



ORKUSTOFNUN
Jarðhitadeild

**JARÐSVEIFLUMÆLINGAR
Á HÖFUÐBORGARSVÆÐINU 1976
Dýpi á lag 3**

Ólafur G. Flóvenz

OS79039/JHD17

Reykjavík, september 1979

JARÐSVEIFLUMÆLINGAR
Á HÖFUÐBORGARSVÆÐINU 1976
Dýpi á lag 3

Ólafur G. Flóvenz

OS79039/JHD17
Reykjavík, september 1979

ÁGRIP

Jarðsveiflumælingar þessar spanna svæðið milli Álftaness, Stíflisdalsvatns, Esju og gamla Þingvallavegarins.

P-bylgjuhraðinn er ákvarðaður sem fall af dýpi. Hann er 3,0-3,3 km/s þar sem móberg eða grágrýti er á yfirborði en 4,0 km/s í gabbróinnskotinu í Þverfelli. Hraðinn vex síðan samfelldt með dýpi allt niður að lagi 3, þar sem hann tekur nánast fast gildi, 6,5 km/s. Lag 3 myndar neðri hluta jarðskorpunnar á Íslandi og er talið þétt og óvatnsgengt. Dýpið á það gefur því hugmynd um hversu djúpt má búast við að hægt sé að vinna heitt vatn. Það er kortlagt í þessum mælingum og reynist liggja á 2,0-4,6 km dýpi. Grynnt er á lagið í megineldstöðvunum, en almennt virðist dýpið vaxa til suðurs.

Þá koma fram lághraðalög í grennd vinnslusvæða Hitaveitu Reykjavíkur í Mosfellssveit. Svára þau til móbergsmýndana milli basaltlaga.

Tvær gamlar, rofnar megineldstöðvar eru á svæðinu, Stardalseldstöðin og Kjalarneseldstöðin. Hraðinn reynist vaxa mun örvar með dýpi innan eldstöðvanna en utan og endurspeglar þannig meiri innskotapéttleika og ummyndun innan eldstöðvanna.

Þá kemur fram að bylgjuhraðinn virðist mjög stefnuháður þar sem móberg er í jörðu í einhverjum mæli. Viðhlítandi skýring hefur ekki fundist. Þó er hugsanlegt að um sé að ræða áhrif innskota í móberginu.

EFNISYFIRLIT

	Bl.s.
ÁGRIP	3
EFNISYFIRLIT	5
SKRÁ YFIR MYNDIR	6
SKRÁ YFIR VIÐAUKA	6
1. INNGANGUR	7
2 UM JARÐSVEIFLUMÆLINGAR	7
3 FRAMKVÆMD MÆLINGANNA	15
3.1 Tækjabúnaður	15
3.2 Sprengitækni	16
3.3 Staðsetning mælipunkta	16
4 ÚRVINNSLA	17
4.1 Hæðarleiðréttingar	17
4.2 Hugleiðing um lagskiptingu	18
4.3 Túlkun jarðsveiflumælinga þegar hraðinn vex samfelld með dýpi	22
4.4 Túlkun einstakra prófíla	22
4.5 Hraði og dýpi á lag 3	26
4.5.1 Ákvörðun hraða og tímaliða	26
4.5.2 Ákvörðun α	28
4.5.3 Dýpt reiknuð frá taftíma	31
4.6 Taftímafrávik	36
4.7 Þyngdarmælingar	39
4.8 Samanburður við lagskipt líkan	41
5 STAÐA JARÐEÐLISFRÆÐIRANNSÓKNA OG TILLÖGUR UM FRAMHALD ÞEIRRA	44
5.1 Jarðsveiflumælingar	44
5.2 Viðnámsmælingar	44
HEIMILDASKRÁ	
<u>TAFLA 1</u> Ákvörðun fastans α	29

MYNDASKRÁ

	Bls.
1 Bylgjuhreyfing í efni	8
2 Endurkast og brot bylgna	9
3 Kritiskt bylgjubrot	10
4 Mismunandi leiðir bylgna	11
5 Dæmigert skjálftarit	12
6 Fartímarit	14
7 Staðsetning mælipunkta	19
8 Prófill Álftanes-Stíflisdalsvatn (8a í vasa innan á bakkápu).	21
9 Ákvörðun α	28
10 Taftímakort fyrir lag 3	30
11 Reitaskipting í dýptarreikningum	32
12 Dýptarreikningar, skýringarmynd	33
13 Dýpi á lag 3	35
14 Taftímafrávik og jafnvíðnámslínur	37
15 Hugsanleg skýring taftímafrávika	39
16 Þyngdarkort af höfuðborgarsvæðinu	40
17 Dýpi á hljóðhraðalag 3 í km undir sjávarmáli	43

SKRÁ YFIR VIÐAUKA

A Fartímarit og túlkun þeirra	47
B Fartímar og fjarlægðir	59
C Hnit skot- og mælipunkta	65

1 INNGANGUR

Sumarið 1976 voru framkvæmdar jarðsveiflumælingar á svæðinu frá Álftanesi að Stíflisdalsvatni. Tilgangur mælinganna var tvíþættur. Annars vegar átti að finna dýpið niður á svokallað lag 3 í jarðskorpunni. Lag þetta myndar neðri hluta jarðskorpunnar á Íslandi. Það hefur fremur háan bylgjuhraða, um 6,5 km/s. Það er talið vera mun þéttara en ofanálíggjandi lög og ef til vill óvatnsgengt. Því gæti dýpið niður að því gefið vísbendingu um hve djúpt vænta megi að hægt sé að vinna heitt vatn. Hins vegar átti að kanna þykktardreifingu móbergsmýndana á og í nágrenni vinnslusvæða Hitaveitu Reykjavíkur í Mosfellssveit.

Mælingarnar voru framkvæmdar af mælingaflokki Orkustofnunar undir stjórn Egils Haukssonar en öll úrvinnsla gerð af höfundu skýrslunnar. Úrvinnsla mælinganna var notuð sem hluti af prófverkefni höfundar til cand real prófs í jarðeðlisfræði við Háskólann í Bergen og eru allar niðurstöður einnig birtar í lokaprófsritgerðinni.

2 UM JARÐSVEIFLUMÆLINGAR

Hér á eftir er reynt að gera grein fyrir því á einfaldan hátt í hverju jarðsveiflumælingar felast. Ekki er farið gegnum neina fræðilega útleiðslu á formúlum, aðeins reynt að lýsa aðferðum og lögmálum í orðum. Þeim sem hafa áhuga á fræðilegum grundvelli mæliaðferðarinnar er bent á bókina "Introduction to geophysical prospecting" eftir Milton B. Dobrin (1976). Kafli 4 byggir hins vegar að hluta á því að lesandinn hafi innsýn í fræðin.

Jarðsveiflumælingar felast í könnun á því hvernig bylgjuhraði breytist með dýpi í jarðskorpunni. Bylgjuhraðinn er háður ýmsum þáttum svo sem þéttleika, hitastigi og þrýstingi efnisins og getur því veitt mikilvægar upplýsingar um eðliseiginleika jarðskorpunnar. Jarðsveiflumælingar eru framkvæmdar á þann hátt að sprengd er dýnamíthleðsla á ákveðnum stað. Bylgjunemar eru síðan notaðir til að skrá þær bylgjuhreyfingar sem sprengingin veldur á yfirborði í ákveðinni fjarlægð frá sprengistað. Mæld er fjarlægð milli skotpunkts og bylgjunema og að auki er styrkur bylgnanna athugaður. Fartími bylgna frá skotpunkti til bylgjunema og styrkur þeirra er meðal annars háð því hvernig bylgjuhraðinn breytist með dýpinu.



Bylgjuhreyfing í efni

'78.08.14 ÓF / AA

T 504 T 343

Reykjavík Jarðsv.m.

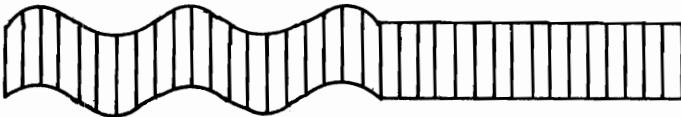
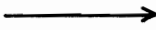
F 17445



S p S p S p S Ötruflað af bylgjuhreyfingu

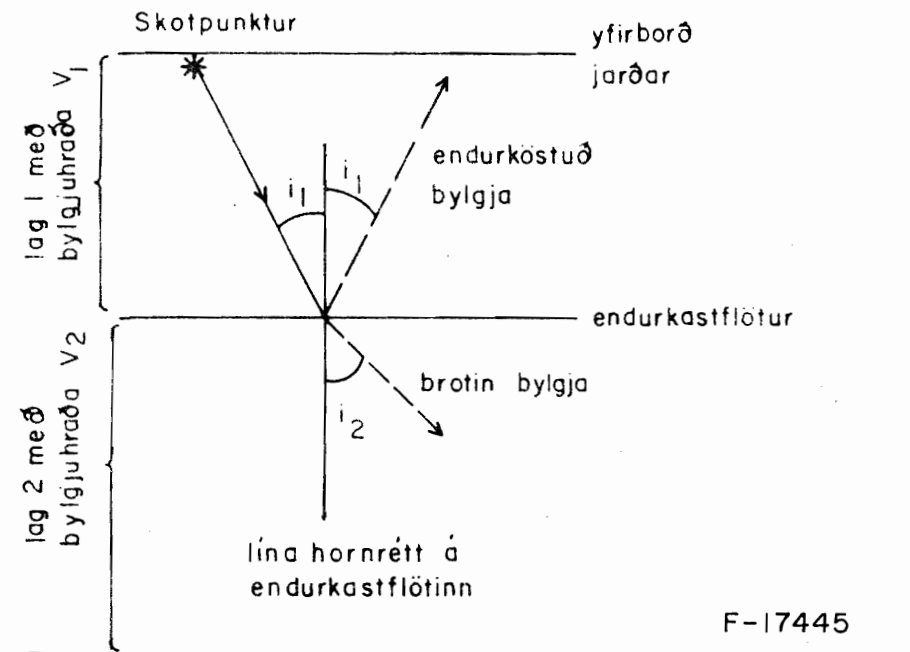
S = Samþjöppun

p = þensla



Frá sprengipunkti breiðast bylgjur út í allar áttir. Um tvenns konar bylgjur er að ræða. P- og S-bylgjur, P-bylgjur eru hljóðbylgjur þar sem bylgjuhreyfingin felst í samþjöppun og þenslu á víxl í efninu en S-bylgjur eru skerhreyfing, þar sem efnisagnirnar sveiflast þvert á útbreiðslustefnu bylgnanna (sjá skýringarmynd 1). P-bylgjur berast mun hraðar en S-bylgjur og eru fyrsta hreyfingin sem bylgjuneminn skráir.

Sem fyrr segir breiðast bylgjurnar út í allar áttir frá skotpunkti. Líta má svo á að óendanlega margir bylgjugeislar fari af stað í allar áttir við sprenginguna. Þessir geislar hegða sér eins og ljósgeislar, brotna og endurkastast við skilfleti í efninu. Sem dæmi tek ég lag-skipta jörð með tveimur lögum þar sem P-bylgjuhraðinn í því efra er V_1 og í því neðra er V_2 (mynd 2). Einn geislinn fer eftir yfirborði efra lagsins og er sá fyrsti sem berst til næstliggjandi bylgjunema. Þeir geislar sem berast niður koma um síðir að skilfletinum milli lags 1 og 2.



Mynd 2 Endurkast og brot bylgna

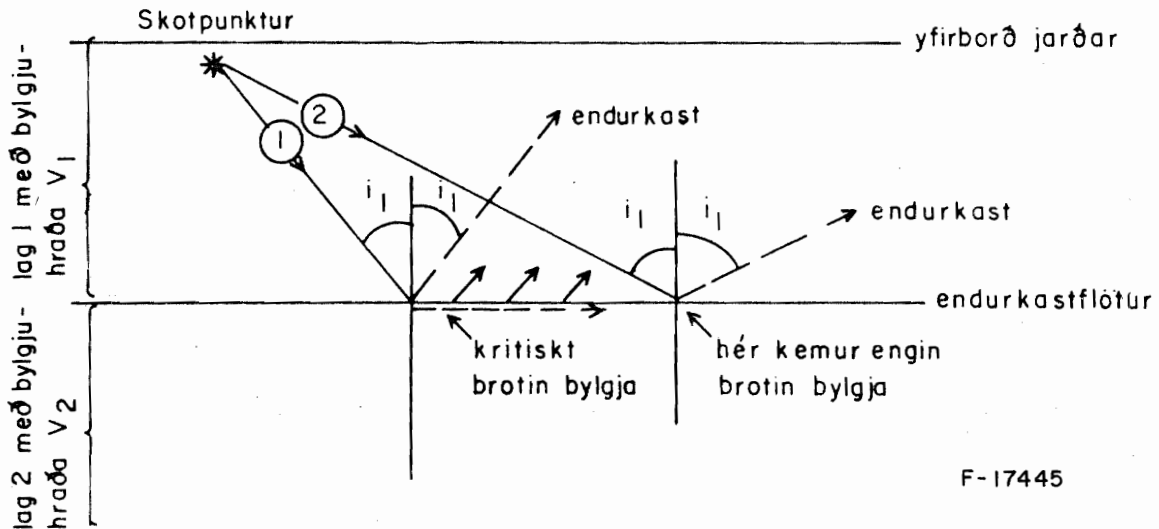
Þar brotnar geislinn upp, hluti hans brotnar og fer niður í neðra lagið og hluti endurkastast upp á ný (mynd 2). Um bylgjubrot gildir Snells lögmál:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin i_1}{\sin i_2} \quad (2.1)$$

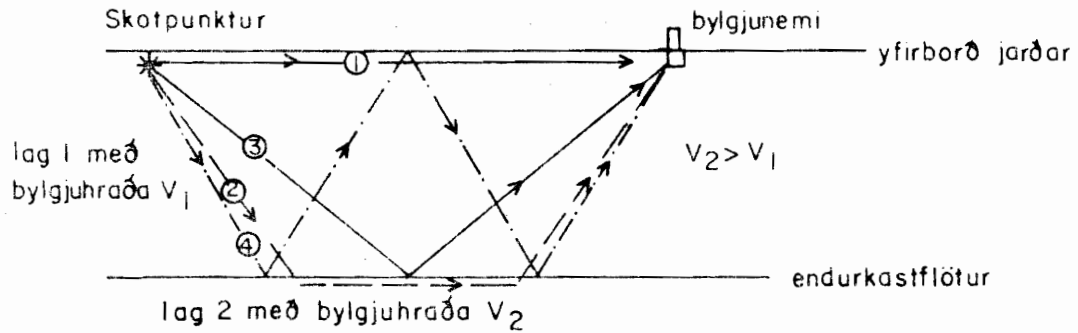
Þar sem i_1 og i_2 eru hornin, annars vegar milli geislans sem kemur að skilfletinum og ímyndaðrar línu hornrétt á skilflöt (lóðlínu) og hins vegar geislans sem brotnar niður í neðra lagið og áður nefndrar línu. Þegar hraðinn í neðra laginu er hærri en í því efra, sem er langalgengast, brotnar geislinn frá lóðlínunni. Eftir því sem geislarnir falla að skilfletinum undir stærra horni, i_1 , kemur að því, að i_2 verður 90° . Þá er $\sin i_2 = 1$ og

$$\frac{v_1}{v_2} = \sin i_1 \quad (2.2)$$

Þá er sagt að um kítískt bylgjubrot sé að ræða og brotna bylgjan



Mynd 3 Tvær bylgjur merktar 1 og 2 koma frá skotpunktinum. Bylgja 1 brotnar kítískt þannig að brotna bylgjan berst út eftir lagamótunum og sendir í leiðinni stöðugt endurkastaðar bylgjur upp í efra lagið. Allar bylgjur sem lenda á endurkastfletinum í meiri fjarlægð en sú kítískbrotna, endurkastast að fullu upp í efra lagið (bylgja 2) og engin brotin bylgja myndast.



F-17445

Mynd 4 Dæmi um fjórar mismunandi bylgjuleiðir frá skotpunkti til bylgjunema. 1 er beina bylgjan, 2 krítískt brotna bylgjan, 3 einfalt endurkast, 4 margfalt endurkast. Þessar bylgjur eru mislengi á leiðinni, fyrir bylgjunema sem er nálægt skotpunkti er beina bylgjan fyrst en þegar bylgjuneminn er kominn út í ákveðna fjarlægð verður krítískt brotna bylgjan fljótust á leiðinni.

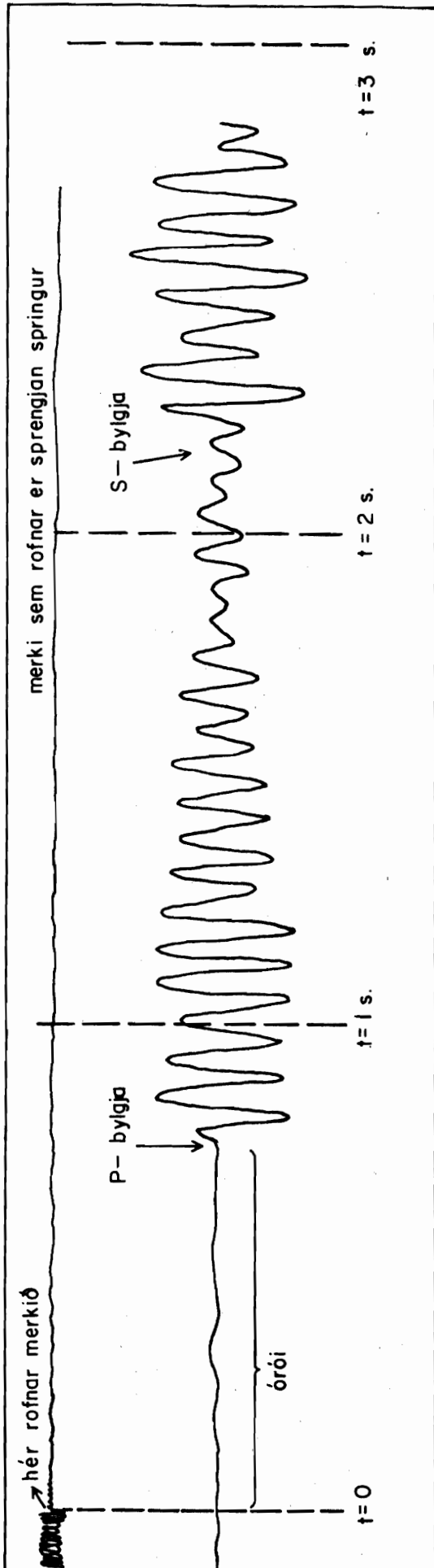
ferðast þá eftir skilfletinum milli laganna (mynd 3). Á því ferðalagi myndar hún stöðugt nýjar bylgjur sem berast frá skilfletinum til yfirborðs. Bylgjur sem koma að skilfletinum undir stærra horni, i_1 , en verður við krítískt brot, endurkastast fullkomlega upp í efra lagið og ekkert bylgjubrot verður.

Hver bylgjunemi skráir hinar ýmsu bylgjur; þá sem berst beint eftir efra laginu (nr. 1 á mynd 4), þá sem kemur sem krítískt brotin bylgja eftir yfirborði neðra lagsins (nr. 2 á mynd 4), bylgju sem endurkastast einu sinni frá lagmótunum (nr. 3 á mynd 4) og margfalt endurkastast (nr. 4 á mynd 4). Þetta gerist bæði fyrir P- og S-bylgjur. Í hvert skipti sem P-bylgja (eða S-bylgja) brotnar eða endurvarpast, myndast auk brotinnar eða endurkastaðrar P-bylgju (eða S-bylgju) ný S-bylgja, (eða P-bylgja), svokölluð PS-bylgja (SP-bylgja) (PS-bylgja = S-bylgja mynduð úr P-bylgju, SP-bylgja = P-bylgja mynduð úr S-bylgju). Þá koma alls konar aðrar endurkastaðrar og brotnar bylgjur fram á namanum vegna



Jarðsveiflumælingar í Reykjavík

'78.08.15 ÓF/ AÁ	
T 504	T 384
Reykjavík	Jarðsv.m
F 17445	

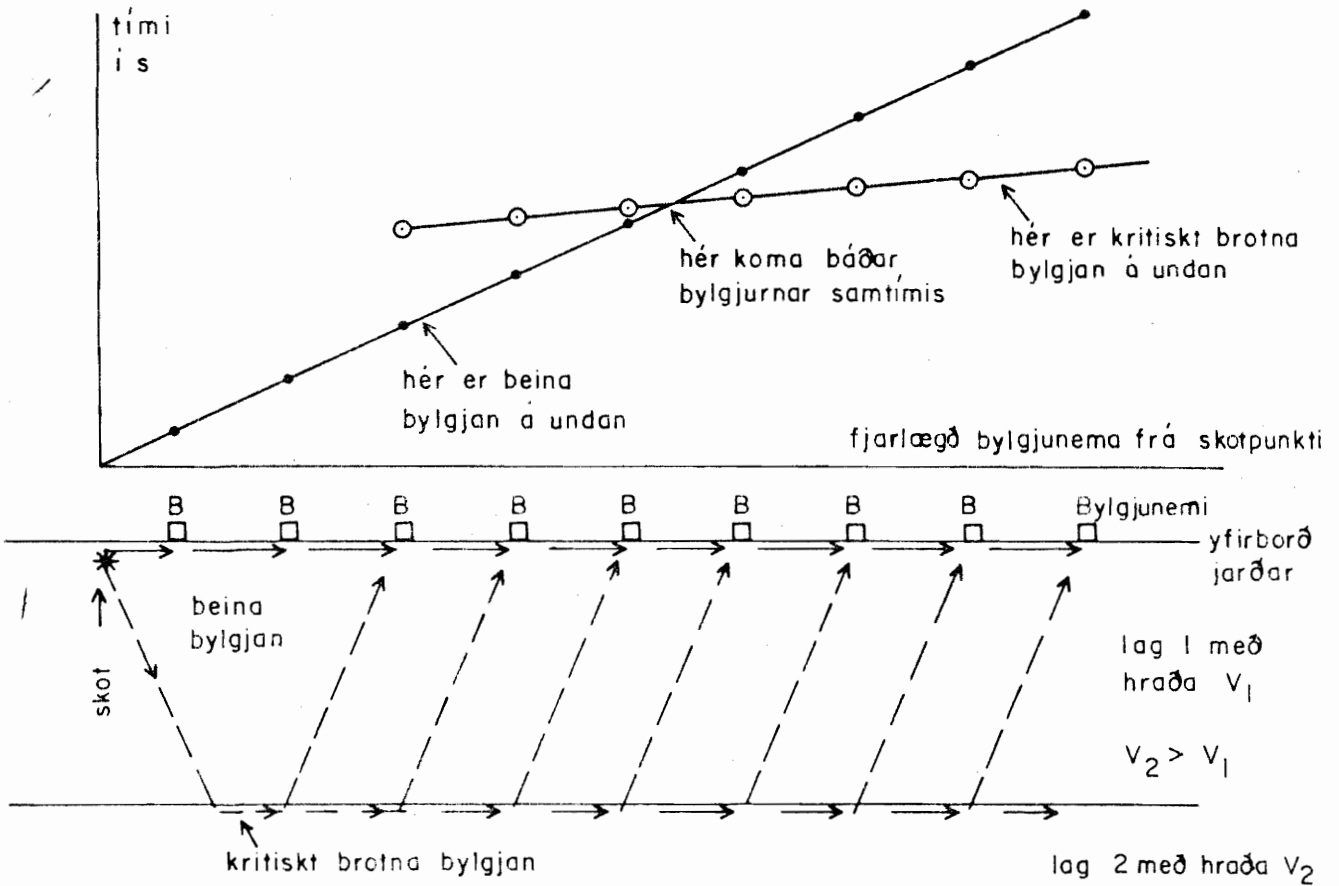


Dæmigert skjálftarit

tilviljunarkenndra aðstæðna sem alltaf eru til staðar í náttúrunni. Loks má búast við óreglulegum truflunum frá vindi, bílum og öðru sem valdið getur bylgjuhreyfingum í jörðinni. Slíkar truflanir kallast suð. Styrkur hinna ýmsu bylgna er misjafn, venjulega eru beinu eða krítískt brotnu P- og S-bylgjurnar ásamt einföldu endurkasti sterkustu bylgjurnar en margfalt endurkast ásamt PS- og SP bylgjum er svo veikt að það sést sjaldan. Það sem bylgjuneminn skráir er summa allra þessara bylgna sem koma að nemanum á ýmsum tímum. Það sem frá bylgjunemanum kemur er kallað sveiflurit (skjálftarit, seismogram). Dæmigert sveiflurit er sýnt á mynd 5.

Við úrvinnslu eru komutímar hinna ýmsu bylgna samkæmt sveifluritunum skráðir og niðurstöðurnar færðar á svo kallað fartímarit sem sýnir hvernig komutími hinna ýmsu bylgna breytist með fjarlægð bylgjunema frá skotpunkti (mynd 6). Einnig má teikna bylgjuritin sjálf inn í stað aflestranna eins og gert er í kafla 4.2. Bylgjuhraðann má síðan finna frá þessu línuriti, en hann er $1/\text{hallatölu ferilsins}$. Eins og sýnt er á mynd 6 ræða komutímar beinu bylgnanna og þeirrar krítískt brotnu sér á tvær beinar línur, og hallatölur þeirra eru mælikvarði á hraðann í lögunum.

Nú er hins vegar alls ekki víst að jörðin sé lagskipt með tilliti til bylgjuhraða. Allt eins getur verið að hraðinn vaxi meira og minna samfelld með dýpinu. Við slíkar aðstæður koma ekki fram beinar línur á fartímalínuritinu heldur bognar, því geislarnir berast þá eftir bognum brautum frá skotpunkti til bylgjunema. Oft er boginn svo lítill að erfitt getur verið að greina út frá fartímaritinu hvort um beinar eða bognar línur sé að ræða. Þá verður að reyna að finna endurkastaðar bylgjur og athuga vel styrk fyrstu bylgjunnar á hverjum stað samanborið við hinar til að leiða líkur að því hvort jarðskorpan sé lagskipt með tilliti til bylgjuhraða eða hvort bylgjuhraðinn vaxi samfelld með dýpi. Allsterkar líkur benda til þess að seinni möguleikinn sé víða ríkjandi í efri hluta jarðskorpunnar á Íslandi (Ólafur G. Flóvenz 1979 a og b) þótt lagskipti sé vafalítið einnig að finna svo sem við mislægi.



F-17445

Mynd 6 Mynd sem sýnir leiðirnar sem beina og brotna bylgjan fara á leið sinni að bylgjunemunum, og samsvarandi fartímalínurit.

3 FRAMKVÆMD MÆLINGANNA

Þessi kafli er í megindráttum byggður á stuttri greinagerð Egils Haukssonar um framkvæmd mælinganna.

3.1 Tækjabúnaður

Bylgjunemar. Notuð var þriggja þátta samstæða frá Hall Sears HS-10, USA. Einn þátturinn var látinn skrá hreyfingar í lóðrétta stefnu, annar í lárétta skotstefnu og þriðji lárétt þvert á skotstefnu. Eigintíðnin er 2Hz og innra viðnám 390 Ω . Þá voru notaðir bylgjunemar frá AB Elektrisk Malmleting í Svíþjóð. Eigintíðni þeirra er 6 Hz og innra viðnám 590 Ω . Tilraunir voru gerðar með raðtengingu bylgjunema, til að reyna að minnka suðið en svo virtist sem tvöfalt suð fengist frá tveimur raðtengdum bylgjunemum. Suð það sem mestum erfiðleikum veldur stafar trúlega annað hvort af vindi eða umferð. Eigintíðni suðsins er um 6 Hz og algengur yfirborðshraði 35 km/s. Reynslan sýnir einnig að breytingar á suði vegna vindsveipa og mismunandi fjarlægðar umferðar eru hverfandi á t.d. 50 m langri bylgjunema-línu með 6 nemum með jöfnu millibili. Við mælingarnar var fjarlægðin milli bylgjunema nokkrir metrar, þ.e. líta má svo á að þeir séu á sama stað og ættu því að sýna það sama og auka verulega aflestraröryggið af skjálftaritunum.

Magnarar. Notaður var 6 rása magnari frá Rafagnatækni. Hann hefur 60 dB fasta mögnun og mest 60 dB breytilega mögnun. Hápass (Highpass) sía var alltaf stillt á 1,0 Hz og lágpas (lowpass) sía á 15 Hz. Nauðsynlegt reyndist að hafa 50 Hz skorusíu (notch filter) á.

Segulbandstæki. Það var af gerðinni Philips ANA-LOG7. Tækið skráir á sjö rásir og eina talrás. Útvarpsmerki frá Rugby, Englandi var notað sem tímaviðmiðun og skráð á rás 7. Á talrásina voru skráðar upplýsingar um punkt, númer, skotblað o.fl. Á eina rásina var skráður sónn sem rofnar við sprenginguna. Útspilun var gerð á 8 rása blekskrifara í eigu Raunvísindastofnunar og Orkustofnunar. Því miður reyndust þau mistök hafa átt sér stað að mögnunin var oft allt of mikil í upptökunni, þ.e. bylgjurnar eru meira og minna klipptar. Af þessum sökum er minna gagn að hafa af útslagi bylgna (amplitúðum) en til stóð.

3.2 Sprengitæki

Yfirleitt var notuð hefðbundin aðferð við sprengingarnar. Sprengt var á 24 V DC og sónhvellhettan var samsíðatengd við sprengjuna. Við sprengingarnar í Bjarnarvatni, sem er aðeins 1 m á dýpt, var beitt þeirri tækni að dreifa dýnamítinu um vatnið. Þannig reyndist unnt að sprengja allt að 10,2 kg í einu skoti. Sprengjunum var þá raðað þvert á stefnuna til mælipunkta.

3.3 Staðsetning punkta

Staðsetningin var gerð eftir loftmyndum. Myndirnar voru síðan fluttar af loftmyndunum á kort (1:50.000) með hjálp tölvuforrits. Forritið byggir á því að fundnar eru 5-10 auðþekkjanlegir staðir á korti og loftmynd. Punktum þessum eru gefin hnit bæði á korti og loftmynd og forritið finnur bestu línulegu vörpun á milli og beitir henni við flutning mælipunkta. Með þessu fæst nákvæmni í staðsetningu upp á minna en 50 metra, þannig að fjarlægðarkvörðun er með mest 100 m skekkju. Fyrir bylgju sem best berst sem krítísk brotin bylgja eftir yfirborði lags 3 jafngildir 100 m skekkja í fjarlægðarmælingu 15 ms tímaskekkju.

4 ÚRVINNSLA MÆLINGANNA

4.1 Hæðarleióréttingar

Nauðsynlegt er að gera hæðarleióréttingar á mælingunum. Þær eru gerðar á þann hátt, að fartími milli skotpunkts og mælipunkts er umreiknaður þannig að hann jafngildi því að báðir þessir punktar hafi verið í sjávarmálshæð.

Ef gengið er út frá því, að jarðskorpan á svæðinu skiptist í þrjú lög, sem hvert um sig hefur ákveðinn bylgjuhraða, og bylgjan berst krítískt brotin eftir yfirborði þriðja lagsins, er hæðarleióréttingin, $t_{leið}$, gefin á eftirfarandi hátt (Dobrin 1976).

$$t_{leið} = \frac{d \sqrt{v_K^2 - v_1^2}}{v_1 v_K} \quad (4.1)$$

þar sem v_1 og v_K eru hraðar í efsta laginu og því, sem bylgjan fer krítískt brotin eftir, og d er hæðarmismunur punktanna.

Ef bylgjuhraðinn vex samfelldt með dýpi verður að nálgast hraðann sem fall af dýpi með nægjanlegum fjölda þunnra laga sem hvert um sig hefur fastan hraða. Þá verður hæðarleióréttingin

$$t_{leið} = \sum_{i=0}^N \frac{d_i \sqrt{v_K^2 - v_i^2}}{v_K = v_i} \quad (4.2)$$

þar sem lágtalan i vísar til hvers einstaks af þunnu lögunum.

Í rauninni væri nauðsynlegt að þekkja hraðann sem fall af dýpi áður en hæðarleióréttingin er gerð. En þar sem um slíkt er ekki að ræða er notast við þriggja laga líkan af jarðskorpunni og hraði þess efsta metinn 3,6 km/s en þess neðsta 6,5 km/s. Mesti hæðarmunur sem fyrir kemur í mælingunum er 0,36 km sem gefur 83 ms í hæðarleióréttingu.

Nú sýnir það sig hér á eftir (kafla 4.2) að hraðinn vex samfelldt með dýpi, er 3,15 km/s næst yfirborði en eykst í 3,6 km/s á 360 m dýpi.

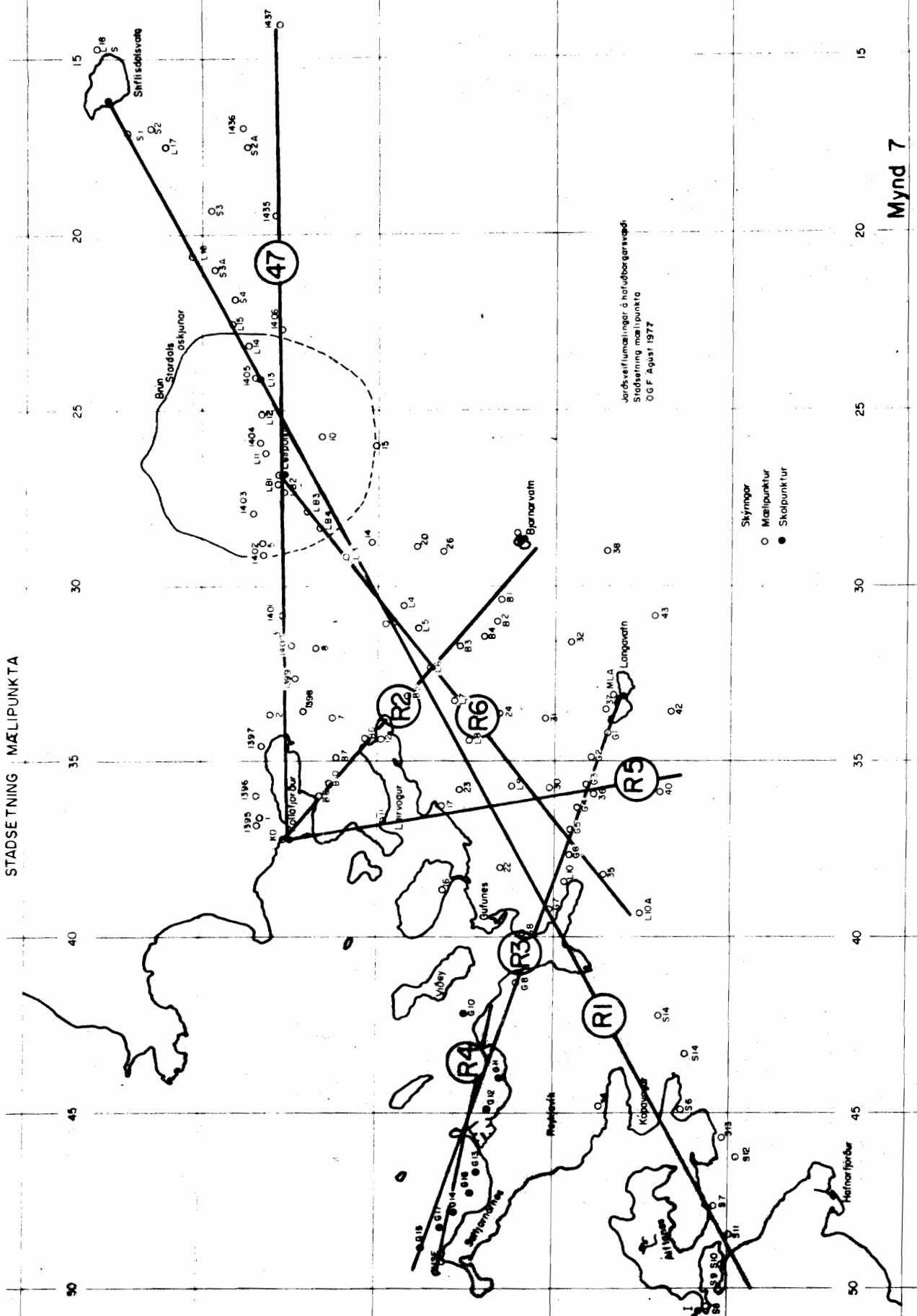
Með því að nota jöfnu 4.2 verður mesta hæðarleiðrétting 87 ms. Mesta skekkja sem fram kemur við að nota jöfnu 4.1 í stað jöfnu 4.2 við hæðarleiðréttingar er því 4 ms sem er óverulegt samanborið við aðrar mæliskekkjur.

4.2 Hugleiðingar um lagskiptingu

Mældir voru alls 6 prófílar, merktir R1 til R6. Af þeim voru tveir viðsnúnir, R1 og R2, og einn viðsnúinn að hluta (R4/R3). Þá eru til þrjár eldri prófílar frá þessu svæði, prófíll A, sem Eysteinn Tryggvason og M. Båth (1961) mældu, og prófílar 47 og 48, sem Guðmundur Pálmason (1971) mældi. Auk prófíllanna sem mældir voru 1976 voru skot frá hinum ýmsu skotpunktum skráð á víð og dreif um svæðið til að gera kleift að nota tímaaðferð (time-term-method) til að reikna út þykkt einstakra laga. Staðsetning hinna ýmsu mælipunkta er sýnd á mynd 7.

Til að finna út hvort um lagskipti í bylgjuhraða í jarðskorpunni sé að ræða eða hvort bylgjuhraðinn vaxi samfelld með dýpinu hef ég einkum notað prófíl R1. Hann hefur þann kost að vera lengsti prófíllinn og er að auki nærri stríkstefnu en það dregur úr líkum á breytingum í bylgjuhraða í stefnu prófílsins (Ólafur G. Flóvenz 1979 a og b). Sá galli er þó á, að prófíllinn liggur gegnum Stardalseldstöðina, gamla rofna megineldstöð. Innan slíkra eldstöðva er bylgjuhraðinn í efri lögum mun hærri en í plötubasaltinu umhverfis (Ólafur G. Flóvenz 1979 a og b). Þess vegna nota ég eingöngu þann hluta prófílsins sem skotinn er við Álftanes og mældur að brúnum eldstöðvarinnar. Þessi prófíll er sýndur á mynd 8 þar sem hann er færður inn á fartímarit. Það einkennir prófíllinn að útslag er sterkt í byrjun hvers skjálftarits. Amplitúður eru sterkar á fyrstu sekúndu hverrar bylgju en minnka oft eftir það en vaxa á ný er S-bylgjan kemur inn. Á sveifluritunum má í mörgum tilfellum sjá, auk fyrstu bylgjunnar, skýra sterka bylgju-toppa á fyrstu sekúndunni eftir að bylgjan kemur fram. Við fyrstu sýn er erfitt að sjá nokkra reglu á þessum seinni bylgjum. Þær gætu til dæmis verið endurkastaðar eða brotnar bylgjur frá mismunandi skilflötum í jarðskorpunni, svokallaðar bólupúls (boblepuls) eða samspil allra þessara þátta.

JARÐSVEIFLUMÆLINGAR Á HOFÚDBORGARSVÆÐI
STADSETNING MÆLPUNKTA



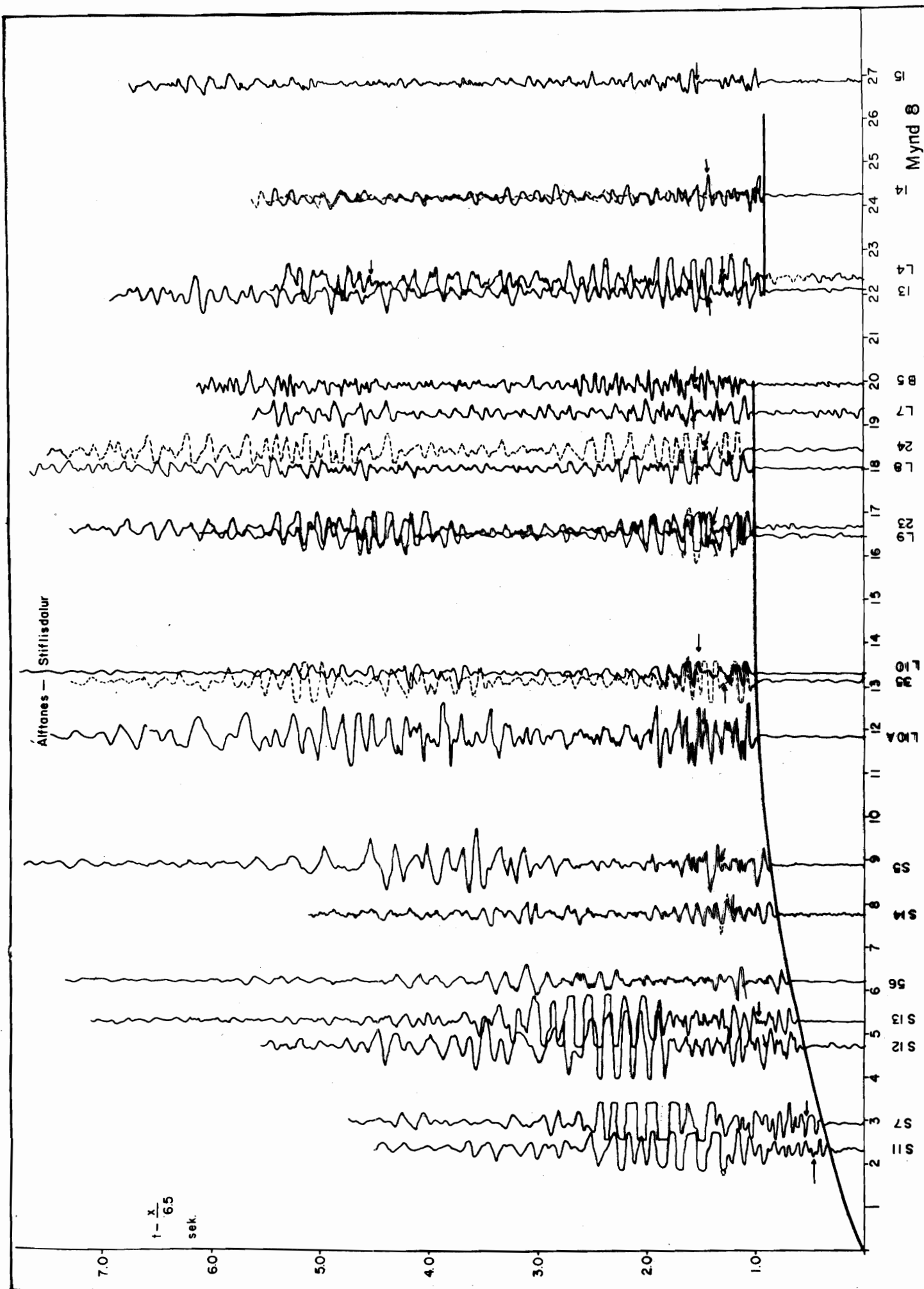
Jarðsveiflumælingar á Hofúðborgarsvæði
Staðsetning mælpunkta
ÖGf. Agust 1977

- Skýringar
- Mælipunktur
 - Skólipunktur

Bólupúls myndast við sprengingu í vatni er fast efni sprengjunnar breytist á örskömmum tíma í heitar lofttegundir. Þar sem fasaskiptin við sprenginguna eru mjög hröð verður þrýstingur í hinu nýmyndaða gasi mjög hár miðað við vatnsþrýstinginn utan frá svo gasið þenst út og myndar eins konar bólu. Þegar bólan hefur náð ákveðinni stærð verður þrýstingurinn inni í henni jafn vökvapþrýstingnum fyrir utan, þ.e. jafnvægisstöðu er náð. En vegna hreyfiorku loftmólikúlanna í útþenslunni heldur bólan áfram að stækka nokkra stund þannig að vatnsþrýstingurinn verður meiri en gasþrýstingurinn inni í bólunni. Þá fer bólan að dragast saman á ný. Þannig sveiflast bólan um jafnvægisstöðuna og myndi gera ærið lengi ef hún ekki stigi til yfirborðs og næði upp úr vatninu. Í hvert skipti sem bólan þenst út sendir hún út nýjan bólupúls. Amplitúðan vex oft lítillega með hverjum bólupúls af því að bólan stígur (fer sífellt) ofar í vatninu og mótþrýstingur vatnsins verður minni. Hægt er að reikna út tímenn sem líður milli bólupúlsanna, ef þekkt er sprengimagn og sprengidýpi. Sambandið er skv. Cole (1975)

$$T = \frac{4,35 W^{1/3}}{(D+33)^{3/6}} \quad (4.3)$$

Þar sem W er hleðslan í pundum og d er dýpið í fetum. Formúlan gildir fyrir dýnamít sem orkugjafa. Á mynd 8 er merkt inn með ör hvar vænta má að fyrsti bólupúls byrji. Á mynd 8a, sem er glæra og má leggja yfir mynd 8, er fyrsta púlsinum í hverjum punkti hliðrað til þannig að hann byrji þar sem fyrsta bólupúls er að vænta. Í ljós kemur að um nær nákvæma endurtekningu á fyrstu bylgjunni er að ræða og sumstaðar finnst vottur af þriðja bólupúls. Sú staðreynd að bólupúlsinn er nær nákvæm endurtekning fyrsta púlsins mælir gegn því að nokkrar endurkastbylgjur eða brotnar bylgjur séu til staðar sem seinni bylgjur, því slíkar bylgjur myndu afmynda bólupúlsa með tilveru sinni. Því hallast ég að því að túlka beri mælingarnar út frá því að bylgjuhraðinn vaxi samfellt frá yfirborði og niður að lagi 3. Hins vegar eru sterkar líkur fyrir því að hraðinn sé hart nær konstant í lagi 3, 6,5 km/s (Guðmundur Pálmason 1971, Ólafur G. Flóvenz 1979 a og b).



4.3 Túlkun á jarðsveiflumælingum þegar hraðinn vex samfelld með dýpi

Aðferð þessi byggir á tölulegri tegrun á svonefndu Herglotz-Wiechert integráli sem gefur samband hraða og dýptar í jörðu þegar hraðinn vex samfelld með dýpinu. Fyrir kúlulaga jörð gildir:

$$R \ln \left(\frac{R}{R-Z} \right) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\Delta_p} \cosh^{-1} \left(\frac{V_p}{V} \right) d\Delta \quad (4.4)$$

þar sem R er jarðradius, Z_p er mesta dýpi, sem bylgjan, sem mældist í fjarlægðinni Δ_p , hefur náð, Δ_p er fjarlægðin til þess punktar þar sem sýndarhraðinn er V_p en V_p er sýndarhraði þeirrar bylgju sem reikna dýpsta punkt fyrir. V er sýndarhraðinn eftir prófílum sem er 1/halla-tölu fartímakúrfunnar. Í flestum bylgjubrotsmælingum er Z_p miklu minna en R þannig að umskrifa má (vinstri) hlið jöfnu (4.2.1) þannig:

$$R \ln \left(\frac{R}{R-Z} \right) = R \ln \left(\frac{1}{1-Z/R} \right) \approx R \ln \left(1 + \frac{Z_p}{R} \right) \approx Z_p \quad (4.5)$$

þegar sleppt er liðum af annarri gráðu og hærri. Formúla 4.2.1 verður þá:

$$Z_p = \frac{1}{\pi} \int_0^{\Delta_p} \cosh^{-1} \left(\frac{V_p}{V} \right) d\Delta \quad (4.6)$$

Þarna er fengið beint samband hraða og dýpis. Útreikningur hraða- og dýptargilda er gerður með tölulegri lausn jöfnunnar. Til þess var notað forrit skrifað af A.M. Berge (1976). Í forritinu er sýndarhraðinn reiknaður á þann hátt að á litlu bili er fartímaritið nálgæð með annarrar gráðu margliðu með hjálp aðferðar minnstu kvaðrata. Hraðinn er síðar fundinn með diffrun í miðpunkti bilsins. Bilið er síðan fært til og fást þannig ný og ný hraðagildi. Þess ber að gæta að skilyrði þess að nota megja þessa túlkunaraðferð er að hraðinn vaxi samfelld með dýpinu og að engar hraðabreytingar eigi sér stað í stefnu prófíls.

4.4 Túlkun einstakra prófíla

Í viðauka A eru sýnd fartímalínurit hinna ýmsu prófíla og túlkun þeirra, þ.e. hraði sem fall af dýpi. Prófílarnir eru: R1a Álftanes-Mosfellsdalur, R1b Stíflisdalur, R2a Bjarnarvatn-Kollafjörður, R2b Kollafjörður-Bjarnarvatn, R6 Stardalsaskja, R3 Langavatn-Elliðavogur, 47 Kollafjörður-

-Mosfellsheiði, R5 Kollafjörður-Grafarholt, 48 Kollafjörður-Faxaflói, A Mosfellsheiði og R7 punktar á gabbróinu í Kollafirði. Hér á eftir rek ég athugasemdir við túlkun hinna ýmsu prófíla.

R1a Álftanes-Mosfellsdalur: Prófillinn er nálægt því að vera í strik-stefnu jarðlaga og sker ekki megineldstöð þannig að láréttar hraðabreytingar ættu að vera litlar í stefnu prófílsins og gefur hann hugmynd um dýpið á lag 3 á svæðinu, 3,8 km.

R1b Stíflisdalur-Stardalur: Í Stíflisdalsvatni var sprengt á allmiklu dýpi þannig að bólupúlsar og einhvers konar margföld endurköst í vatni valda því að bylgjurnar hafa stórt útslag mun lengur en gagnstæði prófíllinn. Prófíll þessi nær í raun alveg út á Álftanes en hann liggur gegnum Stardalseldstöðina þannig að forsendan um litlar láréttar hraðabreytingar brestur til að túlka megi prófíllinn lengra en að eldstöðinni. Framlengingin á hraðaferlinum á mynd 2 ; viðauka A, bendir til að dýpi niður á lag 3 á svæðinu kunni að vera nálægt 2,4 km.

R2a Bjarnarvatn-Kollafjörður: Gagnstætt við flesta aðra prófíla á svæðinu er útslag fyrstu bylgna mjög veikt framan af og virðast þær jafnvel deyja út í ca. 4 km fjarlægð. Eftir það kemur smá hopp í komutíma fyrstu bylgna á fartímalínuritinu. Sterkara útslag kemur inn sem á fjarlægðabilinu ca. 4-6 km eru fyrstu bylgjur en úr því seinni bylgjur með veikum fyrstu bylgjum framan við. Líklegast þykir mér að hér sé um að ræða lághraðalag í jarðskorpunni en þau koma einmitt fram á þennan hátt. Veika útslagið táknar þá brotnu bylgjurnar en það sterka er endurkastaðar bylgjur frá botni lághraðalagsins. Mun þéttari mælinga væri þörf þarna ef ákvarða ætti nákvæmlega hraða og þykkt lagsins. Hins vegar veita jarðfræðilegar upplýsingar nokkra hjálp við mat á þykkt lághraðalagsins, þar sem ætla má að það séu móbergssyrpur, hinar sömu og eru í borholunum við Reyki og Helgadal. Fyrsti hluti fartímaritsins veitir upplýsingar um hraða og dýpi í skorpunni ofan lághraðalagsins og þar með mat á dýpt ofan á það. Sá hluti er túlkaður með Herglotz-Viechert jöfnunni. Síðan er hinn hluti prófílsins túlkaður með hjálp tölvuforrits sem reiknar fartímalínur þegar hraðinn er gefinn sem fall af dýpi (Kanestrøm og Berge 1975). Er þá forritið keyrt

aftur og aftur uns viðunandi samræmi fæst við melda fartímaritið. Niðurstöður þessarar túlkunar eru á mynd 3 í viðauka A. Gróft mat á dýpinu á lag 3 fæst með að framlengja ferilinn á myndinni, hann gefur liðlega 3 km.

Túlkun þessa prófíls er allónákvæm. Auk óvissunnar í túlkun lághraðalagsins kemur óvissa af því að prófíllinn liggur þvert á strikstefnu þannig að jarðlögum hallar upp í stefnu prófíls.

R3 Langavatn-Elliðavogur: Í reyndinni nær prófíllinn alveg út að Gróttu en er aðeins túlkaður niður í Elliðavog. Því veldur tvennt: Annars vegar breytingar á hraða í lárétta stefnu þar sem prófíllinn liggur nær þvert á strikstefnu og gengur í gegnum útkant megineldstöðvar. Hins vegar er breytt um mæliaðferð á miðjum prófílum. Frá Langavatni niður að Elliðavogi er sprengt í Langavatni en mælt í hinum ýmsu punktum, en síðan er sprengt í sjónum við Gróttu og mælt á fastri stöð við Langavatn fyrir 5 síðustu punkta á prófílum, þ.e. helmingur prófíls er mældur upphallandi (up-dip) en hinn helmingurinn niðurrhallandi. Þess vegna hef ég kosið að túlka eingöngu þann hluta prófíls sem sprengdur er í Langavatni við túlkun á því hvernig hraði breytist með dýpi. Hinn hluta prófílsins nota ég síðan í dýptarreikningum á lag 3.

Prófílum Langavatn-Elliðavogur svipar í mörgu til prófílsins frá Bjarnarvatni; veikar fyrstu bylgjur á fyrstu 2-3 kílómetrunum frá skotpunkti en síðan stökk í fartímakúrfunni og eftir það skýrar fyrstu bylgjur. Ég hef því einnig kosið að túlka lághraðalag í þessum prófíl og styðst þá við túlkunina á prófílum Bjarnarvatn-Kollafjörður. Ég set sömu varnagla um ónákvæmni gagnvart þessari túlkun og í Bjarnarvatnsprófílum. Hraða-dýptar módelið er sýnt á mynd 4 í viðauka A. Gróft mat á dýpinu á lag 3 með framlengingu ferilsins á mynd 4 gefur tæpa 3,5 km.

R6, Stardalseldstöðin: Skotpunkturinn er í lítilli tjörn skammt frá Skeggjastöðum. Eldstöðin er vel afmörkuð af hringmynduðum öskjumisgengjum (Ingvar B. Friðleifsson 1973). Sprengingarnar frá Skeggjastöðum, sem eru nálægt miðju öskjunnar, eru skráðar á bylgjunema á víð og dreif um öskjuna. Engu að síður falla þær þokkalega vel á einn prófíl, sem

bendir til lítilla láréttra hraðabreytinga innan sjálfrar öskjunnar. Túlkun þessa prófíls er sýnd á mynd 5 í viðauka A. Hún sýnir að hraðinn vex mun örvar með dýpi innan megineldstöðvarinnar en utan. Orsökina er líklega mun meiri ummyndun og innskotabéttleiki í eldstöðinni en utan hennar. Framlenging á hraða-dýptarferlinum á mynd 5 bendir til þess að dýpið á lag 3 innan eldstöðvarinnar sé nálægt 2 km.

Prófílnum R2b, R5, 47 og 48 er það sameiginlegt að skotpunktur er hinn sami og er á gabbró innskoti, svokölluðu Þverfellsgabbrói sem er hluti af Kjalarneseldstöðinni. Það er áberandi á fartímaritum fyrir þessa prófíla að hraðinn er mikill strax í byrjun, en síðan minni þegar mælipunktarnir eru komnir út fyrir gabbróinnskotið. Því hef ég valið þá leið í túlkun, að mynda einn prófíl úr öllum þeim punktum sem eru á gabbróinu, prófíl R7, og er fartímarit og túlkun þess sýnd á mynd 6 í viðauka A. Hina prófíla hef ég svo leiðrétt á þann hátt að ég hef hliðrað núllpunktinum um 0,1 s eftir tímaásnum þannig að hann falli á framlengingu þess hluta prófílsins sem ekki er á gabbróinu.

Fartíma-línurit fyrir prófíl R7 er sýnt á mynd 6 ásamt túlkun hans. Til samanburðar er túlkun Stardalsprófíls sýnd á sömu mynd. Yfirborðs-hraðinn í gabbróinu er um 4,0 km/s og eykst ört með dýpi og nær 5,6 km/s á 1,2 km dýpi. Lengra niður nær túlkunin ekki, en samanburður við R6, sem ekki er í gabbrói á yfirborði, sýnir að þeir eru frábrugðnir ofan til en mjög svipaðir neðan 700 m dýpis. Þetta bendir til svipaðra eiginleika bergsins í báðum prófílum neðan umrædds dýpis. Þó er hraðinn alltaf örlítið hærri í prófíl R7 en á sama dýpi í Stardalseldstöðinni. Það er í samræmi við það að Kjalarneseldstöðin er ívið meir rofin en Stardalseldstöðin.

Prófílar R2b og R5 (Kollafjörður-Bjarnarvatn og Kollafjörður-Grafarholt) sýna engin einkenni lághraðalags eins og í R2a og R3. Hraðinn sem fall af dýpi er sýndur á mynd 3 í viðauka A fyrir báða prófíla. Hraðaaukningin með dýpi er svipuð í þeim báðum og bendir framlenging á hraðaferlinum til 2,5-3,0 km á dýpi á lag 3. Þokkalegt samræmi er milli gagnstæðu prófíla R2a og R2b að lághraðalaginu frátöldu. Móbergslögin sem líklega valda lághraðalaginu í R2a ná yfirborði milli skotpunktanna og eru því ekki til staðar í prófílum R2b undir Kollafirði.

Prófíll 47 er mjög óreglulegur enda liggur hann gegnum Stardalseldstöðina. Auk þess er allmikið af berggöngum hér og hvar milli skotpunkts og eldstöðvarinnar. Við túlkun prófilsins (mynd 7 í viðauka A) eru óreglurnar á fartímaritinu jafnaðar út og þannig litið á að þær túlki mismunandi ganga og innskotabéttleika við hina ýmsu mælipunkta. Túlkunin svarar því til eins konar meðalgerðar jarðskorpunnar eftir prófílum. Hraðaaukning er ör með dýpi og bendir framlenging á hraðaferlinum til þess að dýpið á lag 3 sé um 2,0 km í stefnu prófilsins.

Í prófíl 48 er þéttleiki mælinga heldur lítill þannig að hann er ekki túlkaður hér á sama hátt og hinir, heldur eru einstakir punktar notaðir til dýptarreikninga á lag 3.

Prófíll A liggur frá tjörn nokkurri skammt frá Langavatni og til Þingvalla. Hann er að hluta viðsnúinn með skotum úr Þingvallavatni. Fartímarit og túlkun þess er sýnd á mynd 8 í viðauka A. Samkvæmt því er dýpið á lag 3 um 3,5-3,6 km undir sjó undir prófílum. Prófíllinn er nálægt strikstefnu og utan megineldstöðva og því væntanlega litlar hraðabreytingar í lárétta stefnu.

4.5 Túlkun á jarðsveiflumælingum þegar hraðinn vex samfelld með dýpi

4.5.1 Ákvörðun hraða og tímaliða

Eins og fram hefur komið er líklegast að bylgjuhraðinn vaxi samfelld með dýpinu allt niður að lagi 3 þar sem við tekur fastur hraði, 6,5 km/s. Bylgjur sem koma sem brotnar úr lagi 3 hafa því farið krítískt brotnar eftir yfirborði lagsins. Þann hluta skorpunnar þar sem hraðinn vex samfelld má nálgast með því að skipta honum upp í þunn lög með föstum hraða innan hvers lags. Þetta eru forsendur þeirrar aðferðar sem beitt er við dýptarreikninga á lag 3.

Aðferðin, svonefnd taftímaaðferð, byggist á því að fartími krítískt brotnu bylgjunnar frá skoti til mælistaðar er leystur upp í þrjá þætti,

$$t_{ij} = a_i + b_j + \Delta_{ij}/v, \quad (4.7)$$

þar sem t_{ij} er fartími bylgjunnar milli j -ta skotpunkta og i -tu mælistöðvar, b_j er taftími við skotpunkt, a_i er taftími við mælipunkt og

Δ_{ij}/v er sá tími sem bylgjan væri á leiðinni ef skotstaður og mælipunktur væru á yfirborði lags 3, lóðrétt undir raunverulegum skot- og mælipunktum. Δ_{ij} er fjarlægð milli j -ta skotpunkts og i -tu mælistöðvar og v er hraðinn í lagi því sem krítískt brotna bylgjan berst eftir, þ.e. lagi 3.

Ef fjöldi mælistöðva er m og fjöldi skotpunkta er n og allar m mælistöðvarnar skrá skot frá öllum n skotpunktum er fjöldi jafna á formi 4.3.1 nm og fjöldi óþekktra stærða ($m + n$) auk hraðans v . Þessar jöfnur er ekki hægt að leysa á einkvæman hátt þar sem hægt er að leggja fasta stærð, α , við öll a_i -in og draga frá öllum b_j -um án þess að jöfnurnar breytist.

Almenn lausn á jöfnum (sjá Willmore og Bancroft 1960) gefur

$$a_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{j=m} (t_{ij} - \Delta_{ij}/v) - \frac{1}{nm} \sum_{j=1}^{j=m} \sum_{i=1}^{i=n} (t_{ij} - \Delta_{ij}/v) + \alpha \quad (4.8)$$

og

$$b_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} (t_{ij} - \Delta_{ij}/v) - \alpha \quad (4.9)$$

Innsetning í jöfnur (4.3.1) fyrir a_i og b_j gefur

$$\begin{aligned} & \frac{1}{nm} \sum_{j=1}^{j=m} (t_{ij} - \Delta_{ij}) - \frac{1}{nm} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (t_{ij} - \Delta_{ij}/v) + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_{ij} - \Delta_{ij}/v) \\ & = t_{ij} - \Delta_{ij}/v - \delta_{ij} \end{aligned} \quad (4.10)$$

þar sem δ_{ij} er frávikið. Jöfnu (4.3.4) má umskrifa á formið:

$$C_{ij} - \frac{1}{v} d_{ij} = \delta_{ij} \quad (4.11)$$

Með aðferð minnstu kvaðrata fæst lausn fyrir hraðann:

$$\frac{1}{v} = \frac{C_{ij} d_{ij}}{d_{ij}^2} \quad (4.12)$$

Með innsetningu hraðans frá (4.5.6) í (4.5.2) og (4.5.3) fást tímalíðirnir fyrir hina ýmsu skot- og mælipunkta, en fastinn α er eftir sem áður óþekktur.

Ofangreindri aðferð var beitt á mæligögnin á þann hátt að notaðir voru tveir skotpunktar, við Álftanes og Stíflisdalsvatn, og allir mælipunktar sem skráðu umrædd skot frá báðum skotpunktum, 33 talsins. Útreikningararnir voru gerðir á tölvu Háskólans.

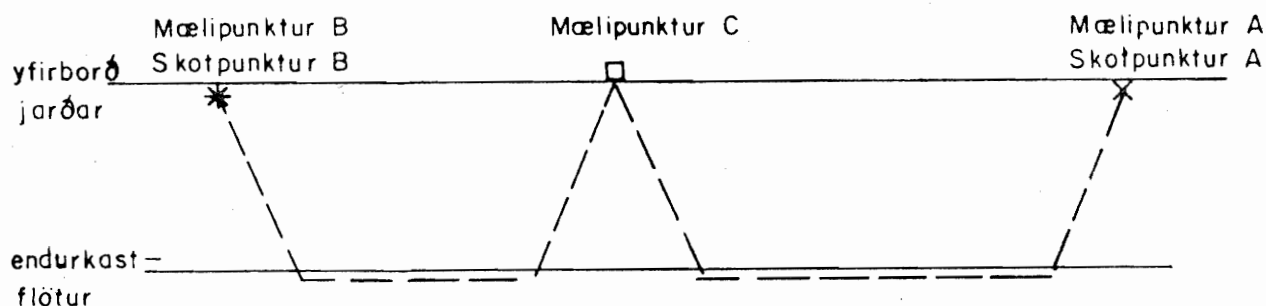
Hraðinn í lagi 3 og staðalfrávik reyndist vera $6,49 \pm 0,04$ km/s.

Þetta er í samræmi við eldri ákvarðanir á hraða í lagi 3 (Guðmundur Pálmason 1971). Við frekari útreikninga er notast við hraðann 6,5 km/s í lagi 3.

4.5.2 Ákvörðun α

Til að finna fastann α í tímaliðsákvörðuninni er notast við mælipunkta sem liggja á beinni línu milli skotpunkta (mynd 9). Um slíkan prófíl gildir að

$$T_D = \frac{1}{2} \{T_{AD} + T_{BD} + T_{AB}\} \quad (4.13)$$



F-17445

Mynd 9 Ákvörðun α

Þar sem T_D = taftíminn við skotpunkt D, T_{AD} er fartími bylgjunnar milli skotpunkts A og mælipunktur D, T_{BD} er fartími milli skotpunkts B og mælipunkts D og T_{AB} er taftíminn milli skotpunkts A og mælipunkts B.

Jafna 4.5.7 gefur þannig T_D , taftímann undir punktinum D, en a_i er sá taftími sem ákvarðaður var skv. jöfnu (4.5.2).

Sambandið milli T_D og a_i er þá

$$T_D = a_i + \alpha \text{ eða}$$

$$\alpha = T_D - a_i \quad (4.14)$$

Í mælingunum eru punktarir LP, L3, 17 og 13 nokkurn veginn á beinni línu milli skotpunkta og hafa skráð skotin frá þeim báðum. Sem T_{AB} er notað skot skráð frá Stíflisdalsvatni í S8. Heildarfartíminn milli þessara punkta er 6,76 s, hæðarleiðrétting 0,03 s og leiðrétting vegna fjarlægðar S8 frá skotpunkti við Álftanes er

$$\frac{\text{fjarlægðarmunurinn}}{6,5 \text{ km/s}} = \frac{38,80 - 38,24}{6,5} = 0,09 \text{ s}$$

þá er $T_{AB} = (6,76 - 0,03 + 0,09) \text{ s} = 6,82 \text{ s}$.

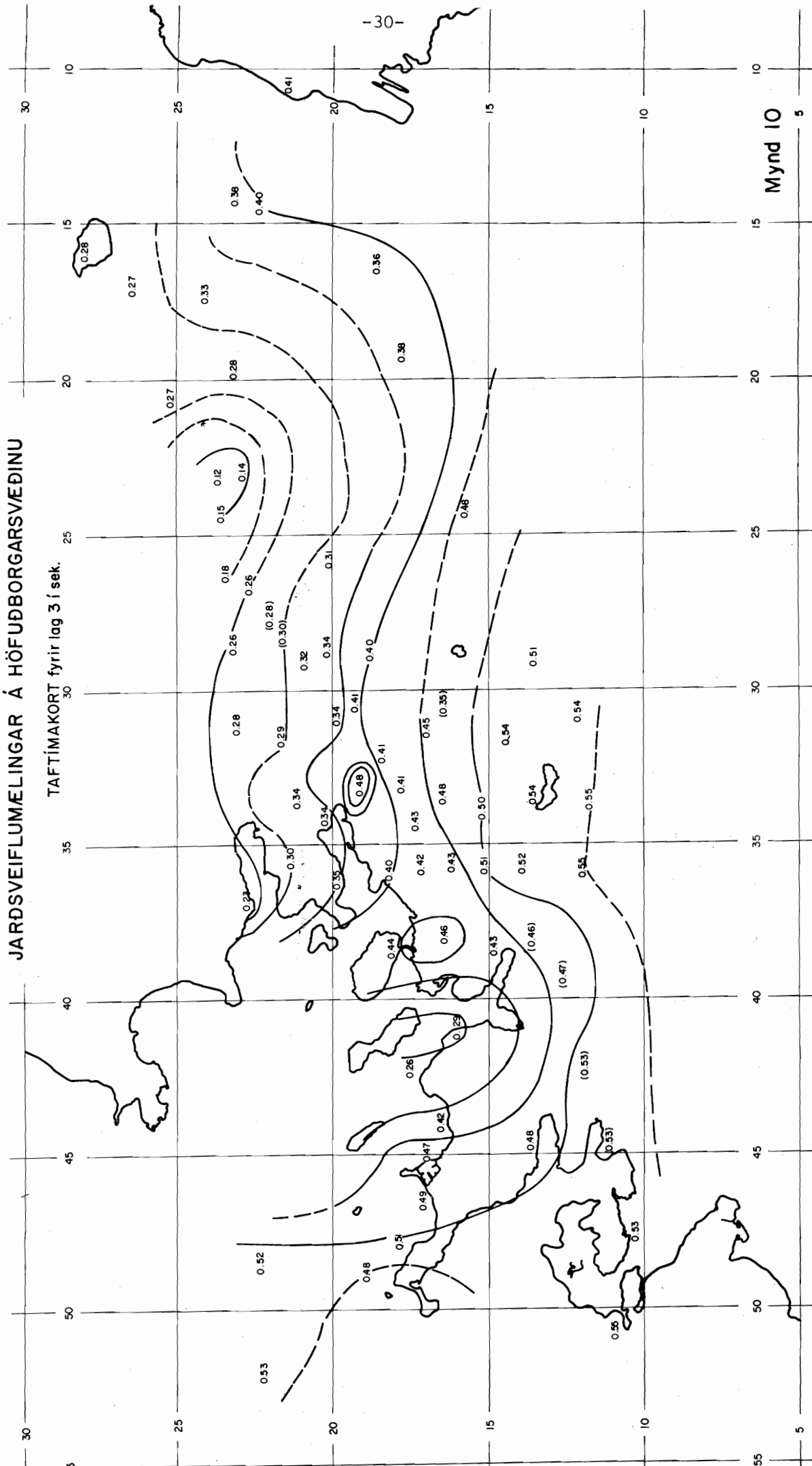
TAFLA 1 Ákvörðun α

mælipunktur nr	fartími frá Álftanesi s	fartími frá Stíflisdal s	T_D s	a_i s	α s
LP	4,99	2,35	0,260	0,678	0,418
L3	4,60	2,87	0,325	0,742	0,417
17	3,51	4,11	0,400	0,818	0,418
13	4,29	3,20	0,335	0,754	0,418

Tafla 1 sýnir reiknuð gildi á α í hinum ýmsu punktum og þær tölur sem útreikningurinn byggir á. Meðalgildi α er 0,418 og frávik eru nær engin milli punkta. Síðan er taftíminn reiknaður fyrir alla punktana skv. jöfnu (4.3.8). Fyrir þá punkta sem aðeins hafa skráð skot frá öðrum hvorum skotpunktinum er jafna 4.3.1 notuð beint til að finna taftímann fyrir mælipunktinn, þar sem hraðinn og taftími fyrir skotpunktinn eru þekkt. Fyrir punkta á prófilnum 47, 48, A og R3 er dýpið við

JARÐSVEIFLUMÆLINGAR Á HÖFUÐBORGARSVEÐINU

TAFTÍMAKORT fyrir lag 3 í sek.



-30-

Mynd 10

78.06.22 ÓF/ÁÁ Reykjavík 508 Jarðv.m. 347

skotpunktana annað hvort þekkt þar sem bylgjunemar á sama stað hafa skráð bylgjur frá Álftanesi og Stíflisdal (47, 48, R3) eða það er áætlað út frá næstliggjandi þekktum dýptargildum (A).

Allir taftímarnir eru síðan færðir inn á mynd 10 sem sýnir taftímakort af svæðinu. Kortið má túlka á þann veg að það sýni eitt af þrennu; breytingar í dýpi á lag 3, breytingar í bylgjuhraða ofan lags 3 eða samspil beggja þessara þátta. Síðasttaldi möguleikinn er líklegastur. Vandinn er þá að greina þættina hvorn frá öðrum til að finna megi dýpið á lag 3.

Óvissa í taftímaákvörðuninni kemur frá óvissu í staðsetningu (± 15 ms), hæðarleiðréttingu ± 5 ms og aflestraróvissu (± 20 ms). Samtals gerir þetta ± 40 ms óvissu í hverri einstakri taftímaákvörðun.

4.5.3 Dýpt reiknuð frá taftíma

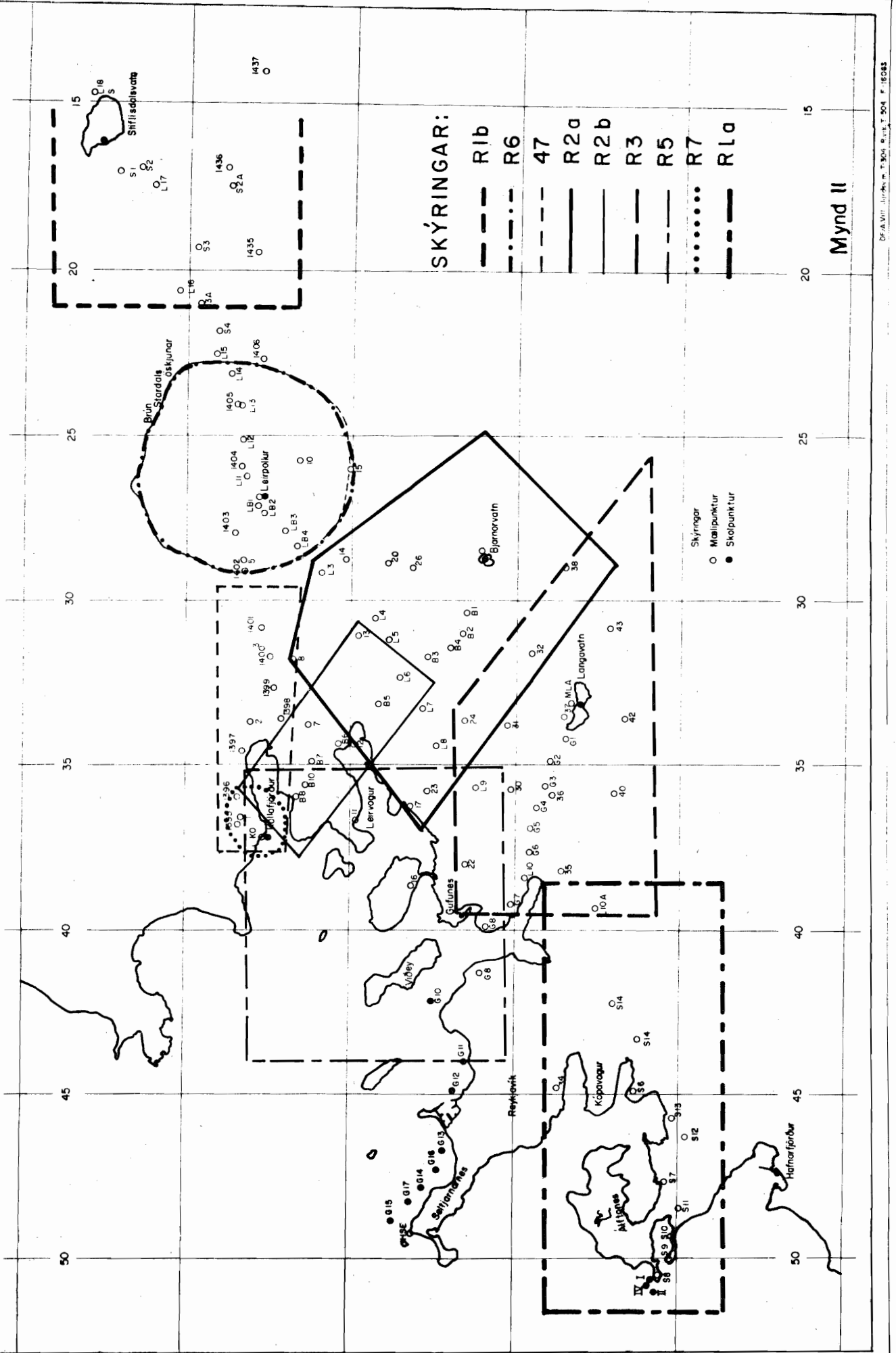
Til að leysa þennan vanda er notast við hina einstöku prófíla sem lýst var í kafla 4.2. Þeir gefa í flestum tilfellum bylgjuhraða í jarðskorpunni 1-2 km niður í grennd við skotpunktinn.

Hraðinn í þessum efstu kílómetrum virðist allbreytilegur frá einum stað til annars sem orsakar a.m.k. hluta taftímabreytinganna á mynd 10.

Við dýptarreikningana er gert ráð fyrir að eftirfarandi forsendur gildi:

- 1) Bylgja berst sem krítískt brotin bylgja eftir lagi 3.
- 2) Mælisvæðum er deilt upp í reiti þar sem hraðinn er þekktur innan hvers reits í efstu 1-2 km út frá stuttu prófílunum. Mynd 11 sýnir reitaskiptinguna, og hvaða prófílar ákvarða hraðann í efstu lögnum.
- 3) Hraðaaukning á dýptareiningu er föst á því dýptarbili þar sem hraðinn er óþekktur og allt niður að lagi 3 með bylgjuhraða 6,5 km/s.
- 4) Taftíminn er þekktur í hverjum mælipunkti.
- 5) Nálgá má hina samfelldu hraðaaukningu með dýpi með N þunnum lögum sem hvert um sig hefur fastan hraða.

REITASKIPTING Í DÝPTARREIKNINGUM

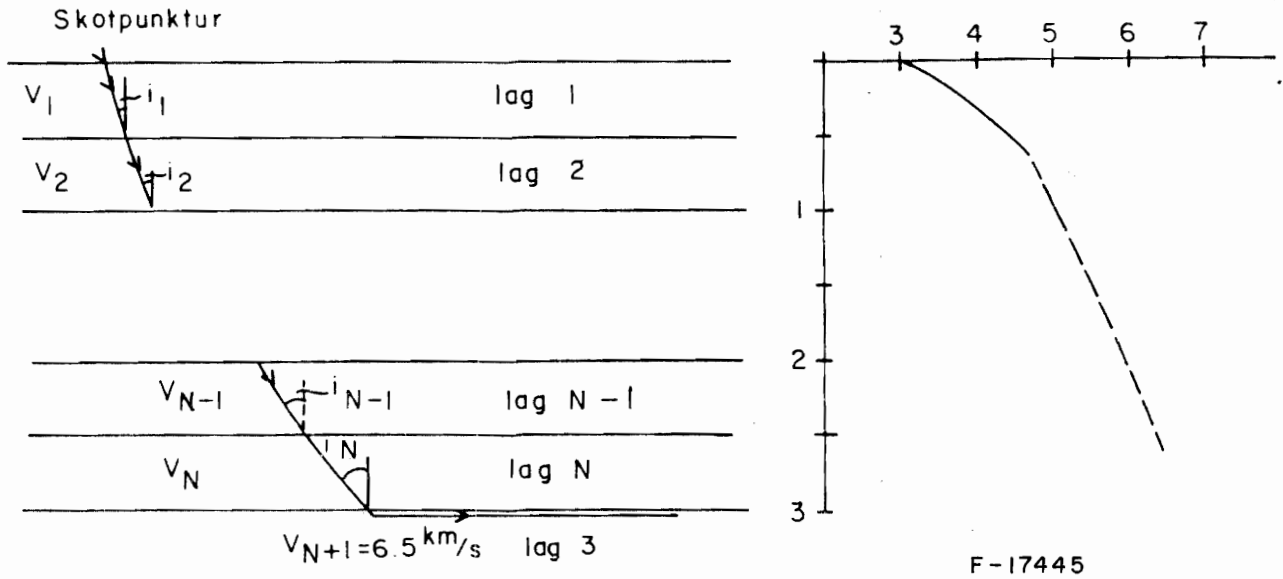


SKÝRINGAR:

- R1b
- .-.- R6
- 47
- R2a
- R2b
- R3
- R5
- R7
- R1a

Mynd II

Skýringar
 ○ Málpunktur
 ● Skolpunktur



Mynd 12 Við dýptarreikningana er efri hluta jarðskorpunnar skipt upp í mörg þunn lög sem hvert um sig hafa fastan hraða.

Við kritískt brot milli lags N og N+1 (lag 3) gildir skv. jöfnu (1.2) (3.3.9) $\sin i_N = \frac{V_N}{V_{N+1}}$, þar sem i_N er infallshornið í lagi N (Sjá mynd 12). Við öll önnur horn milli laga gildir jafna (1.1)

$$\frac{\sin V_k}{\sin V_{k+1}} = \frac{V_k}{V_{k+1}}$$

Fyrir lag N-1 verður þetta $\frac{\sin V_{N-1}}{\sin V_N} = \frac{V_{N-1}}{V_N}$ og innsetning

frá jöfnu (3.3) gefur $\frac{\sin V_{N-1}}{V_N / V_{N+1}} = \frac{V_{N-1}}{V_N} = \sin i_{N-1} = \frac{V_{N-1}}{V_N}$

eða almennt má tákna brothornið í k-ta laginu við $\sin i_k = \frac{V_k}{V_N}$ (4.15)

Tíminn sem bylgjan notar við að fara gegnum k-ta lagið er þá

$$T_k = \frac{d_k}{V_k \cos i_k} \quad \text{þar sem } d_k \text{ er þykkt k-ta lagsins. Heildar tíminn}$$

sem það tekur bylgjuna að komast niður að lagi 3 er þá

$$\sum_{k=1}^N \frac{d_k}{V_k \cos i_k}$$

Heildar færsla geislans í x-stefnu í þessum N lögum er þá

$$\sum_{k=1}^N d_k \tan i_k$$

og útreiknaður taftími er þá

$$T_r = \sum_{k=1}^N \frac{d_k}{V_k \cos i_k} - \frac{1}{V_{N+1}} \sum_{k=1}^N d_k \tan i_k \quad (4.16)$$

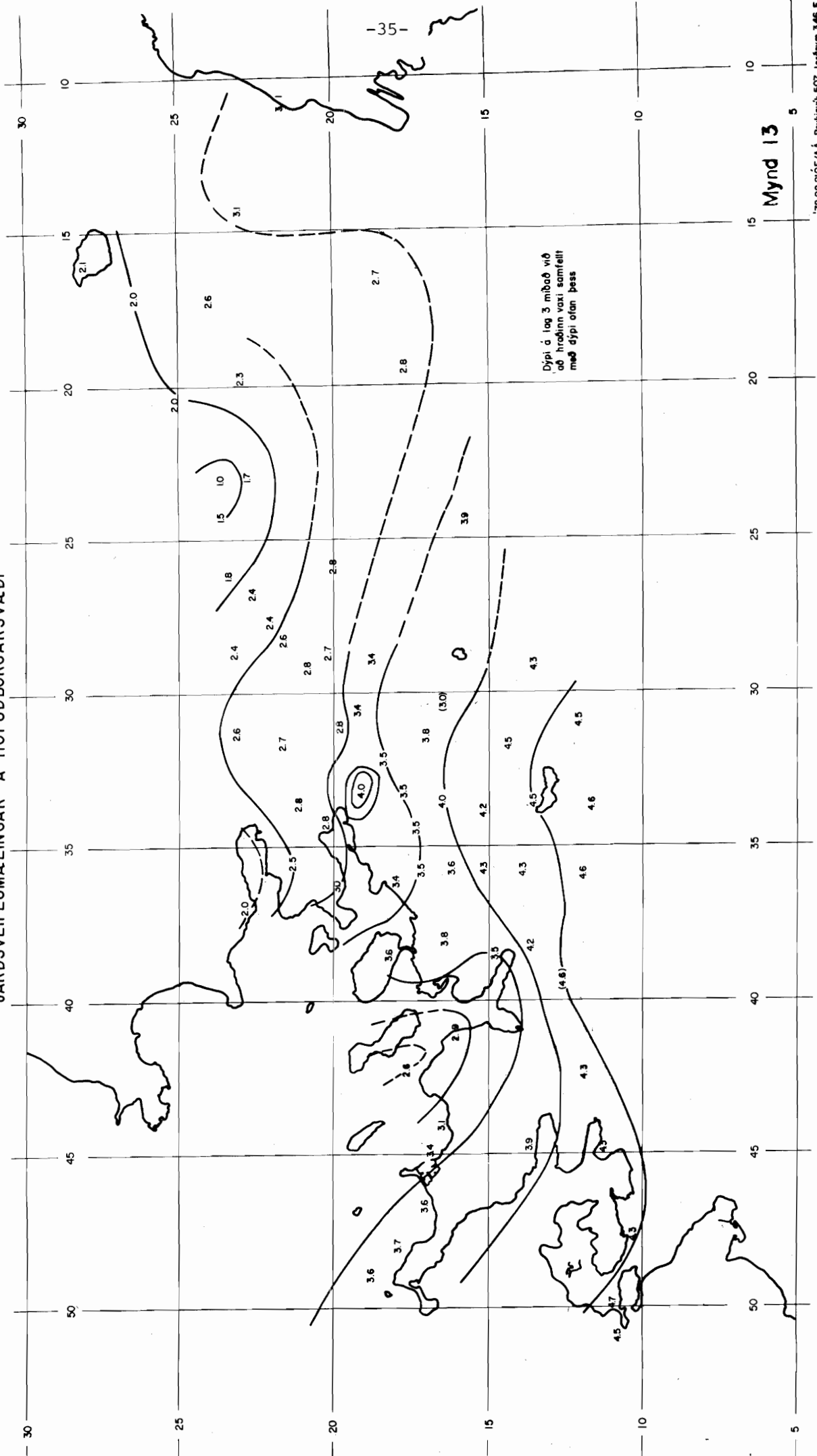
og dýpið á lag 3 (lag N+1) er þá

$$D = \sum_{k=1}^N d_k \quad (4.17)$$

Tölvuforrit er nú notað við útreikninga á dýpinu. Þekktu hraðarnir í efsta hluta jarðskorpunnar eru lesnir inn ásamt áætluðum hraðastigli fyrir óþekkt hlutann, mældum heildar taftíma viðkomandi punkts og hraðanum í lagi 3 (V_{N+1}). Prógramið deilir síðan hraðagildunum niður á fjölmörg þunn lög sem öll hafa sömu þykkt d . Því næst reiknar hún taftíma í módelinu eftir jöfnu (4.16) og ber saman við melda taftímann. Ef mismunur þessara gilda er meir en 0,01 s breytir hún gildi innlesna hraðastigulsins uns mismunur melda og reiknaða taftímans er minni en 0,01 s. Þá reiknar hún dýpið á lag 3, skv. jöfnu (4.17).

Í töflu í viðauka B eru gefnir upp taftímar hinna einstöku punkta, en á mynd 13 er dýptarkort á lag 3 sýnt. Þar má glögg sjá, að allmiklar sveiflur eru í dýptinni á lagið. Utan megineldstöðvanna er dýpið 3-4,5 km og virðist grynka á lagið í norðvestlæga stefnu. Innan megineldstöðvanna er dýpið mun minna, um 2 km innan Kjalarneseldstöðvarinnar en 1,5-1,8 km innan Stardalseldstöðvarinnar. Í einum punkti, L14, er dýpið aðeins 1,0 km. Hugsanlegt er að meiri innskotapéttleiki ofan lags 3, og því hærri hraði þar en á sama dýpi undir öðrum mælipunktum innan Stardalseldstöðvarinnar, valdi því hve lítill taftíminn fyrir þennan eina punkt er.

JARÐSVEIFLUMÆLINGAR Á HÖFUÐBORGARSVÆÐI



-35-

Mynd 13

Ef svo er, er allt eins líklegt að dýpið sé svipað undir L14 og annars staðar innan Stardalseldstöðvarinnar, eða 1,5-1,8 km.

4.6 Taftímafrávik

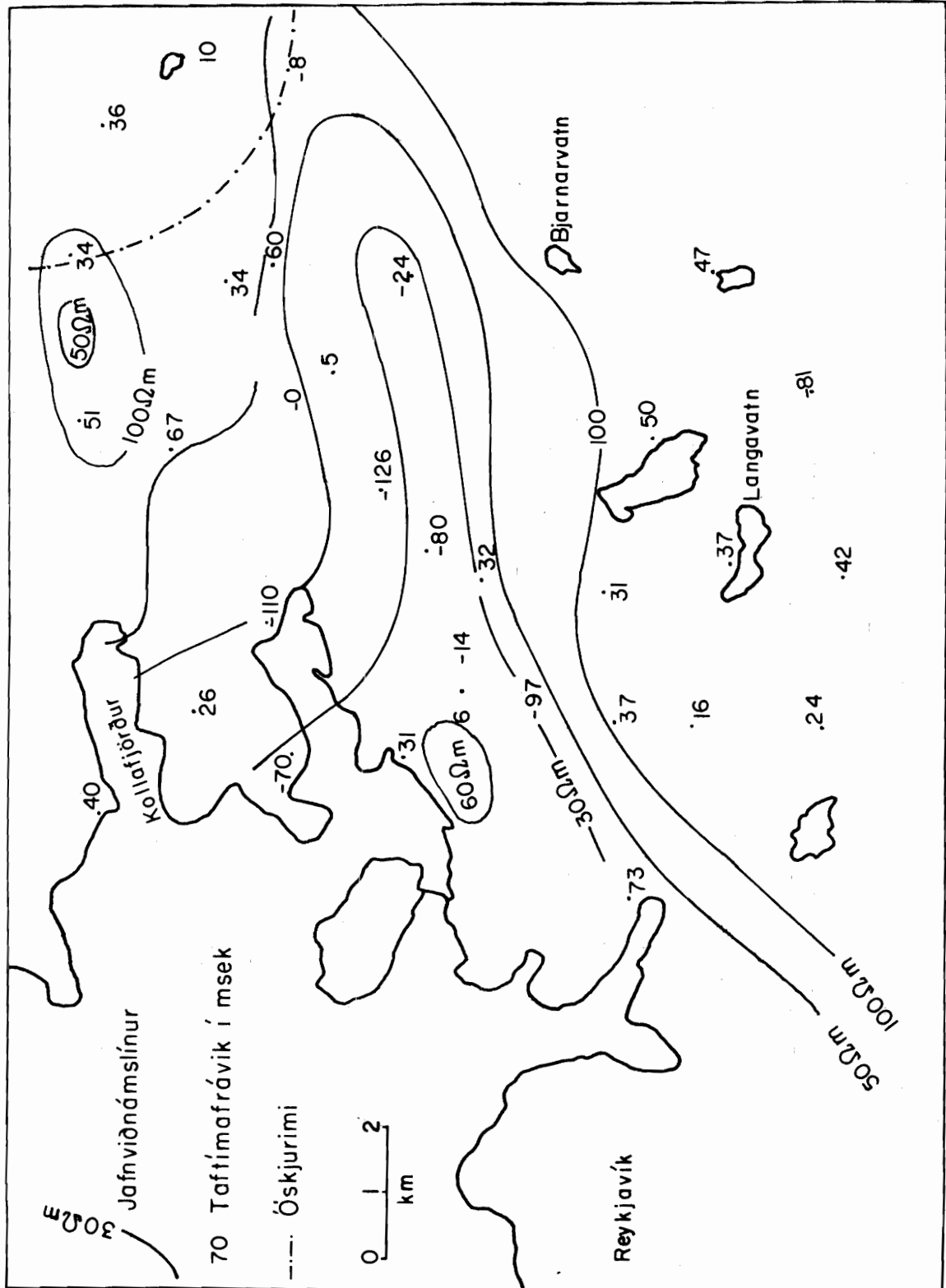
Taftímakortið á mynd 13 sýnir m.a. taftímana undir skotpunktunum, 0,28 s í Stíflisdalsvatni og 0,55 s við Álftanes. Út frá þessum tölum hvorri fyrir sig og fartíma bylgju frá skotpunkti til mælipunkts má reikna taftímana í hverjum einstökum mælipunkti. Hann á að vera sá sami óháð því frá hvaða skotpunkti er reiknað, þ.e. stærðin D_R = (taftími reiknaður út frá skotum í Stíflisdalsvatni) - (taftími reiknaður út frá skotum við Álftanes) á að vera núll. Þessi stærð kallast taftímafrávik.

Á mynd 14 hef ég merkt inn taftímafrávikin. Þau eru allmikil, bæði jákvæð og neikvæð. Stærsta mínusgildið er 126 ms en stærsta plúsgildið 73 ms. Meðaltal og staðalfrávik neikvæðu taftímafrávikanna er 59 ± 43 ms og 38 ± 18 ms fyrir þau jákvæðu. Meðaltal allra taftímafrávikanna er nálægt 1 ms sem er eðlileg afleiðing tímaliðsaðferðarinnar.

Taftímafrávik þessi eru stærri en svo að þau verði skýrð með mælingaróvissu. Ef taftímafrávikin stöfuðu af mælingaróvissu væri þess að vanta að þau væru dreifð af handahófi en ekki eftir ákveðnu mynstri eins og mynd 14 sýnir. Mjög hefur verið leitað eftir því hvort um einhverja kerfisbundna skekkju í framkvæmd eða túlkun mælinganna væri að ræða. T.d. kemur í ljós, að engin tengsl eru milli taftímafrávikanna og þess á hvaða loftmyndum mælipunktarnir eru staðsettir. Þá er heldur ekki að finna neitt samband milli taftímafrávikanna og raðarinnar sem punktarnir eru mældir eftir. Tímamerkin milli skot- og mælipunkta voru alltaf send á sama hátt. Sú skýring á þessu að það sé hærra hraði í lagi 3 undir megineldstöðvunum tveimur en annars staðar í því gengur ekki, því þá myndu bylgjur sem farið hafa gegnum rætur Stardalseldstöðvarinnar en ekki Kjalarneseldstöðvarinnar hafa sama formerki á taftímafrávikunum. Væri ástæðan sú að hraðinn ykist með dýpi svo einhverju næmi í lagi þrjú, kæmi fram andhverfa (anti-symmetria) í taftímafrávikunum um þverlínu mitt á milli skotpunktanna.



Jarðsveiflumælingar á höfuðborgarsvæði
Taftímafrávik og jafnvíðnámslínur



Allt bendir til þess að staðbundnar aðstæður við mælipunktana valdi taftímafrávikunum. Ef svo er þá þýðir þetta að hraðinn er mjög stefnuháður í næsta nágrenni mælipunktanna.

Til að fá hugmynd um stærðargráðuna á hraðabreytingunni í mismunandi stefnur má nálgast efri hluta jarðskorpunnar með einu lagi sem hefur meðalhraða 4,8 km/s fyrir bylgjur sem koma frá Álftanesi. Ef einnig er gert ráð fyrir því að efra borð lags 3 liggi á 3,5 km dýpi undir mælipunktinum og sé þar flatt, má reikna þann hraða sem bylgjan frá Stíflisdalsvatni fer með á leið sinni frá efra borði lags 3 að mælipunkti og er hann 5,6 km/s ef taftímafrávikid er -100 ms.

Á mynd 14 hef ég auk taftímafrávikanna teiknað inn jafnvíðnámslínur á 500 m dýpi. Línurnar eru teiknaðar eftir óbirtu korti (Ingvar B. Friðleifsson og Guðmundur I. Haraldsson 1976; óbirt kort af víðnámi á 500 m dýpi á höfuðborgarsvæðinu, Orkustofnun), byggðu á svonefndum Schlumberger-víðnámsmælingum. Fram koma áberandi tengsl milli lágvíðnámsvæðanna og neikvæðu taftímafrávikanna.

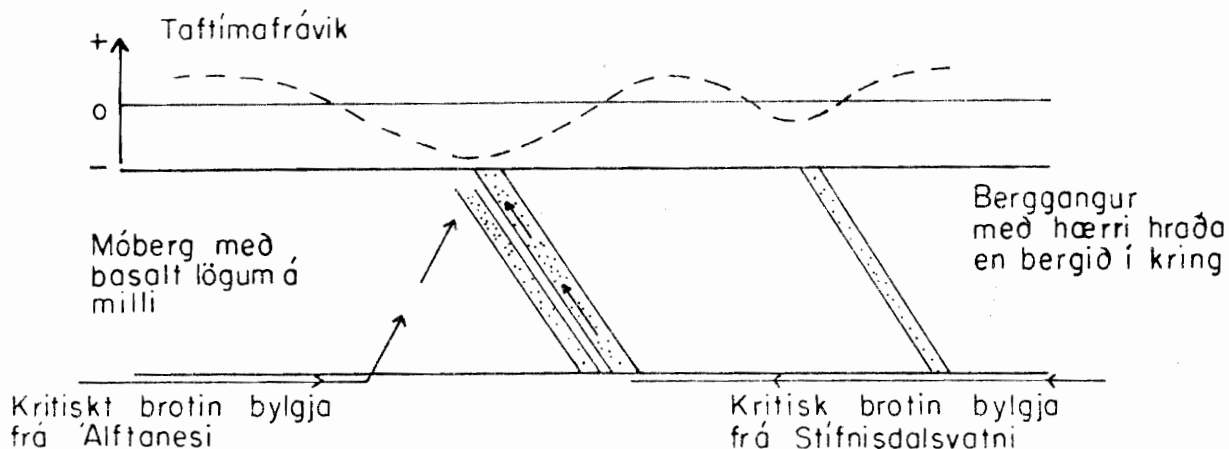
Lágvíðnámið endurspeglar líklega móbergsmýndanir og neikvæðu taftímafrávikin þá e.t.v. tengd þeim á einhvern hátt. Ef svo er, þá eru jákvæðu frávikin að hluta til reikningsleg afleiðing þeirra neikvæðu, vegna eðlis tímaliðsaðferðarinnar.

Hugsanleg skýring er að um hallandi innskot í móberginu sé að ræða. Innskotunum hallaði þá í áttina að Stíflisdalsvatni (Stardal) og virkuðu sem háhraðabylgjuleiðarar fyrir bylgjur þaðan, en hefðu lítið áhrif á bylgjur frá Álftanesi. Þessi skýring er sýnd á mynd 15.

Helsta mótbára gegn þessari skýringu er sú að fremur mætti búast við að innskotum norðanvert við Leirvog hallaði inn að Kjalarneseldstöðinni og yllu þær jákvæðum frávikum.

Ef gengið er út frá þessari skýringu er unnt að leiðrétta fartímana frá Stíflisdalsvatni til þeirra punkta sem hafa neikvæð taftímafrávik og endurkeyra tímaliðsprógramið í tölvu. Það hefur verið reynt og fæst þá

að hraðinn í lagi 3 sé 6,47 km/s og öll taftímafrávikin verða mun minni. Þetta breytir taftímakortinu á mynd 10 mjög lítið og aðeins í þeim punktum sem fartími er leiðréttur fyrir.



F-1884I

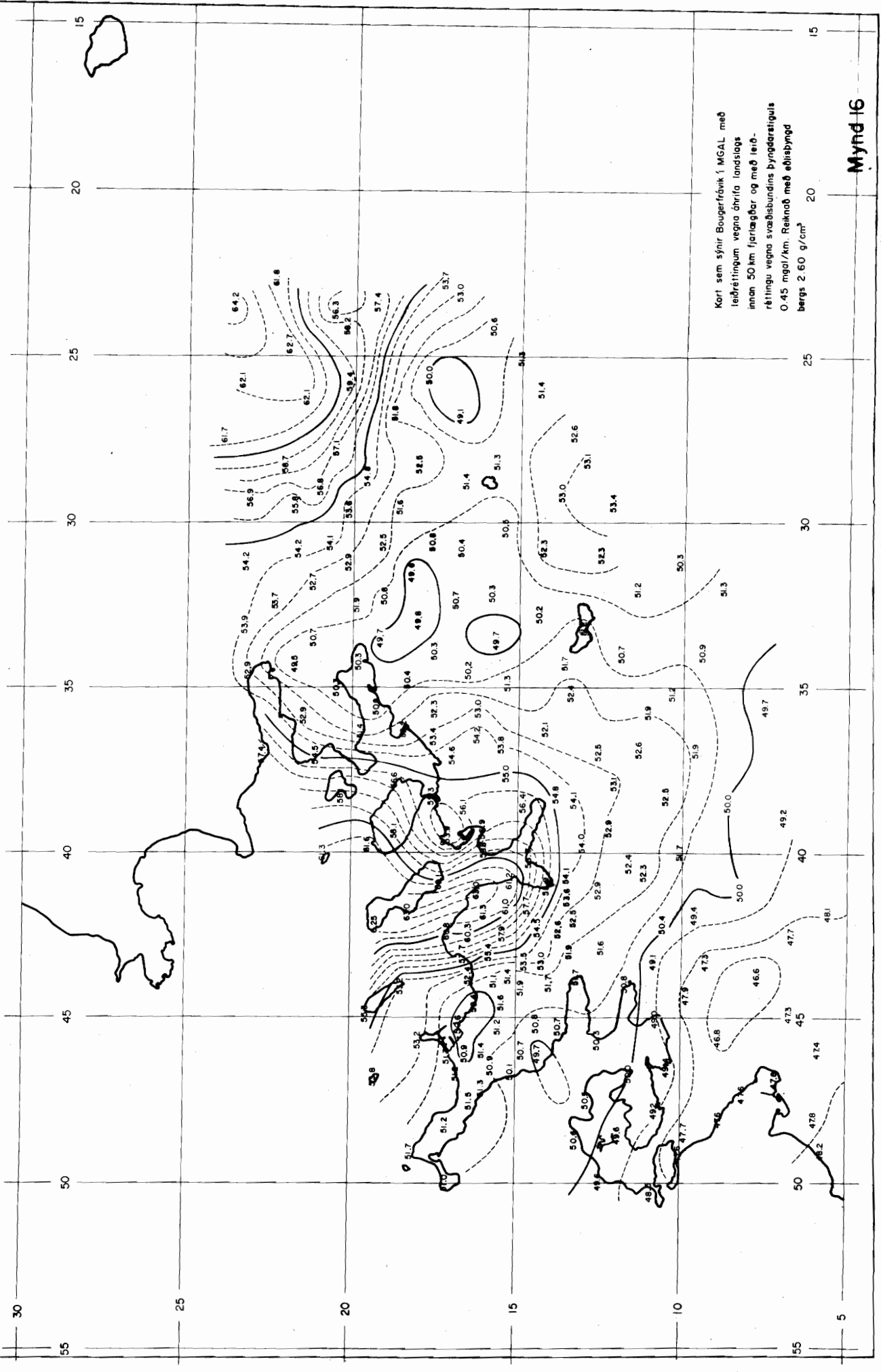
Mynd 15 Hugsanleg skýring taftímafrávika.

4.7 Þyngdarmælingar

Allnákvæmar þyngdarmælingar hafa verið gerðar af svæðinu (Gunnar Þorbergsson, 1976; óbirt þyngdarkort af Reykjavík og nágrenni, Orkustofnun). Gunnar Þorbergsson annaðist mælingarnar og útreikning Bougerfráviks, sem leiðrétt er fyrir landslagsáhrifum út í 50 km fjarlægð. Ég hef síðan leiðrétt fyrir svæðisbundnum þyngdarstigli til þess að fá sem besta mynd af staðbundnum óreglum í þyngdarsviðinu. Þyngdarstigulinn hef ég metið $-0,45 \text{ mgal/km}$ í stefnu að miðju landsins. Við matið hef ég notast við þyngdarkort Trausta Einarssonar (1954).

Þyngdarkortið er sýnt á mynd 16. Það endurspeglar óreglur í eðlisþyngd jarðlaganna á svæðinu eða óreglur í dýpi niður á lög með aðra eðlisþyngd en lögin umhverfis. Út frá þyngdarmælingunum einum sér er ekki hægt að segja til um hvort tiltekin óregla stafar af litlum hlut með miklum þéttleika eða stærri hlut með minni þéttleika. Hins vegar er bylgjuhraðinn meðal annars háður eðlisþyngd bergsins, þannig að nota má jarðsveiflumæl-

ÞYNGDARKORT AF REYKJAVÍK OG NÆGRENNI



Kort sem sýnir Bougerfrávik í MGAL með leiðréttingum vegna óhrifa landslags innan 50 km fjartæðis og með leiðréttingu vegna svæðsbundins bygðarstígis 0.45 mgal/km. Reiknað með eðlisþyngd bergs 2.60 g/cm³

Mynd 16

ingar til að fá hugmyndir um stærð tiltekinna óreglna. Ef þekking á sambandi bylgjuhraða og eðlisþunga er fyrir hendi (til eru ýmsar erlendar mælingar á því, og auðvelt ætti að vera að gera slíkar mælingar hér) er hægt að túlka saman þyngdar- og jarðsveiflumælingar og fá með því mun betri mynd af efri hluta jarðskorpunnar á svæðinu en þessar mælingar gefa hvor um sig.

Ef þyngdarkortið er borið saman við taftímakortið á mynd 10, og dýptarkortið á mynd 13 koma ýmis sameiginleg einkenni í ljós. Megineldstöðvarnar tvær koma mjög vel fram á öllum kortunum. Einnig verður bylgja sem kemur upp við botn Leirvoggs fyrir áberandi meiri tímatöf en gerist í nærliggjandi punktum. Svipað gildir um mælipunkta á Keldnaholti. Lægðir koma í þyngdarsviðinu á sömu stöðum. Á dýptarkortinu kemur þetta fram sem meira dýpi á lag 3 en ella. Allt eins er líklegt að þessu valdi lægri hraði ofan lags 3 á umræddum svæðum en umhverfis, t.d. þykkri móbergsmýndanir sem hafa lægri hraða en basaltið.

Þess ber að gæta við samlíkingu þyngdarkortsins við taftímakortið og dýptarkortið að þau eru ekki að öllu leyti sambærileg. Þannig gætir áhrifa eðlisþunga laga, eins og t.d. eru í megineldstöðvunum, mun lengra út fyrir það svæði, sem þessi eðlisþungu lög ná yfir, í þyngdarmælingunum en í jarðsveiflumælingunum. Við samtúlkun beggja mælinga eru slík áhrif tekin með í dæmið.

4.8 Samanburður við lagskipt líkan

Eins og áður er að vikið er framangreind túlkun byggð á því að hraðinn vaxi samfelld með dýpi niður að lagi 3. Einnig má túlka mælingarnar út frá lagskiptri jörð. Þótt fyrrgreind túlkun verði að teljast nær raunveruleikanum er full ástæða að sjá hvaða mynd lagskipta túlkunin gefur.

Fartímalínuritinn má nálgast þökkalega með þremur lögum, lagi 1, lagi 2 og lagi 3. Lag eitt hefur þá hraða 3,6-4,2 km/s eftir svæðum. Lag 2 virðist hafa hraða 4,7-4,8 km/s nema innan Stardalseldstöðvarinnar, þar sem hraðinn virðist vera um 5,6 km/s. Engar mælingar á bylgjuhraða eru til innan Kjalarneseldstöðvarinnar en ég geri ráð fyrir að hraðinn í lagi 2 sé þar einnig 5,6 km/s. Lag 3 hefur svo, sem fyrr segir, hraðann 6,5 km/s.

Samkvæmt útreikningum á dýpinu á lag 2 virðist það afar óreglulegt. Að hluta kann það að stafa af því hve fáir mælipunktur eru nothæfir til reikninganna en langlíklegast er að sjálfur grundvöllur túlkunarinnar sé rangur, þ.e. að ekkert hraðastökk sé milli "lags 1", og "lags 2". Þó er hugsanlegt að lagamótin séu sumsstaðar fyrir hendi og tákni þá neðri mörk móbergsmýndana. Þetta gæti einkum átt við svæðið frá Elliðaár-
vogi að Helgadal. Mælingarnar á dýpinu á lag 2 gefa þá vísbendingu um að þykkar móbergsmýndanir séu á svæði frá Gufunesi, inn með Grafarvogi og þaðan í sveig norðaustur í áttina að Reykjum í Mosfellssveit. Til að nokkuð verði um þetta fullyrt er nauðsynlegt að gera mun ítarlegri jarðsveiflumælingar á umræddu svæði og bera saman við viðnámsmælingar.

Dýpið á lag 3 út frá lagskipta líkaninu er sýnt á mynd 17. Svo sem sjá má er dýpið þarna mun minna eða rúmum kílómetra minna en samfellda hraðatúlkunin gefur. Innan megineldstöðvarinnar er munurinn heldur minni. Gera má ráð fyrir að samfellda túlkunin gefi mesta mögulega dýpi á lag 3 en sú lagskipta minnsta mögulega dýpið. Sannleikurinn er svo kannski einhvers staðar þarna á milli eftir því að hve miklu leyti hraðinn vex með dýpi, einkum innan lags 2. Ef hraðinn er til dæmis nálægt því að vera fasti á einhverju dýptarbili en jafnvaxandi utan þess má áætla að dýpið á lag 3 sé eitthvað heldur minna en mynd 13 sýnir, en hversu mikið ræðst af stærð dýptarbilsins. Hins vegar getur slíkt dýptarbil með föstum hraða varla verið mjög stórt án þess að brotin bylgja frá yfirborði þess kæmi fram sem seinni bylgja á skjálftaritunum. Slík seinni bylgja finnst ekki (kafla 4.1) þannig að ég tel samfelldu túlkunina á dýpinu nær raunveruleikanum en þá lagskiptu.

5. STAÐA JARÐEÐLISFRÆÐIRANNSÓKNA OG TILLÖGUR UM FRAMHALD ÞEIRRA

5.1 Jarðsveiflumælingar

Þótt lokið sé dýptarreikningum á lag 3 eru enn nokkur atriði úr þeim mælingum, sem fjallað er um í þessari skýrslu, sem ekki er búið að vinna úr. Er það fyrst og fremst athugun á S-bylgjuhraða sem fall af dýpi. Þá er samtúlkun jarðsveiflumælinga og þyngdarmælinga mjög æskileg því hún eykur mjög öryggið í túlkun jarðsveiflumælinganna.

Áður en í slíka samtúlkun yrði ráðist væri rétt að stækka það svæði sem jarðsveiflumælingarnar ná til. Þar sem efri mörk lags 3 eru talin líkleg til að vera mesta dýpi, sem unnt sé að vinna heitt vatn á, væri æskilegt að kortleggja dýpið á lag 3 á svæðinu frá Hvalfirði suður og austur fyrir Nesjavelli og suður að Krísuvík.

5.2 Viðnámsmælingar

Mikið er til af viðnámsmælingum af höfuðborgarsvæðinu. Allnokkuð vantar enn á að frá túlkun þeirra sé gengið. Er það nú brýnasta verkefni á höfuðborgarsvæðinu á sviði jarðeðlisfræðirannsóknna. Þegar því er lokið þarf að bera saman hinar ýmsu athuganir, s.s. viðnámsmælingar, jarðsveiflumælingar, þyngdarmælingar og athuganir á borholum og jarðfræðikortlagningu, og reyna að draga upp sem besta heildarmynd af svæðinu. Æskilegt er að því verði lokið áður en ráðist verður í boranir utan núverandi vinnslusvæða Hitaveitu Reykjavíkur.

Eins og fram hefur komið í skýrslunni voru mælingarnar ekki nógu langar til að gefa upplýsingar um þykkt og útbreiðslu móbergsmýndana. Móbergsmýndanir inni á milli basaltlaga koma fram sem lághraðalög í jarðsveiflumælingum. Slík lághraðalög er erfitt að rekja með bylgjubrotsmælingum, einkum ef þau eru þunn. Endurkastmælingar væru hins vegar kjörnar til að kortleggja móbergsmýndanirnar, þar sem vænta má öflugs endurkasts frá mótum móbergs og basalts. Þær mælingar eru hins vegar dýrar og tækjabúnaður og úrvinnslutækni ekki fyrir hendi hérlendis. Vel er hugsanlegt að nota megí bylgjubrotsmælingar með miklum þéttleika mælipunkta ásamt viðnámsmælingum til að fá upplýsingar um móbergsmýndanirnar, ef ástæða þykir til að fá grófa hugmynd um dreifingu og þykkt þeirra.

HEIMILDASKRÁ

Berge, A.M. 1976: Program for beregning og plotting av hastighetsdybde fordelingen ut fra gangtidskurva, når hastigheten øker kontinuerlig med dypet. Skýrsla frá Jordskjelvstasjon, Háskólinn í Björgvin.

Cole, R.H. 1965: Underwater explosions, Dover.

Dobrin, M.B. 1976: Introduction to geophysical prospecting. 3. útgáfa. McGraw-Hill. 630 s.

Eysteinn Tryggvason og Markus Båth 1961: Upper Crustal structure of Iceland. Journal of Geophys. Res., 66, 1913-1925.

Gudmundur Pálmason 1971: Crustal Structure of Iceland from Explosion Seismology. Vísindafél. Ísl. XL., 187 s.

Ingvar Birgir Friðleifsson 1973: Petrology and structure of the Esja quarternary volcanic region. Doktorsritgerð við Háskólann í Oxford.

Ingvar Birgir Friðleifsson og Jens Tómasson 1974: Áætlun um jarðhitarrannsóknir á höfuðborgarsvæðinu 1974, Orkustofnun, OSJHD 7406, 8 s.

Kanestrøm, R. og Berge, A.M. 1975: Tolkning av sonarbýyeda. Programbeskrivelse. Kontinental sokkelprojektet 1975, Jordskjelvstasjon, Háskólinn í Björgvin, 21 s.

Ólafur G. Flóvenz 1979 (a): Analyse av refraksjonsseismiske og teleseismiske data fra Island. Prófrítgerð til cand real prófs við Háskólann í Björgvin, 183 s.

Ólafur G. Flóvenz 1979 (b): Seismic Structure of the Icelandic Crust and the Relation between body wave velocity and the alteration of the basaltic crust. (Í prentun).

Trausti Einarsson, 1954: A survey of gravity in Iceland. Vísindafélag Íslendinga XXX, 22 s.

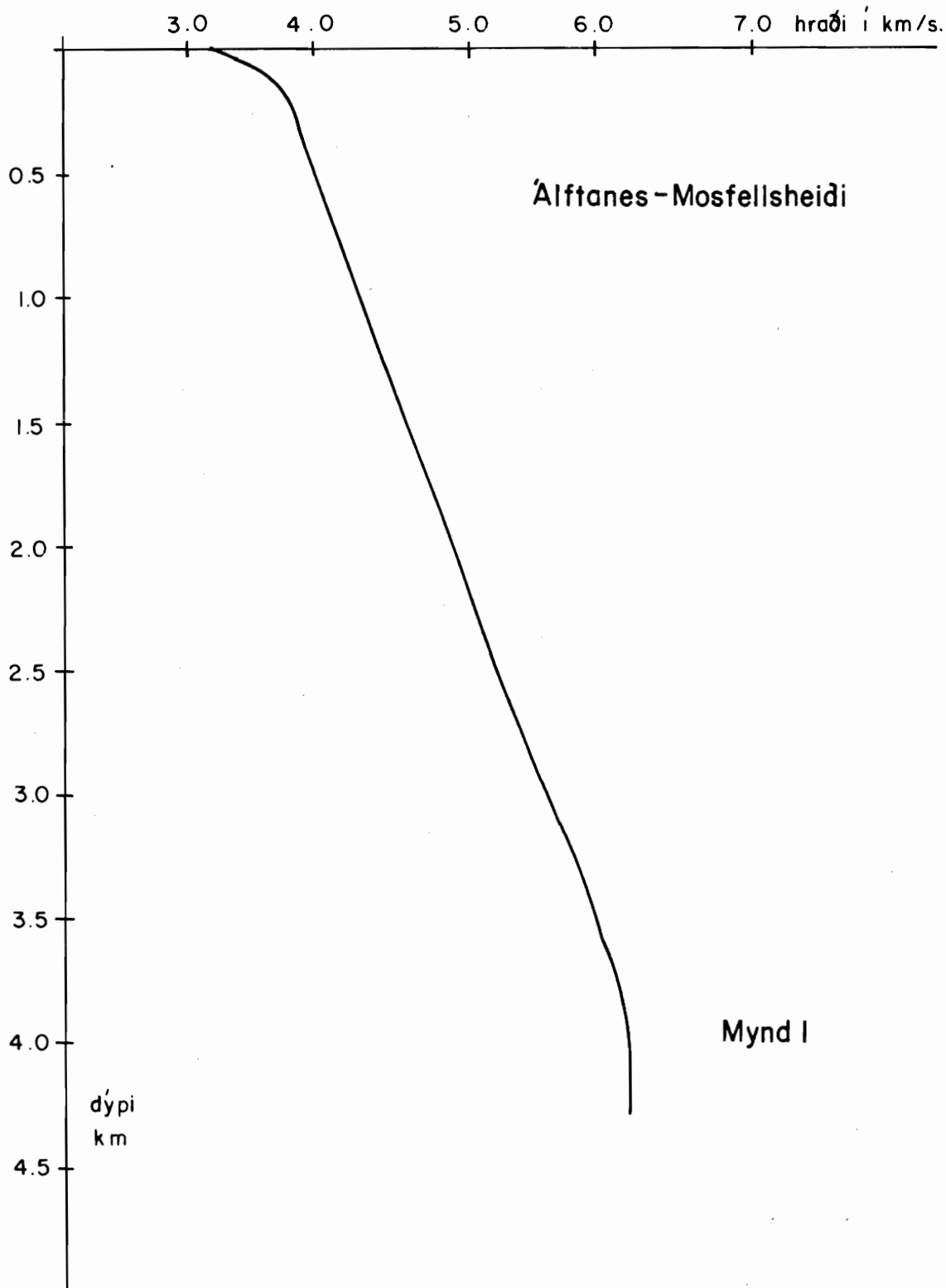
Willmore, P.L., Bancroft, A.M. 1960: The time term approach to refraction seismology. Geophys. J. Roy. astron. Soc., 3, 419-432.

VIÐAUKI A

FARTÍMARIT OG TÚLKUN ÞEIRRA

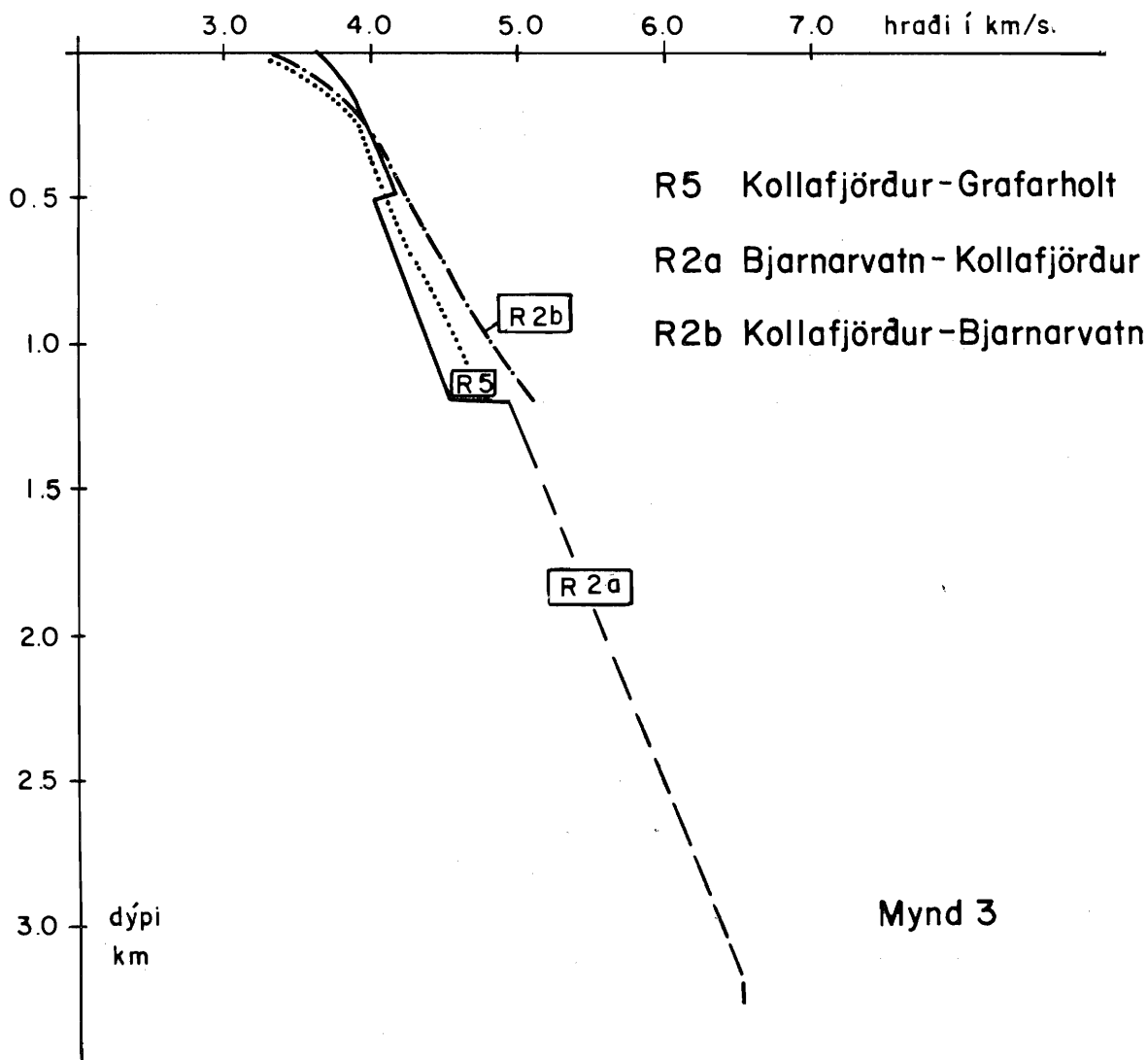
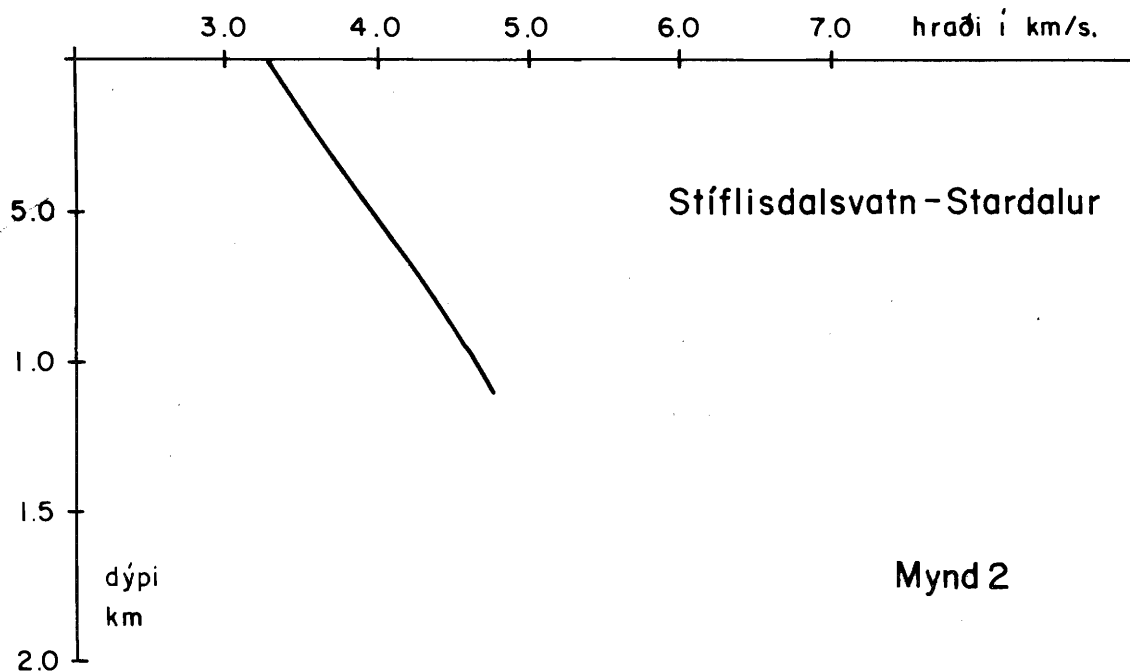


Hraði sem fall af dýpi



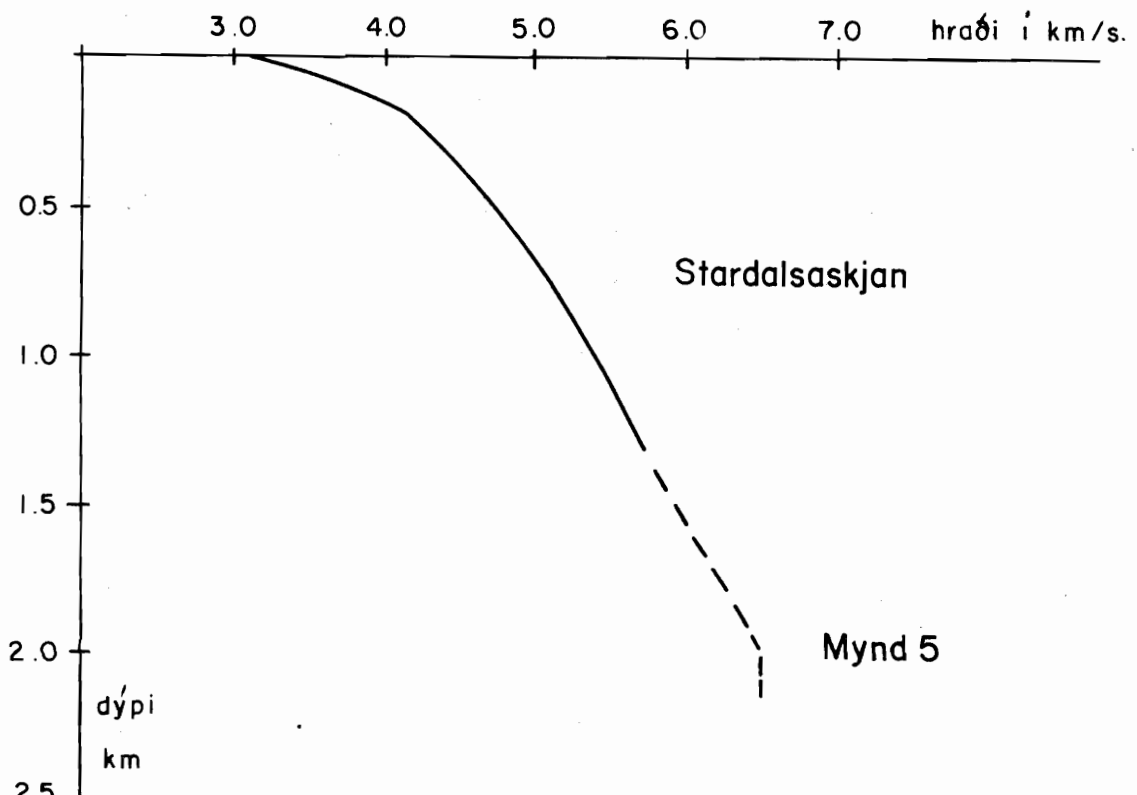
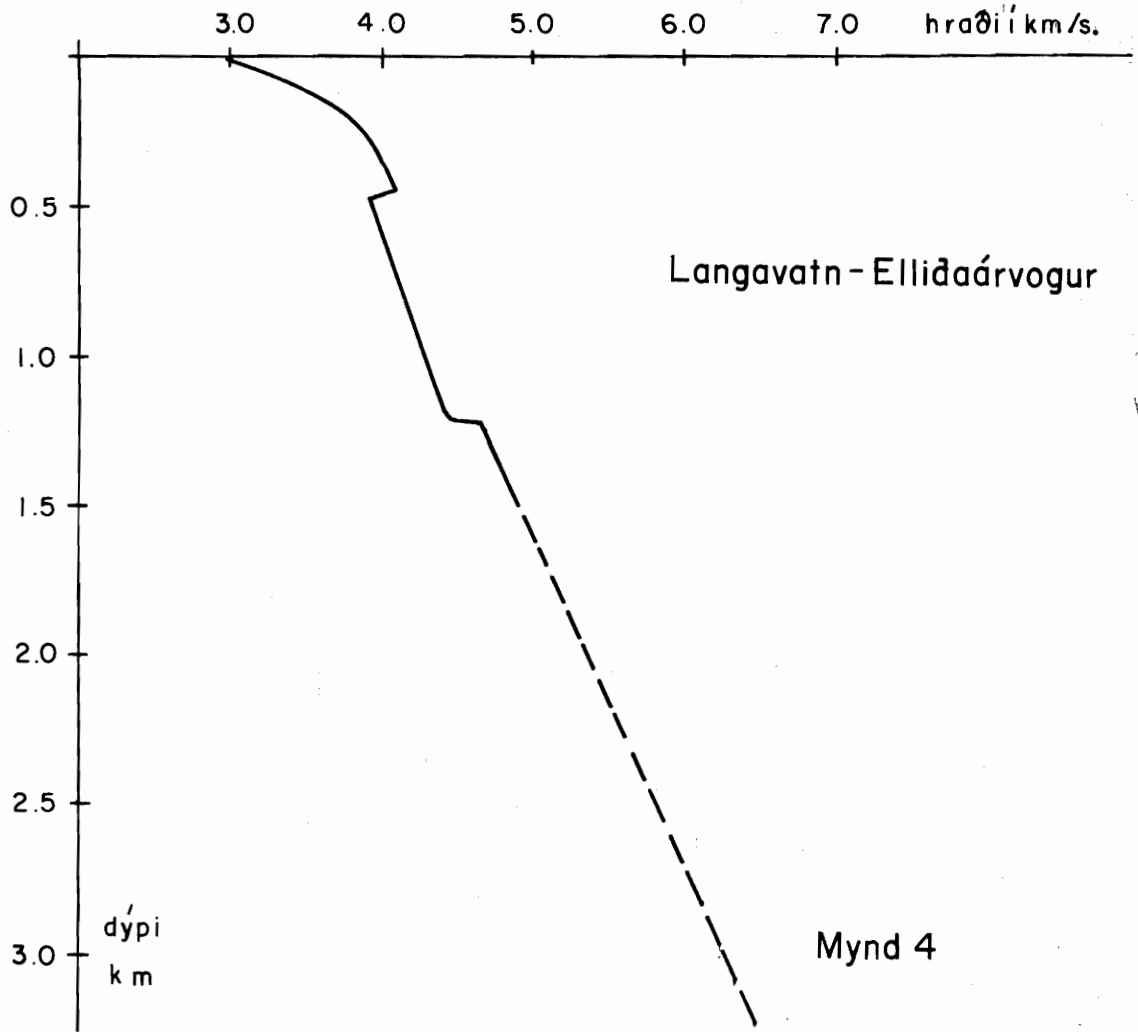


Hraði sem fall af dýpi





Hraði sem fall af dýpi





ORKUSTOFNUN

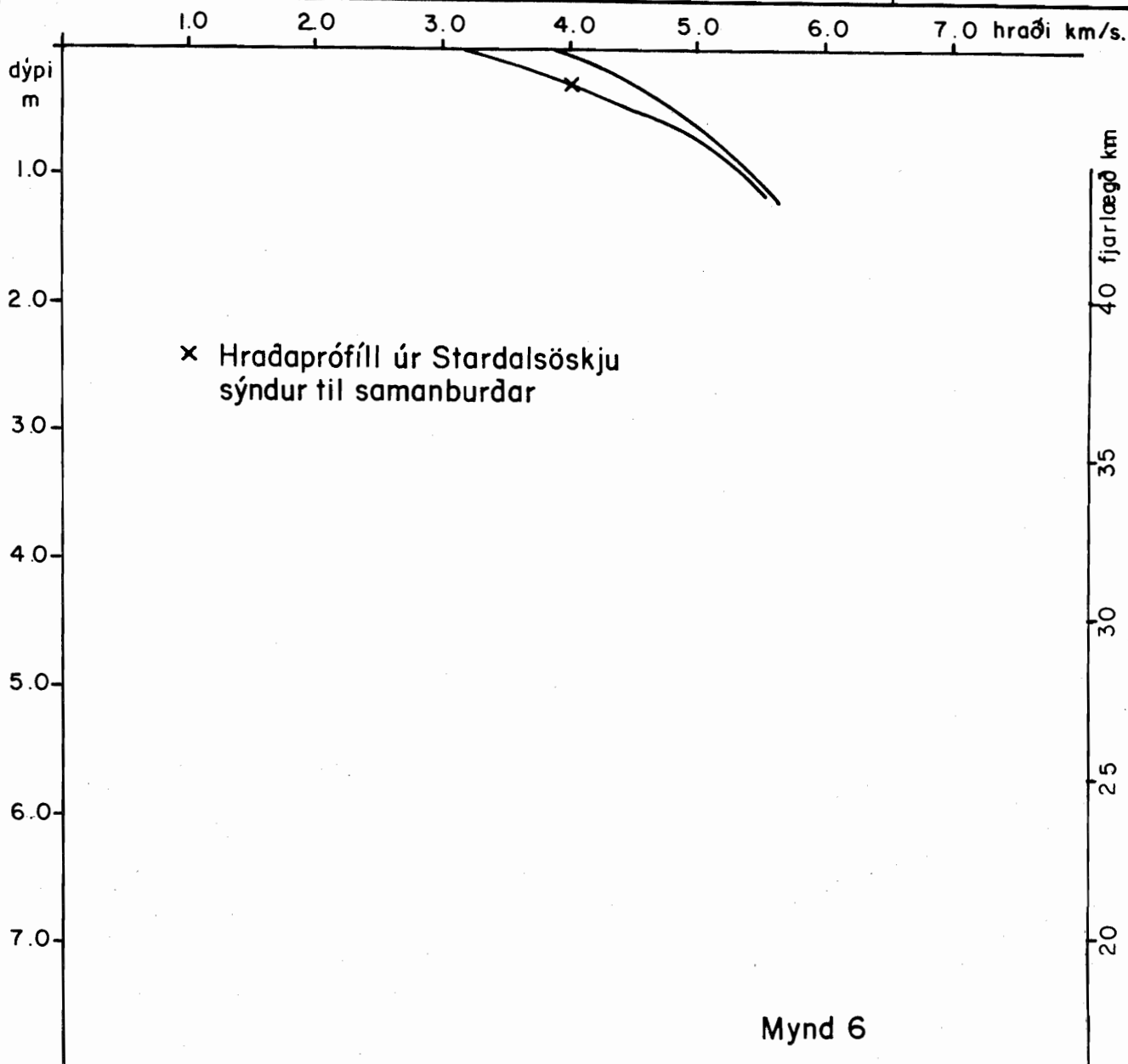
'78.08.15 ÓF / A'A

T 504 T 384

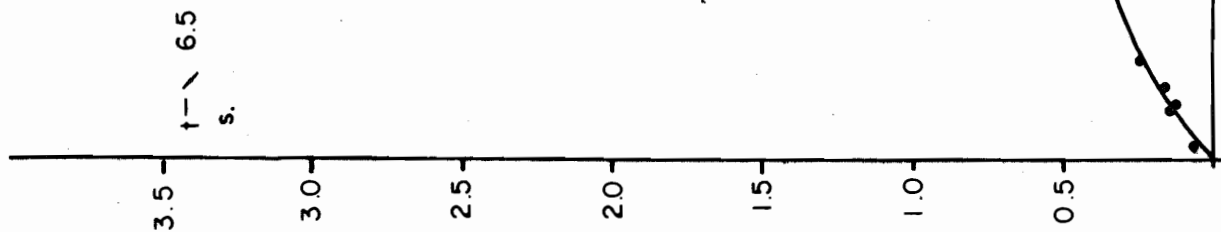
Reykjavík Jarðsv.m.

F17445

R7 Þverfellsgabbróið fartímalínurit og túlkun þess



Mynd 6





ORKUSTOFNUN

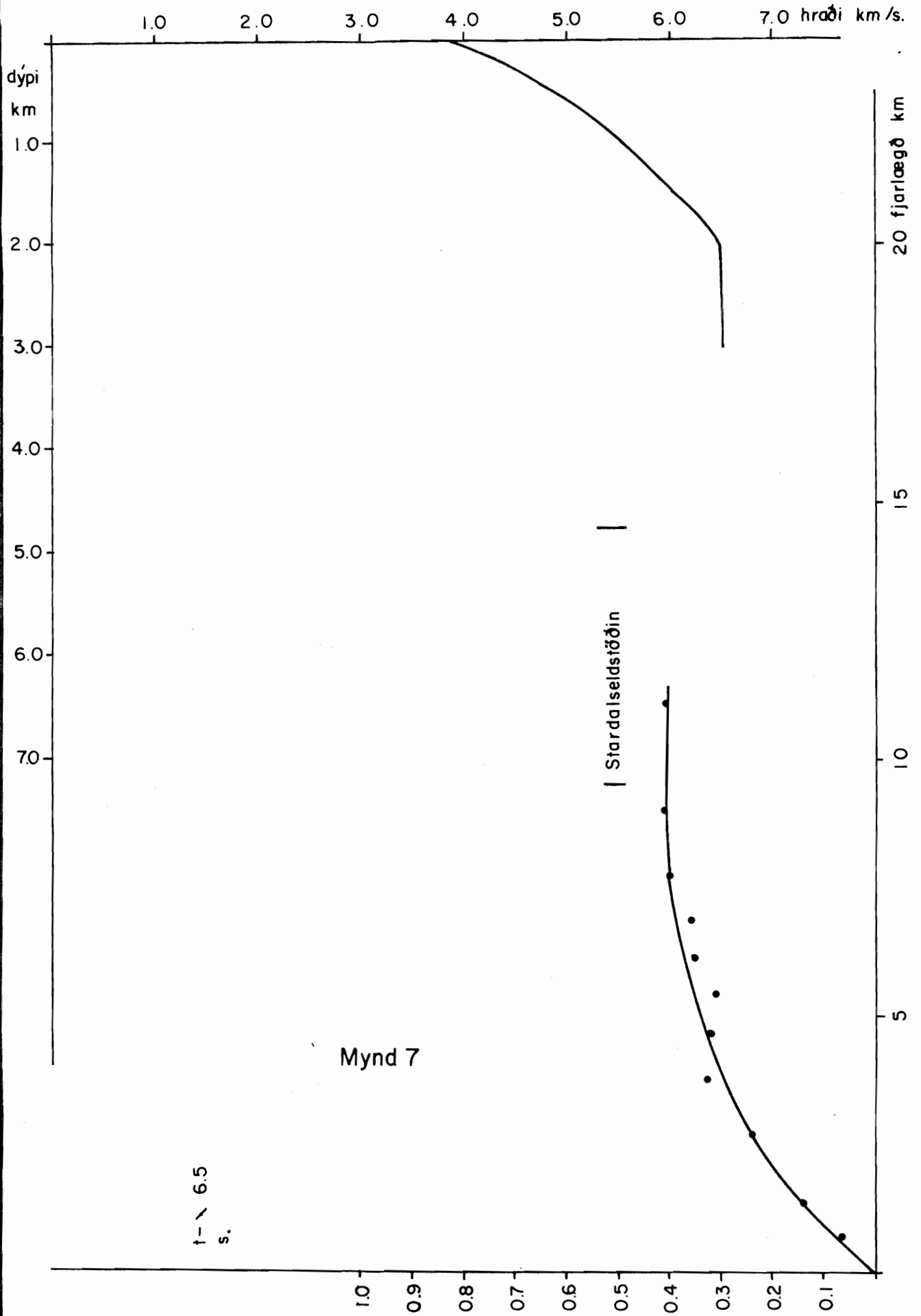
47 Kjalarnes - Þingvellir
fartímalínurit og túlkun þess

'78.08.16 ÓF / AÁ

T 504 T 384

Reykjavík Jarðsv.m.

F 174 45





ORKUSTOFNUN

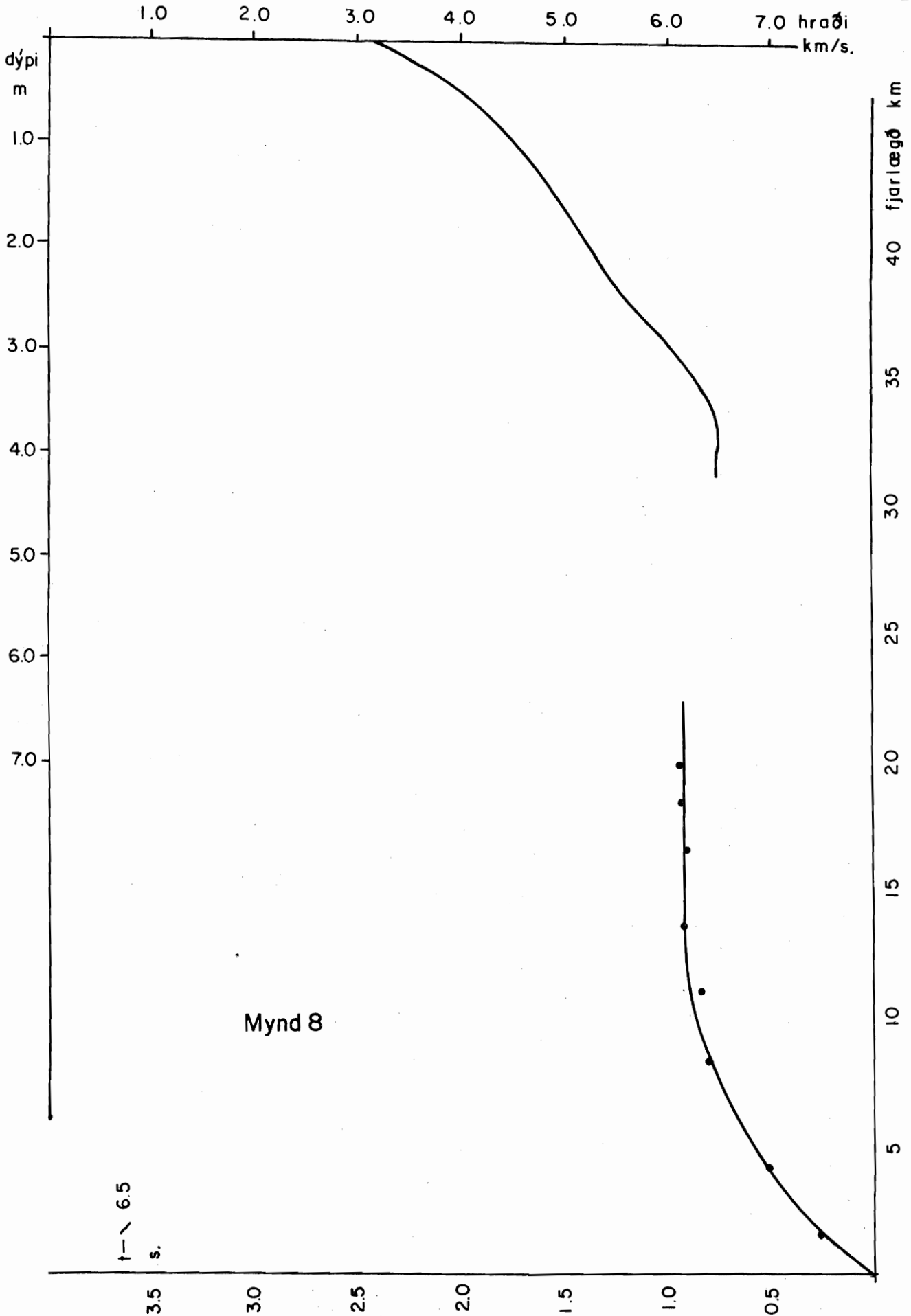
Á Mosfellsheiði
fartímalínurit og túlkun þess

'78.08.15 ÓF/AA

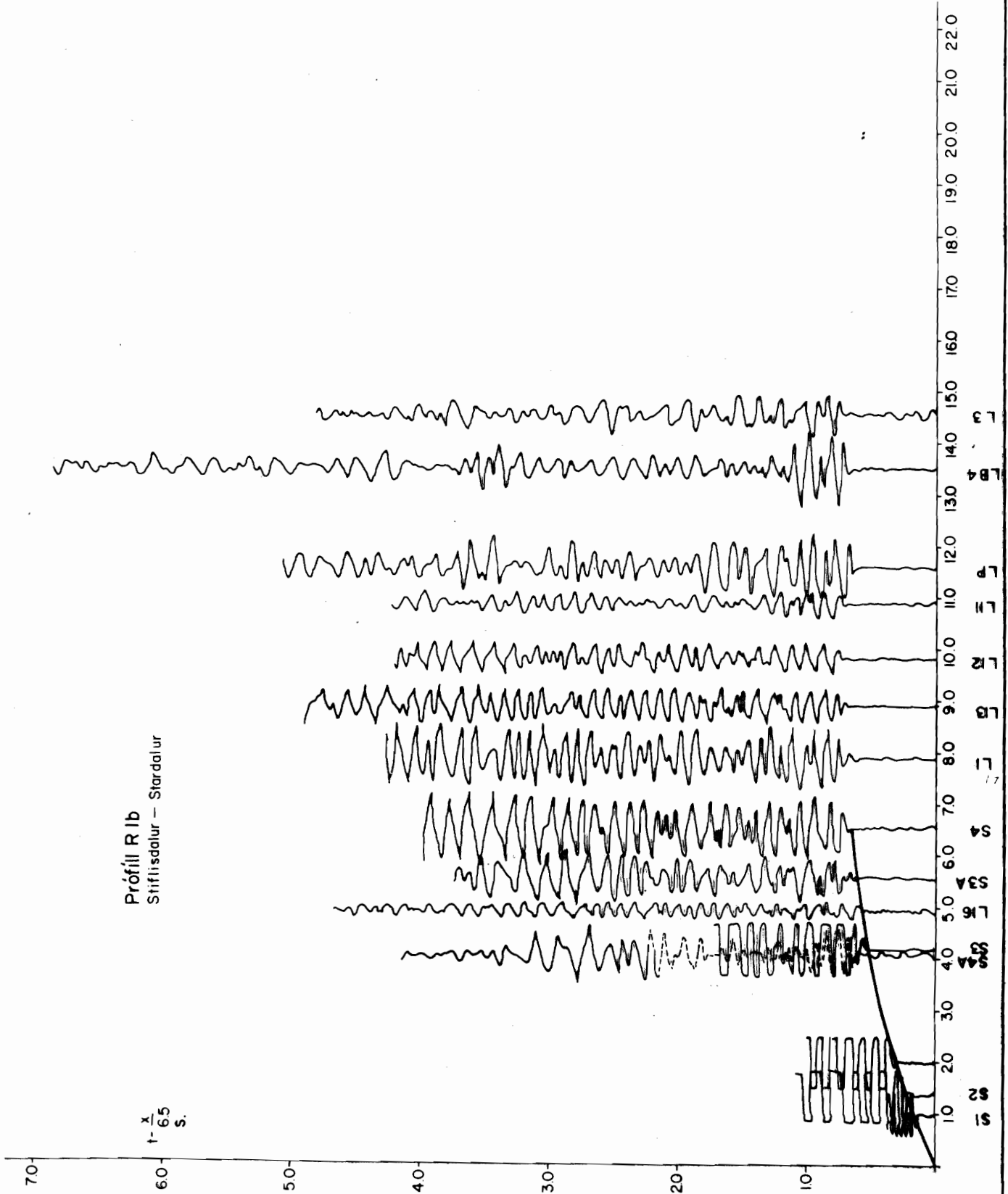
T 504 T 384

Reykjavík Jarðsv.m.

F 17445

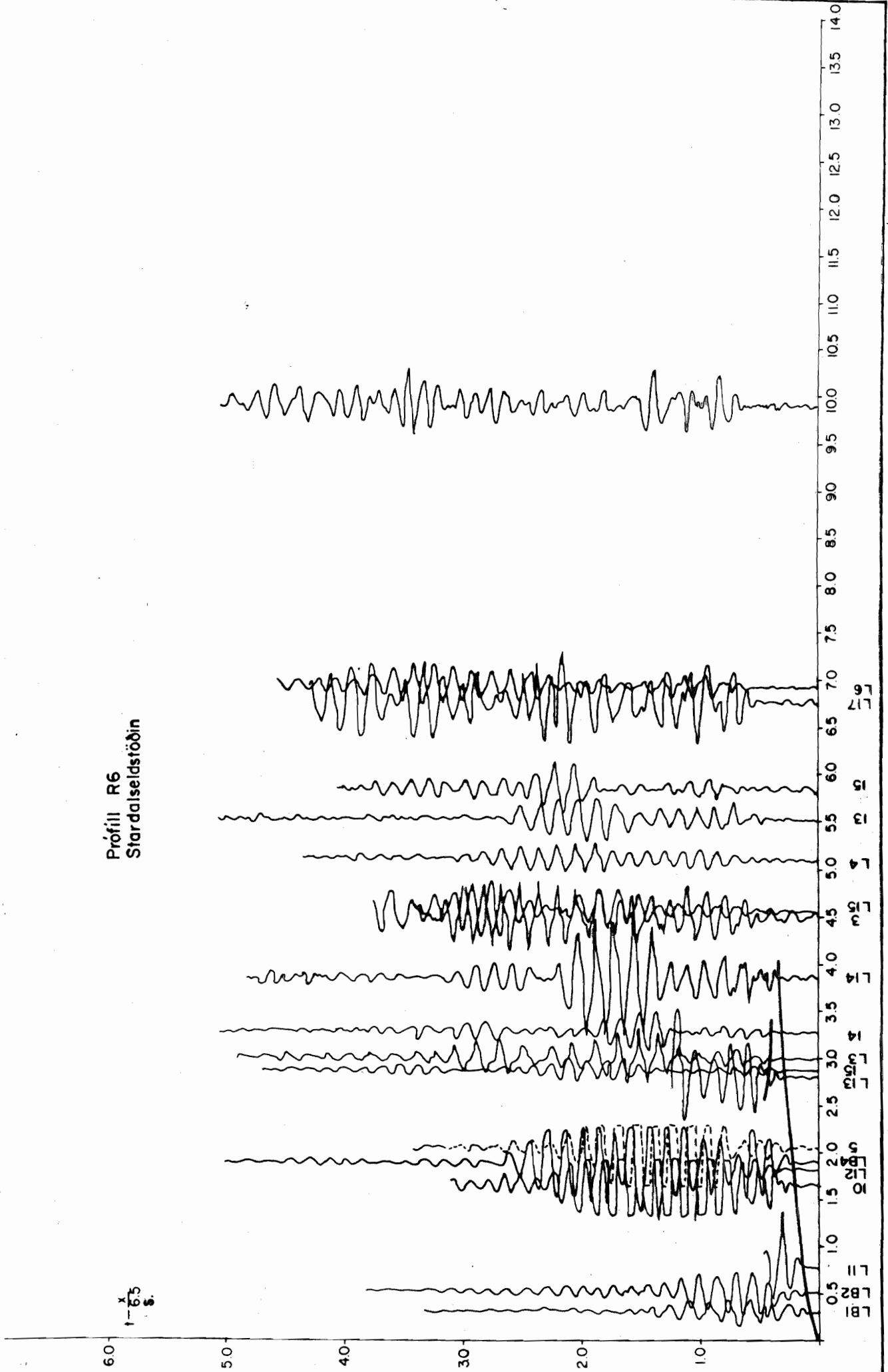


Mynd 8



Prófill R6
Stardalseldstöðin

\times
1-63
s.

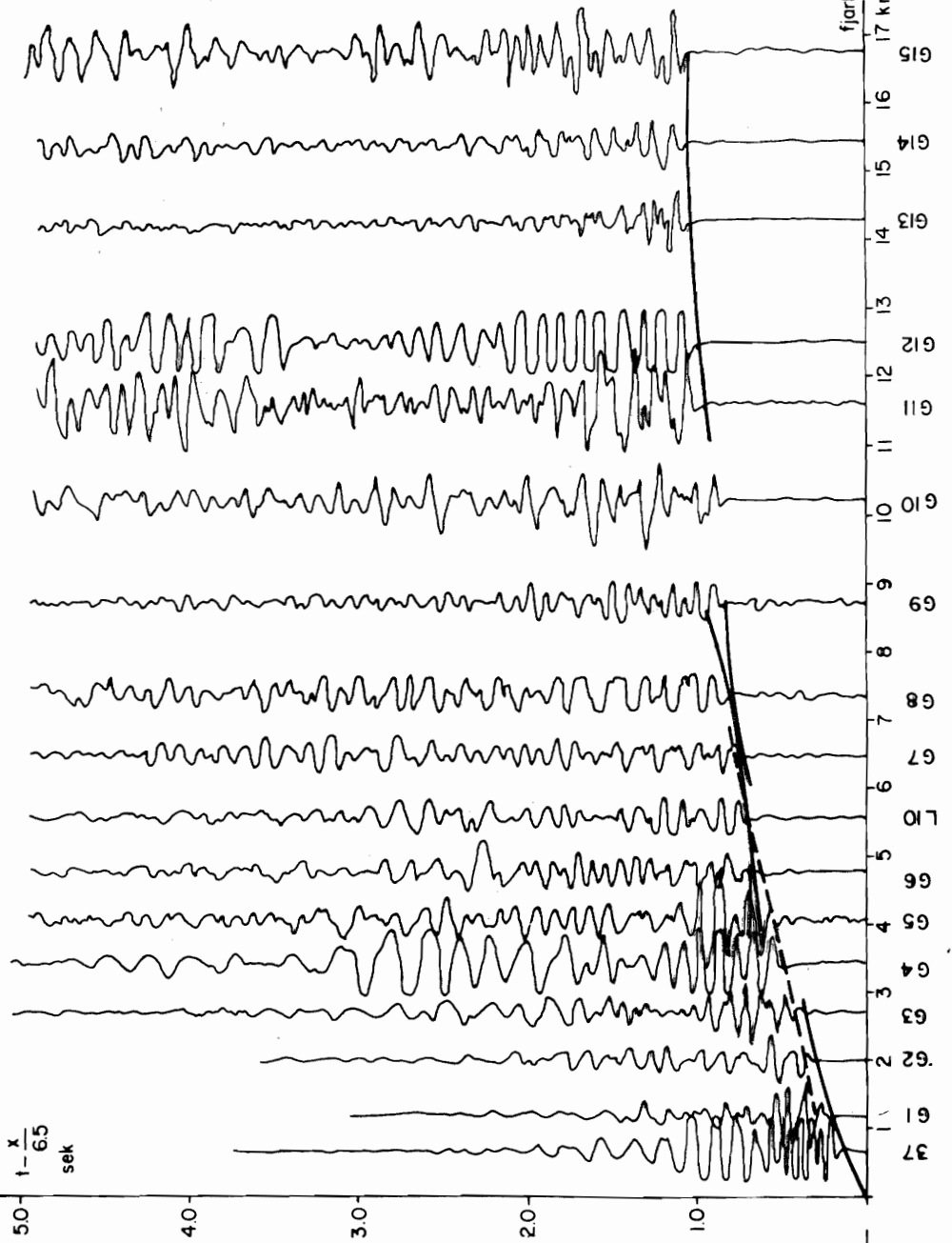


Jarðsveiflumælingar á Höfuðborgarsvæði
 Bygjur fyrir prófili R 5
 Kollafjörður Grafarholt
 Skotið í Kollafirði

Prófill R 3
 Langavatn — Grötta

50-
40-
30-
20-
10-
0-
1-
2-
3-
4-
5-
6-
7-
8-
9-
s

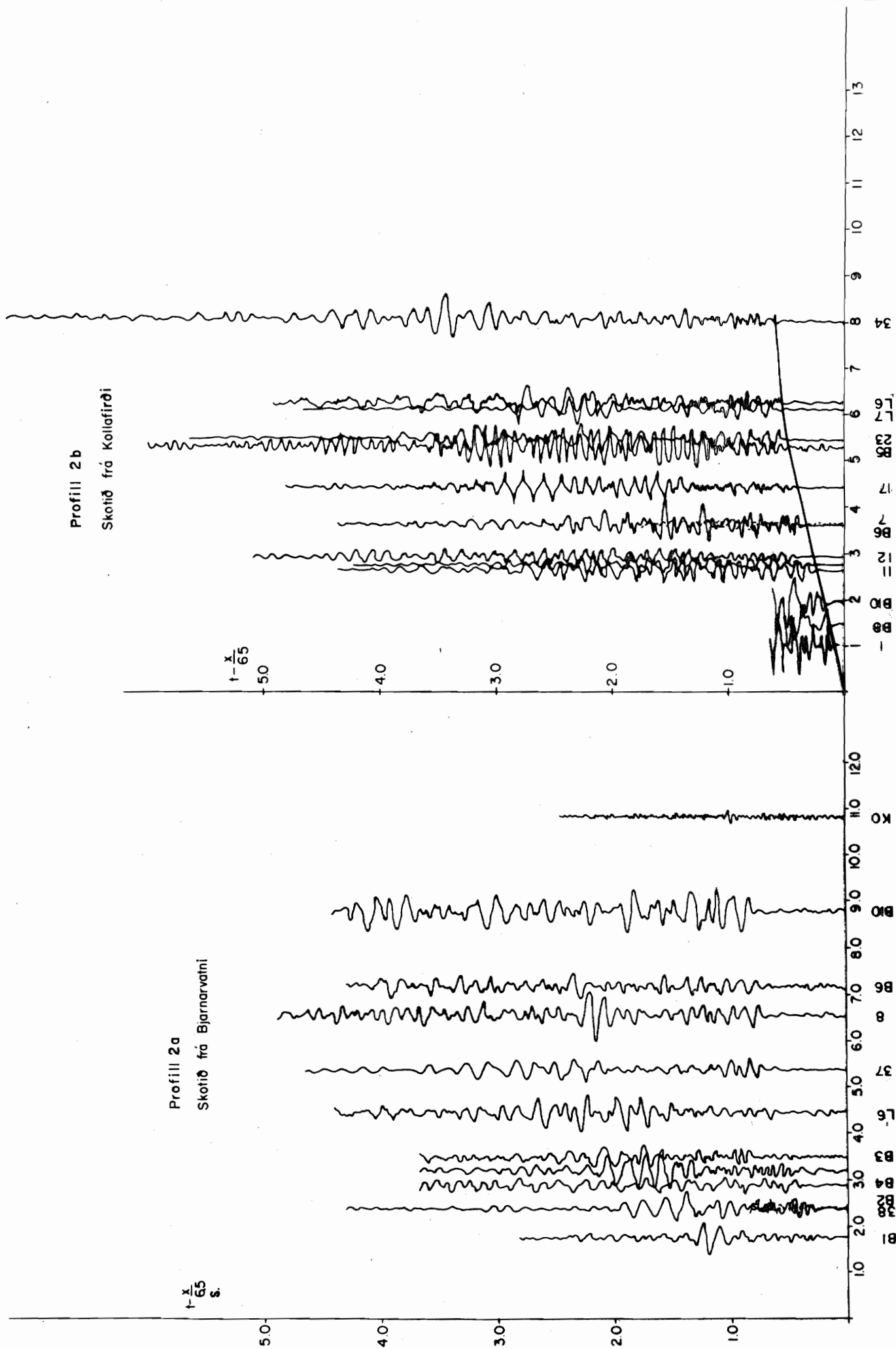
50-
40-
30-
20-
10-
0-
1-
2-
3-
4-
5-
6-
7-
8-
9-
sek



Skotið í Langavatn

Skotið í sjó mælt við Langavatn

fjarlægð
17 km



Profill 2b
Skotið frá Kollafríði

Profill 2a
Skotið frá Bjarnarvatni

VIÐAUKI B

FARTÍMAR OG FJARLÆGÐIR

Δx = fjarlægð milli skot- og mælipunkta

Δt = fartími fyrstu bylgju að frádreginni
hæðarleiðréttingu þar sem við á

Δt_h = hæðarleiðrétting

MP nr	Skotp. Stíflisdalsvatn			Skotp. Álftanes			Skotp. Skeggjastaðir			Skotp. Bjarnarvatn			Skotp. Kollafjörður		
	Δx km	Δt s	Δt_h s	Δx km	Δt s	Δt_h s	Δx km	Δt s	Δt_h s	Δx km	Δt s	Δt_h s	Δx km	Δt s	Δt_h s
37	22,30	4,27	0,05	17,76	3,82	0,02	17,76	3,82	0,02	5,37	1,46		10,39	2,04	
38	19,00	3,75	0,05	22,18	4,46	0,02	22,18	4,46	0,02	2,38	0,60		6,00	1,44	
40	25,11	4,71	0,05	15,19	3,43	0,02	15,19	3,43	0,02	8,19	2,13		4,62	1,13	
42	23,55	4,46	0,05	17,44	3,80	0,02	17,44	3,80	0,02	6,46	1,75		3,64	1,29	
43	21,32	4,07	0,05	20,21	4,25	0,02	20,21	4,25	0,02	4,40	1,11		2,76	0,68	
LP	11,59	2,35	0,05	27,23	4,99	0,02	27,23	4,99	0,02	7,15	1,75		7,99	1,89	
LB3	25,87	4,81	0,02	25,87	4,81	0,02	25,87	4,81	0,02	2,90	0,60		5,27	1,29	
B1				21,53	4,22	0,03	21,53	4,22	0,03	3,50	0,60		1,46	0,34	
34	31,74	5,65	0,03							2,38	0,60		2,63	0,66	
22	24,40	4,50	0,04							2,90	0,60		3,80	0,97	
16	24,30	4,46	0,03							3,50	0,60				
B4	18,51	3,58	0,04												
7	18,61	3,48	0,03												
11	21,86	3,97	0,03	17,18	3,59	0,00	17,18	3,59	0,00						
B2															
B4															
B5															
B8															
B7															
12															
S9															
S10				0,83	0,280		0,83	0,280							
S11				1,43	0,420		1,43	0,420							
S7	35,8	6,35		2,31	0,630		2,31	0,630							
S12				2,96	0,780		2,96	0,780							
S13				4,73	1,31		4,73	1,31							
S6	32,90	5,87		5,30	1,43		5,30	1,43							
S14				6,20	1,62		6,20	1,62							
S5	30,34	5,48		7,74	1,97		7,74	1,97							
S2	1,35	2,95		8,88	2,23		8,88	2,23							
				37,71	6,66		37,71	6,66							

o merkir skotpunkt Álftanes II

VIÐAUKI C

HNIT SKOT- OG MÆLIPUNKTA

Hnitin eru gefin upp í km til norðurs og vesturs frá
punkti sem liggur á 64,00° n.br. og 21,00° v.l.

Skotpunktur	Km norðan við- miðunarpunkts	Km vestan við- miðunarpunkts
Langavatn	12,98	33,13
Bjarnarvatn	15,96	28,71
Stíflisdalsvatn	27,70	16,29
Skeggjastaðir	22,79	26,84
Kollafjörður	22,51	37,21
Álftanes II	10,55	26,87
Álftanes III	10,25	26,70
G 10	17,53	42,39
G 11	16,54	44,25
G 12	16,80	45,01
G 13	17,20	46,83
G 14	17,78	47,85
G 15	18,75	48,92
G 16	17,48	47,40
G 17	18,18	48,35

Mælipunktur nr	Norður km	Vestur km	Mælipunktur nr	Norður km	Vestur km
LP	22,86	26,83	26	18,16	29,05
LB1	22,90	27,12			
LB2	22,72	27,35			
LB3	22,05	27,93			
LB4	21,70	28,40	30	15,15	35,74
			31	15,28	33,84
L3	20,96	29,20	32	14,53	31,59
L4	19,32	30,55	33		
L5	18,90	31,19	34	13,67	44,76
L6	18,58	32,33	35	13,59	38,19
L7	17,86	33,28	36	13,84	35,90
L8	17,42	34,40	37	13,51	33,49
L9	16,23	35,69	38	13,60	29,02
L10	14,72	38,41	39		
L10A	12,58	39,32	40	11,97	35,86
L11	23,24	26,22	41		
L12	23,38	35,12	42	11,70	33,57
L13	23,40	24,10	43	12,11	30,83
L14	23,73	23,10	44		
L15	24,22	22,52			
L16	25,35	20,57	S1	27,19	17,14
L17	26,15	17,52	S2		
L18	28,06	14,62	S2A	23,75	17,54
KO	22,70	37,19	S3	24,80	19,33
1	23,33	36,61	S3A	24,67	20,96
2	23,02	33,70	S4	24,13	21,81
3	23,18	31,33	S5	11,97	42,24
			S6	11,32	44,84
5	23,34	28,82	S7	10,39	47,64
6			S8	10,55	50,47
7	21,31	33,77	S9	10,23	49,94
8	21,79	31,76	S10	10,14	49,29
			S11	9,91	48,43
10	21,59	25,77	S12	9,75	46,25
11	19,80	36,67	S13	10,12	45,65
12	19,92	34,35	S14	11,23	43,27
13	19,82	31,06			
14	20,22	28,78			
15	20,12	25,97			
16	18,11	38,62	B1	16,54	30,36
17	18,21	36,29	B2	16,63	30,99
			B3	17,72	31,73
			B4	17,02	31,41
20	18,94	28,93	B5	19,17	33,13
21			B6	20,34	34,35
22	16,56	38,00	B7	21,19	34,93
23	17,27	35,80	B8	21,69	36,00
24	16,56	33,62	B10	21,40	35,63
MLA	13,26	33,10			
G1	13,46	34,20			
G2	13,90	34,91			
G3	14,08	35,61			
G4	14,32	36,29			
G5	14,53	36,90			
G6	14,60	37,62			
G7	15,16	39,21			
G8	15,90	39,87			
G9	16,06	41,25			
MSE	18,12	49,23			

6.0

5.0

4.0

3.0

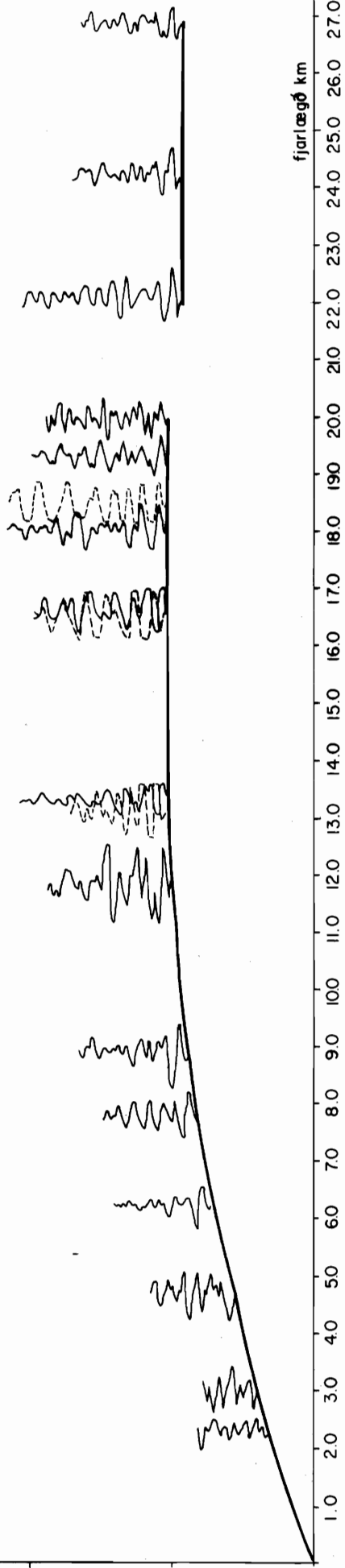
2.0

1.0

$t - \frac{x}{65}$

sek.

Alftanes - Stíflisdalsvatn
 I. Bólupúsi hiðrað að byrjun I. bylgju



Mynd 8a