotsmælingar í Öxarfirði af hópi vísindamanna á vegum Vísindakademíu Sovétríkjanna í samvinnu við Orkustofnun, og hafa niðurstöður einungis verið birtar í skýrslu Orkusstofnunar (Lúðvík S. Georgsson o.fl., 1993, 6. kafli). Mælt var eftir tveimur línum, austur-vestur línu sem nær frá Víkingavatni í vestri að Sandfellshaga í austri. Niðurstöður úr túlkun þessarar línu eru innifaldar í sniðinu á mynd 11 hér aftar. Einnig var mæld norður-suður lína sem nær frá ströndu Öxarfjarðar vestan Skógalóns í norðri að jarðhitasvæðinu við Bakkahlaup í suðri (sjá staðsetningar á mynd 1). Þessar mælingar eru all vandaðar og með mikilli upplausn, því stutt var á milli nema og sprengt var á nokkrum stöðum á hvorri mælilínu. Samt sem áður er gefur þessi aðferð mun grófari upplýsingar um jarðlögin en endurkstsmælingar af þeirri gerð sem greinir frá í þessari skýrslu. Hins vegar sjá þær dýpra, niður á eina 4 km, og hljóðhraðlíkönin í dýpri lögum eru áreiðanlegri.

Niðurstöður mælinganna, studdar túlkun þyngdarmælinga, sýna að berggrunnurinn undir flatlendi Öxarfjarðar er hulinn töluverðum setlögum sem ná frá Tjörnesi í vestri og austur fyrir Brunná Þeistareykjaeldstöðvanna. Þau eru þykkust í sigdældinni sem tengist Kröflusprungubeltinu og virðast einnig þykkna inn í sprungubelti Þeistareykja, en það er ekki eins ljóst þar sem línan nær ekki vestur yfir það belti. Einnig virðast þau þykkna nokkuð í átt til sjávar.

Efsta setlagið er með lágum hraða, um 1,55 km/s, og er túlkað sem ósamlímdur árframburður eða sandur. Það er allt að 300 m þykkt en sums staðar mjög þunnt. Þar

undir eru tvö eða þrjú lög þar sem hraði er á bilinu 2,3-3,6 og fer hækkandi með dýpi. Þessi lög má túlka sem samanlímd setlög, þótt hraðinn gæti einnig átt við lítt ummynduð hraun eða móbergbotn. Botn þeirra nær niður á 600-900 m dýpi. Undir þessum lögum eru að öllum líkindum basalthraunlög, því hraði þar fer vaxandi með dýpi frá 4,4 í 4,9 km/s.

Á Orkustofnun var gerð önnur sjálfstæð tilraun til túlkunar mælinganna (Ingi Ólafsson, 1990). Þar kemur fram að huganlega gæti tiltölulega þunnt lághraðalag verið til staðar á ca. 400 m dýpi á blettum innan Kröflusprungubeltisins, og er ekki óvænt að finna þannig breytilega hraða í margbreytilegum setlagabunka. Þetta lag breytir þó ekki heildarmyndinni, né hefur það afgerandi áhrif á hraðalíkan fyrir vinnslu endurkastsmælinganna í þessari skýrslu.

Milli 2000 og 3000 m dýpis hækkar hraðinn enn í um 5,3-5,5 km/s, og er grynnra á svo háan hljóðhraða í Öxarfirði en víðast í gosbeltinu. Ætla má að hraði sem er um eða yfir 5,0 km/s fylgi epídót ummyndunarbeltinu (Ólafur G. Flóvenz, 1980). Þetta má skýra með því að gömul, rofin og ummynduð basaltlög (væntanlega frá tertíer) séu þar til staðar, en þetta gæti einnig verið merki um að jarðlögin séu mjög ummynduð af háhitavirkni.

4.4 Setlög í borholum

Auk ofangreindra bylgjubrotsmælinga, hafa einnig fengist upplýsingar um setlög úr borholum á söndunum. Þess má þó fyrst geta að endurkastsmælingar úti á firðinum með Sparker-tækjum gáfu til kynna að setlögin væru um 150 m þykk (Axel Björnsson 1975). Af síðari reynslu verður að telja það mögulegt að hér sé einungis um að ræða efsta lausa setlagið, og að heildarþykkt setlaganna sé þar meiri. Mælingar hafa og sýnt að á ytri hluta landgrunnsins norður undan firðinum eru setlög um 2 km þykk, og sýnir það bæði vinnsla Orkustofnunar á endurkastsmælingar bandaríska fyrirtækisins Western Geophysical frá 1972, og nýrri bylgjubrotsmælingar (Sturkell o.fl.,1992; Mochizuki o.fl. 1995). Ekki er hægt að rekja þessi jarðlög til lands á grundvelli fyrirliggjandi gagna.

Boruð var hola árið 1971 við Keldunes í Kelduhverfi (368 m). Jarðlagagreining hennar er ekki ýtarleg, en gaf til kynna að undir 20 m þykkum hraunlögum á yfirborði væri 140 m þykkur laus setlagabunki sem hvíldi á berggrunni úr móbergi, en hraunlög eða harðara berg væri á bilinu frá 257 m dýpi niður í botn í 368 m. Ef miðað er við reynsluna af síðari borunum má ætla að um jarðhitaummynduð setlög sé að ræða en ekki móberg (Lúðvík Georgsson o.fl. 1993).

Við Skógalón hafa verið boraðar fjórar rannsóknaholur. Holur ÆR-1og ÆR-2 voru boraðar sumarið 1987 í 70 m og 102 m dýpi. Hola ÆR-3 var boruð árið eftir og er 322 m djúp og gefur heitt vatn í sjálfrennsli. Loks var hola ÆR-4 (sjá staðsetningu á 2. mynd) boruð 1991 sérstaklega til könnunar á lífrænu jarðgasi, en er jafnframt ágæt jarðhitahola (Magnús Ólafsson o.fl. 1992). Boranirnar leiddu í ljós gerð setlaga þar allt niður á um 450 m dýpi. Efsti hlutinn, niður á 65 m dýpi, er myndaður af framburði Jökulsár á Fjöllum, eða með öðrum orðum laus jarðefni af því tagi sem einkennir sandana. Þar fyrir neðan eru fíngerðari sjávarsetlög með steingervingum, sem bera þess merki allt niður á 140 m dýpi að óseyri hafi verið að byggjast út í Öxarfjörð og stöðugt hafi gynnkað. Þaðan og niður á 210 m dýpi eru setlögin úr ennþá fíngerðari

jarðefnum, eðjulögum og fínsandi. Á bilinu 210-250 m eru um 50-75% setsins úr silti, og á 250-325 m dýpi er setið nær eingöngu úr leirkenndu silti. Talið er að fínkorna setið hafi borist eftir sjávarbotni með eðjustraumum og öðrum botnstraumum og sest til á nokkru dýpi. Kjarnaborað var í holu ÆR-4 frá 325 m dýpi í botn á 450 m. Efstu 5 m borkjarnans eru eðjustraumaset sem ber þess glögg merki að ströndin hafi legið mörgum kílómetrum innar en nú. Fyrstu merki um áhrif jökla í Skógalónsholunni sjást á 350 m dýpi. og því virðist sem setlögin ofan við séu öll yngri en 10 þúsund ára, en þá er talið að jökull hafi hörfað af landinu. Þrjú jökulbergslög sjást síðan á bilinu 365-385 m dýpi, síðan eðjustraumaset myndað framan við óseyri niður á 415 m dýpi. Þá tekur við 5 m þykkt sjávarsetlag sem virðist myndað allfjarri strönd, og loks sjást jökulbergslög í neðsta hluta kjarnans. Þessi lög gætu verið frá fleiri jökulskeiðum en því síðasta, en þó er talið ólíklegt að elsti hluti kjarnans geti verið eldri en nokkur hundruð þúsund ára gamall (Magnús Ólafsson o.fl. 1992).

Boranirnar við Skógalón hafa því sýnt að þar hafa efstu 350 m sigdældarinnar fyllst upp á síðustu tíu þúsund árum eftir, eftir lok ísaldar. Setmyndunarhraði er því um 3,5 m á 100 árum, og hugsanlega er landsigið svipað, sem er ótrúlega há tala. Kröflueldar, 1975-1985, leiddu í ljós að sig af þessu tagi gerist í afmörkuðum umbrotahrinum og nam heildarsig í Kröflusprungubeltinu þá um 2 m í Öxarfirði (Oddur Sigurðsson 1980).

4.5 Jarðhiti og gas

Eftir að borun holu ÆR-1 við Skógalón lauk kom fljótlega í ljós að holan safnaði á sig gasi þegar henni var lokað. Efnagreining á gasi þessu leiddi í ljós að það innihélt lítilsháttar magn af kolvetnum, öðrum en metani, en slíkt gas hafði ekki áður fundist með jarðhitagasi hérlendis. Sama fannst úr holu ÆR-3, og nánari greiningar á gasinu á rannsóknastofu í Bretlandi staðfestu greiningar Orkustofnunar. Frekari túlkun á efnasamsetningu þess benti eindregið til að það væri myndað vegna niðurbrots lífræns efnis. Orkustofnun gerði sérstaka rannsókn í þeim tilgangi að reyna að finna uppruna þess, m.a. með borun ÆR-4, en án árangurs (Magnús Ólafsson o.fl., 1992; einnig ensk útgáfa 1993). Þó er vitað að gas þetta er ættað af meira dýpi en 450 m og er a.m.k 20.000 ára gamalt og trúlega miklu eldra. Gasið myndast annað hvort í surtarbrandslögum eða lífrænu sjávarseti vegna jarðhitans, en upprunabergið skiptir verulegu máli því að mestöll nýtanleg jarðolía hefur myndast úr lífrænum leifum í sjávarseti.

Sem fyrr segir er að finna jarðhita á söndunum, og jarðeðlisfæðilegar mælingar benda til að þar sé háhitakerfi. Ummerki um háhita fundust einnig í dýpstu holunni við Skóga, ÆR-4. Þar bendir tilvist steindanna kvars-wairakít og svo blandlagsleirs, smektíts/klóríts, til að berghiti hafi komist yfir 200°C. Mælingar á vökvabóluhita í kalsíti staðfesta 200-250°C fornhita, en hæsti berghiti í dag er 150°C á 400 m dýpi. Efnahitamælar gefa til kynna að vatn sem streymir inn í holuna á 360-370 m dýpi, sé með 160-190°C djúphita. Einnig sjást vísbendingar um háhitaeinkenni í efnasamsetningu gassins, þar sem CO_2 mælist tæp 8%.

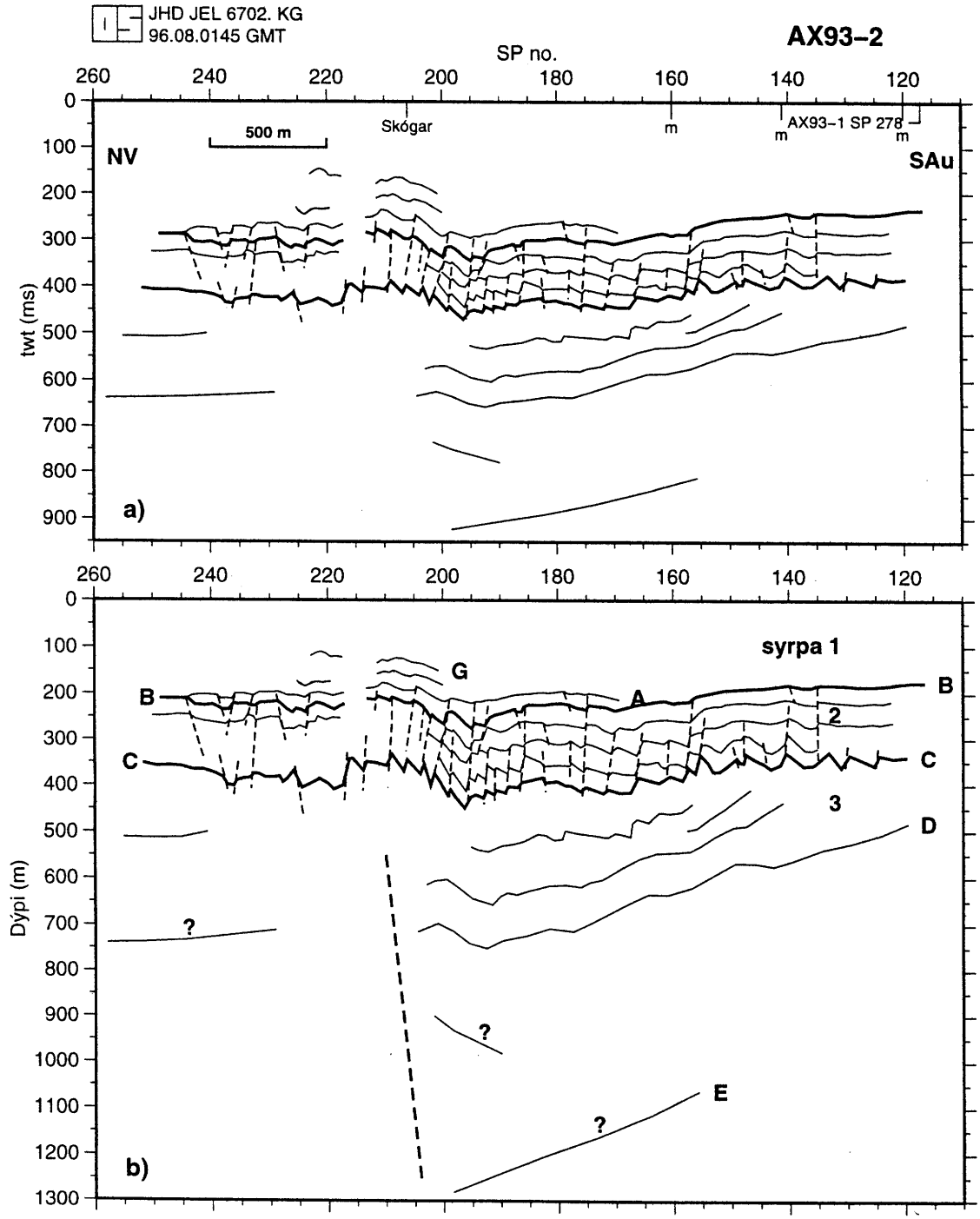
5. TÚLKUN MÆLINGANNA

5.1 Túlkun á endurkastssniðum

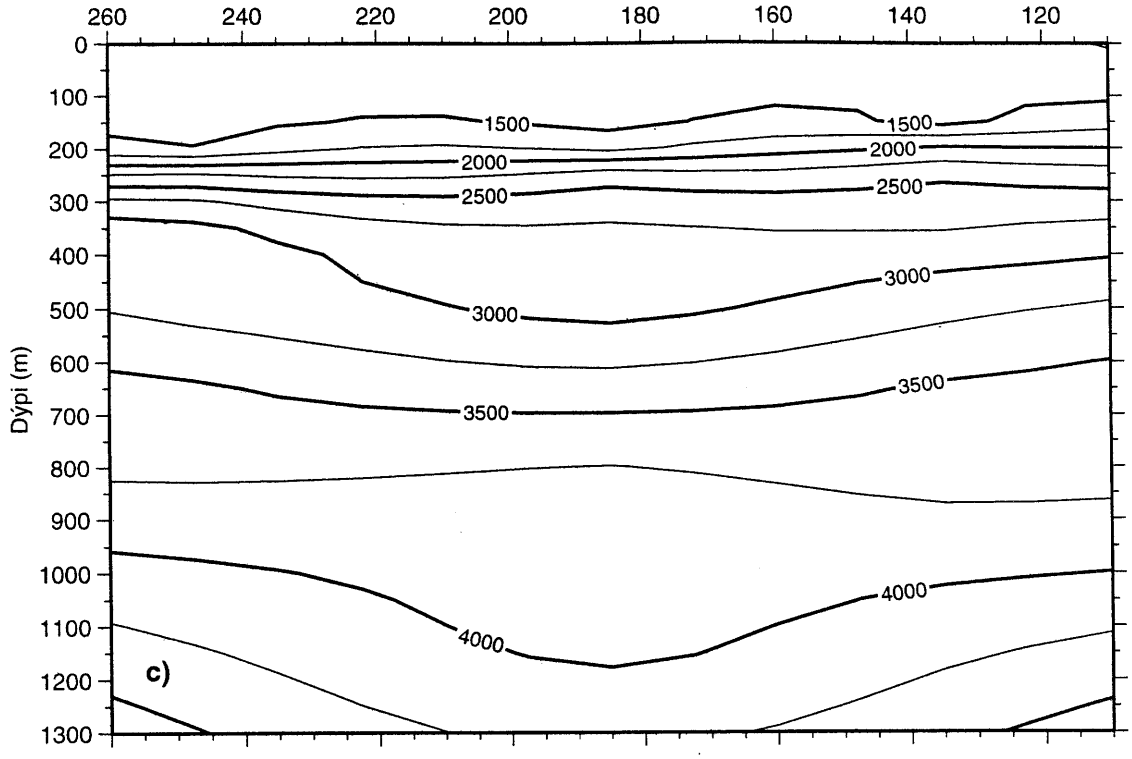
Endurkastssnið sýnir útslög jarðsveiflubylgna sem berast að bylgjunemum eftir skotaugnablikið, og eftir að búið er að fjarlægja eins mikið og unnt er af ýmsum truflunum á það einkum að sýna endurköst frá jarðlagamótum undir línunni. Líkja má því við lóðrétta sneiðmynd af jarðlögum, sem þó er nokkuð afmynduð og teygð þar sem lóðrétti ásinn er tími en ekki dýpi, og endurkaststíminn er háður hraða bylgnanna í lögunum. Á þannig sniðum skiptast á jákvæð og neikvæð útslög sem koma fram sem svart/hvítt röndótt munstur (myndir 3 og 4), og túlkunin felst í því að merkja við og rekja endurköst sem eru líkleg til að samsvara ákveðnum jarðlagaskilum. Út frá hliðrunum í endurkastsmynstrinu má einnig áætla staðsetningu misgengja og hliðrun. Þessi túlkuðu endurköst eru síðan hnituð og dregin upp í sniði sem línuteikning (myndir 8 og 9). Þar sem hraðalíkanið er þekkt, má umreikna endurkaststímana yfir í eiginlegt dýpi, og draga annað snið þar sem lóðrétti ásinn er dýpi í stað tíma í frumgögnunum. Við þessara reikninga eru hér notuð tvívíð hraðasnið sem fengust við hraðagreiningu gagnanna, eins og lýst var í 3. kafla. (Í þessum gögnum samsvarar millisekúndan 0,8-2,0 m dýptarbili). Í umræðunni hér á eftir verður einkum rætt um dýpi, en hafa verður í huga að frumgögnin liggja í tímasniðinu og mögulegar skekkjur í hraða afmynda sniðið. Dýptartölur eru allar miðaðar við yfirborð lands, enda er landhæð óveruleg á línunum, um 10 m syðst en nærri sjávarmáli nyrst.

Aflestrar á endurkaststíma eru misnákvæmir, en ofarlega í sniðinu er afstæð óvissa einungis fáeinar millisekúndur (ms). Hins vegar er ráðandi bylgjulengd í þessum gögnun oftast 30-40 ms og ekki er með öllu ljóst hvar "byrjunarpunktur" liggur í bylgjuforminu. Sé hann rangt valinn má áætla að túlkunin gæti hliðrast reglubundið frá réttu dýpi um 10-30 m, og er það háð hljóðhraða. Oftast hafa fremri kantar í hinu dæmigerða bylgjuformi verið valdir, en það er gjarnan svart-hvítt-svart á sniðunum. Í neðri hluta sniðanna eru endurköst svo óljós að ekki er hægt að halda þessa reglu, og túlkunin þar sýnir fyrst og fremst heildarmynstur endurkastanna. Annar skekkjuvaldur er röng tenging eftir óljósum endurköstum; ef túlkun hleypur til um bylgjulengd getur komið fram skekkja upp á tugi ms.

Línurnar tvær, AX93-1 og AX93-2, eru þannig lagðar að lína 1 liggur nærri strikstefnu brotanna, en lína 2 gengur meira þvert (60°) á sprungustefnu í Kröflureininni og sýnir því skýrara snið sem auðveldara er að túlka. Lýsing á einkennum gagnanna er því einkum grundvölluð á sniðinu af línu 2. Endurkastssniðin fylgja með á lausum blöðum í stórum kvarða, þar sem láréttur kvarði er 1:10.000, sekúndan er 25 cm, og sniðin eru teiknuð niður í 1,7 sekúndu. Þessi snið eru grundvöllur túlkunarinnar. Einnig eru sniðin sýnd í smáum kvarða á myndum 3 og 4 og teiknuð niður í 4 eða 4,5 s til að gefa hugmynd um dýpri hlutann. Ekkert hefur sést í neðri hluta sniðanna sem telja má líklegt sem raunverulegt endurkast, enda er merkið sjálfsagt of veikt til þess að ná því dýpi.



Mynd 8. Túlkun á línu AX93-2. a) Snið með endurkaststíma á lóðréttum ás. b) Sama snið þar sem tími hefur verið með reiknaður í dýpi. Vísað er í fleti merkta með upphafstöfum í texta. Spurningamerki tákna vafasöm endurköst, sem gætu verið fölsk.



Mynd 8 - frh. c) Hljóðhraðasnið (bilhraði) samkvæmt hraðagreiningum.

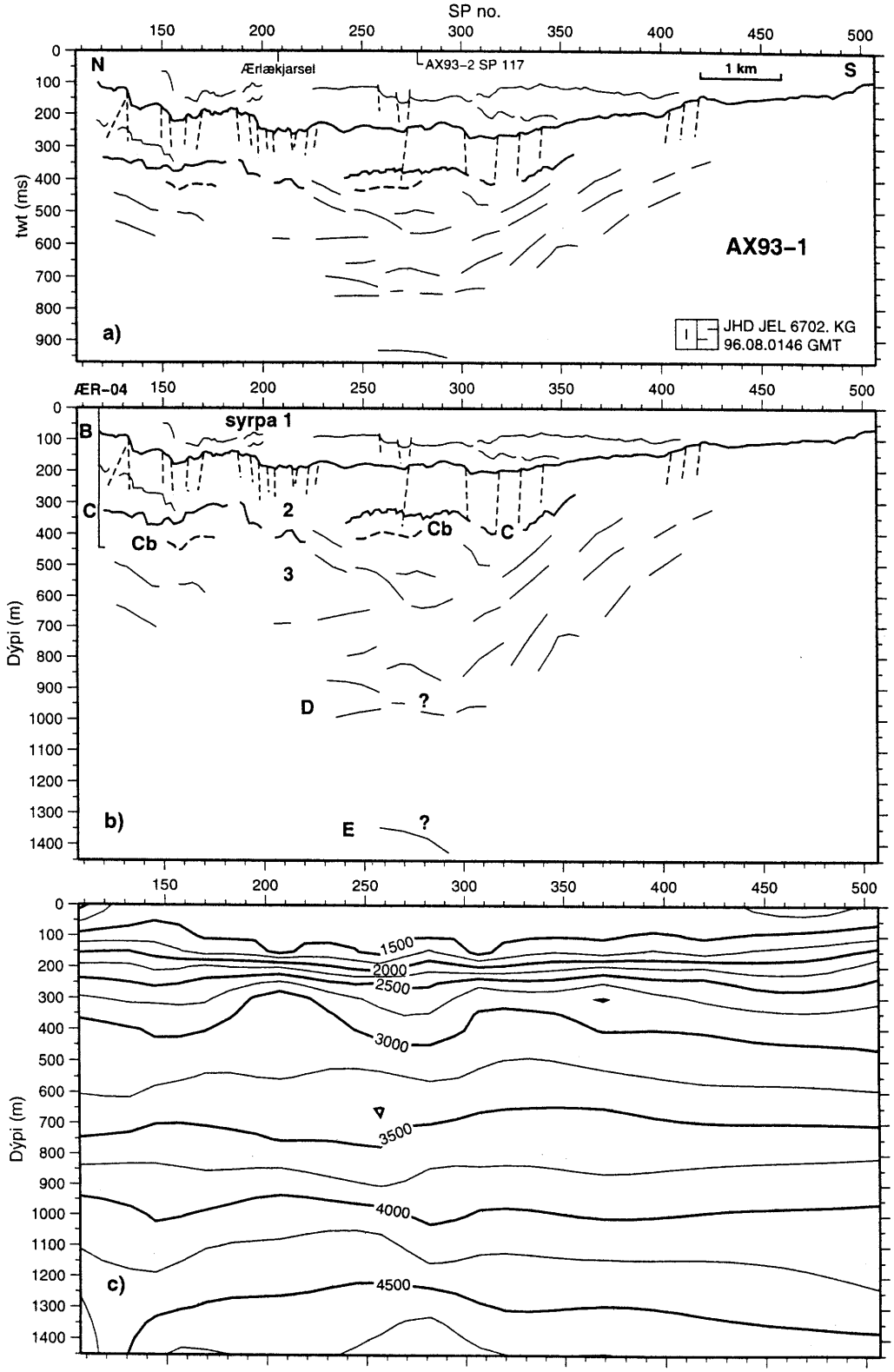
5.1.1 Lína AX93-2

Á mynd 8a er sýnd línuteikning af túlkun sniðsins, þar sem línur eru dregnar í endurköst og reynt er að rekja einstaka fleti. Mynd 8b sýnir sama sniðið þar sem endurkaststími (twt) hefur verið umreiknaður í dýpi. Til samanburðar er einnig hraðalíkan línunnar í mynd 8c. Á lárétta ásinum eru merkt SP-númer (stöðvarhælar á línunni), sem eru með 25 m millibili. Í sniðinu má greina þrjár megineiningar eða lagsyrpur eftir endurkastsmynstrinu:

1. Syrpa 1, efsta syrpan, er með afar veikum innri endurköstum og kemur að mestu fram sem eyða í sniðinu. Þessi eining nær niður á 250-300 ms dýpi. Meðalhljóðhraði niður í gegn um syrpuna mælist 1500-1600 m/s og er mjög jafn.

2. Syrpa 2 þar undir er um 200 ms þykk og sýnir sterk innri endurköst sem koma í samfelldri runu. Toppur þessarar syrpu er mjög greinilegur, og einnig er áberandi endurkast í botninum. Hraðinn er verulega hærri, og mælist að meðaltali um 2400 m/s niður í gegn um lagið. Eins og mynd 8c sýnir er nokkur aukning á hraða með dýpi innan lagsins, frá um 2200 upp í 2700 m/s, en nokkur óvissa er á þessu vegna útjöfnunar í vinnslu hraðafallanna.

3. Þriðja syrpan sýnir að vísu greinileg endurköst, en þau eru dauf og erfitt er að rekja ákveðna fleti. Þó verður að gera ráð fyrir að þessi syrpa sé raunveruleg, því endurkastsmynstrið liggur mislægt við efri flötum og er því ólíklega að um fölsk (margföld) endurköst sé að ræða. Greina má endurköst niður í 750 ms dýpi eða svo, en botninn er ekki markaður með ákveðnu endurkasti. Varla eru nein endurköst greinanleg neðan þesarar syrpu. Hraði er ekki ýkja vel ákvarðaður, en eykst með dýpi úr 3000 m/s upp í 3500-4000 m/s í neðri hluta.



Mynd 9. Túlkun á línu AX93-1. a) Snið með endurkaststíma á lóðréttum ás. b) Sama snið þar sem tími hefur verið með reiknaður í dýpi. Vísað er í fleti merkta með upphafstöfum í texta. Spurningamerki tákna vafasöm endurköst, sem gætu verið fölsk. c) Hljóðhraðasnið (bilhraði) samkvæmt hraðagreiningum.

Syrpa 2 er nokkuð jafnþykk yfir sniðið, á bilinu 160-200 m. Hún inniheldur mörg athygilsverð smáatriði, sem reynt hefur verið að ráða í og túlka eins og gögnin frekast leyfa. Huganlega hefur verið gengið of langt í sumum smáatiðum, en það ætti ekki að breyta helstu niðurstöðum. Í syrpunni má greina fjölda misgengja, og greinilegt missig sem tengist sprungurein Kröfluelstöðvarinnar. Í stórum dráttum er syrpan missigin á þann veg að hún fellur niður vestan við misgengi í SP-157 og er mest sigin í SP-195. Þar vestar rís hún aftur upp og myndar dálitla bungu í SP-210, en lækkar nokkuð aftur norð-vestar á línunni.

Efra borð syrpu 2 er skilgreint sem fyrsti sterki endurkastsflöturinn, og samkvæmt túlkuninni hér er um tvo fleti að ræða sem kallaðir eru A og B á mynd 8b. Flötur B er efstur á suð-austurenda línunnar á 180 m dýpi, en sígur æ neðar vestur frá misgenginu í SP-157 og nær 270 m dýpi í 195. Hann lyftist staðbundið í 205 m í SP-210, stendur lægra þar vestan við en er á 210 m dýpi á vesturendanum. Flötur A sést ekki í austurhluta línunar, en kemur ljós við SP-170. Síðan liggur hann í 20-40 m ofan við B þar til hann virðist renna saman við B í vesturenda línunnar. Á þessu bili myndar A efra borð syrpunnar, og fylgir lögun B í helstu dráttum. Ætla má að sigið hafi verið í gangi meðan lögin lögðust til, og lagið A-B verið fylling í dældina sem þá hefur myndast í B.

Neðra borð syrpunnar (C-flötur) er skilgreint sem nokkuð ákveðið endurkast, og markar það einnig neðri takmörk á runu af sterkum endurköstum sem einkenna syrpuna. Í raun eru þessi endurköst samfelldar sveiflur með ríkjandi bylgjulengd merkisins, 30-40 ms, svo óvarlegt er að líta á hverja sveiflu sem ákveðið lag. Fremur gæti verið að endurköst frá mörgum lagamótum legðust saman til að mynda "interferen"-mynstur. Í þannig mynstri mætti þó hugsanlega greina afstæðar breytingar innan syrpunnar í lóðrétta og lárétta stefnu. Á þeim forsendum er reynt að túlka mynstrið með því að draga línu í hverja sveiflu, og úr því verða 2 eða 3 fletir milli B og C.

Mynstrið sem þessi túlkun leiðir í ljós gefur sterklega til kynna að greina megi fjölda misgengja í syrpunni, og hvernig færslan um þau breytist með dýpi. Neðsti flöturinn (C) er mikið brotinn, en færslan um misgengin minnkar gjarnan er ofar dregur í syrpunni og þau deyja mörg út. Fæst misgengjanna ná upp í fleti B eða A. Almennt má segja að misgengin séu yfirgnæfandi normalmisgengi með halla til vesturs. Brotavirknin hefur staðið yfir þegar flötur C myndaðist og haldist meðan syrpa 2 hlóðst upp, og stendur enn. Austasta greinilega brotið í B-fleti er í SP-135, stórt brot er í 157, en þar vestar eykst brotavirknin og er mest um bunguna vestan við 195. Allmikil brot virðast haldast vestur undir enda línunnar, en breyting virðist verða í brotamynstrinu vestan SP-220.

Misgengin sem mörkuðu austurjaðar sigspildunnar í umbrotahrinum Kröflu 1975-78 komu fram á yfirborði á þessum slóðum (sjá 4. kafla). Þau spanna á sniði okkar bilið SP-115-160, og voru fjölmörg. Þrjú af mestu brotunum eru merkt inn sem "m" á mynd 8a. Sjá má að þau falla ekki á það bil sniðsins sem mest er brotið á dýpi, og sýnir það að ýmis brotakerfi hafa áður verið virk, önnur en þau sem hreyfðust í Kröflueldum. Þó er yfirborðsbrotið í SP-160 yfir því misgengi í syrpu 2 sem afmarkar austurjaðar helstu sigspildunnar, og kemur það það vel heim og saman.

Stallurinn sem myndast í syrpu 2 á milli SP-195 og 210 er einkennilegur, því þótt syrpan í heild lyftist vestan við, virðist syrpan þéttbrotin af misgengjum með vestlægum halla, og á hverju einstöku misgengi er fallið niður vestanvið. Myndun þessarar bungu

eða "flexúru" er tiltölulega ný, og mótar fyrir henni ofar í syrpu 1, á um 120 m dýpi. Það mætti e.t.v. hugsa sér að hér væri um samjöppunareinkenni að ræða, t.d. vegna þess að hreyfing á normalmisgengi með vestlægum halla hafi snúist við og valdið samþjöppun, eða þá að þetta sé staðbundið fyrirbæri í rima á milli hliðraðra skástígra meginbrota.

Á hinn bóginn virðist sú túlkun einfaldari að brotakerfi þetta sé viðbrögð yfirborðslags við djúptliggjandi meginmisgengi með **austlægan halla**, í andstæðu við fyrri tilgátu. Brot þetta er merkt á mynd 8b með brotinni línu, og ýmis óljós einkenni í endurkastsmunstrinu, svo sem hallabreytingar, styðja þessa hugmynd. Brotin með vestlæga hallanum væru þá mótstæð (antithetic) við stóra misgengið, þ.e. stöðvast við það, og sýna afmyndun kílsins ofanvið. Þessa skýringu ætlum við einna líklegasta, og til stuðnings þessu má benda á að stórir misgengisstallar koma fram í B-fleti á línu 1, með fallið austanmegin. Gögn vantar til að rekja saman þessi fyrirbæri.

Syrpa 3 gefur mun daufari endurköst og varasamt er að reyna að rekja einstök misgengi niður í gegn um hana, og veldur því bæði lítil orka í merkinu, suð í gögnunum og takmörkuð upplausn. Þess vegna er ekki einhlítt hvernig rekja skuli eigi einstök endurköst eða lagamót. Líta verður á túlkunina á mynd 8 sem grófa ábendingu um það hvernig "liggi í " lagsyrpunni í stórum dráttum. Botn hennar er hér talinn vera ekki ofar en í fleti D, sem er á 500 m dýpi í austurenda línunnar en hallar til vesturs og er á 750 m dýpi við SP-190. Túlkun þessi er reyndar óviss og ekki er víst að þessi flötur samsvari merkilegum lagamótum enda ekki afgerandi sterkur, en ekki er gott að greina örugg endurköst þar undir. Þykkt syrpunnar eykst á þessu bili frá um 150 m í 300 m. Halli jarðlaganna er meiri en í efri syrpum og virðist vera mislægi þar á milli í fleti C, sem gæti verið rofflötur frá síðasta jökulskeiði. Óvíst er hvernig rekja megi fletina vestan við SP-190, en hugsanlega er þar stallur upp við ofangreint meginmisgengi og lögin virðast liggja nær láréttu þar vestan við.

Syrpa 1 sýnir einungis dauf og illrekjanleg innri endurköst. Því veldur að hraði í þessum lögum er nærri 1500 m/s, og er efnið því lítt samlímt. Þess er þó að gæta að gögnin eru ófullkomin á þessu dýptarbili, og heppilegri mælingar með skarpara merki myndu að líkindum sýna meiri smáatriði. Yfir bungunni á bili SP-200 til 220 koma þó fram nokkuð ákveðin endurköst sem fylgja nokkuð lögun flatar A, en eru allt að 100 m ofar.

5.1.2 Lína AX93-1

Mun erfiðara er að túlka línu 1 en 2. Því veldur að hún liggur nær brotastefnu eða strikstefnu jarðlaga, en þannig línur sýna gjarnan óglögga og tvíræða mynd af jarðlagaskipan. Við það bætist að gæði gagnanna virðast minni á þessari línu, og er það einkum bagalegt í grunnum endurköstum í suðurendanum vegna óeðlilegrar tognunar merkisins í vinnslu ("nmo-glenning" þar sem nær-rásir vantar). Af ofangreindum orsökum þykir ekki gerlegt að túlka þessa línu í sömu smáatriðunum og línu 2, en áhersla er lögð á að tengja saman og staðfesta helstu drættina. Túlkun sniðsins er sýnd á mynd 9 (a,b og c).

Lína AX93-1 sker enda línu AX93-2, og má því tengja hana við túlkaða fleti úr sniði línu 2. Reyndar er skurðurinn við bláenda línunnar þar sem gögnin eru óljós, en samt sem áður má tengja með öryggi fletina B og C. Þannig má sjá sömu þrjár meginsyrpurnar og í línu 2.

Flötur B er efsti greinilegi endurkastsflöturinn, og má rekja hann eftir endilangri línunni, eins og í línu 2, og er hann hér skilgreindur sem skilin milli syrpa 1 og 2. Hugsanleg sundurgreining í fleti A og B er ekki gerleg á þessari línu. Flöturinn er á um 180 m dýpi í skurðpunkti línanna (SP-278), fer dýpst í um 200 m nokkru sunnar, en rís þaðan jafnt og þétt til suð-austurs í 70 m dýpi á línuenda. Frá skurðpunktinum norður að SP-200 er dýpið á bilinu 170-190 m, en þar lyftist flöturinn um stall. Hann hækkar enn við stalla í SP-155 og SP-135, og er nyrst á línunni í tæplega 100 m dýpi.

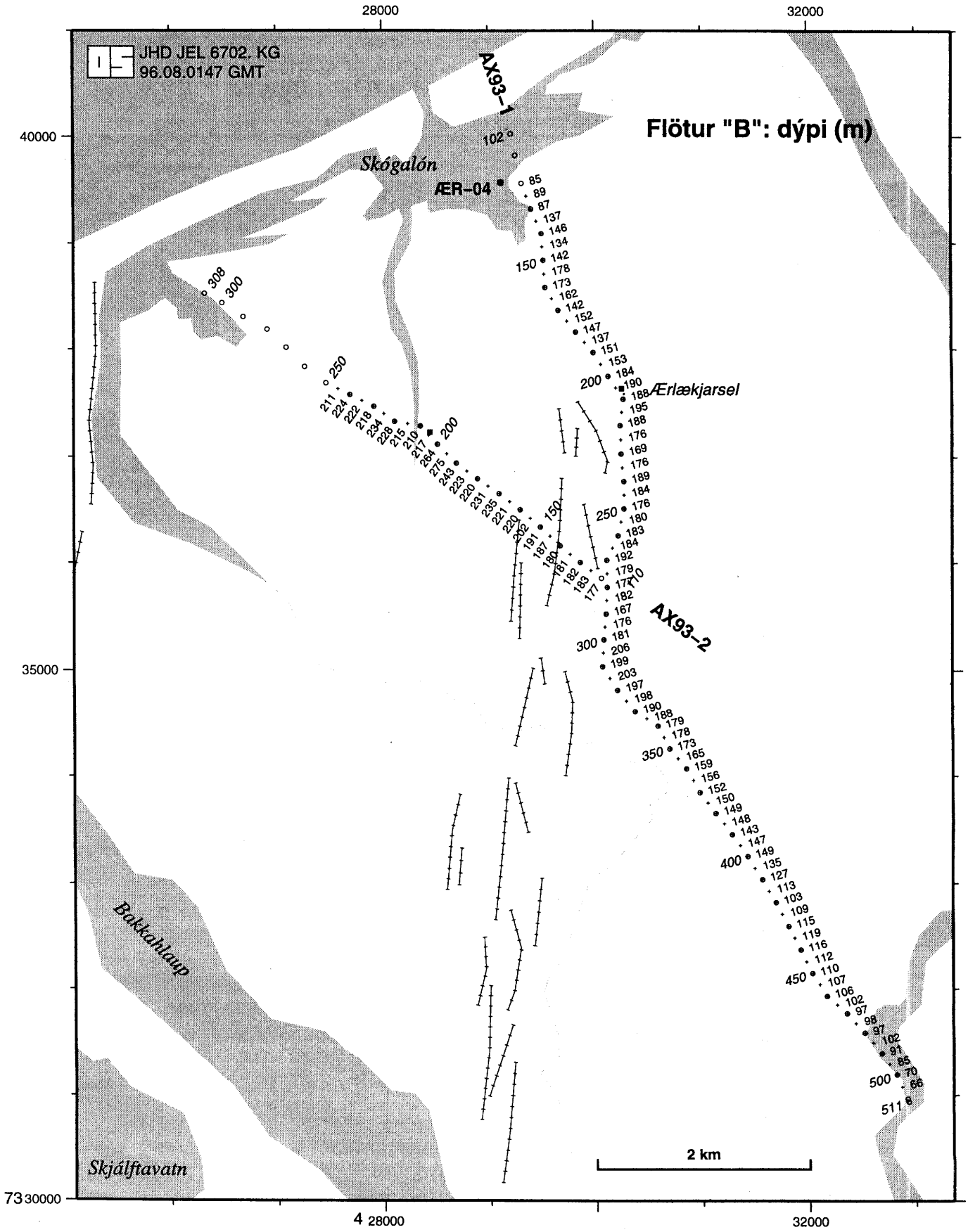
Sjá má fjölda stalla og hnökra á fleti B, og liggur beint við að túlka þá sem misgengi, þótt sjaldnast sé unnt að staðfesta það með samsvarandi hliðrun á öðrum flötum. Misgengi eru fremur lítil í upphallanum á syðri hluta sniðsins, en þó eru stallar niður til vesturs nærri SP-410. Svo virðist sem og sigdalur sé bilinu SP-300 til 340, og er það reyndar rétt austan við sigspilduna frá Kröfluelstöðinni. Hér er önnur ábending um að sprungureinin hafi í gegn um söguna tekið ýmsar myndir eða færst til. Einna þéttust brot virðast vera á bilinu norðan SP-230, og nyrst í línunni virðist vera komið inn á belti normal misgengja með fall til austurs.

Vott af lagskiptingu má sjá í **syrpu 1** ofan við B-flöt. Þessi lög virðast leggjast mislægt utan í upphallann á B-fleti til suð-austurs, og má túlka þau sem fyllingu í sigdæld. Einnig má sjá óljóst að sum misgengin ganga upp í syrpuna.

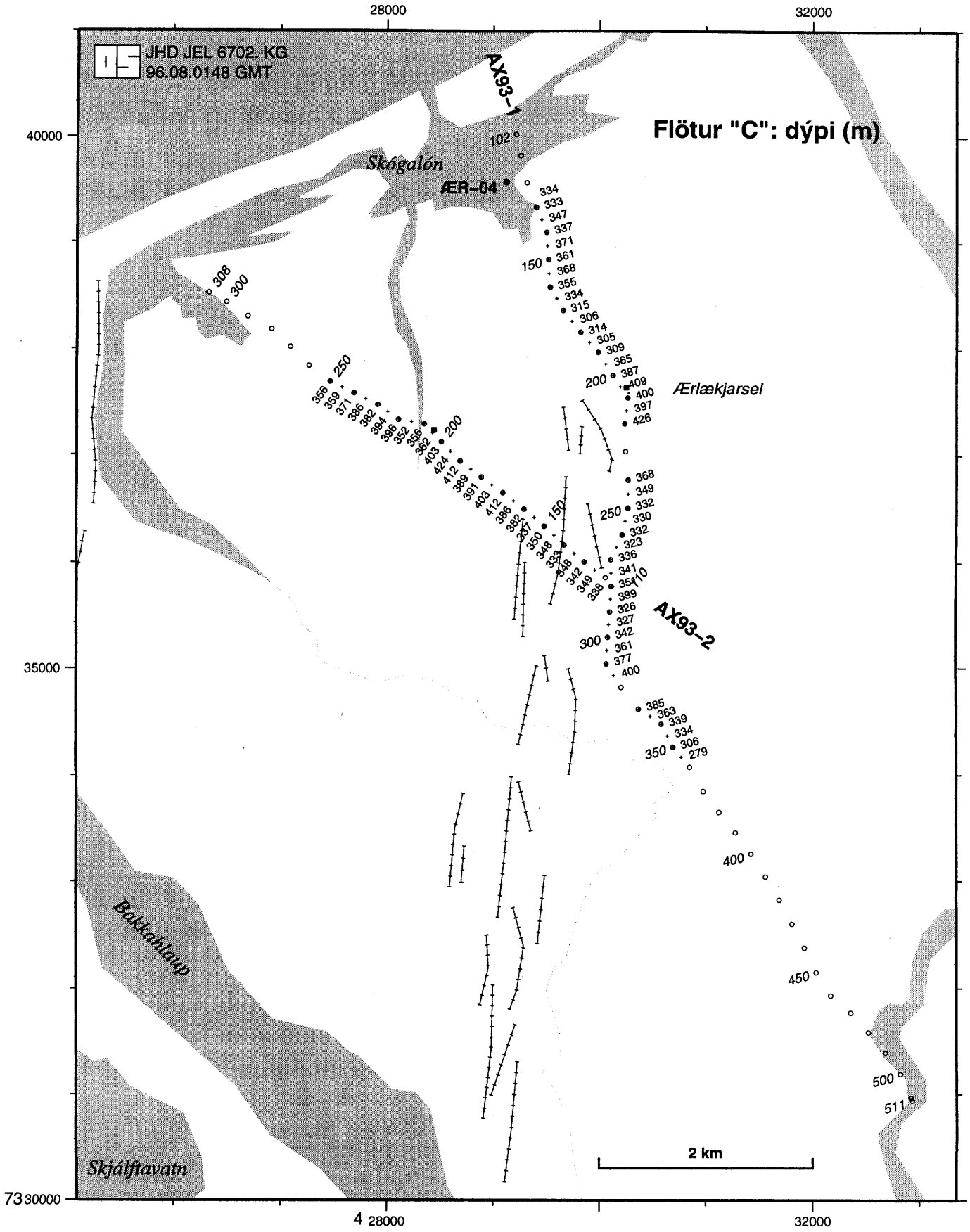
Innri lagskipan í **lagsyrpu 2** (milli B og C) er mun ógreinilegri hér en í línu 2, og hefur ekki verið reynt að túlka hana í sömu smáatriðum. Botn hennar, sem markast af fleti C, er þó all greinilegur um miðbik línunnar þar sem tenging fæst við línu 2. Flötinn má rekja þaðan til suðurs að SP-360, en slitrótt þó. Ekki sést hann sunnar á línunni, e.t.v. vegna ófullnægjandi mæligagna, en þó má giska á að syrpa 2 þynnist þar til suðurs eftir línunni. Rekja má flötinn slitrótt norður á SP-120, og er hann valin sem sterkasta endurkastið á þessu dýptarbili. Þessi túlkun gefur til kynna nokkra misþykkt á syrpu 2, og einkum er einkennilegt að flöturinn fylgir ekki B í stóra misgengisstallinum nyrst. Hugsanlegt er að C-endurkastið sé hér mistúlkað, og að eiginlegur botn syrpunnar liggi ca. 70 m dýpra á köflum, eins og sýnt er með fleti "Cb" á sniðinu.

Greina má **syrpu 3** undir fleti C, og líkleg endurköst sjást niður undir 800-1000 m dýpi undir línunni miðri. Eins og í línu 2 er erfitt að fylgja einstökum endurköstum eða draga þau í smáatriðum. Líta verður á túlkunina á þessri syrpu sem vísbendingu um hvernig "liggi í" jarðlagastaflanum. Áberandi er breyting á halla nærri stað SP-310, þar sem jarðlagahalli þar sunnar er norðlægur (þ.e. í sniði línunnar), en fremur flatur norðan við. Nyrst í línunni má síðan sjá ábendingu um suðlægan halla, og virðist því sigdældin vera dýpst um miðbik línunnar. Þessir drættir endurspegla lögunina á fleti B, og gætu bent til þess að það sigmynstur sem hann sýnir hafi verið virkt lengi. Það er áberandi að þar sem línurnar skerast greinast endurköst niður á 900-1000 m á línu 1, en einungis 500 m á línu 2. Þetta sýnir fyrst og fremst að gögnin eru mjög óljós á þessu dýpi, og endurköstin að hverfa í suðið. Þannig er óvarlegt að túlka þessi endurköst sem ákveðin larðlagaskil, eða fullyrða um dýpt setlagatrogsins á þessum forsendum. Hins vegar sýnir hraðalíkanið, sem styrkt er upplýsingum úr fyrri bylgjubrotsmælingum, að á þessu dýptarbili má búast við að hraunlög taki við.

Dýpi á fleti B og C á báðum línum er sýnt með tölugildum á kortunum á myndum 10 og 11.



Mynd 10. Kort af mælilínum með innfærðu dýpi (metrar) niður á flöt "B".



Mynd 11. Kort af mælilínum með innfærðu dýpi (metrar) niður á flöt "C".

5.2 Samanburður endurkastssniða og borholu ÆR-04

Norðurendi á sniði AX93-1 endar í SP-118 á móts við jarðhitasvæðið á austurbakka Skógalóns, sem hefur verið rannsakað með borholum (sjá 4. kafla). Dýpsta holan og sú sem mest var rannsökuð kallast ÆR-04 (Magnús Ólafsson o.fl. 1992) og er um 150-200 m til vesturs frá mælilínunni, þar um bil sem endurkastssniðið endar. Staðsetning holunnar er merkt inn kortin á myndum 1 og 2, og dýptarbil hennar er fært inn á sniðið á mynd 9b.

Hér gefst tækifæri til að yfirfæra upplýsingar úr borholum á sniðið, og búa til tilgátu um hvaða jarðlög eða lagamót samsvara einstökum endurköstum. Að vísu eru annmarkar á því, og af tvennum toga. Línan er nokkuð fjarri holunum, og eins og sjá má í sniðinu eru möguleikar á verulegum stöllum og dýptarbreytingum vegna misgengja. Þá hafa engar hljóðhraðamælingar eða VSP-mælingar verið gerðar í holunum, svo ekki er gefið hvaða lagamót gefa endurköst og því verður að meta það á óbeinan hátt.

Holum Æ-1 og Æ-3 er lýst í skýrslu eftir Lúðvík S. Georgsson o.fl. (1989). Hola Æ-3 er um 50 m austan við ÆR-04, og er 322 m djúp. Efst er linur sandur niður á 54 m, en þar undir er "misharður sandsteinn". Hola Æ-1 er nokkuð norðan við Æ-3, og er 71 m djúp. Borsvarfi var ekki safnað, en samkvæmt borskýrslum er sandur ofar 55 m dýpis, en þar undir sandsteinn.

Borun holu ÆR-04 fylgdu mestar rannsóknir með tilliti til setlagagerðar og möguleika á olíu- og gasmyndun (Magnús Ólafsson o.fl. 1992). Jarðlagasnið eða súla úr holunni er sýnt á 12. mynd, og er byggð á svarfgreiningu ofan við 325 m dýpi, en þar undir á borkjörnum niður í 440 m dýpi. Efsti 65 m kaflinn er grófkornótt setlög sem eru framburður eða óseyri Jökulsár. Þar undir taka við sandsteinslög sem hafa að líkindum safnast fyrir neðan sjávarmáls, og í þeim finnast sjávarsteingervingar. Við getum gert ráð fyrir að efsta framburðarlagið samsvari efsta lausa laginu í holum 1 og 3, og er það því 54-65 m þykkt í holunum. Það liggur beint við að tengja þetta lag við syrpu 1 í sniði AX93-1. Botn hennar, B-flötur, er á 70-80 m dýpi næst holunum, og mismuninn má skýra með breytingu í dýpi milli staðanna, eða að öðrum kosti með óvissu eða hliðrun í viðmiðun mælinganna.

Eins og fyrr segir má rekja flöt B (eða B/A) samfellt eftir báðum línunum, enda gefur hann sterkt endurkast og samsvarar greinilega snöggri hækkun á hljóðhraða setanna. Hann finnst á dýptarbilinu 70-220 m. Þessi flötur kemur einnig vel fram í eldri bylgjubrotsmælingum, og finnst þar allt frá yfirborði niður undir 300 m dýpi. Báðar mælingaaðferðirnar sýna að hraði í laginu fyrir ofan B er 1500-1600 m/s, sem staðfestir að lagið er ósamlímt, og má það teljast skýring á hinum daufu innri endurköstum í laginu.

Samkvæmt túlkun á borholugögnum gæti B-flötur samsvarað því stigi að fjarðarbotninn hafi orðið svo grunnur að brimið náði að hlaða upp sandrif utar, og innan þess hafi sest fyrir ýmist lónaset eða gróf ármöl (Magnús Ólafssonar o.fl., 1992). Freistandi er því að ætla að flötur B/A hafi allur myndast nokkuð samtímis og verið þá nærri láréttur. Hæðarmismunur á þessum fleti ætti þá að endurspegla mismun í landsigi sem hefur síðan átt sér stað á svæðinu. Í gögnunum nemur mismunurinn a.m.k. 170 m. Þá má álykta að ef sjávarborð hafi verið nærri núverandi stöðu og flöturinn myndast á fárra tuga metra dýpi, hafi eiginlegt sig á svæðinu verið á bilinu frá fáeinum tugum metra upp í svo sem 200 m frá því að flötur B myndaðist.

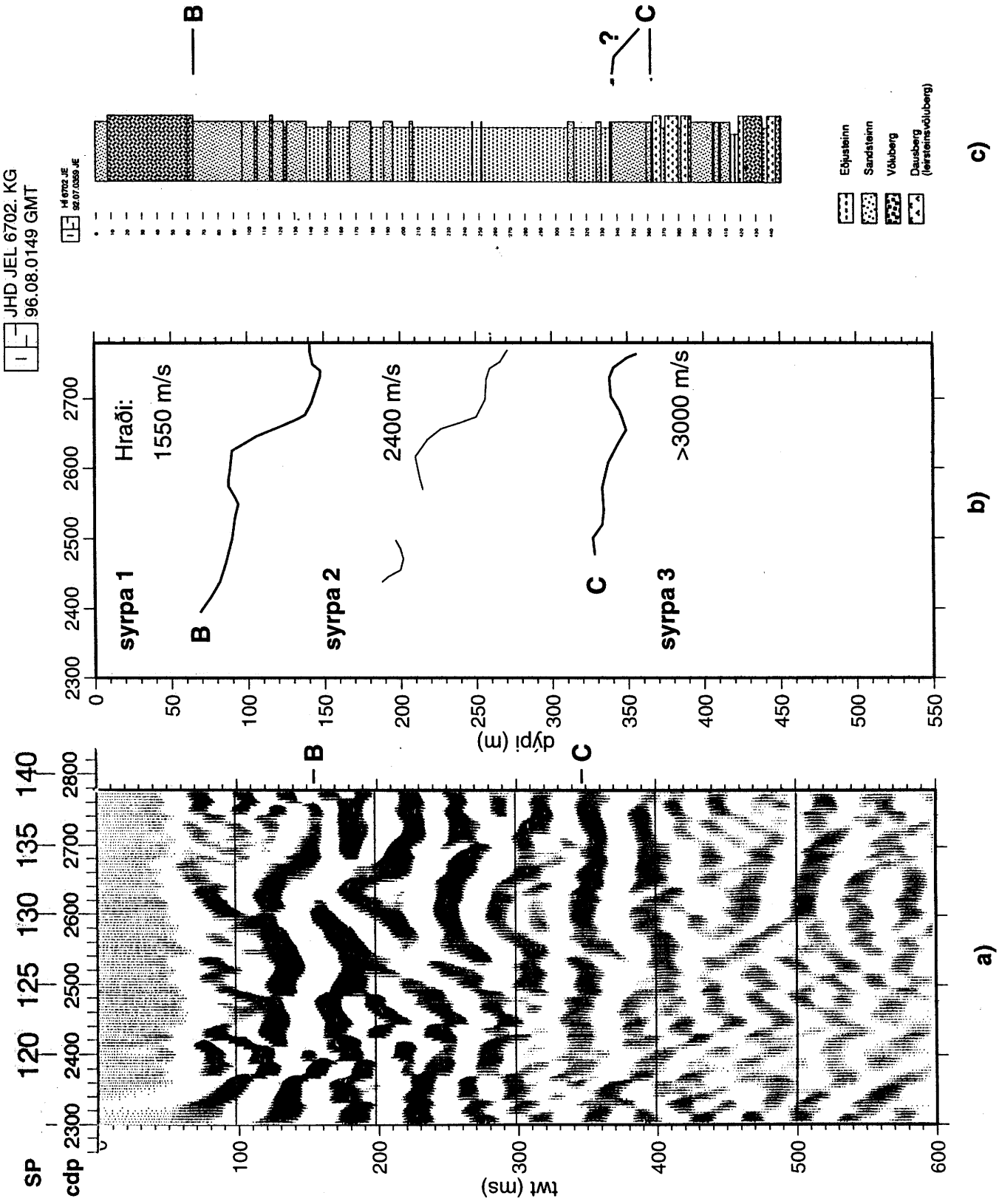
Á 140 m dýpi í holu ÆR-04 koma inn eðjusteinslög sem skiptast á við fínkorna sandsteinslög, og undir 210 m dýpi verður setið enn fínkornaðri eðjusteinn, sem nær allt niður á 337 m dýpi. Á þessum tíma hefur sjávardýpi verið verulegt á þessum slóðum, og lögin lagst til á ysta hluta óseyrahlíðanna. Þar neðar ber meira á grófara seti og er það sandkennt niður á 364 m, þar sem við tekur svokallað dausberg (diamictite). Þannig berg inniheldur grjót í mis-fínkornuðum massa, og hefur það líklega lagst til á sjávarbotni undir íshellu eða framundan undan jökli á síðasta jökulskeiði sem lauk fyrir um 10.000 árum, og má kalla það jökulberg. Álitið er að síðustu áhrif þessa jökulskeiðs hverfi í um 350 m dýpi, og þar ofan við ber fínkornótta setið vitni um áflæði (hærra sjávarborð) í lok jökulskeiðs, sem var fyrir um 10.000 árum. Eftir því sem hlóðst upp í fjörðinn - og e.t.v. hefur land lyfst upp eftir jökulfargið - grynnkaði aftur uns sandar eða óseyrar Jökulsár breiddust yfir sjávarsetið.

Dausbergið nær slitrótt niður í 387 m, en þar fyrir neðan er flókin syrpa sem bendir til örra breytinga á sjávardýpi og myndunarumhverfi. Aftur finnst þunnt dausbergslag á um 440 m dýpi. Þessi syrpa gæti samsvarað tiltölulega löngum tíma og fleiri en einu jökulskeiði, en ekki er ástæða til að ætla að elstu lögin séu meira en nokkur hundruð þúsunda ára gömul.

Endurkastsflötur C er er áætlaður á um 330 m dýpi næst borholunni. Hann mætti annað hvort tengja við botn hins fínkornótta eðjusteins í 337 m dýpi eða toppinn á dausberginu á 364 m dýpi, en af fyrri reynslu má ætla að hraði aukist í jökulberginu. Þótt óvissa í mælingu sé meiri en svo að greina megi á milli, má segja að það skipti ekki meginmáli, því það má telja mjög líklegt að flöturinn marki þá umhverfisbreytingu sem varð í lok síðasta jökulskeiðs, þegar jöklar hurfu og sjávarhæð óx ört, og verður hér gengið út frá þeirri tilgátu. Það er því eðlilegt að finna flötinn um allt svæðið, og ætla má að að hann hafi verið sléttur eða jafnhallandi botn og sé alls staðar jafn gamall, og líkist í þessu fleti B/A.

Flötur C er nú mjög úr lagi færður af misgengjum. Hann er mest megnis á 350 m meðaldýpi, nær dýpst 450 m, en er grynnstur þar sem hann greinist sunnarlega á línu 1, á tæplega 300 m dýpi. Að öllum líkindum grynnkar enn á hann sunnar á línunni, en gögnin eru ófullnægjandi.

Neðstu 100 m holukjarnans, jökulbergið og það sem undir er, má því tengja við efsta hluta endurkastssyrpu 3. Hana má því túlka sem setlög frá síðasta jökulskeiði og að líkindum einnig frá fyrri jökulskeiðum/hlýskeiðum. Af sniðunum má sjá að þessi lög eru misþykk og liggja mislæg við C-fleti, og uppbygging þeirra ber vott um rof og heldur flókna innri gerð sem gæti endurspeglað margendurtekna hringrás setmyndunar og rofs á ísöld. Það er líklegt að hinn óljósi botn syrpu 3 á 700-1000 m dýpi samsvari botni setlaganna. Hann gæti samsvarað upphafi ísaldar, eða jafnvel það sem líklegara er að setlögin hafi byrjað að myndast fyrir svo sem einni milljón árum þegar upphaf jarðskorpugliðnunar á svæðinu skapaði dælu fyrir setlögin.



Mynd 12. Samanburður á jarðlagagreiningu úr borholu ÆR-04 og túlkun á línu AX93-1. a) Bútur úr endurkastssniði. b) Túlkuð lagskipting endurkastsmælinga, ásamt hljóðhraða bergsins. c) Jarðlagasúla borholunnar.

6. SAMANTEKT OG UMRÆÐA

6.1 Niðurstöður um jarðlagagerð

Rannsókn þessari má líkja við dæmigerða olíuleit, þó í smárri mynd sé. Hér er átt við þau vinnubrögð að mæla net endurkastsmælinga, rekja saman endurkastsfleti og tengja við greiningar á jarðlögum í borholum. Líklega er þetta fyrsta rannsókn þessarar tegundar sem gerð hefur verið á landinu. Þessi vinnubrögð hafa reynst öflug við rannsókn setlaga, og segja má að það hafi einnig orðið reyndin í þessu tilviki, þrátt fyrir ýmsa ágalla gagnanna. Það sem ræður hér úrslitum er að setlög eru yfirgnæfandi í efri jarðlögum undir söndum Öxarfjarðar. Reynslan hefur sýnt að storkuberg, hraunlög eða innskot, er miklum mun erfiðara að gegnumlýsa með endurkastsmælingum.

Nefna má helstu takmarkanir mæligagna. Vegna nokkurra tæknilegra ágalla við upptöku, hafa gögnin ekki nægjanlega upplausn fyrir fíngerða drætti lagskiptingar, bylgjulengd er á bilinu 50-150 m. Efsti efsti hluti sniðsins er ógreinilegur, og reyndar draga mælingarnar ekki heldur mjög djúpt vegna lítillar orku í merkinu. Segja má að upplýsingarnar takmarkist við dýptarbilið 70-1000 m þegar best lætur. Þá eru línurnar alltof fáar og dreifðar til þess að kortleggja megi lagamótin, og við sjáum einungis sýnishorn af jarðlagaskipan. Tengsl borholu og mælisniðs eru ekki nægjanlega nákvæm, og æskilegt væri að fylgja kortlagningunni eftir með borunum. Borholumælingar, sem nota mætti til að tengja við endurkastsmælingar (VSP eða sonic log), hafa ekki verið gerðar, enda hafa slíkar aðferðir ekki tíðkast hér á landi. Þessi atriði má hafa í huga við frekari vinnu á þessu sviði.

Túlkun gagnanna bendir til ákveðinnar jarðlagaskipanar, sem kemur heim og saman við jarðlagagerð í borholu ÆR-04 við Skógalón, sem er um 450 m djúp. Sjá má þrjár syrpur jarðlaga sem númeraðar eru 1, 2 og 3 ofan frá. Fyrsta syrpan og efsta er mest grófkornótt set og ósamlímt, eins og hljóðhraðinn 1500-1600 m/s sýnir. Hún er að líkindum framburður Jökulsár og hefur lagst til á söndunum við eða yfir sjávarmáli. Þykkt hennar í mælingunum er á bilinu 70-220 m, er víða um 200 m þykk, en um 55-65 m í borholu við Skógalón.

Önnur syrpan samsvarar sjávarseti sem hefur að líkindum lagst til eftir lok síðasta jökulskeiðs. Þessi syrpa er um víðast 160-200 m þykk, en líklega nokkru þykkri yst á söndunum og þynnist til landsins. Hljóðhraði er að meðaltali um 2400 m/s, en eykst með dýpi, og sýnir þetta að efnið er vel samanlímt. Í borholunni má sjá að þessi setlög eru fínkorna neðan til en verða grófgerðari er ofar dreggur, og endurspeglar það minnkandi sjávardýpi með tíma. Þetta má túlka sem áflæði í lok jökulskeiðs við hækkandi sjávarstöðu og síðan minnkandi dýpi vegna uppfyllingar og e.t.v. landriss. Af þessu leiðir að syrpan hefur byrjað að myndast fyrir um 10 þúsundum ára þegar jöklar hörfuðu, en óljóst er hversu lengi myndun hennar stóð. Þykkt hennar virðist vera mun jafnari en syrpu 1, og af því mætti draga þá ályktun að myndun hennar hafi tekið hlutfallslega minni tíma, þ.e.a.s. ef við gefum okkur að missig lands á svæðinu hafi verið svipað allan tímann frá lokum ísaldar. Á móti þessu mælir að skeljabrot úr efsta hluta sjávarsetlaganna við Skógalón, sem samsvara syrpu 2, var aldursgreint sem 3000 ára (Lúðvík S. Georgsson o.fl., 1989).

Mót annarrar og þriðju syrpan virðast vera nærri því að samsvara toppinum á efsta jökulberginu, eða vera um það bil þar sem síðustu jökulmenjar móta lagstaflann. Innri

lagskipan syrpu 3 er óljóst skilgreind og botn óviss, en "áferð" endurkasta, svo og hjóðhraði bendir til að um vel hörðnuð setlög sé að ræða. Hún nær með vissu niður fyrir 700 m dýpi og dýpstu mögulegu endurköstin eru á 900-1000 m dýpi. Þykkt syrpunnar minnkar að líkindum til suð-austurs. Borholan nær einungis 100 m niður í þessa syrpu, og af henni að dæma samanstendur þessi syrpa að líkindum fyrst og fremst af setlögum frá jökultíma, sjálfsagt frá mörgum hringrásum hlýskeiða og jökulskeiða.

Mælilínurnar liggja yfir austurjaðar sprungubeltisins frá Kröflu, og greina má földa misgengja í sniðunum, einkum í hinni reglulegu lagskiptingu í syrpu 2. Flest brotin greinast sem normalmisgengi með vestlægan halla og fall vestan megin. Þau hafa verið misvirk með tíma, sum deyja út í miðjum stafla en önnur ganga upp svo grunnt sem greina má. Sjá má brotakerfi bæði innan og utan við spungubeltið frá síðustu umbrotum í Kröflu, og því er ljóst að brotavirknin hefur færst til og frá í sögu eldstöðvarkerfisins. Hliðstæð fyrirbæri hafa sést við jarðfræðarannsókn á Kröflueldstöðinni (Kristján Sæmundsson, 1991).

Eitt mesta brotakerfið virðist vera inni í miðju sigbeltinu frá síðustu Kröflueldum, nærri bænum Skógum, og fellur ekki saman við ræmuna í jaðrinum sem þá brotnaði mest. Þótt gögnin séu ekki afdráttarlaus, má helst túlka þetta kerfi þannig að hin mörgu vesturhallandi misgengi séu minni annars-stig brot sem standi andstæð við undirliggjandi meginbrot með austlægum halla. Þess má geta að grunnt í setlögunum má sums staðar greina enn eitt stig slíka brota, þar sem smámisgengi með austlægum halla myndast á móti þeim vestlægu. Þetta brotamynstur er líklega skýringin á hinum mjóu einstöku sigspildum á yfirborði sem komu fram í eystri brotaræmunni í Kröflueldum. Eðlilegt væri að ætla að annað meginbrot með austlægum halla afmerki sprungbeltið að vestan, en þar myndaðist einungis einfaldur misgengisstallur í umbrotunum 1975.

6.2 Endurmat fyrri rannsókna

Í skýrslu Lúðvíks S. Georgsson o.fl. (1993) eru birtar niðurstöður bylgjubrotsmælinga sem rússneskir vísindamenn framkvæmdu í samvinnu við Orkustofnun (sjá 4. kafla). Þessar mælingar gefa 16 km snið þvert yfir sandinn og niður á meira en 4 km dýpi. Á mynd 13 er sýnt snið af svæðinu frá miðju Tjörnesi austur um láglendi Öxarfjarðar, en lagskipan austanvert byggist á bylgjubrotssniðinu (línu 1; milli skotpunkta SP-6 og SP-9). Allnokkur fígerðari atriði má sjá í sniðinu, þó upplausnin jafnist ekki á við endurkastsmælingar. Túlkun á lögunum er nokkuð hliðstæð og í ofangreindri skýrslu, en lagsyrpa 1 samsvarar "sandi", en tvö lög með setlögum með hraða á bilinu 2,4-3,6 km/s samsvara syrpum 2 og 3. Þar undir koma hraunlög, og á 1-1,5 km dýpi er hraðinn orðinn nærri 5 km/s, sem er óvenjulega hár hraði svo grunnt í "gosbelti" og gæti bent til þess að um sé að ræða gömul ummynduð hraunlög frá tertíertíma.

Nokkrar sveiflur eða mishæðir má greina á lagflötum í þessu líkani, og með hliðsjón af niðurstöðum endurkastsmælinganna er freistandi að túlka þær sem afleiðingar misgengja og missigs. Í skýrslu Lúðvíks S. Georgsson o.fl. (1993) er sett fram sú tilgáta að auk tertíerhraunlaga gæti mismikið dýpi á háan hljóðhraða bent til þess að ný epidótmyndun í jarðhitakerfum auki hljóðhraðann, og þar nái hái hraðinn grynnst. Þótt ekki sé rétt að útiloka þessi fyrirbrigði, liggur nú fyrir að missig og snörun misgengisblokka getur einnig komið til greina sem skýring. Því er óvarlegt að gera ráð fyrir að beint

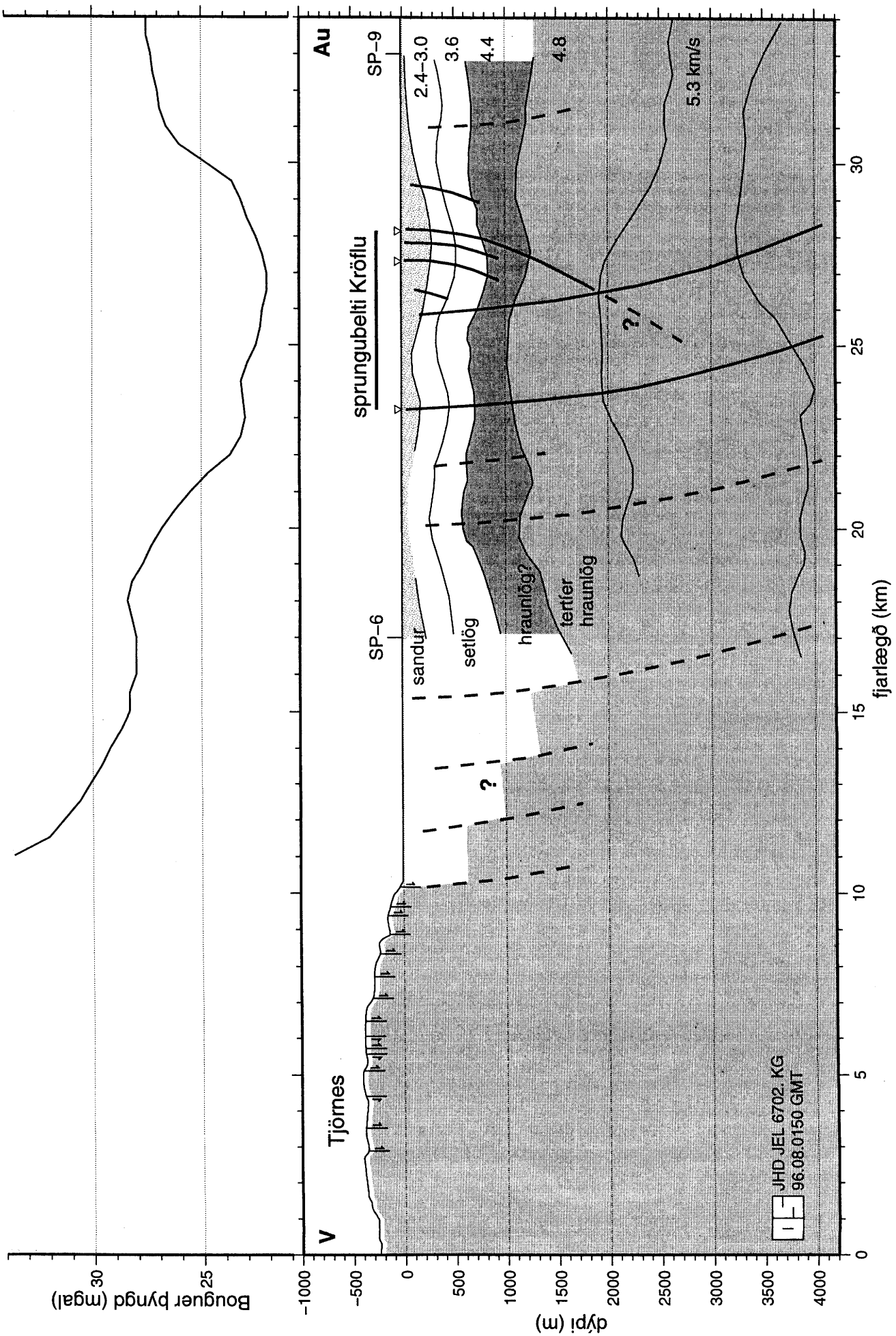
samband sé á milli dýptar á háhraðalögin og ummyndunar vegna jarðhita.

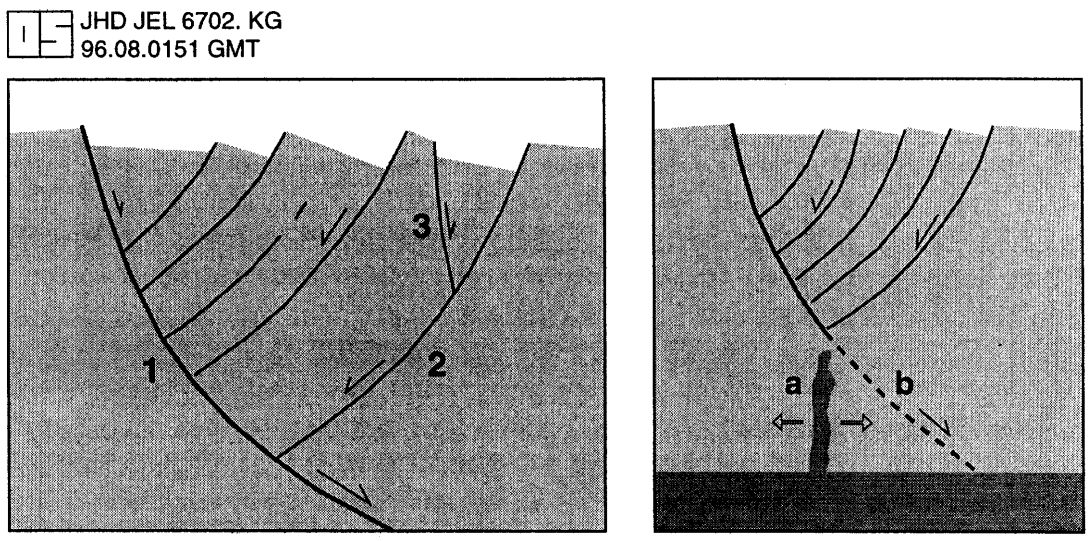
Á Tjörnesi stendur upp úr gamall berggrunnur úr tertíerhraunlögum. Misgengi sem þar má sjá á yfirborði eru merkt á sniðið (samkv. korti Kristjáns Sæmundssonar í handriti). Á austanverðu nesinu er fallið ákveðið niður til austurs, og þessi misgengi hafa sjálfsagt austlægan halla. Samkvæmt túlkun bylgjubrotsmælinganna er líklegt að lög af þessum aldri sé að finna á 1-1,5 km dýpi úti undir sandinum, og því hlýtur þetta misgengjakerfi að ganga inn undir sandinn. Þessi hugsuðu misgengi eru sýnd táknrænt með brotalínum á myndinni.

Sprungubelti Kröflu er merkt á sniðið, og eins og fyrr segir má túlka brotamynstrið á yfirborði og í endurkastssniðum á þann veg að í vesturjaðri og um mitt beltið séu djúpstæð misgengi með austlægum halla, en brotin í austurjaðri beltisins séu grunn "andstæð" brot. Þessi hugmynd er sýnd á sniðinu. Þegar form lagamótanna eru skoðuð í þessu samhengi, virðist sá möguleiki vera fyrir hendi að austurhallandi meginbrot séu ráðandi á öllu sniðinu, og hafa nokkur möguleg brot verið teiknuð á sniðið. Þessi hugmynd gerir því ráð fyrir að djúpt í jarðskorpunni séu austurhallandi sveigmynduð (listrísk) misgengi ráðandi, en í efri jarðlögum beri mest á smáum vesturhallandi misgengjum, sem standi andstætt meginbrotunum og stöðvist við þau.

Þetta hugsaða líkan af brotavirkni í Öxarfirði er mjög hliðstætt því sem einkennir sigdalinn í Eyjafjarðarál, utar og vestar í Tjörnesbrotabeltinu, þar sem fjöldi vesturhallandi misgengja standa andstætt austurhallandi meginmisgengi (Ólafur G. Flóvenz og Karl Gunnarsson, 1991). Ósamhverfa af þessu tagi í tognunar- og sigdölum er einnig mjög algeng í sigdölum meginlandanna. Ef brotamynstur af þessu tagi er ráðandi niður í gegn um jarðskorpuna undir söndunum verður að ætla að gliðnun á þessum slóðum hafi einkum verið á formi tognunar jarðskorpunnar á skásneiddum brotum, og má líta á þetta sem andstæðu gliðnunarlíkansins fyrir Kröflueldstöðvarina, sem byggist einkum á lóðréttum sprungum með innskotum kvikuganga (Páll Einarsson, 1991). Sigið í Öxarfirði vitnar vissulega um þynningu skorpunnar jafnframt gliðnun, og samkvæmt því mætti meta lauslega að það samsvari a.m.k. 5 km tognum yfir sigdalinn, sem slagar hátt upp í þá 10 km gliðnun sem áætla má út frá tilfærslusögu gliðnunarbeltanna.

Hinn möguleikann verður einnig að hafa í huga, að gangainnskot hafa borist úr suðri frá Kröflu inn í neðri hluta jarðskorpunnar, og brotakerfið sem við höfum séð hér sé fyrst og fremst viðbrögð efri hluta jarðskorpunnar. Mynd 14 sýnir á lauslegan hátt þessi tvö mögulegu líkön. Þessi brotakerfi myndu þá að líkindum ganga dýpra niður í skorpuna eftir því sem fjær dregur eldstöðinni. Yfir söndunum er jákvætt segulfrávik sem er í framhaldi af segulfráviki gosbeltisins sunnan við, og eðlilegt er að skýra þetta með því að jarðskorpan sé að verulegu leyti gerð úr nýju innskotsbergi (Leó Kristjánsson o.fl., 1991). Hins vegar er sá möguleiki fyrir hendi að hér sé til staðar um 10 Má gamalt berg frá tíma "Anomaly 5", sem gefur jafnan sterkt jákvætt frávik. Þá er enn fremur hugsanlegt að brotakerfin séu að þróast frá því að vera hrein gliðnunarbrot yfir í innskortavirkni. Hvernig sem því háttar, er ljóst að sá möguleiki er fyrir hendi að tiltölulega gömul og sigin jarðskorpa liggi undir söndunum, og hefur það þýðingu fyrir leit að uppsprettu olíu og gass.


Bouguer þyngd (mgal)
30
25
V
Tjörnes
Au
SP–9
SP–6
sprungubelti Kröflu
2.4–3.0
3.6
4.4
4.8
5.3 km/s
sandur
setlög
hraunlög?
tertíer
hraunlög
?
?
JHD JEL 6702. KG
96.08.0150 GMT
dýpi (m)
−1000
−500
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
3500
4000
0
5
10
15
20
25
30
fjarlægð (km)



Mynd 14. Hugmyndalíkön af brotakerfum í Öxarfirði. a) Sviðið sýnir sveigð misgengi í gegn um skorpuna, og annað og þriðja stigs andstæð misgengi sem skýra m.a. yfirborðseinkenni í austurjaðri sprungnanna frá Kröflueldum. b) Tvennskonar möguleg gliðnun í neðri skorpu, annars vegar með djúpum misgengjum og hins vegar með lóðréttum innskotsgögnum.

Mynd 13. Samansett snið frá Tjörnesi austur um láglendi Öxafjarðar, og uppkast af hugmyndum um hugsanlegu brotakerfi. Jarðlagagerð undir söndunum er byggð á niðurstöðum bylgjubrotsmælinga, og þyngdarprófíll er tekinn úr sömu heimild. (lína 1, SP6-SP9, Lúðvík S. Georgsson o.fl. 1993). Misgengi eru dregnar sem vísbending um hvernig túlka má þessa jarðlagaskipan. Heildregin misgengi eru sett inn með hliðsjón af endurkastsmælingunum og umbrotum í sprungubelti Kröflu, en brotalínur tákna lauslegar hugmyndir um önnur misgengi. Misgengi á yfirborði á Tjörnesi eru lesin af handritskorti Kristjáns Sæmundssonar.

6.3 Leit að jarðhita og gasi

Ekki er við því að búast að finna jarðhita eða gas á beinan hátt með endurkastsmælingum, þótt það komi fyrir að í þeim sjáist sterk endurköst frá gashólfum í jörðinni. Þær leiða fremur í ljós uppbyggingu jarðlaga og misgengi. Ætla má af endurkastsgögnunum að í berggrunninum undir Skógum sé meginmisgengi með austlægan halla. Svipuð brot má einnig sjá nærri jarðhitasvæðinu austan við Skógalón, en mælilínan liggur því miður ekki þvert yfir svæðið. Hugsanlegt er að þessi misgengi séu uppstreymisrás jarðhitans neðan úr jarðskorpunni. Sjá má bungu í sjávarsetlögunum undir Skógum yfir þessu ætlaða misgengi, og er hún þéttbrotin með vesturhallandi smábrotum. Þessa bungu og brot má einnig greina í endurkastsflötum í efstu lagsyrpunni (merktir "G" á 8. mynd), en annars eru endurköst mjög dauf innan syrpunnar. Þessir styrktu endurkastsfletir gætu verið merki um áhrif jarðhita á setlögin, t.d. vegna ummyndunar. Mætti setja fram þá tilgátu að jarðhitauppstreymið norður við Skógalónið teygi sig, eða hafi gert það fyrrum, suður að þessum stað. Dýpi á efra borð sjávarsetlaganna er lítið við Skógalón, og af bylgjubrotsmælingunum má sjá að það er einnig tilfellið undir jarðhitanum suður við Bakkahlaup (Ingi Ólafsson, 1990). Þetta mætti skýra á þann veg að meiriháttar misgengisstallar séu undir þessum stöðum, og jarðhitastreymið komi upp með brotinu og standi upp af hástallinum. Meiri mælingar þyrfti að gera til að staðfesta þessa tilgátu.

Grunnu endurköstin í sandinum ("G") gætu jafnvel stafað af gasi í jarðlögunum, en magnið þyrfti ekki að vera nema sáralítið til að styrkja endurköstin. Þetta er eina mögulega beina vísbendingin um gas eða jarðhita sem lesa má úr gögnunum.

Enn er ósvarað spurningunni um uppruna þess gasvotts sem fundist hefur í borholum við Skógalón. Þó má álykta af þeim gögnum sem nú liggja fyrir að ólíklegt sé að um verulegar olíulindir geti verið að ræða, og vegur þar þyngst að engar ábendingar um lífræn setlög (organic shale) hafa fundist. Er það í samræmi við rannsóknir á öðrum setlögum við strönd Norðurlands, svo sem í Flatey og á Tjörnesi (Karl Gunnarsson o.fl. 1984). Endurkastsmælingarnar benda til þess að sjávarsetlög séu ekki þykk, og boranir niður í gegn um verulegan hluta þeirra hafa sýnt að það berg er snautt. Góðar líkur eru á því að hraunlagastafli frá tertíertíma sé til staðar undir söndum Öxarfjarðar. Ekkert í núverandi gögnum mælir á móti þeirri tilgátu að gasið stafi af upphitun surtarbrandslaga í þessum eldri jarðlagastafla. Surtarbrand gæti einnig verið að finna í tertíersetlögum ofan á hraunastaflanum, svipað og finnst á Tjörnesi, en ekki er líklegt að slík setlög séu þykk í Öxarfirði. Þá er líklegt, að aukning hafi orðið á jarðhita á þessum slóðum síðan gliðnunarbeltið teygði sig norður um fjörðinn og tók að þróast með kvikuinnskotum. Þessi aukni hiti rekur fljótt út kolvetnisgösin, og vegna stöðugrar sprunguvirkni er líklegt að þau sleppi auðveldlega upp í gegn um jarðlögin. Þannig séð er það ekki óeðlilegt að stöðugt verði vart við nokkurn gasvott, og þarf það ekki að tákna uppsafnaðar lindir, hvað þá nýtanlegt magn.

Ef meta á gagnsemi mælinganna, má leggja áherslu á það að nú hefur sannast að auðvelt er að kortleggja í smáatriðum efsta hluta setlagastaflans, sem er frá nútíma (síðustu 10.000 árin) og nær allt að 450 m þykkt. Í þessum jarðlögum má og greina og rekja brot og misgengi, hvar þau hafa verið virk og hversu lengi. Einnig má ráða töluvert í megindrætti brotavirkni í dýpri jarðlögum. Endurkastsmælingar gætu því orðið mjög nytsamt tæki til þess að staðsetja borholur til rannsókna og jarðhitanýtingar.

Reyndar má segja, að vegna setlaganna sé þetta eina jarðhitasvæði landsins sem býður upp á möguleika á svo nákvæmri "gegnumlýsingu" jarðarinnar. Líklega mætti gera mjög einfaldar endurkastsmælingar í þessum tilgangi, sem miðuðust eingöngu við það að fá góða upplausn í efstu lögum. Í árfarvegum, á lónunum og sjó mætti gera fljótlegar margrása-mælingar, samanber aðferðir Orkustofnunar við könnun fyrir jarðgöng í Hvalfirði. Þá er það enn ekki fullkannað hvort endurkastsmælingar með sterkari hljóðgjafa gætu sýnt dýpri jarðlagagerð, og þar með djúp misgengi í neðri hluta jarðskorpunnar.

7. HEIMILDIR

Axel Björnsson, 1975: Mæling setlaga á sjávarbotni. *Tímarit V.F.Í.*, 2, 3-7.

Axel Björnsson, 1985: Dynamics of crustal rifting in NE Iceland. *J. Geophys. Res.*, 90, 10,151-10,162.

Ingi Ólafsson, 1990: *Bylgjubrotsmælingar í Öxarfirði. Niðurstöður einvíðrar túlkunar.* Handrit í vörslu Orkustofnunar.

Jón Eiríksson, 1981. Tjörnes, North Iceland: A bibliographical review of the geological research history. *Jökull*, 30, 1-20.

Karl Gunnarsson, Margrét Kjartansdóttir, Jón Eiríksson og Leifur Símonarson 1984. *Rannsóknarborun í Flatey á Skjálfanda. Hola FL-1.* Orkustofnun, OS-84052/JHD-10.

Kristján Sæmundsson, 1974: Evolution of the axial rift zone in Northern Iceland and the Tjörnes fracture zone. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 495-504.

Kristján Sæmundsson, 1978: Fissure swarmes and central volcanoes of the neovolcanic zone of Iceland. Í Bowes. D.R. og B.E. Leake (ritsj.): *Crustal evolution in northwestern Britain and adjacent regions.* Geol. J., Spec. Issue, 10: 415-432.

Kristján Sæmundsson, 1979: Outline of the geology of Iceland. *Jökull*, 29: 7-28.

Kristján Sæmundsson, 1986: Subaerial volcanism in the western North Atlantic. Í: *The Western North Atlantic Region.*The geology of North America. Vol. M. Peter R. Vogt and Brian E. Tucholke (eds.): 69-86.

Kristján Sæmundsson, 1991: Jarðfræði Kröflukerfisins. Í: Arnþór Garðarsson og Árni Einarsson (ritstjórar), *Náttúra Mývatns*, Hið íslenska náttúrufræðifélag, Reykjavík 1991: 24-95.

Leó Kristjánsson, Geirfinnur Jónsson og Marteinn Sverrisson, 1991. Magnetic surveys of Iceland. *Tectonophysics* 189: 229-247.

Lúðvík S. Georgsson, Guðmundur Ómar Friðleifsson, Magnús Ólafsson, Ómar Sigurðsson og Þórólfur H. Hafstað, 1989: *Skilyrði til fiskeldis í Öxarfirði. Ferskvatn, jarðsjór, jarðhiti og rannsóknaboranir.* Orkstofnun, OS-89041/JHD-08, 61 s.

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

Magnús Ólafsson, Guðmundur Ómar Friðleifsson, Jón Eiríksson, Hilmar Sigvaldason og Halldór Ármannsson, 1992: *Könnun á uppruna gass í Öxarfirði. Borun og mælingar á holu ÆR-04 við Skógalón.* Orkustofnun, OS-92031/JHD-03, 78 s.

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

Mochizuchi, Mashasi, Shuichi Kodaira, Hajime Shiobara, Hideki Shimamura, Bryndís Brandsdóttir, Erik Sturkell, Gunnar Guðmundsson og Ragnar Stefánsson, 1995. Seismicity in the Tjörnes Fracture Zone, off NE-Iceland, derived from an ocean bottom seismographic observation. (japanskt tímarit?), 48: 257-270.

Oddur Sigurðsson, 1980: Surface deformation of the Krafla fissure swarm in two rifting events. *J. Geophys.*, 47, 154-159.

Ólafur G. Flóvenz, 1980: Seismic Structure of the Icelandic Crust Above Layer Three and the Relation Between Body Wave Velocity and the Alteration of the Basaltic Crust. *J. Geophys.*, 47, 211-220.

Ólafur G. Flóvenz og Einar Kjartansson, 1993. *Endurkastsmælingar í Öxarfirði sumarið 1993. Greinargerð um framkvæmd mælinganna.* Greinargerð Jarðhitadeildar Orkustofnunar, ÓGF-EiK-93/07.

Ólafur G. Flóvenz og Karl Gunnarsson, 1991. Seismic crustal structure in Iceland and surrounding area. *Tectonophysics*, 189, 1-17.

Páll Einarsson, 1991: Umbrotin við Kröflu 1975-89. Í: Arnþór Garðarsson og Árni Einarsson (ritstjórar), *Náttúra Mývatns*, Hið íslenska náttúrufræðifélag, Reykjavík 1991: 95-139.

Sturkell Erik, Bryndís Brandsdóttir, Hideki Shimamura and Masashi Mochizuki, 1992. Seismic crustal structure along the Axarfjörður trough at the eastern margin of the Tjörnes Fracture Zone, N-Iceland. *Jökull*, No. 42, 13-23.

SUMMARY IN ENGLISH

The Öxarfjörður region under investigation in this report is a river delta area on the north-eastern coast of Iceland. It is located in a tectonic graben within the northern end of the Neovolcanic Zone that crosses Iceland, and is a segment of the Mid-Atlantic Ridge axis. Just off the north coast the rift zone enters the Tjörnes Fracture Zone where the rifting is shifted about 60 km westwards to join with the submarine Kolbeinsey Ridge spreading axis.

The rift zone in Öxarfjörður is thought to have been active since about 1 Ma BP, as a prograding end of the rifting zone. The general trend of the zone is north-south, but the rifting takes place on *en-echelon* arranged fissure swarms trending slightly east of north. Three active northward trending fissure swarms are presently found in the area, the Þeistareykir, Krafla and Fremrinámur swarms, which are related to corresponding volcanic centers to the south. The 1975-1986 spreading episode in the Krafla volcano affected the fissure swarm in this area, causing up to 2 m subsidence of a 5 km wide zone. A considerable sedimentary graben has formed in Öxarfjörður within the rifting zone, a unique situation on land in Iceland, as lava and other volcanic products normally fill in the gaps created by the spreading process. However, comparable and greater sedimentary thicknesses are found offshore in the T.F.Z., especially in *en-echelon* arranged and rift-related subsidence troughs, and the Öxarfjörður depression can in a sense be considered as the landward and most recent part of that basin complex.

Geothermal surface manifestations are widespread in Öxarfjörður, but the main geothermal fields are within the Krafla fissure swarm, where the highest surface temperatures are found in the Skógalón hot spring area. Resistivity measurements, however, indicate that the most intense activity at depth is farther to the south by the river Bakkahlaup. Extensive chemical and geophysical investigations thus suggest a high-temperature geothermal system in the sedimentary graben. These conditions are unique in Iceland as other known comparable geothermal areas occur in volcanic rocks, and this calls for new exploration methods to be attempted. The interest in the area has also be quickened by the discovery of traces of oil-related (wet) hydrocarbon gases in shallow boreholes.

Here we report on an experiment in applying the multichannel seismic reflection method with a Vibroseis source to the investigation of the geological structure of the Öxarfjörður graben, the first instance of this kind of exploration on land in Iceland. The records contain 60 channels spread over 1500 m, while the source was one Vibroseis truck vibrating at 2.5 m intervals, giving 30-fold data, later binned to nominal 120-fold cdp's. The data were processed in-house at Orkustofnun, the processing providing conventional filtered stacked sections, without migration. The two seismic sections obtained are in total 16 km long, and cover the eastern margin of the Krafla fissure swarm in the outer part of the alluvial plain. However, in a projection across the tectonic structure they represent only some 5 km in section. Reliable reflections are only observed above 1 km depth, while shallow reflections above 70-100 m depth are poorly represented due to corruption of the near-distance traces of the data. Velocity analysis proved to be ambiguous, but with constraints provided by existing refraction studies close by, probable velocity models have been obtained. These models are used to convert the interpreted time sections into depth sections.

Three sedimentary sequences were defined on the basis of reflection character and velocity structure. These sequences have been tied to a geological section obtained from a 450 m deep

borehole (ÆR-04). The uppermost sequence is relatively homogeneous and non-reflective with P-velocity of 1500-1600 m/s, and ranges from 50-220 m in thickness. It is thought to consist of the clastic deposits of the river delta.

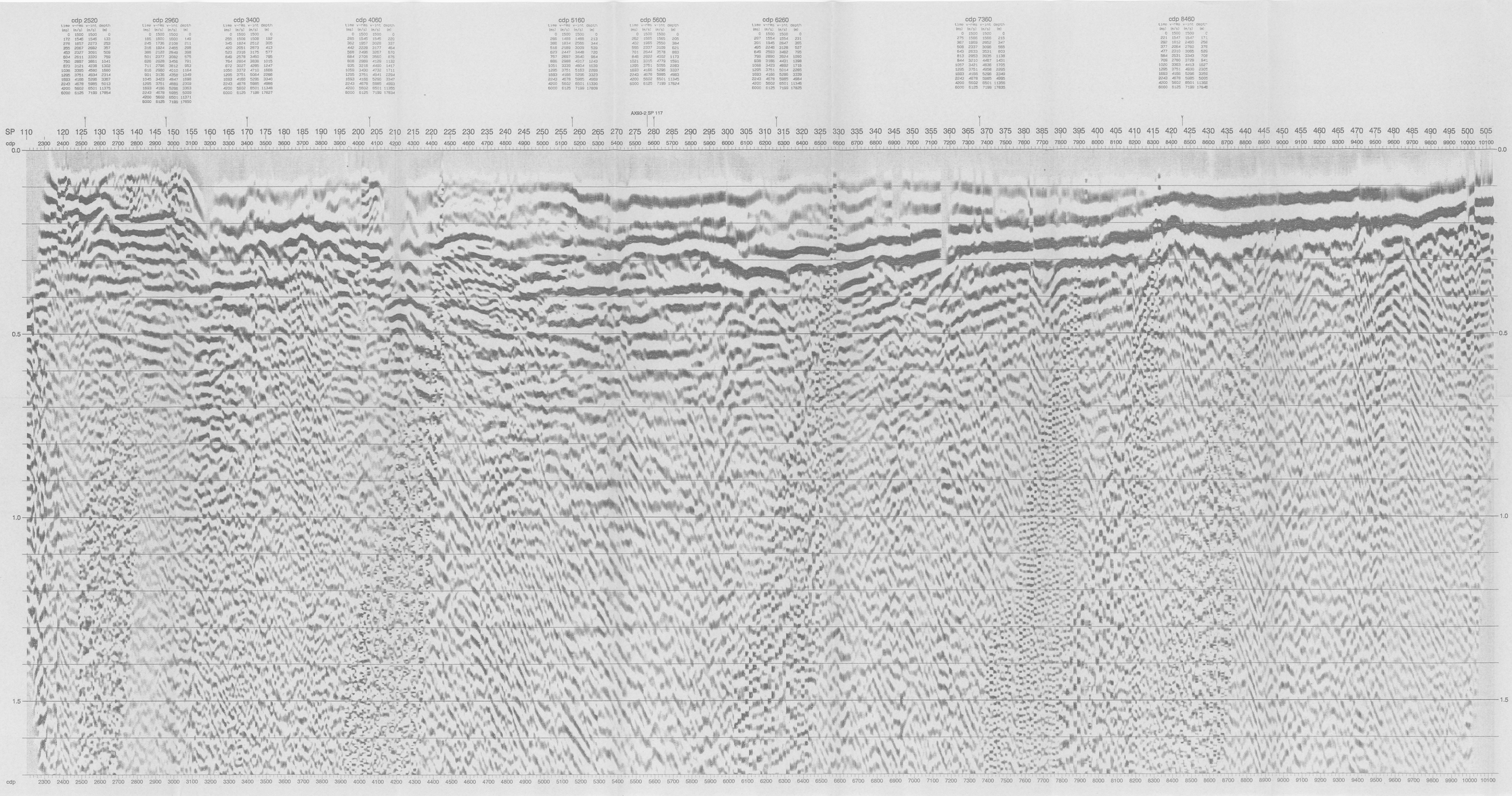
The second sequence consists of marine sediments, increasingly fine-grained with depth. The upper part is estuary sands while the lower parts consist of fine sand and siltstone deposited by turbidity currents. The bottom of the sequence coincides with, or is close to, the uppermost dacite formation from the last glaciation. The formation of this sequence was thus initiated at the transgression of the sea after the last glaciation some 10,000 years ago, and continued during the following shallowing of the fjord due to infill (and possibly some uplift of the land due to rebound after the glaciation). The seismics show clear reflections from the top of this sequence as well as internal stratification. The velocity increases with depth but is about 2400 m/s on average. The bottom of the sequence goes down to a maximum of 400-450 m, and the thickness is commonly 160-200 m but appears to increase seawards.

The internal stratification of the third sequence is not clearly defined in the seismic data, but appears to be sedimentary in character. The top boundary of the sequence appears to be a clear unconformity. The velocity is above 3000 m/s, which indicates that the sediments are well consolidated, and that hydrothermal alteration could play a role. According to the borehole data, which extend 100 m into the sequence, it consists of alternating coarse and fine-grained sediments from more than one glaciation cycle. It is suggested that the sequence is not older than from the initiation of the rifting about 1 Ma ago. The base of this sequence is not clear but is likely at a maximum depth of 700-1000 m. This is supported by independent seismic refraction data that suggest that the basalts become prominent at this depth. Furthermore, high seismic velocities suggest that Tertiary lavas could be reached at 1-2 km depth.

Prominent extensional fault patterns can be seen in the data, most clearly in the marine sequence. The faults are not only coincident with the present activity in the fissure swarm, but are found to be widely distributed at depth, showing that the activity in the fissure swarm has migrated through time. West-dipping faults are dominant in the area, but it is suggested that they form a secondary antithetic system to major east-dipping listric faults, although the data do not show this conclusively. However, judging from available geological and geophysical data, the possibility exists that this asymmetrical fault pattern is dominant in the graben as a whole.

The question of the origin of the detected hydrocarbons is still open, but the available data do not suggest the presence of marine source rocks in any quantities. Exposed sedimentary strata on the western Tjörnes Peninsula ranging in age into Tertiary times contain thin lignite beds. As there is a distinct possibility that relatively old basement rocks are present in the Öxarfjörður area, such lignite beds could provide a possible source for hydrocarbon gas. It is likely that gas formation has been accelerated due to elevated temperatures caused by the recent extension of the rift zone into this area.

The detailed structural information gained by this seismic experiment is unique for geothermal areas in Iceland. The results suggest that the method has a place in the geothermal exploration of this sediment dominated area, while much worse results would be expected in volcanic strata.



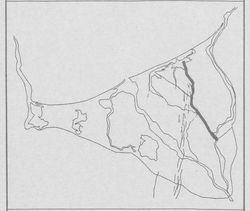
JHD JEL 6702 KG
96.09.0173 T

ÖXARFJÖRÐUR 1993

Filtered Stack

Line AX93-1

N <----------> S



Location map.

ACQUISITION

SHOT BY:	University of Bergen and Orkustofnun
DATE:	July 1993
SOURCE:	One 16 ton vibrator.
	Station spacing (SP): 25 m
	Sweeps per station: 10
	Nominal sweep spacing: 2.5 m
	Sweep duration: 20 s
	Sweep frequency: 10 - 79 Hz
RECORDING SENSORS:	Provided by University of Glasgow
	Group spacing: 25 m
	Geophones per group: 12
RECORDING SYSTEM:	DFS V
	Data channels recorded: 60
	Record length: 25 s
	Sample interval: 4 ms
	Recording format: SEG-C
	Magnetic tape density: 1600 bpi

PROCESSING

PROCESSED BY:	Orkustofnun, Reykjavik Iceland
DEMULTIPLEX:	To SEG-Y by University of Glasgow
CORRELATION:	Individual sweeps correlated.
EDITING:	Corrupt traces killed
NMO:	Velocity analysis at 1.5 km intervals. Interpolated outside.
MUTE:	
STACK:	CDP bins: 5 m
	Nominal fold: 120
Filter:	Low-cut truncation: 5-10 Hz.
	Trace mix: 5 traces.
AGC:	Window length: 500 ms.
DISPLAY	Variable area.
	Horizontal scale: 1:10000

sysplot -v -- 3 ps702.r /tmp/ret -l cdp 20 5 -L 16 -l shot 5 42 SP -L 24 -u cdp 20 5 -L 16 -l cdp 5864 AX93-2 SP 117 -l 13 -v fin.vel -V 12 -S fine.sieb < PIPE
Wed Jun 5 13:02:22 1996

cdp 2580

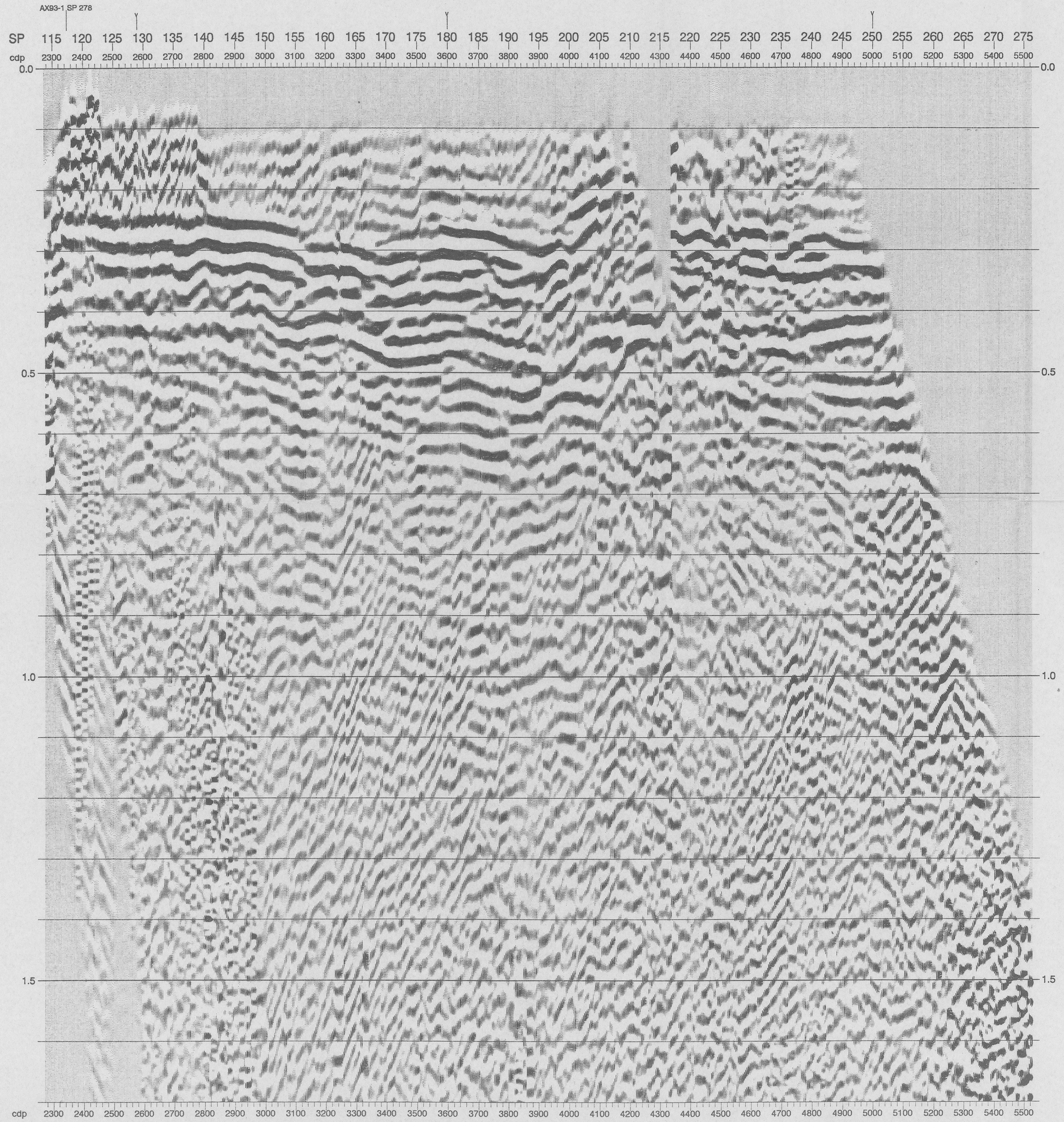
time (ms)	v-rms (m/s)	v-int (m/s)	depth (m)
0	1448	1448	0
262	1448	1448	190
385	1822	2434	339
534	2227	3033	565
689	2593	3578	843
884	2968	4022	1235
1295	3751	5038	2270
1693	4166	5296	3324
2243	4678	5985	4970
4200	5602	6501	11332
6000	6125	7199	17811

cdp 3600

time (ms)	v-rms (m/s)	v-int (m/s)	depth (m)
0	1463	1463	0
289	1463	1463	211
443	1922	2571	409
590	2235	2986	629
773	2658	3706	968
985	3028	4104	1403
1295	3751	5445	2247
1693	4166	5296	3301
2243	4678	5985	4947
4200	5602	6501	11308
6000	6125	7199	17788

cdp 5000

time (ms)	v-rms (m/s)	v-int (m/s)	depth (m)
0	1522	1522	0
325	1522	1522	247
475	2066	2915	466
668	2540	3439	798
848	2910	3994	1157
1295	3751	4970	2268
1693	4166	5296	3322
2243	4678	5985	4968
4200	5602	6501	11329
6000	6125	7199	17809



JHD JEL 6702 KG
96.09.0174 T

ÖXARFJÖRÐUR 1993

Filtered Stack

Line AX93-2

SA <----------> NW

Location map.

ACQUISITION

SHOT BY:	University of Bergen and Orkustofnun	
DATE:	July 1993	
SOURCE:	One 16 ton vibrator.	
	Station spacing (SP):	25 m
	Sweeps per station:	10
	Nominal sweep spacing:	2.5 m
	Sweep duration:	20 s
	Sweep frequency:	10 - 79 Hz
RECORDING SENSORS:	Provided by University of Glagsgov	
	Group spacing:	25 m
	Geophones per group:	12
RECORDING SYSTEM:	DFS V	
	Data channels recorded:	60
	Record length:	25 s
	Sample interval:	4 ms.
	Recording format:	SEG-C
	Magnetic tape density:	1600 bpi

PROCESSING

PROCESSED BY:	Orkustofnun, Reykjavík Iceland	
DEMULTIPLEX:	To SEG-Y by University of Glasgov	
CORRELATION:	Individual sweeps correlated.	
EDITING:	Corrupt traces killed	
NMO:	Velocity analysis at 1.5 km intervals.	
MUTE:	Inside and outside.	
STACK:	CDP bins:	5 m
	Nominal fold:	120
Filter:	Low-cut transition:	5-10 Hz.
	Trace mix:	5 traces.
AGC:	Window length:	500 ms.
DISPLAY	Variable area.	
	Horisontal scale:	1:10000

syvplot -w -x 3.93700 -d finm.vtek -1 cdp 20 5 -L 16 -1 shot 5 -E SP -L 24 -u cdp 20 5 -L 16 -v ../ax2_kg_high.ve1 -V 12 -i cdp 2348 AX93-1 SP 278 -I 13 -S finm.side1 < PIPE
kg Tue Jun 4 13:46:55 1996