



**ORKUSTOFNUN**

**Rannsóknasvið**

**Smáskjálftar í Kröflu  
í lok borunar holu KJ-31  
í október 1997**

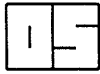
**Kristín S. Vogfjörð**

**Samvinnuverk Landsvirkjunar og Orkustofnunar**

**1999**

**OS-99012**





**ORKUSTOFNUN**  
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verknr. 8-630667

**Kristín S. Vogfjörð**

**Smáskjálftar í Kröflu í lok borunar  
holu KJ-31 í október 1997**

**Samvinnuverk Landsvirkjunar og Orkustofnunar**

**OS-99012**

**Mars 1999**



Skýrsla nr: OS-OS-99012	Dags: Mars 1999	Dreifing: <input checked="" type="checkbox"/> Opin <input type="checkbox"/> Lokuð til
Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill: Smáskjálftar í Kröflu í lok borunar holu KJ-31 í október 1997	Upplag: 30	
	Fjöldi síðna: 41	
Höfundar: Kristín S. Vogfjörð	Verkefnisstjóri: Kristín S. Vogfjörð	
Gerð skýrslu / Verkstig: Mæliniðurstöður, könnun á skjálftavirkni	Verknúmer: 8-630667	
Unnið fyrir:		
Samvinnuaðilar: Samvinnuverk Landsvirkjunar og Orkustofnunar		
<b>Útdráttur:</b> Gerð er grein fyrir mælingum á smáskjálftavirkni á Kröflusvæðinu í október/nóvember 1997. Tilgangur þeirra var að kanna hvort unnt væri að skrá smáskjálfta í tengslum við borun eða dæluþrófun. Skráð voru tvö aðskilin tímabil, u.þ.b. 10 dagar hvort, en hér er aðeins lýst niðurstöðum mælinga þess fyrra, þ.e. í lok borunar holu KJ-31. Settir voru upp 6 jarðskjálftamælar og skráningartæki í þessu sambandi. Aðferðum til að staðsetja smáskjálfta hefur fleygt fram á síðustu árum og með aukinni nákvæmni er hægt að ákvarða legu sprungna undir yfirborði, sem ekki hefur verið hægt áður. Kortlagning smáskjálfta er mikilvæg viðbót við aðrar jarðeðlisfræðilegar mælingar í leit að jarðhita því með þeim má afmarka hugsanlegar rennislisleiðir jarðhitavökvans. Helstu niðurstöður eru þær að nokkuð stöðug skjálftavirkni er á Kröflusvæðinu, um tveir skjálftar á dag að meðaltali, og gefur hún góðar vonir um að hægt sé að nota smáskjálfta til að kortleggja sprungur undir yfirborði. Skjálftarnir virðast raða sér við Hveragilssprunguna, austan við Leirhnúk og í grennd við Námafjall. Greining á útbreiðslumynstri skjálfta á svæðinu sýnir að hraðadreifing er flókin. Gögn frá seinna tímabilinu eru komin á vinnanlegt form en úrvinnsla er ekki hafin.		
Lykilorð: Krafla, borhola, smáskjálftar, mælanet, kortlagning sprungna, mæligögn, suð	ISBN-númer:	
	Undirskrift verkefnisstjóra: <i>Kristín S. Vogfjörð</i>	
	Yfirfarið af: KÁ	

# EFNISYFIRLIT

<b>1</b>	<b>Ágrip</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Inngangur</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Uppsetning mælanets</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Útdráttur gagna og úrvinnsla</b>	<b>5</b>
<b>5</b>	<b>Niðurstöður</b>	<b>8</b>
5.1	Svæðissuð . . . . .	8
5.2	Smáskjálftar . . . . .	8
5.3	Helstu niðurstöður . . . . .	13
5.4	Tillögur um framhald . . . . .	14
<b>6</b>	<b>Þakkir</b>	<b>15</b>
<b>7</b>	<b>Heimildir</b>	<b>16</b>
<b>8</b>	<b>Viðauki</b>	<b>36</b>
8.1	Uppsetning tækja . . . . .	36
8.2	Ferli frá Orion formi yfir á SEED/AH/SAC form . . . . .	37
8.3	Skriptir og skrár . . . . .	38
8.4	Pólar og núll Orion-Lennarz/5s kerfisins . . . . .	40

# 1 ÁGRIP

Í tengslum við borlok og dæluþrófanir í holu KJ-31 í Kröflu, í októberbyrjun 1997, og holu KJ-27 um mánaðamót okóber/nóvember, voru settir upp 6 jarðskjálftamælar og skráningartæki í þeirri von að takast mætti að skrá smáskjálfta tengda borun eða dæluþrófunum, og einnig til að kanna suð á svæðinu. Staðsetning mæla og borholna er sýnd á mynd 1. Skráð voru í tvö aðskilin tímabil, u.þ.b. 10 daga hvort en hér er einungis skýrt frá niðurstöðum þess fyrra.

Úrvinnslu frá fyrra tímabilinu, við borlok í holu KJ-31 er nú lokið og fundust 19 smáskjálftar að stærð  $M_L \leq 1.1$  í nálægð Kröflu og einn, að stærðinni  $M_L=3.4$ , úti fyrir mynni Eyjafjarðar. Af skjálftunum við Kröflu var hægt að staðsetja 16, en þrjár sem urðu í upphafi skráningartímabilsins voru einungis skráðir á tveim mælistöðvum og ekki staðsetjanlegir. *S-P* tími fasa bendir þó til að þeir séu í nálægð KJ-31. Staðsetjanlegir skjálftar raða sér í þrjú svæði: svæði 1, í um kílómeters fjarlægð frá KJ-31 og hugsanlega á Hveragilssprunguna, svæði 2 austan við Leirhnjúk, í u.þ.b. 2,6 km fjarlægð frá holunni og svæði 3 í nágrenni Námafjalls, í um 7 km fjarlægð.

Á fyrra skráningartímabilinu fundust því 16 skjálftar í innan við 3,0 km fjarlægð frá holu KJ-31. Fyrstu tveir urðu meðan á borun stóð og næstu sjö á meðan ádæling fór fram og gætu einhverjir þeirra hugsanlega tengst dælingu í holuna. Dýpi þessara nálægu skjálfta er lítið, frá nokkur hundruð metrum niður í um 2,4 km undir yfirborði.

Gögnin frá seinna tímabilinu eru komin á vinnanlegt form, en úrvinnsla er ekki hafin. Miðað við fyrra tímabilið má gera ráð fyrir að þá hafi aðrir 15-20 skjálftar skráðst.

## 2 INNGANGUR

Á seinustu árum hefur aðferðum við staðsetningar á smáskjálftum fleygt fram og þar sem virkni er mikil og margar mælistöðvar í nánd, eins og t.d. á Hengilssvæðinu, hefur verið hægt að kortleggja strik og halla sprungnanna sem þeir verða á. Hver smáskjálfti lýsir hreyfingu á litlu broti af heildarsprungufletinum, en brotflötur hvers skjálfta getur verið nokkur hundruð m, á meðan sprungan getur verið allt frá nokkrum km upp í tugi km að lengd. Séu smáskjálftarnir nákvæmlega staðsettir geta þeir þannig afmarkað hluta sprungufletarins og, ef hægt er að ákvarða brotahreyfinguna sem á sér stað í hverjum þeirra, má einnig fá glögga mynd af hreyfingunum sem verða á sprungunni. Á jarðhitasvæðum sem hafa smáskjálftavirkni er slík kortlagning sprungna mikilvæg viðbót við aðrar jarðeðlisfræðilegar mælingar því hún getur skýrt legu sprungna með dýpi og jafnvel lýst upp nýjar sem ekki sjást á yfirborði. Jarðhitavökvinn finnur sér oftast leið um sprungurnar og nákvæm kortlagning þeirra er því ákaflega mikilvæg fyrir vinnslu svæðinsins.

Í ljósi þessa var ákveðið að setja upp jarðskjálftamæla í Kröflu til að skoða almenna smáskjálftavirkni og suð á svæðinu, ásamt því að kanna áhrif borunar og ádælingar á skjálftavirknina, en þrýstingsaukning vegna ádælingar gæti hugsanlega valdið skriði á sprungum sem fyrir eru í berginu. Í október 1997 vildi svo vel til að Lennarz mælar og Orion skráningartæki í eigu Uppsalaháskóla voru í láni hér á landi hjá Veðurstofu Íslands, og ekki í notkun. Þessi tæki voru fengin að láni til að fylgjast með virkni á meðan borun tveggja holna stóð yfir.

Kröfluvirkjun kostaði vinnu við uppsetningu mælanetsins og fyrsta hluta úrvinnslu en Orkustofnun hefur tekið á sig stærstan hluta kostnaðar við gagnaútdrátt, úrvinnslu og aðlögun hugbúnaðar sem þurfti til að finna og staðsetja skjálftana. Engin reynsla var fyrir hendi af því að draga gögn af Orion skráningartækjunum og koma þeim á vinnanlegt form og fór verulegur tími í að koma því ferli í gagnnið. Þessi vinna hefur síðan nýttst á Veðurstofu Íslands við útdrátt gagna af tækjunum og verði þau aftur fengin að láni mun þessi vinna einnig nýtast á OS. Hugbúnaðurinn sem þurfti til staðsetningar fékkst hjá Veðurstofu Íslands og er hann staðlaður fyrir mælanet með > 20 km bil á milli stöðva, fasta söfnunartíðni í 100 Hz og fyrir meðallíkan af hraða í jarðskorpu Íslands. Sjálfvirki hugbúnaðurinn virkaði alls ekki fyrir svo nálæga skjálfta og svo lítið mælanet, en gagnvirka þáttinn var hægt að aðlaga að hraðalíkani sem passaði

fyrir Kröflusvæðið. Enn fremur þurfti að endursafna gögnunum 100 sinnum á sekúndu.

Vegna nálægðar skjálftanna við netið og grunnra (< 2,5 km) upptaka þeirra ferðast bylgjurnar að mestu í efstu tveim kílómetrum jarðskorpunnar. Þess vegna þarf hraðalíkanið sem notað er að hafa góða upplausn á því dýptarbili. Í Kröflu hafa verið gerðar fjölmargar skjálftamælingar til að kanna virkni og uppbyggingu svæðisins og hafa mismunandi hraðalíkon fengist úr þeim tilraunum. Það líkan sem stuðst er við hér, og hefur jafnframt bestu upplausn í þessum efsta hluta skorpunnar, fékkst með túlkun sprengimælinga, sem gerðar voru árið 1994 (Bryndís Brandsdóttir o.fl. 1995, 1997). Þetta líkan er hins vegar flókið, með lághraðalögum sem talin voru tengjast jarðhitavökvanum og valda þessi lághraðalög vandamálum í staðsetningarhugbúnaðinum. Þar eru lághraðalög ekki leyfileg og þarf að 'plata' hugbúnaðinn með nálgunarlíkönum til að staðsetja dýpstu skjálftana, sem allir eru inni á vinnslusvæðinu. Hermireikningar í mismunandi hraðalíkönum gefa til kynna að hraðadreifing á Kröflusvæðinu sé ekki einföld og geti innihaldið slík lághraðalög.

### 3 UPPSETNING MÆLANETS

Uppsetningu mælitækjanna er lýst af Sigvalda Thordarson (Sigvaldi Thordarson 1997). Notaðir voru Lennarz mælar með 5 sekúndna horntíðni, þannig að svörunarfall (instrument response) þeirra við hraða er flatt í tíðni fyrir ofan 0,2 Hz. Skráningartækin eru af gerðinni Orion og stillt þannig að svörun þeirra er flöt fyrir ofan 1 Hz. Heildarsvörun kerfisins er því nokkurn veginn fasti fyrir tíðnir yfir 1 Hz. Safnað var 250 sinnum á sekúndu og fékkst þannig upplausn á tíðnum upp í 125 Hz. Heildarsvörun mælakerfisins sem fall af tíðni er sýnd á mynd 2.

Tafla 1. Skráningartími mælistöðva á fyrra skráningartímabili.

Stöð	Orion	Þáttur	Upphaf	Endir	Breidd, °	Lengd, °	Hæð, m
H18	125	Z	1997 10 03 10:25	10 12 08:16	65.7020	-16.7305	612
		N	15:56				
		E	16:15				
SND	124	Z	1997 10 04 17:02	10 15 14:14	65.6852	-16.7408	475
		N,E	03 10:06				
H09	128	Z,N,E	1997 10 04 16:18	10 14 18:33	65.7093	-16.7613	522
RAH	123	Z	1997 10 04 23:22	10 13 17:13	65.7090	-16.7793	535
		N	05 04:03				
		E	04:58				
SLK	122	Z	1997 10 06 08:58	10 14 20:38	65.6947	-16.7778	445
		N	10:54				
		E	11:03				
VIT	130	Z,N,E	Ekkert skráð		65.7228	-16.7538	575

Þrem mælanna var komið fyrir í borholukjöllurum holna KJ-09, KJ-18 og höggborsholu vestan við Rauðhól (H09, H18, RAH). Einn var settur í yfirgefna SIL holu Veðurstofu Íslands norðan við Hvíthóla (SLK) og tveir voru grafnir niður utan svæðisins; annar um 400 m norðan við Víti (VIT), og hinn fyrir sunnan, í Sandabotnaskarði (SND) (sjá mynd 1). Á fyrra tímabilinu var skráning sett í gang 2. og 3. okt. og stöðvuð 14. og 15. okt. Skráning var í hringormsskrár og þegar hún var stoppuð kom í ljós að skrifast hafði yfir byrjunina á öllum stöðvum. Sums staðar hafði skráning reyndar þegar stöðvast við það að rafgeymar tæmdust. Tafla 1 sýnir staðsetningar og skráningartímabil stöðvanna. Stöðin við Víti skráði ekkert á þessu tímabili; gleymst hafði að hreinsa burt eldri hringormsskrár af disknum og því ekkert pláss fyrir ný gögn, en hinar skráðu í 8 til 13 daga. Á seinna tímabilinu, sem er einn sólarhringur 18.-19. okt. ásamt tímabilinu 27. okt. til 5. nóv. skráðu allir mælar í a.m.k 9 daga, nema H09 sem virkaði einungis í tvo

daga.

Mælirinn við KJ-09 var tengdur í rafmagn, en hinir voru á rafgeymum. Við útdrátt gagna kom í ljós að mælirinn þar, H09, var ótengdur fram að um kl. 19, 5. okt. Gögnin sem skráðust eftir það voru á kafi í suði og mjög trufluð, einkum í kringum 50 Hz. Átta skjálftar sáust þó á H09 þar sem komutímar  $S$  og stundum einnig  $P$  voru nothæfir til staðsetningar. Svörun kerfisins var hins vegar bjöguð og engin orka fyrir neðan 2 Hz. Við skoðun á skráningartækinu á Veðurstofu Íslands í apríl kom í ljós að öryggi í því hafði brunnið yfir og var það orsök truflananna. Vegna óþekkrar svörunar þessa skráningartækis voru gögnin úr því ekki nothæf í tíðnirófsgreiningu, sem gerð var til að meta stærð og brotlausn skjálfta.

Truflanir sáust einnig á stöðinni í Sandabotnaskarði. Þær voru óreglulegar og á öllum tíðnum; í byrjun aðeins á lóðréttu þættinum, en undir lok tímabilsins á þeim öllum. Ekki er enn vitað hvað olli þeim, en hugsanlega var skráningartækið einnig bilað þar. Þá var enn fremur u.þ.b. þrisvar sinnum meira hvítt suð á lóðréttu þættinum en hinum lárétta allan tímann, svo og reglulegir púlsar, mest á lóðréttu þættinum. Þeir tengdust ræsingu skráningar- og GPS tækisins á klukkutíma fresti. Nokkrir skjálftar lentu ofan í truflunum á lóðréttu þættinum, en yfirleitt var merki ekki mikið truflað eða bjagað.

Gamla SIL holan, SLK reyndist vera slæmur staður því þar var mikið suð, einkum á lágum tíðnum (1-10 Hz). Enda var það ástæðan fyrir því að staðurinn var ekki lengur í notkun.

Miklar truflanir voru á flestum mælunum í kringum 90 Hz, einkum á lárétta þáttunum og sums staðar voru stanslausir hátíðnispúlsar. Hin háa söfnunartíðni nýttist því ekki sem skyldi.

## 4 ÚTDRÁTTUR GAGNA OG ÚRVINNSLA

Hringormsskránnar á Orion skráningartækinu voru á einkaformi og þurfti að koma þeim yfir á X-form, þar sem hægt var að leiðrétta staðsetningar og annað sem vantar í haus skráanna. Ein hringormsskrá er fyrir hvern þátt mælisins og hver af stærð 392 Mb. Á 250 Hz söfnunartíðni rúma þær u.þ.b. 9 daga. Af X-formi var síðan farið með gögnin yfir á algengt og aðgengilegt form sem kallast SEED (Standards for the Exchange of Earthquake Data) og er notað til dreifingar á skjálftagögnum um allan heim. Á því formi voru gögnin sett á segulbönd. Af SEED formi má komast yfir á AH form, sem notað var á Veðurstofu Íslands og SIL hugbúnaðurinn þar gerði ráð fyrir. Þessi hugbúnaður var einmitt notaður til að staðsetja skjálftana. Af SEED er líka hægt að komast yfir á SAC form sem er nauðsynlegt til að nota SAC (Seismic Analysis Code) hugbúnaðarpakkann og eigin utanálggjandi hugbúnað. Ferlinu frá hráum Orion gögnum yfir í SAC og AH form er lýst í viðauka.

Ferlið í SIL kerfinu felst í því að keyrt er forritið *fasafinnur* á hrá gögnin, en hann á að finna alla nothæfa  $P$  og  $S$  fasa á hverri stöð. Fasaupplýsingarnar eru síðan sendar inn í önnur forrit, en þau samhæfa á milli stöðva, þannig að öllum fösum sem ekki eiga samsvörun á öðrum mælistöðvum er fleygt, og staðsetja loks skjálftana sjálfvirkt eftir komutímum fasanna. Þetta gefur einungis grófa staðsetningu, því komutímarnir úr fasafinni eru ekki alltaf nákvæmlega réttir. Staðsetningarnar má svo endurbæta í samsvarandi gagnvirku forriti, *lokimp* sem finnur bestu staðsetningu fyrir hvern skjálfta með ítrekun, þar sem minnkadur er mismunur á mældum og reiknuðum komutímum skv. einhverju hraðalíkani. Þarna er hægt að bæta við og breyta komutímum á fyrstu  $P$  og  $S$  fösum ásamt pólun á fyrsta  $P$ . Þegar staðsetning er fengin, er síðan farið í gegnum þriggja forrita röð sem samanstendur af *lockina*, *skiaut* og *spqaut*. Þau velja tíma-glugga umhverfis  $P$  og  $S$  komutímanna, framkvæma tíðnirófsgreiningu til að finna útslag og renna svo í gegnum allar mögulegar staðsetningar á  $P$  (pressure) og  $T$  (tension) ásum, bera saman reiknaða og mældu sveifluvídd  $P$  og  $S$  að viðbættri pólun á  $P$  og geyma þær lausnir sem eru innan leyfilegra skekkjumarka. Úr þessum hluta fæst stærð skjálftans og besta brotlausn, ásamt dreifingu mögulegra  $P$  og  $T$  ása (Reynir Böðvarsson o.fl. 1996; Sigurður Th. Rögnvaldsson og Ragnar Slunga 1993).

Fasafinnurinn í SIL hugbúnaðinum er hannaður til að finna fasa frá skjálftum í  $> 5$  km fjarlægðum og meðhöndla mikið magn af gögnum. Hann fleygir því gjarnan upplýsingum um litla, nálæga skjálfta sem ónothæfum fösum. Það urðu reyndar afdrif flestra skjálftanna sem skráðust, þeim var hent sem



ónothæfum. Ekki hefði unnist tími til að endurvinnna þennan þátt hugbúnaðarins og var því brugðið á það ráð að leita að skjálftum og merkja komutíma fyrstu  $P$  og  $S$  fasa handvirkt í SAC. Þetta var gert með því að sía burt tíðnir undir 2 Hz og yfir 50 Hz, og skoða síðan útslag á öllum þrem þáttum stöðvanna. Með þessa komutíma og bráðabirgða upphafsstaðsetningar var hægt að keyra forritið *lokimp* og staðsetja flesta skjálftana. Komutímar voru síðan endurbættir handvirkt með því að samliða (korrelera) eftir megni fasa mismunandi skjálfta og mismunandi stöðva. Með svona litla skjálfta, mikið suð og fáar mælistöðvar er þetta næst því sem hægt er að komast afstæðri staðsetningu, en hún getur, þegar best gegnir, gefið nákvæmni upp á nokkra metra og þannig gert kleift að kortleggja sprungurnar sem skjálftarnir verða á.

Í brotlausnaforritunum voru leyfilegar gluggalengdir, sem notaðar eru við spekturgreiningu minnkaðar til að stilla pakkann betur fyrir nálæga og litla skjálfta, en minnsti  $S$ - $P$  tími í gagnasafninu er u.þ.b. 0.4 s. Minnsta gluggalengd er nú 0,32 s, en var áður 0,64 s. Svörun Orion söfnunartækisins hefur ekki verið bætt inn í SIL hugbúnaðinn, þannig að við ákvörðun brotlausna og stærða skjálfta var gert ráð fyrir svörun SIL söfnunartækisins. Fyrir tíðnir yfir  $\sim 2$  Hz er munurinn nokkurn veginn fasti, þar sem mögnun SIL kerfisins er  $2.72 \times 10^8$  (Sigurður Th. Rögnvaldsson o.fl. 1997), og Orion kerfisins  $2,0 \times 10^9$  (Reynir Böðvarsson, pers. upplýs. 1998). Mögnunin í Orion kerfinu er því 7,35 sinnum meiri en í SIL. Fyrir litla skjálfta ( $M_L < 3$ ) ætti því að vera nógu góð nálgun að leiðrétta bara fyrir mismunandi mögnun kerfanna.

Allir fyrrgreindir þættir eru háðir hraðalíkaninu sem valið er til að lýsa skorpunni og þar er viðkvæmasti þáttur þessa ferlis. Hraðalíkanið sem notað er til að nálga jarðlagaskipan í Kröflu er einvitt (þ.e. hraði breytist einungis með dýpi) og fékkst með túlkun á sprengimælingum í Kröflu (Bryndís Brandsdóttir o.fl. 1995). Sprengilínurnar lágu A-V í gegnum smánetið norðanvert og N-S í gegnum það vestanvert, og sprengt var í Víti og við Leirhnjúk. Líkanið ætti því að passa vel við svæðið sem skoðað er hér. Líkanið er hins vegar ekki einfalt og felur í sér tvö lághraðalög, á 1,28 km og 1,65 km dýpi, eins og sýnt er á mynd 3a og b og merkt *kra3l*. Þessi túlkun byggði á skyndilegri seinkun sem sást í komutíma fyrstu  $P$  bylgna frá yfirborðssprengingunum, ásamt eftirfylgjandi  $P$  millifösum. Lághraðalögin voru talin merki um vatnsleiðandi lög í berginu, með háan poruhluta. SIL hugbúnaðurinn leyfir ekki minnkandi hraða með dýpi og þarf því að 'plata' forritin með nálgunarlíkönum, sem fara eftir því á hvaða dýpi skjálftarnir eru.

Áhrif lághraðalaganna á geislabrautir frá skjálftaupptökum yfir og undir þeim eru sýnd á mynd 4a og b. Fyrstu  $P$  og  $S$  bylgjur frá grunnnum skjálftum, sem staðsettir eru fyrir ofan  $\sim 1$  km dýpi "sjá" ekki lághraðalögin fyrr en kemur út í u.þ.b. 4 km fjarlægð, því bylgjurnar beygja fyrir ofan efra lághraðalagið í hinum sterka hraðastigli sem er við yfirborð (sjá mynd 4a). Grunna skjálfta er því hægt að staðsetja með líkani *kra3*, sem er án lághraðalaganna (sjá mynd 3b), en ferðatímar í því eru þeir sömu og í *kra3l* út í um 4 km fjarlægð, þar sem áhrifa lághraðalagsins fer að gæta í því að fyrstu  $P$  seinkar um  $\sim 0,1$  s og  $S$  um  $\sim 0,2$  s. Hafa ber í huga að  $P$  bylgjulengdir fyrir tíðnisviðið sem unnið er með (2-15 Hz) eru 0,3-3 km á  $\sim 1,25$  km dýpi og  $S$  bylgjulengdir u.þ.b. helmingur þess. Bylgjurnar "sjá" um hálfu bylgjulengd umhverfis geislabrautina og því fer áhrifa lághraðalaganna að gæta fyrir geisla sem beygja nokkru ofan við lögin.

Skjálfta sem eru fyrir neðan bæði lághraðalögin, á  $> 1,8$  km dýpi (sjá mynd 4b), má staðsetja með hraðalíkani *kra3y*, sem sýnt er á mynd 3a, en þar hafa lághraðalögin verið flutt ofar í skorpuna til að forðast viðsnúinn hraðastrúktúr. Ferðatími fyrstu  $P$  og  $S$  bylgna er nánast sá sami í báðum líkönum út í u.þ.b. 5,5 km fjarlægð; tímamismunur er innan við 5 ms. Skjálftar sem eru á milli 1,25 og 1,8 km dýpis eru staðsettir með líkani *kra3z*, þar sem einungis er gert ráð fyrir að fyrstu bylgjurnar sjái efra lághraðalagið. Það er því flutt ofar í skorpuna, eins og í líkani *kra3y*. Þessi nálgun gildir út í u.þ.b. 4,5 km fjarlægð og tímamismunur er innan við 10 ms.

Geislabrautir bjagast við þessar tilfærslur laga, en svo fremi að skjálftinn sé fyrir neðan lághraðalögin, er brautarlengd í hverju lagi sú sama og skv. Snells lögmáli, byrja geislar og enda á sama stað og áður, og með sama innfallshorn. Brotlausnir truflast því ekki að af þeim sökum, en breyting í víxlverkun bylgjunnar við lögin veldur breytingu í sveifluvidd einstakra fasa og það truflar brotlausnirnar. Þær gætu

því verið vafasamar.

Skjálftarnir á svæði 3, við Námafjall eru staðsettir með líkani *kra3*, þrátt fyrir að dýpi sé fest við 2 km, því engin upplausn er á finni hraðastrúktúr frá þetta fjarlægum skjálftum.

Með svo mörgum mismunandi 'nálgunarlíkönum' eykst auðvitað skekkja í staðsetningum skjálftanna, en *kra3l* er besta líkanið sem til er af svæðinu og nálgar vel komutíma bylgna sem ferðast í efsta 1,2 km skorpunnar. Með tilliti til fráviks í komutíma  $P$  og  $S$  bylgna, þá er staðsetning grunnra skjálfta (á  $< 0,5$  km dýpi) vel ákvörðuð í þessu líkani, sem bendir til að líkanið gefi góða mynd af hraða í efsta kílómetranum, og að einvíð nálgun á hraðastrúktúr þar sé ekki fjarri lagi; eldra líkan Arnott og Foulger (1994) er með of háan hraða við yfirborð til að framkalla rétta ferðatíma frá yfirborðsupptökum (Bryndís Brandsdóttir o.fl. 1995). Þar að auki virðist áhrifa lághraðalaga gæta í sumum gögnunum, einkum frá dýpri skjálftum (á  $> 1,5$  km dýpi) nálægt holu KJ-31, þar sem greinilegir sterkir millifasar sjást á eftir fyrsta  $P$ . Ferðatímafrávik fyrstu fasa eru hins vegar ívið stærri frá dýpri skjálftunum, sem bendir til að bæta mætti hraðalíkanið fyrir neðan 1,2 km dýpi með frekari sprengi- og skjálftamælingum.

Ferðatímaferlar einstakra fasa með fjarlægð (Kafli 12.1, (Aki og Richards 1980)), eru notaðir til að rekja helstu fasa í skjálftaritunum á milli stöðva, og sýna þannig áreiðanleika staðsetninganna myndrænt. Ferlarnir eru reiknaðir fyrir viðeigandi skjálftadýpi í hinum mismunandi einvíðu líkönunum, sem sýnd eru á mynd 3a og b. Ekki er gert ráð fyrir hæðarbreytingum á yfirborði og hlutfallið milli  $P$  og  $S$  hraða er áætlað 1,76, nema í lághraðalögunum, þar sem það er áætlað 1,5; sbr. lág  $v_P/v_S$  gildi sem fengist hafa í Hengli (Ari Tryggvason o.fl. 1999). Tafla 1 sýnir, hins vegar að yfirborð á Kröflusvæðinu er ekki flatt, heldur dreifist hæð stöðvanna yfir 137 m hæðarbil. Því má búast við tímafrávikum fasa sem sjást í skjálftaritunum frá ferðatímaferlunum sem sýndir eru. Frávikin eru stærst fyrir stöð H18, um +0,070 s í  $P$  og +0,125 s í  $S$ . Tímafrávika af þessum orsökum gætir ekki í staðsetningarforritinu *lokimp*, því það tekur tillit til mismunandi hæðar stöðvanna.

Hermiskjálftaritin, sem sýnd verða, eru reiknuð með heildun yfir bylgjutölu (wavenumber integration) einnig í einvíðu hraðalíkani. Þessi aðferð felur í sér tölulega tegrun yfir bylgjutölu við lausn bylgjujöfnunnar, svo að lausnin sem fæst inniheldur allar bylgjur sem koma upp í viðkomandi strúktúr. Kosturinn er sá að ekki er nauðsynlegt að giska rétt á hvaða fasar eru mikilvægastir, því þeir fást allir, en ókosturinn auðvitað sá að hraðalíkanið er einvitt; það leyfir þó minnkandi hraða með dýpi og einnig lághraðalög. Með tilliti til hversu vel ferðatímum bylgna sem ferðast í efstu 1,2 kílómetrunum er lýst, er einvitt líkan heldur ekki svo fjarri lagi. Hraðalíkönin sem notuð eru við hermireikningana eru byggð upp af mörgum þunnum lögum, hvert með fastan hraða, sem eykst svo með dýpi og nálgast þannig líkön *kra3* og *kra3l*. Deyfingarlíkanið er líka lagskipt. Líkönin eru sýnd á mynd 3c og d. Hermiskjálftaritin eru síðan földuð við svörun Lennarz-Orion kerfisins og 'impulse'-líkt tímafall. Mikilvægi hermiskjálftaritanna felst aðallega í því að gefa vísbendingu um hvort líkanið nálgast það að líkja eftir raunverulegri deyfingar- og hraðadreifingu og hvort brotlausnir eru trúanlegar.

Úrvinnsla gagna frá seinna skráningartímabilinu er skammt á veg komin, en skrifuð hefur verið forskrift (macro) í SAC til að leita að og merkja aukningu í útslagi eftir að síað hefur verið með tilliti til bakgrunnssuðs á hverri stöð; í flestum tilvikum á bilinu 2-15 Hz. Síðan verður leitað handvirkt á þeim stöðum sem merki finnst. Með ekki fleiri skjálfta en fundust á fyrra tímabilinu er það fljótvirkasta leiðin. Til að bæta staðsetningar enn frekar og takmarka betur mögulegar brotlausnir, þyrfti einnig að leyfa aukið vægi  $S$  komutíma og bæta við pólu á  $S$  fösum í hugbúnaðinn. Í núverandi mynd eru þessir þættir óvirkir, en með svo fáar stöðvar er æskilegt að auka áhrif upplýsinga frá góðum  $S$  fösum, þar sem þær eru til staðar.

## 5 NIÐURSTÖÐUR

### 5.1 Svæðissuð

Áhrif vinnslunnar á svæðinu voru mjög greinileg í skjálftaritunum, einkum á mælunum sem voru inni á vinnslusvæðinu sjálfu. Í upphafi tímabilsins var hola KJ-29 í blæstri og olli miklu suði á Rauðhól og H18. Stöð H09 var ekki tengd fyrr en eftir að holan var tekin inn á veitu, 5. okt. kl 16:25, og á SLK var skrifað yfir fyrstu gögn, fram að morgni 6. okt. Mynd 5a-c sýnir eina klst á öllum þrem þáttum frá stöðvunum á Rauðhóli, H18 og Sandabotnaskarði þar sem lágtíðnir undir 2 Hz hafa verið síaðar burtu. Greinilega sést hvernig suðið minnkar skyndilega kl. 16:25 við að holan hættir að blása, um helming á H18 og nær þrefalt á Rauðhóli. Í Sandabotnaskarði, fyrir sunnan svæðið voru áhrifin mun minni en þó merkjanleg á tíðnirófi. Smáskjálfti sem varð kl. 16:30 kemur greinilega fram en hann hefði drukknað í suðinu á RAH og H18 á meðan holan var í blæstri.

Áhrifa blástursins gætir mest á tíðnibilinu 12-25 Hz, eins og sést á mynd 6a-c. Hún sýnir tíðniróf austur-vestur þáttar mælisins í þeim fjórum tímagluggum á Rauðhóli, sem merktir eru á mynd 5a-c. Tveir fyrri glugganna eru inni í blæstrinum, en þeir tveir síðari fyrir utan. Þetta sést einnig í Sandabotnaskarði, þó í mun minna mæli. Þá hverfur einnig lítill toppur við 5.7 Hz, úr tíðnirófi H18 og SND við það að holan hættir að blása. Þessi toppur er ekki sýnilegur yfir annað suð á RAH.

Seinna á tímabilinu, þann 8. okt., má einnig sjá í gögnum frá H18 að hola hefur líklega blásið frá 05:50 til 07:50, og aftur frá 08:35 til 09:03. Þessi blástur olli auknu suði sem jók útslag um tæplega helming á A-V þættinum; heldur minna á hinum. Suðið hafði mjög þröngt tíðnisvið um 22 Hz.

Truflanir frá vinnslunni á svæðinu virðast mestar frá u.þ.b. 15 til 25 Hz og mestar á A-V þætti mælanna. Áhrifanna gætir mest innan svæðisins, en þau eru líka merkjanleg, með minna útslagi utan svæðisins, á mælinum í Sandabotnaskarði. Þá er einnig mjög sterkur toppur við 90,04 Hz á öllum stöðvum. Inni á svæðinu er hann mestur á láréttu þáttunum, en á SND er hann stærstur á þeim lóðrétta. Í tímaröðum frá SND er þessi truflun ekki merkjanleg yfir annað suð, en á hinum stöðvunum geta þessar hátíðnipúlsar verið yfirgnæfandi. Á láréttu þáttum RAH og SLK dreifist suðið auk þess yfir tíðnibilið frá 60 til 100 Hz. Vegna þessa virðast lítil not vera í tíðnum yfir 60 Hz. Ekki er vitað hvað veldur þessum hátíðni truflunum.

Suð frá úthafsöldunni (microseismic noise) er mest í kringum 0,2 Hz. Horntíðni mælisins og stilling söfnunartækisins sjá um að lækka útslagið fyrir neðan u.þ.b. 1 Hz (sjá mynd 2), en áhrifanna gætir að einhverju leyti upp að 1-2 Hz. Nýtanlegar tíðnir frá smáskjálftum eru því þar fyrir ofan og upp að um 30 Hz. Suðið frá vinnslunni er sterkast milli 15 og 25 Hz, þannig að ef skjálftarnir eru litlir er aðeins bandið 2-15 Hz nothæft. Þó skjálftar sjáist vel fyrir ofan 30 Hz er bylgjulengdin orðin svo lítil að bylgjuformið getur stjórnað sterklega af staðbundnum aðstæðum undir mælistöðinni og á útbreiðsluleiðinni, sem er mismunandi fyrir hverja mælistöð, og því erfitt að finna samfösun (coherence) í bylgjuformum milli stöðvanna. Tíðniróf frá SLK sýnir mun meira suð á tíðnibilinu 2-15 Hz en hinar stöðvarnar, og mest á A-V þættinum. Þetta gerir það að verkum að erfitt er að sjá merki frá smáskjálftum í gegnum bakgrunnssuðið, sem þekur allan nýtanlega tíðniskalann.

Valdir voru 4 mínútna langir gluggar á 4 klst. fresti á öllum stöðvum til frekari kerfisbundinna athugana á svæðissuði, en úrvinnsla á þeim gögnum hefur ekki enn farið fram.

Ekkert er hægt að segja um merki frá bornum í gögnunum, því borun var hætt kl. 11:00, 4. okt. og þá var einungis ein stöð, H18, virk.

### 5.2 Smáskjálftar

Í fyrra tímabilinu, á meðan borun KJ-31 lauk fundust 19 skjálftar og þar af 18 í nálægð Kröflu. Af þeim 18 voru 3 í námunda við Námafjall (svæði 3), í um 7 km fjarlægð frá netinu, en afgangurinn var í 0,5-3 km fjarlægð frá holu KJ-31. Staðsetning skjálftanna er sýnd á mynd 7 og sést að þeir raða sér nær allir í tvær

Þyrpingar norðvestan við KJ-31. Nyrðri þyrpingin (svæði 2) er austur af Leirhnjúk, en sú syðri (svæði 1) er inni á vinsslusvæðinu, á milli holna KJ-09 og KJ-31, og fellur mjög nálægt Hveragilssprungunni, sem einnig er sýnd á mynd 7. Upphafstími, staðsetning og stærð skjálftanna eru listuð í töflu 2. Þar er einnig sýnt hvaða líkan og hversu margir fasar eru notaðir við staðsetninguna.

Tafla 2. Staðsetning og upphafstími skjálfta á fyrra skráningartímabili. Nr. = Númer skjálfta (fyrri hluti númersins vísar til svæðisins sem skjálftinn er á, sá seinni til mánaðardagsins); Lk.= Líkan notað við staðsetningu; Fs.= Fjöldi fasa notaðir við staðsetningu; †Gróft áætluð stærð skv. SIL mælaneti er 1.7

Nr.	Lk.	Fs.	Upphafstími	Breidd, °N	Lengd, °E	Dýpi, km	$M_L$
1-3			03 20:49:59.0	svæði 1			
2-4			04 05:50:35.3	svæði 2			
-5a			05 00:09:51.0	svæði 1 eða 2			
2-5b	3	6	— 08:04:36.289 ± .249	65.724 ± .013	-16.776 ± .030	0.48 ± 1.41	-0.7
3-5c	3	4	— 14:12:26.894 ± .387	65.644 ± .022	-16.862 ± .086	2.0 fest	0.6
1-5d	3y	6	— 15:11:32.387 ± .236	65.709 ± .011	-16.753 ± .012	1.98 ± 1.80	0.2
2-5e	3	6	— 16:30:47.075 ± .246	65.718 ± .014	-16.768 ± .017	1.01 ± 1.16	-0.4
2-5f	3	6	— 19:59:11.257 ± .303	65.723 ± .007	-16.781 ± .049	0.38 ± 1.64	-0.4
1-5g	3z	5	— 20:10:40.204 ± .299	65.713 ± .018	-16.746 ± .035	1.65 ± 1.73	-0.6
2-5h	3	8	— 21:41:04.202 ± .213	65.724 ± .006	-16.778 ± .015	0.42 ± 0.79	†0.6
3-6a	3	6	06 00:56:23.205 ± .275	65.615 ± .016	-16.846 ± .039	2.00 fest	0.7
2-6b	3	8	— 05:47:42.302 ± .214	65.724 ± .007	-16.765 ± .010	0.11 ± 0.47	-0.1
2-6c	3	10	— 15:12:17.949 ± .193	65.728 ± .007	-16.782 ± .014	0.53 ± 0.88	0.3
3-7	3	9	07 11:09:59.905 ± .214	65.623 ± .012	-16.864 ± .033	2.00 fest	1.1
1-9a	3y	10	09 19:23:26.366 ± .188	65.714 ± .009	-16.743 ± .011	2.43 ± 1.05	0.1
1-9b	3y	9	— 19:34:59.971 ± .181	65.714 ± .009	-16.753 ± .009	2.16 ± 1.10	-0.3
1-9c	3z	9	— 22:13:14.706 ± .163	65.715 ± .009	-16.743 ± .011	1.67 ± 0.98	0.3
1-13a	3z	5	13 06:37:01.823 ± .301	65.712 ± .017	-16.741 ± .027	1.64 ± 5.41	-0.3
2-13b	3y	6	— 08:37:32.965 ± .245	65.717 ± .013	-16.770 ± .028	1.91 ± 1.40	-0.2

Eins og kemur fram í töflu 1, hófst skráning ekki fyrr en 3. okt., um 10:06 á lárétu þáttum stöðvar SND, og kl. 10:25 á lóðréttu þætti H18. Lárétu þættir H18 komu svo inn um kl. 16. Fyrsti skjálftinn sem skráðist varð um kl. 20:50 og sést á báðum stöðvum, H18 og SND. Með einn vafasaman  $P$  fasa og tvo  $S$  fasa er ekki hægt að staðsetja skjálftann, en  $S-P$  tíminn á H18 er u.þ.b. 0,5 s. Á SND er einungis  $S$  tíminn áreiðanlegur og tímamismunur  $S$  á SND og H18 er um 0,46 s. Þetta eru svipaðir tímar og sjást frá skjálftum 9a-9c á svæði 1 og má því draga þá ályktun að skjálftinn sé á svæði 1. Næsti skráði skjálfti var 4. okt. og sást hann líka bara á H18 og lárétu þáttum SND.  $S-P$  tími á SND er 0,8 s og mismunur  $S$  tíma á stöðvunum er um 0,4 s. Þetta eru svipaðir tímar og sjást frá skjálftum 5h, 6b og 6c og bendir til að staðsetning sé á svæði 2. Þriðji skjálftinn var skráður á alla þrjá þætti H18 og SND og lóðréttu þátt RAH. Hann sést hins vegar illa yfir bakgrunnssuðið á RAH, sem var mjög hátt vegna blásandi holu KJ-29. Þá var einnig lóðréttu þáttur SND mikið truflaður.  $S-P$  tími á SND er um 0,7 s og mismunur  $S$  tíma á SND og H18 er um 0,5 s, hann er því líklega nálægt svæði 2. Allir aðrir skjálftar voru skráðir á þrjár til fimm stöðvar og því staðsetjanlegir í lokimp.

Í töflu 2 sést að óvissa í staðsetningu er allt frá nokkur hundruð metrum, í vel staðsettum skjálftum, upp í nokkra kílómetra ( $0.001^\circ$  er um 100 m í breidd og 50 m í lengd). Hún stjórnast aðallega af óvissu í tímaflestrum fasa, þannig að minnstu skjálftarnir eru verst staðsettir, en fjöldi mælistöðva hefur líka mikið að segja, svo og fjarlægð skjálftanna frá mælanetinu. Best staðsettu skjálftarnir inni á Kröflusvæðinu, 2-6c og skjálftarnir 9. okt., voru skráðir á fimm mælistöðvum, 2-5f, 2-5h og 2-6b skráðust á fjórum stöðvum

og afgangurinn á þrem. Af skjálftunum við Námafjall var einn, 3-7, skráður á fimm mælistöðvar, en hinir á þrjár. Vegna fjarlægðar þeirra frá smánetinu er staðsetning ekki nákvæm og þá einkum með tilliti til stefnu (azimuth), en dýpi er heldur ekki vel ákvarðað. Skjálfti 3-7 staðsettist á 8 km dýpi, með mikla óvissu, og dýpi breyttist mikið með breytingum í hraðalíkani. Fyrir hina tvo fannst ekki lausn fyrr en dýpi var fest. Allir þrír skjálftarnir voru því staðsettir með 2 km föstu dýpi, sem ætti ekki að vera fjarri lagi, því dýpi skjálfta á þessu svæði skv. eldri rannsóknum (Arnott og Foulger 1994a,b) eru á bilinu 1-3 km.

Stærðir skjálftanna eins og þær eru ákvarðaðar í SIL hugbúnaðinum eru gefnar í Töflu 2, en þar sést að stærstu skjálftarnir eru við Námafjall,  $M_L = 0,6-1,1$ , en um og undir  $M_L = 0$  inni á Kröflusvæðinu. Til samanburðar má geta þess að sjálfvirka SIL kerfið fann og staðsetti gróflaga skjálfta 2-5h inni á Kröflusvæðinu. Til þess voru notaðar þrjár mælistöðvar, sú næsta í Reynihlíð. Vegna smæðar skjálftans voru engin bylgjugögn geymd frá þessum stöðvum, en gróft áætluð stærð út frá útsagi á þeim var 1,7; skv. Kröflunetinu er stærðin 0,6.

Í mjög litlum skjálftum er stundum vafaatriði hvar fasinn kemur og á þetta einkum við um  $P$  fasa. Til að auka nákvæmni aflestra og þar með staðsetninga, var reiknuð víxl fylgni, eftir því sem hægt var, milli fasa frá mismunandi skjálftum og mælistöðvum og fengust þá áreiðanlegri tímaaflestrar. Við það aðskildust skjálftaþyrpingarnar tvær á svæði 1 og 2. Fyrir svo litla skjálfta, á svo hávaðasömu svæði og með svo fáar virkar mælistöðvar, er þetta næst því sem komist verður að beita afstæðum staðsetningaraðferðum, en gera má ráð fyrir að þessir víxl fylgnireikningar geri innbyrðis staðsetningar skjálftanna betri en óvissumörkin gefa til kynna, einkum þeirra sem skrást á 4 eða fleiri mælistöðvar.

Það sést einnig í töflu 2 að flestir skjálftarnir urðu 5. október á meðan ennþá var verið að dæluþróa holuna, en ádæling stóð frá því síðdegis þann 4. til kl. 22 þann 5. (Ásgrímur Guðmundsson o.fl. 1999). Flestir skjálftanna eru þó nálægt Leirhnjúk, í um 2.7 km fjarlægð, svo óvíst er hvort ádælingin hafði nokkuð með þá að gera, en tveir, 1-5d og 1-5g eru við nálæga Hveragilssprungu. Til að skera úr um hvort ádælingin hafi valdið aukinni skjálftavirkni hefði skráning þurft að byrja fyrr og tímabilið að vera lengra. Virknin á seinna skráningartímabilinu mun einnig varpa betra ljósi á almenna skjálftavirkni svæðisins.

Staðsetning skjálftanna í þyrpingum 1 og 2 er nokkuð stöðug innbyrðis, en heildin getur hliðrast til um nokkur hundruð metra eftir því hvaða hraðalíkan er notað. Aftur á móti er í mörgum tilfellum hægt að sannreyna hvort staðsetning sé rétt með því að skoða úr hvaða átt bylgjan kemur í mælistöð. Þetta er gert með því að skoða eindahreyfinguna (particle motion) í fyrstu  $P$  bylgjunni á lárétu þáttum mælisins. Skilyrðið fyrir því að þetta sé hægt er að suðið á lárétu þáttunum sé nógu lágt til að yfirgnæfa ekki  $P$ -bylgju merkið, sem er mun minna á lárétu þáttunum en þeim lóðrétta. Stöðin við Rauðhól, RAH, reyndist best fallin til þessa og eru stefnur bylgna, frá þeim skjálftum þar sem hægt var að ákvaða þær (5d,f,h, 6b,c, 9a,b og 13b) í góðu samræmi við staðsetningarnar (sem ákvarðaðar voru út frá komutímum  $P$  og  $S$ ) þ.e. frávikid er innan við  $11^\circ$ . Jafnvel í skjálftum þar sem merkið var lítið (5e,g) virtist stefnan einnig vera innan við  $10^\circ$  frá staðsetningu. Stöð H09 var stundum einnig nothæf og var hún í samræmi við stöð RAH. Af þessu má draga þá ályktun að staðsetningar skjálftanna á svæðum 1 og 2 séu nokkuð réttar og óvissa innan við 300 m.

Brotlausnir skjálfta sýna þau tvö hornréttu brotþlön, sem gætu valdið útgeislunarmynstrinu sem sést í skjálftaþylgjunum. Á grundvelli skjálftagagna frá einum skjálfta er ekki hægt að gera upp á milli þeirra, en ef margir litlir skjálftar verða á sömu sprungu, er stundum hægt að beita afstæðum staðsetningaraðferðum til að skera úr um hvor brotflatanna á í hlut, og um leið kortleggja brotflötinn undir yfirborði. Til að fá áreiðanlegt mat á brotlausnum þurfa mælistöðvar að vera vel dreifðar í allar áttir frá upptökum. Vegna staðsetninga skjálftanna með tilliti til mælanetsins, voru brotlausnir ekki vel ákvarðaðar fyrir skjálfta á svæðum 2 og 3, en þar er aðeins lítil geiri af útgeisluninni frá upptökunum mældur á stöðvunum fimm. Hins vegar ætti að vera hægt að finna sémilegar brotlausnir fyrir skjálfta á svæði 1, við Hveragil, einkum þar sem fjórar mælistöðvar skrá; sú fimmta, H09 var ekki nothæf til að ákvarða sveifluvídd vegna bjögunar merkisins í söfnunartækinu. Skjálftarnir 9. okt., sem allir eru í Hveragili voru skráðir

á allar fimm mælistöðvar. Hafi þeir orsakast af brotahreyfingum á Hveragilssprunguni mætti ætla að annað planið í brotlausn þeirra samsvaraði striki og halla hennar ( $\theta = 27^\circ$ ;  $\delta = 87^\circ$ ). Sú var hins vegar ekki raunin, og lausnirnar þrjár voru heldur ekki mjög líkar innbyrðis, eins og sjá má á mynd 7, þar sem bestu brotlausnir fyrir þá eru sýndar. Þetta getur stafað af nálgunarlíkönunum sem notuð eru,  $kra3y$  og  $kra3z$ , en þau hafa ekki sömu víxlverkun við bylgjurnar og líkan  $kra3l$ , eða því að forritið,  $spqaut$ , gerir ráð fyrir að öll orkan sem finnst í  $P$  og  $S$  gluggunum sem valdir eru (0,32 eða 0,64 s) komi frá fyrstu fösum og ekki séu neinir eftirfylgjandi  $P \rightarrow S$  eða  $S \rightarrow P$  umbreyttir millifasar. Eins getur rangt hraða- og deyfingarlíkan truflað mat á brotlausnum. Brotlausnirnar þrjár hafa allar sambland siggengis- og sniðgengishreyfinga, en sýna að öðru leyti mjög breytilega spennuútleusn og einungis í skjálfta 1-9b samsvarar annar brotflöturinn nokkurn veginn Hveragilssprungunni. Brotlausnin fyrir 2-5h er einnig sýnd á mynd 7, en hún er sennilega ekki vel ákvörðuð heldur.

Skjálftarit (ósíuð) ásamt ferðatímaferlum fyrir helstu fasa í líkani  $kra3$  eru sýnd á mynd 8 sem fall af fjarlægð fyrir þrjá þætti (lóðrétta, radíal og tangent) hreyfingarinnar frá skjálfta 2-5h, en hann er einn af best staðsettu skjálftunum. Hann er grunnur, á 0,4 km dýpi og því staðsettur með líkani  $kra3$ . Vegna þess hve grunnur hann er, hafa allar fyrstu  $P$  og  $S$  bylgjur farið niður frá upptökunum, eins og sjá má á mynd 4a. Ferðatímaferlar úr líkani  $kra3$  falla vel að komutíma fyrstu fasa, sem merktir eru með  $P$  og  $S$  á mynd 8. Af tímalengd  $P$  og  $S$  bylgjulestanna má einnig greinilega sjá að skjálftinn er í efsta kílómetranum. Radíal þátturinn sýnir ferðatímaferla reiknaða fyrir líkan  $kra3l$ , en í því er ferðatími fyrstu fasa sá sami og í líkani  $kra3$  út í rúmlega 4 km fjarlægð, þar sem fyrsta fasa ætti að hafa seinkað um  $\sim 0,1$  s. Þessi fasi ætti reyndar að byrja að sjást sem millifasi í um 3,2 km fjarlægð. Í líkani  $kra3$  hafa fyrstu  $P$  og  $S$  bylgjurnar sem koma á SND farið dýpst niður í skorpuna, niður á 1,30 km dýpi. Þetta þýðir að þær hefðu átt að "sjá" lághraðalagið á 1,28 km dýpi og seinkast eitthvað. Því má búast við að skjálftinn, ásamt öðrum skjálftum á svæði 2, séu í raun eitthvað norðar. Þegar 2-5h var staðsettur án komutíma frá SND, færðist hann norðar um 100 m. Skekkjan við að nota þetta líkan við staðsetningu skjálfta á svæði 2 er því sennilega innan við 200 m.

Geislabrautir helstu fasa sem sýndar eru á mynd 8 eru teiknaðar á skýringarmynd 9, en hún gæti átt við líkan  $kra3$ . Bylgjur sem fara niður frá upptökunum og snúa við í hraðastiglinum í skorpunni kallast  $P_g$ . Þær sem fara niður frá upptökum og endurkastast af yfirborði á miðri leið kallast  $2P_g$ . Bylgja eins og  $pP_g$  hefur farið upp frá upptökunum sem  $P$ , endurkastast af yfirborði yfir þeim, og kafað svo ofan í skorpuna sem  $P_g$ .  $sP_g$  hefur farið upp frá upptökunum sem  $S$ . Við yfirborð hefur hún endurkastast sem  $P$  og snúið svo við í skorpunni aftur til yfirborðs.  $P$  fasarnir eiga sér samsvörun í  $S$  bylgjulestinni, en  $P \rightarrow S$  og  $S \rightarrow P$  umbreyttir fasar sjást þó einungis á lóðrétta og radíal þættinum, þ.a. á tangent þættinum eru aðeins hreinir  $S$  fasar. Eftir því sem hraðastigullinn í skorpunni er hærri, því fyrr beygja bylgjur aftur upp til yfirborðs. Eins og sést á mynd 3a og b er hraðastigull mestur við yfirborð og minnkar síðan með vaxandi dýpi. Þess vegna "festist" mikill hluti orkunnar frá grunnnum skjálftum við yfirborð og kemur fram í margföldum endurköstum, sem mynda langar  $P$  og  $S$  bylgjulestir. Eftir því sem dýpi eykst, sleppur meira af orkunni niður í skorpuna og bylgjulestirnar stytast (Kristín Vogfjörð og Sigurður Th. Rögnvaldsson 1999).

Þó  $P$  og  $S$  bylgjulestir í skjálftaritunum á mynd 8 séu langar, eru ekki augljós merki um endurkastaða fasa  $pP_g-2P_g$ ,  $sP_g$ , og  $sS_g-2S_g$ , en þeir geta verið mjög greinilegir í grunnnum skjálftum á Suðurlandi (Kristín Vogfjörð og Sigurður Th. Rögnvaldsson 1999). Hugsanlega eru þessir fasar truflaðir af endurköstum frá lághraðalögunum og því ógreinilegri, en sjá má að enn er mikil orka í skjálftaritunum í kringum væntanlegan komutíma þeirra.

Til samanburðar við þessi gögn eru hermiskjálftarit sýnd á mynd 10. Þau eru reiknuð fyrir sömu upptök og brotlausn og í skjálfta 2-5h. Hraðalíkanið, sem nálgar líkan  $kra3$ , ásamt breytingum í deyfingu, eru sýnd á mynd 3c og d. Hermiskjálftaritin eru áberandi einfaldari en gögnin, enda innihalda þau einungis tíðnir undir 25 Hz, og líkanið án lághraðalaga.  $pP_g-2P_g$  fasarnir eru greinilegir á lóðrétta (Z) þættinum og  $sS_g-2S_g$  fasarnir á radíal (R) og tangent (T) þáttunum. Á lárétta þáttunum má reyndar einnig sjá  $s2S_g-3S_g$  í 3,2 og 4,7 km fjarlægð. Af þessum hermireikningum er einnig greinilegt að geislarnir koma of bratt undir mælistöðvarnar, þ.e. hraðinn við yfirborð er heldur lágur. Þetta sést á því að  $P$  er nær

eingöngu á lóðréttu þættinum og  $S$  nær eingöngu á þeim láréttu. Til að halda sama ferðatíma en stækka innfallshornið er sennilega nóg að hækka hraða í efstu  $\sim 200$  metrunum. Með  $2,0$  km/s  $P$ -hraða við yfirborð, í stað  $1,2$  km/s, myndi t.d.  $S$ -útslag á lóðréttu þættinum aukast um  $\sim 70\%$ . Hærra hraði við yfirborð er ekki endilega í ósamræmi við niðurstöður Bryndísar Brandsdóttur o.fl. (1995), því hraði í efstu  $\sim 300$  metrunum virðist ekki vel ákvarðaður af gögnum þeirra. Í gögnunum frá skjálfta 2-5h er  $S$ -bylgju orkan hlutfallslega hærra en í hermiskjálftaritunum, þannig að sennilega er deyfing  $S$  bylgna ( $1/Q_S$ ) heldur mikil í líkaninu. Í hermiskjálftaritunum er sveifluvidd  $P$  bylgna 3–5 sinnum minni en í gögnunum (ath. að sveifluviddin á mynd 10 er ekki í sömu einingu og á mynd 8) og enn fremur er pólun  $P$  bylgjunnar á RAH röng. Í  $SV$  bylgjunum (radíal) er sveifluviddin 3–6 sinnum minni en í gögnunum og í  $SH$  bylgjunni (tangent), 1–4 sinnum minni. Brotlausnin er því ekki vel ákvörðuð, enda ekki við öðru að búast með svo lítið rúmhorn af úteislunni skráð.

Dæmi frá svæði 1 er sýnt á mynd 11, en þar eru skjálftarit frá skálfta 1-9a teiknuð ásamt ferðatímaferlum fyrir upptök á  $2,4$  km dýpi í líkani *kra3l* (á  $Z$  þætti) og *kra3y* (á radíal og tangent þáttum). Sveifluviddin er um  $10$  sinnum minni en í skjálfta 2-5h og merkið því augljóslega meira truflað af bakgrunnssuðinu. Skjálftinn er á  $2,4$  km dýpi þ.a. allar fyrstu  $P$  og  $S$  bylgjur sem sjást, fara upp frá skjálftanum (sjá mynd 4b). Tímafrávik frá ferðatímaferlunum eru mun stærri en frá skjálfta 2-5h og bendir það til að líkanið þurfi endurbóta við fyrir neðan  $1,25$  km dýpi, en þó ber að hafa í huga að hluti frávikanna er vegna þess að ferlarnir gilda fyrir slétt yfirborð, og að fyrsti  $S$  fasinn sem sést í gögnunum er hugsanlega  $P \rightarrow S$  umbreyttur fasi. Komutími hans passar nokkurn veginn við ferðatíma fyrir  $P \rightarrow S$  endurkast frá efri mótum efra lághraðalagsins, sem endurkastast svo aftur af botni lagsins áður en það fer til yfirborðs. Mjög greinilegur  $P$  millifasi er sýnilegur á lóðréttu þættinum frá þessum skjálfta sem og skjálftum 1-9b og 1-9c (sjá mynd 12). Komutími hans passar nokkurn veginn við ferðatímaferil fyrir  $S \rightarrow P$  umbreyttan fasa við botn neðra lághraðalagsins, en þó er vafasamt að útslag hans gæti verið svo stórt. Líklegra er að hann sé eitthvert annað endurkast innan millilaganna.  $P$  og  $S$  bylgjulestimar eru mun styttri en frá skjálfta 2-5h, í samræmi við dýpri upptök:  $S$  bylgjulestin er rúmlega  $0,5$  s löng frá þessum, en  $1-1,5$  s löng frá skjálfta 2-5h.

Hermiskjálftarit sem samsvara upptökum og brotlausn skjálfta 1-9a, í líkani sem nálgar *kra3l* (sjá mynd 3c), eru sýnd á mynd 13. Þar eru greinilegir millifasar á eftir fyrsta  $P$  á lóðréttu og radíal þættinum. Ferðatímaferlar fyrir  $P \rightarrow S$  og  $S \rightarrow P$  fasa, sem passa nokkurn veginn við komutíma þeirra eru lagðir yfir. Svo virðist sem fyrsti  $S$  fasinn í gögnunum (sjá mynd 11) samsvari  $P \rightarrow S$  fasa úr millilögnum, og enn fremur að innfallshornið við yfirborð sé heldur lítið í hermiskjálftaritunum vegna of lágs yfirborðshraða. Sveifluviddir fyrsta  $P$  og fyrsta millifasa eru ekki þær sömu og í skjálftaritunum og bendir það til að brotlausnin sé ekki alveg áreiðanleg, eða jafnvel að líkanið þurfi endurbóta við. Á lóðréttu þættinum er sveifluvidd í hermiskjálftaritunum  $1,5-4$  sinnum minni en í skjálftaritunum, á radíal þættinum er hún  $2-10$  sinnum minni og á tangent þættinum frá  $9$  sinnum minni upp í  $3$  sinnum stærri. Án lághraðalaganna myndu hermiskjálftaritin líta út eins og sýnt er á mynd 14, en þar koma bara einn  $P$  og einn  $S$  fasi inn á hverja stöð. Sveifluviddir fasanna á lóðréttu og radíal þættinum eru að sama skapi stærri en á mynd 13, því engin tilfærsla á orku milli  $P$  og  $S$  bylgna verður á lagmótum. Jarðslagaskipan er því augljóslega flóknari en líkan *kra3*. Tangent þátturinn er lítið breyttur miðað við mynd 13, sem gefur til kynna að millifasarnir á lóðréttu og radíal þætti myndar 13, séu aðallega  $P \rightarrow S$  og  $S \rightarrow P$  umbreyttir fasar, og að lítil orka sé í hreinum endurköstum.

Í eldri jarðskjálftarannsóknnum (Páll Einarsson 1978) hafa merki kvikuhólfs verið talin finnast á  $\sim 3$  km dýpi undir Kröflu. Tilvist þess hefur einnig verið studd af hermilíkansreikningum á landmælingagögnum frá 1984-1986 (Þóra Árnadóttir o.fl. 1998), þar sem miðja kvikuhólfsins er á  $\sim 3$  km dýpi undir suðvest-anverðum Leirhnjúki (merkt með stjörnu á mynd 7). Væri endurköst ofan af lofti slíks kvikuhólfs að finna í bylgjulestumum, er áætlaður komutími þeirra, frá upptökum á  $2,4$  km dýpi, um  $0,1-0,2$  s á eftir fyrstu  $P$  og  $S$ , eða á svipuðum tíma og stóru millifasarnir sem sjást á SND (sjá mynd 12). Afstaða skjálfta og mælistöðva er þannig, að endurköst af hliðum þessa kvikuhólfs gætu sést í skjálftaritum frá skjálftum á svæði 2, en til þess að sjást á SND frá upptökum á svæði 1, þyrfti kvikuhólfið að teygja sig a.m.k.  $2$

km suðaustur frá miðju og er þá orðið nokkuð stórt. Það er því ekki líklegt að millifasarir á SND séu endurköst af þaki kvikuhólfs, en þó er ekki útilokað að þeir séu endurkast af einhverjum lagmótum undir upptökunum. Seinkun þessa fasa frá skjálfta 9c (á 1,7 km dýpi), miðað við skjálfta 9a og 9b (á 2,4 og 2,2 km dýpi), gæti bent til að hann væri endurkast að neðan. Eindahreyfingin í þessum  $P$  millifösum bendir til að þeir séu sambland af fleiri en einum fasa, hugsanlega úr mismunandi áttum.

### 5.3 Helstu niðurstöður

Núverandi skjálftavirkni á Kröflusvæðinu er um tveir skjálftar á dag að meðaltali. Þetta er rúmlega þriðjungur þeirrar skjálftavirkni er mældist á þriggja mánaða tímabili árið 1985, en þá voru að jafnaði um 5 skjálftar á dag (Arnott og Foulger 1994a). Skjálftarnir virðast raða sér við Hveragilssprunguna (svæði 1), austan við Leirhnjúk (svæði 2) og í grennd við Námafjall (svæði 3), svipað og í eldri mælingunum (sjá mynd 7). Þó er skjálftavirknin á Kröflusvæðinu nokkuð austar nú en áður. Dýpi skjálfta nálægt Leirhnjúki er líka minna nú en skv. þessari eldri rannsókn, þar sem dýpi var 1–2,5 km en er nú nálægt 0,5 km. Skjálftarnir á vinnslusvæðinu (svæði 1) eru þó í meira samræmi, en þeir eru 1,7–2,4 km undir yfirborði. Dýpi er samt sem áður mjög háð hraðalíkani og bent hefur verið á (Bryndís Brandsdóttir o.fl. 1995) að dýpi hjá Arnott og Foulger (1994) geti hafa verið of mikið vegna 'trade-off' við hraða undir mælistöðvum á jafri mælanetsins. Þessi stöðuga skjálftavirkni á Kröflu- og Námafjallssvæðunum gefur góðar vonir um að hægt sé að nota smáskjálfta við kortlagningu sprungna á vinnslusvæðunum.

Flestir skjálftarnir urðu 5. október, en þá stóð einmitt yfir ádæling í holu KJ-31. Tveir þeirra (5d, 5g) eru staðsettir nálægt holunni og gætu hugsanlega tengst ádælingunni. Ekki hefur verið reynt að tengja skjálftana á svæði 2 ákveðnum sprungum, en nálægð skjálftanna á svæði 1 við Hveragilssprunguna gefur sterklega til kynna að þeir hafi orðið við skrið á henni. Brotlausnir skjálfta 9a-c gefa þó ekki ótvírætt til kynna að brotflöturinn sé sá sami, en brotlausnir geta auðveldlega verið truflaðar af millifösum og vanmætti nálgunarlíkananna,  $kra3y$  og  $kra3z$  til að búa til samskonar bylgjumynstur og sést í gögnunum.

Hluti úrvinnslunnar fólst í því að skoða náíð útbreiðslumynstur (wave propagation characteristics) á Kröflusvæðinu, til þess að reyna að skilja og þekkja þá fasa sem sjást í gögnunum, með tilliti til mismundi hraðalíkana, en það er forsenda þess að staðsetningar verði áreiðanlegar og að hægt sé að meta hvort brotlausnir eru marktækar. Skjálftaritin innihalda talsverða millifasa, sem gætu verið endurköst frá lághraðalögum, eins og þeim sem eru í líkani  $kra3l$  (Bryndís Brandsdóttir o.fl. 1995). Það líkan nálgar vel komutíma frá grunnum skjálftum (sjá mynd 8) og gefur til kynna að hægt sé að notast við einvíða nálgun í efsta kílómetra skorpunnar. Líkan Arnott og Foulger (1994) sýndi aftur á móti talsverðar þrívíðar hraðabreytingar á svæðinu. Þó það líkan hafi ekki nálgað ferðatímana vel og hugsanlega verið truflað af 'trade-offs', er ekki útilokað að þrívíð hraðadreifing undir efsta kílómetranum valdi einhverjum endurköstum eða fjölbrautun (multi-pathing) og orsaki þannig millifasa. Með tilliti til líkanreikninga sem sýna kvikuhólf á ~3 km dýpi undir suðvestanverðum Leirhnjúki (Þóra Árnadóttir o.fl. 1998), eru endurköst ofan af þaki þess hugsanleg, einkum í skjálftum á svæði 2. Hér var valið að fylgja líkani  $kra3l$ , því það nálgadi ferðatíma vel og bjó til millifasa líkt og sást í gögnunum (sjá mynd 13). Hvað sem öðrum hraðalíkönunum líður, gefa millifasarir til kynna að hraðadreifingin sé flókin á svæðinu.

Staðsetningarnar voru gerðar með nálgunarlíkönunum, sem líktu eftir ferðatímum í líkani  $kra3l$  og þurfti mismunandi nálgunarlíkön fyrir mismunandi upptakadýpi. Þetta hefur vafalaust aukið eitthvað á ónákvæmni í staðsetningu, en á móti kemur að innbyrðis staðsetning í skjálftaþyrpingunum á svæði 1 og 2 er bætt með því að bera bylgjuform mismunandi skjálfta saman. Þá eru staðsetningarnar einnig studdar af eindahreyfingum (particle motions) í  $P$  bylgjunum. Það er því áætlað að staðsetningarnar séu nákvæmar upp á ~300 m og dýpið ~500 m. Vegna smæðar skjálftanna og mikils bakgrunnssuðs á svæðinu, var ekki hægt að beita afstæðum staðsetningaraðferðum til að auka nákvæmnina frekar. Með fleiri skjálftum og betri staðsetningu mæla, verður hugsanlega hægt að beita þessum aðferðum á Kröfluskjálfta í framtíðinni og kortleggja þannig sprungur á svæðinu, því eins og sást á gögnunum var suð mjög mismunandi



á mælistöðvunum; á SND, í útjaðri Kröflusvæðisins, var suð t.d. mun minna en inni á vinnslusvæðinu.

Áreiðanleiki brotlausna mun fylgja áreiðanleika hraðalíkans, en búast má við að þegar bylgjuútbreiddslu-  
mynstur svæðisins er orðið þekkt verði hægt að bæta úr. Eins og er, eru þær vafasamar.

Sjálfvirki SIL hugbúnaðurinn virkaði ekki á þessa litlu skjálfta og mun þurfa að fínstillta hann enn frekar til að vinna með svona litla og nálæga skjálfta. Einkum þarf *fasafinnur* endurbóta við til að hægt sé að fá sjálfvirku staðsetningarnar til að virka. Enn fremur þyrfti staðsetningarforritið að leyfa flóknari hraðastrúktúr, t.d. lághraðalög eða viðsnúinn hraðastrúktúr. Þó í mörgum tilvikum sé hægt að 'plata' forritið með einfölduðum líkönum, þá gengur það ekki við ákvörðun brotlausna. Þá væri reynandi að auka eitthvað vægi  $S$  ferðatíma í staðsetningarforritinu, því vægi  $S$  er einungis um  $1/9$  af vægi  $P$ . Ef komutími  $S$  bylgna er vel ákvarðaður, getur aukið vægi hans bætt nákvæmni staðsetningar, einkum þegar fáar stöðvar skrá skjálfta. Við ákvörðunum brotlausna með svo fáar mælistöðvar væri einnig athugandi að taka til greina pólun  $S$  bylgna. Þessar viðbætur myndu að sjálfsögðu aðeins eiga við þar sem bylgjuformið væri eins og í  $P$  bylgjunni þannig að hægt væri að sjá með vissu hvar  $S$  bylgjan byrjaði og í hvaða átt útslagið væri. Vegna áhrifa millifasanna sem koma á eftir fyrstu  $P$  og  $S$  bylgjunum og lenda inni í skoðunargluggunum, er samt hugsanlegt að brotlausnir skjálfta á Kröflusvæði sé erfitt að ákvarða með svo nálægu neti. Mælistöðvar gætu verið eitthvað fjær, en fjarlægðir mæla í netinu takmarkast þó af smæð skjálftanna á svæðinu. Síðan í janúar 1999 hafa farið fram endurbætur á SIL hugbúnaðinum á Veðurstofu Íslands, bæði á *fasafinn* og brotlausnarforritunum, m.a. er leyft aukið vægi  $S$  bylgna og mun það væntanlega bæta framtíðarúrvinnslu. Hins vegar hefur líka verið breytt um form gagna, þannig að nú eru þau geymd á þjöppuðu innanhússformi, *bc*, í stað *AH*. Þetta breytingaskeið stendur enn yfir og mun það líklega valda einhverjum töfum á næstu mánuðum.

Bakgrunnssuðið á svæðinu er mest á tíðnibilinu 15-25 Hz, og eykst það til muna í nálægð blásandi holna (sjá myndir 5 og 6). Við skráningu smáskjálfta á svæðinu mun því mikilvægt að halda blæstri í lágmarki á meðan skráning stendur yfir. Hugsanlega er hægt að draga einhverjar ályktanir af tíðnirófi suðsins, en það var ekkert kannað í þessum þætti úrvinnslunnar. Af suðinu á stöð SLK er einnig ljóst mikilvægi þess að staðsetja nema þar sem suð á hljóðláta tíðnibandinu ( $< 15$  Hz) er lítið.

Orion skráningartækin og 5 sekúndna Lennarz skjálftanemarnir reyndust ágætlega við skráningu smáskjálfta. Kerfið var hins vegar mikið truflað við tíðnir yfir  $\sim 50$  Hz og því alls ekki nothæft ef hárrar söfnunartíðni er krafist. Þá var skráning í hringormsskrá mistök, því gögn frá upphafi tímabilsins, á meðan borun var enn í gangi töpuðust. Ef lágtíðniinnihald (0,2–1 Hz) skjálfta eða bakgrunnssuðs er mikilvægt þarf einnig að stilla háhleypitíðnina í söfnunartækinu lægra en 1 Hz, eins og hér var gert, en þá verður svörun kerfisins fasti niður að  $\sim 0,2$  Hz (sjá mynd 2). Í smáskjálftarannsóknnum er þó tíðnibilið yfir 1 Hz notadryggt og mætti því auðveldlega notast við 1 sekúndna skjálftanema. Hins vegar er nauðsynlegt að mælarnir séu þriggja þátta til að hægt sé að mæla alla hreyfinguna og greina þannig örugglega á milli  $P$  og  $S$  fasa, ásamt því að meta brotlausnir.

Ráðist var í þá könnun á skjálftavirkni á Kröflusvæðinu, sem hér er greint frá, með litlum fyrirvara og með lágmarkstilkostnaði. Þó einungis hafi verið unnið úr gögnum frá fyrri skráningartímabilinu, sýna niðurstöðurnar samt að smáskjálftavirkni er fyrir hendi í jarðhitageyminum og að skjálftar virðast fylgja meginrennislisleiðum jarðhitavökvans. Í ljósi þessa, verður að teljast næsta víst að með vandlega undirbúinni og skipulegri skráningu smáskjálfta megi fá miklar upplýsingar um brotavirkni og sprungur með góðri lekt. Til þess að svo megi verða þarf að ná meiri nákvæmni í staðsetningu skjálftanna. Velja verður skjálftamælunum staði þannig að suð verði ekki of mikið, en samt það nærri að nema megi smáa skjálfta og staðsetja nákvæmlega.

## 5.4 Tillögur um framhald

Vinna þarf úr seinna skráningartímabili. Mesta vinnan, sem fólst í því að koma gögnunum af hráu formi yfir á form sem gengur í SIL hugbúnaðinn, er búin og úrvinnsla getur hafist strax. Á seinna tímabilinu

var stöðin við Víti virk og mun það væntanlega auka til muna nákvæmni staðsetninga á svæðum 1 og 2.

Fjögurra mínútna löngum gluggum með fjögurra klukkustunda millibili hefur verið safnað úr fyrra skráningartímabilinu til að skoða bakgrunnsróa á Kröflusvæðinu. Ekkert hefur verið unnið úr þessum gögnum, en þau, og samskonar safn úr seinna skráningartímabilinu, þyrfti að skoða nánar, m.a. með tilliti til þess hvort hægt er að staðsetja upptök órósans að einhverju leyti. Hugsanlega má finna stefnu frá mælistöðvunum í upptök svæðisórósans og þar með afmarka legu þess svæðis eitthvað.

Hraðastrúktúr inni á Kröflusvæðinu þarf að kanna betur með frekari skjálfta- og jafnvel sprengimælingum, til að minnka óvissu í staðsetningum. Vinna þarf að endurbótum á SIL hugbúnaði svo hann geti fengist við gögn frá smáneti og svo hann geti virkað í því hraðalíkani sem líkir eftir strúktúr á Kröflusvæði, t.d. að leyfð séu lághraðalög.

Stöðug smáskjálftavirkni er á Kröflusvæðinu og gefur það góða von um að kortleggja megi þar sprungur. Það væri því fjárfestingarinnar virði að koma upp fastaneti við Kröflu og Bjarnarflag og hefja söfnun gagna. Smæð skjálftanna krefst þess að netið sé nálægt, en suðið á svæðinu veldur því að betra merkis/suðshlutfall fæst utan við svæðið. Það þarf því að finna einhverja málamiðlun, sem hugsanlega felur í sér samspil fastra "fjarlægari" mæla og færanlegra "nálægari" mæla. Meðan tímabundin skráningarverkefni standa yfir þarf einnig að gera vinnslusvæðið sem kyrrlátast, þ.e. minnka suðið með því að stöðva blástur í holum.

Vonir standa til að aftur verði hægt að fá Orion tækin að láni frá Uppsala háskóla næsta sumar, en við markvissa könnun skjálftavirkni og kortlagningu sprungna á jarðhitasvæðum mun þurfa að koma upp tækjabanka á Íslandi, sem hægt verður að ganga í þegar með þarf, t.d. þegar fylgjast á með áhrifum borunar og ádælingar í holur. Það þarf því að kaupa mæla og skráningartæki og byggja upp slíkan banka af færanlegum mælistöðvum. Vegna mikils stofnkostnaðar mun þurfa samstarf allra íslenskra jarðvísindastofnana, sem fást við skjálftarannsóknir, ásamt framlagi frá orkufyrirtækjum, til að svo geti orðið. Slíkur banki getur nýst til allra almennra skjálftaskráninga og er því augljóslega hagur bæði rannsóknastofnana og orkufyrirtækja, sem hyggjast kortleggja skjálftavirkni og sprungur innan núverandi eða framtíðar vinnslusvæða sinna. Þriggja þátta Lennarz nemarnir hafa reynst vel á Veðurstofu Íslands og fyrir smáskjálftarannsóknir ættu namar með 1 Hz horn tíðni að duga. Orion skráningartækin hafa reynst ágætlega, en hugsanlega er hægt að kaupa sams konar, en ódýrari íslenska smíð.

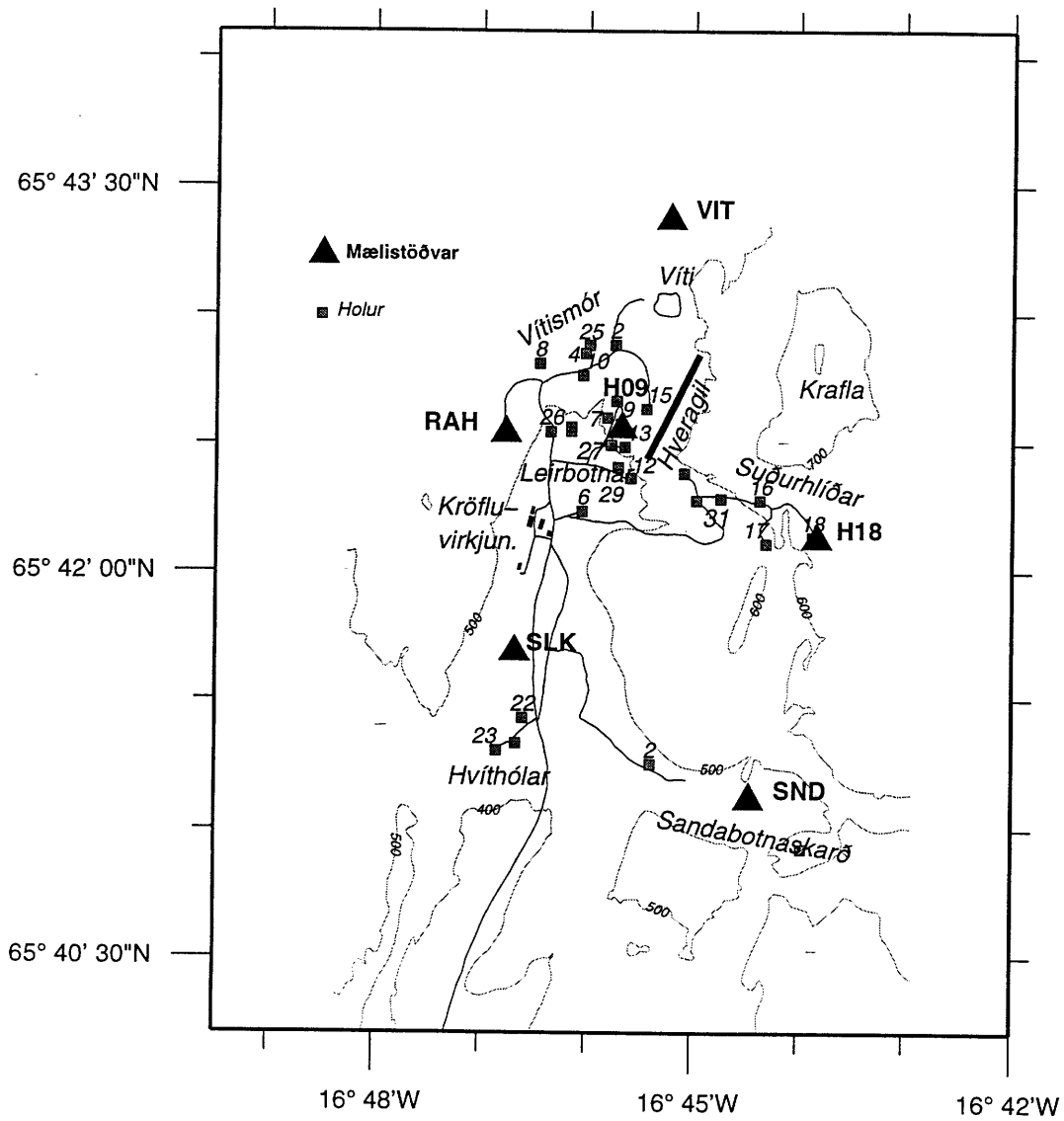
## 6 ÞAKKIR

Við staðsetningar og stærðarmat á skjálftum var notaður SIL hugbúnaður sem saminn er af Ragnari Slunga og Reyni Böðvarssyni, ásamt viðbótum frá starfsfólki Jarðeðlissviðs Veðurstofu Íslands og er hann notaður með þeirra leyfi. Við spekturgreiningu, teikningar og aðra vinnu var notaður SAC2000 (Seismic Analysis Code) hugbúnaðurinn frá Lawrence Livermore Laboratories. Geislabrautir voru reiknaðar með forritinu MacRay, frá J.H. Luetgert í U. S. Geological Survey. Hnit á Hveragilssprungu eru fengin frá Sigvalda Thordarson.

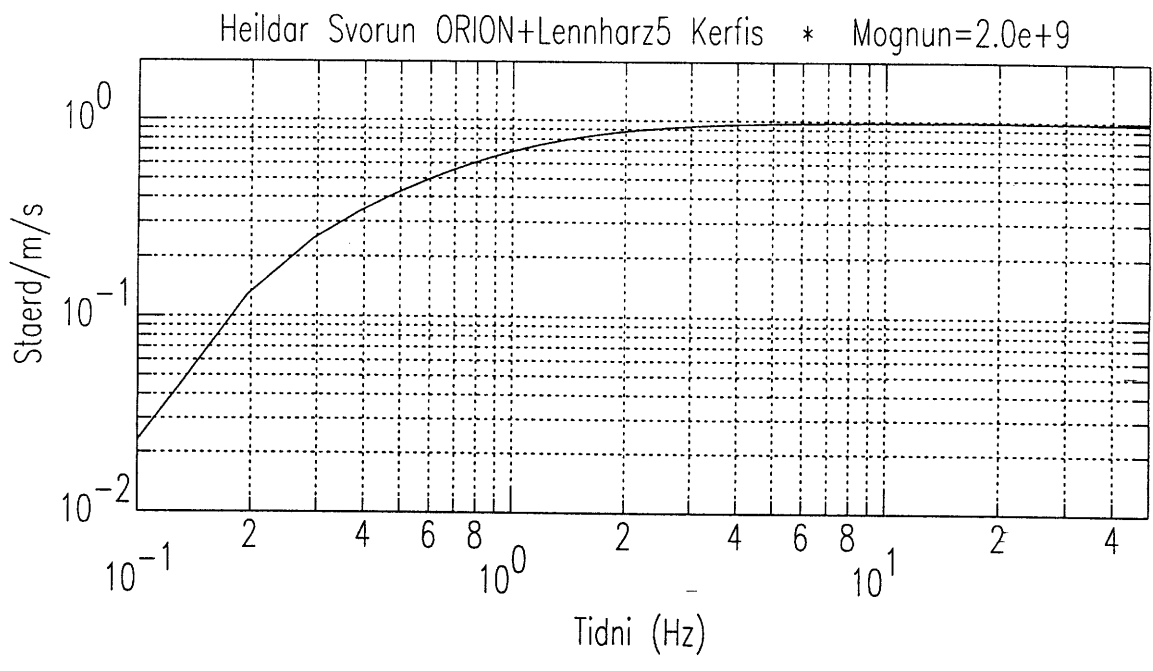
## 7 HEIMILDIR

- Aki, K. og Richards, P. G., 1980. Quantitative seismology, theory and methods. W. H. Freeman, New York.
- Ari Tryggvason, Sigurður Th. Rögnvaldsson og Ólafur G. Flóvenz, 1999. Three-dimensional imaging of the P- and S-wave velocity structure and earthquake locations beneath southwest Iceland. Óbirt handrit.
- Arnott, S. K. og Foulger, G. R., 1994a. The Krafla spreading segment, Iceland 1. Three-dimensional crustal structure and the spatial and temporal distribution of local earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 99: 23801–23825.
- Arnott, S. K. og Foulger, G. R., 1994b. The Krafla spreading segment, Iceland 2. The accretionary stress cycle and nonshear earthquake focal mechanisms. *J. Geophys. Res.*, 99: 23827–23842.
- Ásgrímur Guðmundsson, Guðrún Sverrisdóttir, Sigurður Benediktsson og Dagbjartur Sigursteinsson, 1999. Krafla, hola KJ-31. Þriðji áfangi.
- Bryndís Brandsdóttir, Menke, W., Páll Einarsson, White, R. og Staples, R., 1995. Crustal structure of the Krafla central volcano in the Northern Volcanic Zone of Iceland as determined through seismic observations. Skýrsla RH-95-05, Raunvísindastofnun Íslands.
- Bryndís Brandsdóttir, Menke, W., Páll Einarsson, White, R. S. og Staples, R. K., 1997. Faroe-Iceland ridge experiment 2. crustal structure of the Krafla central volcano. *J. Geophys. Res.*, 102: 7867–7886.
- Kristín S. Vogfjörð og Sigurður Th. Rögnvaldsson, 1999. Identification and modeling of secondary phases in short-period seismograms from local earthquakes in the South Iceland Seismic Zone. *Geophys. J. Int.* (Samþykkt til birtingar, jan. 1999)
- Páll Einarsson, 1978. S-wave shadows in the Krafla caldera in NE-Iceland, evidence for a magma chamber in the crust. *Bull. Volcanol.*, 41: 1–9.
- Reynir Böðvarsson, Sigurður Th. Rögnvaldsson, Steinunn S. Jakobsdóttir, Slunga, R. og Ragnar Stefánsson, 1996. The SIL data acquisition and monitoring system. *Seism. Res. Lett.*, 67: 35–46.
- Sigurður Th. Rögnvaldsson og Ragnar Slunga, 1993. Routine fault plane solutions for local networks: a test with synthetic data. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 83: 1232–1247.
- Sigurður Th. Rögnvaldsson, Reynir Böðvarsson, Ragnar Slunga og Steinunn S. Jakobsdóttir, 1997. The transfer function of the SIL seismic data acquisition system. Skýrsla VÍ-R97001-JA01, Veðurstofa Íslands.
- Sigvaldi Thordarson, 1997. Smáskjálftamælingar í Kröflu. Greinargerð á OS, nóv. 1997.
- Þóra Árnadóttir, Freysteinn Sigmundsson og Delaney, P. T., 1998. Sources of crustal deformation associated with the Krafla, Iceland eruption of September 1984. *Geophys. Res. Lett.*, 25: 1043–1046.

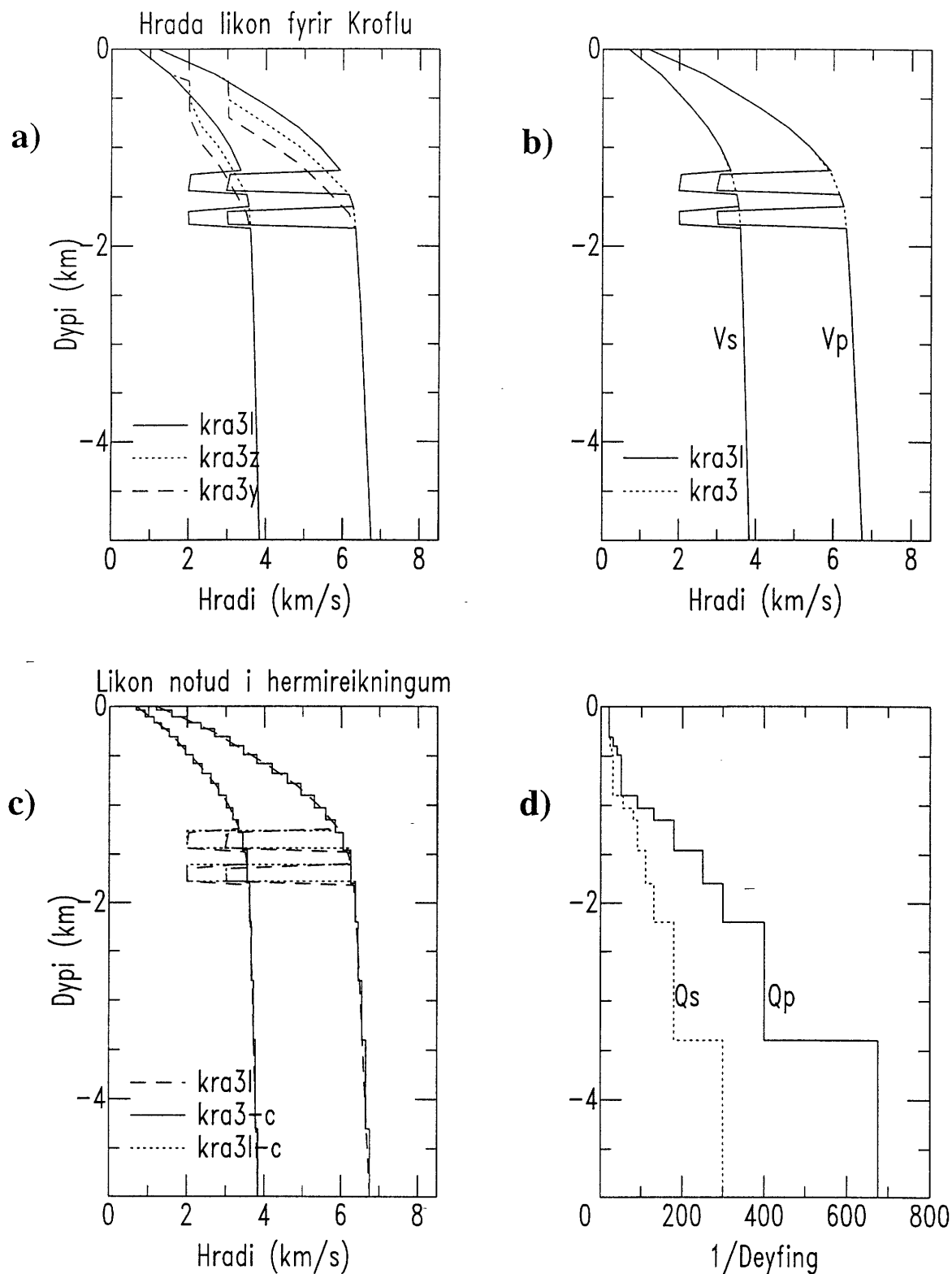
Mælanet í Kröflu okt./nóv. 1997



Mynd 1. Kort sem sýnir afstöðu mælanets (fylltir þríhyrningar) til borholna á Kröflusvæðinu. Hveragilssprungan er sýnd með þykkri línu.

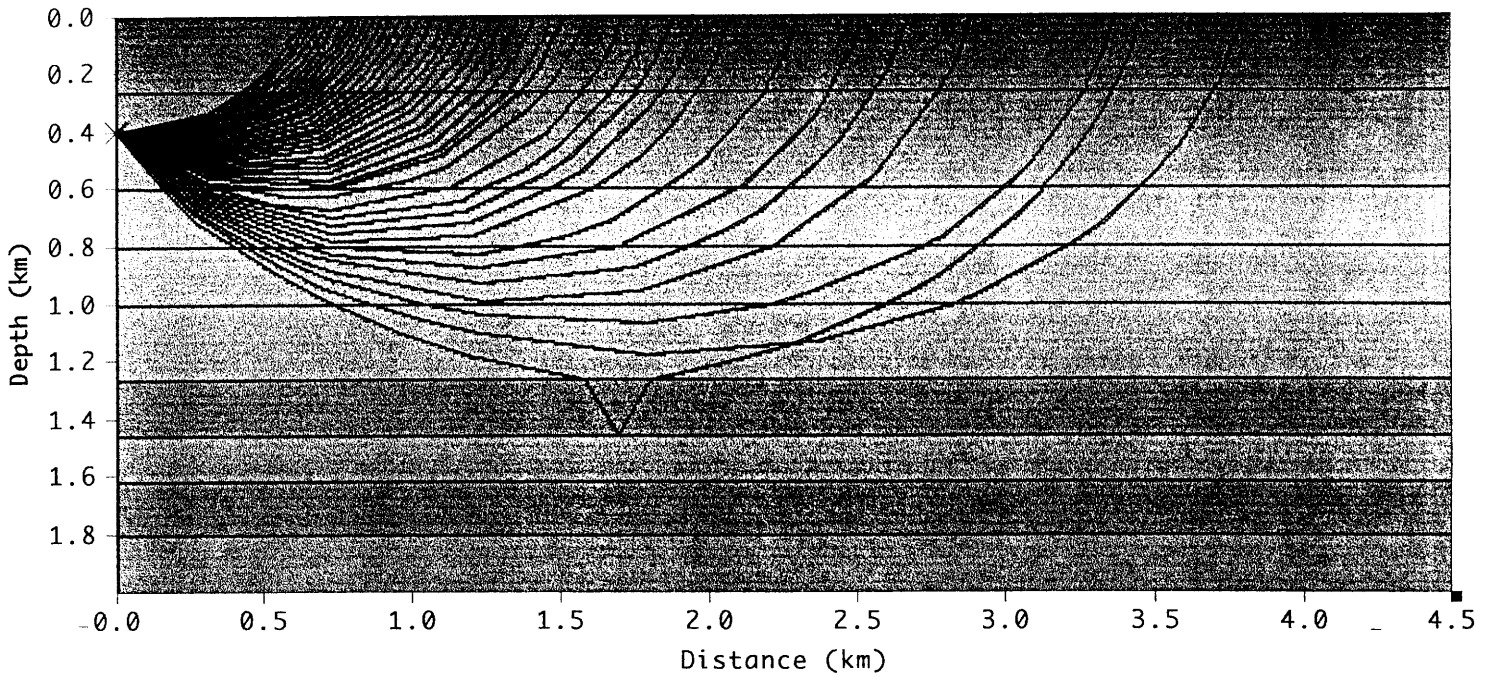


Mynd 2. Kvörðuð svörun mælakerfisins við hraða. Heildarmögnun kerfisins er 2,0e+9 /m/s.

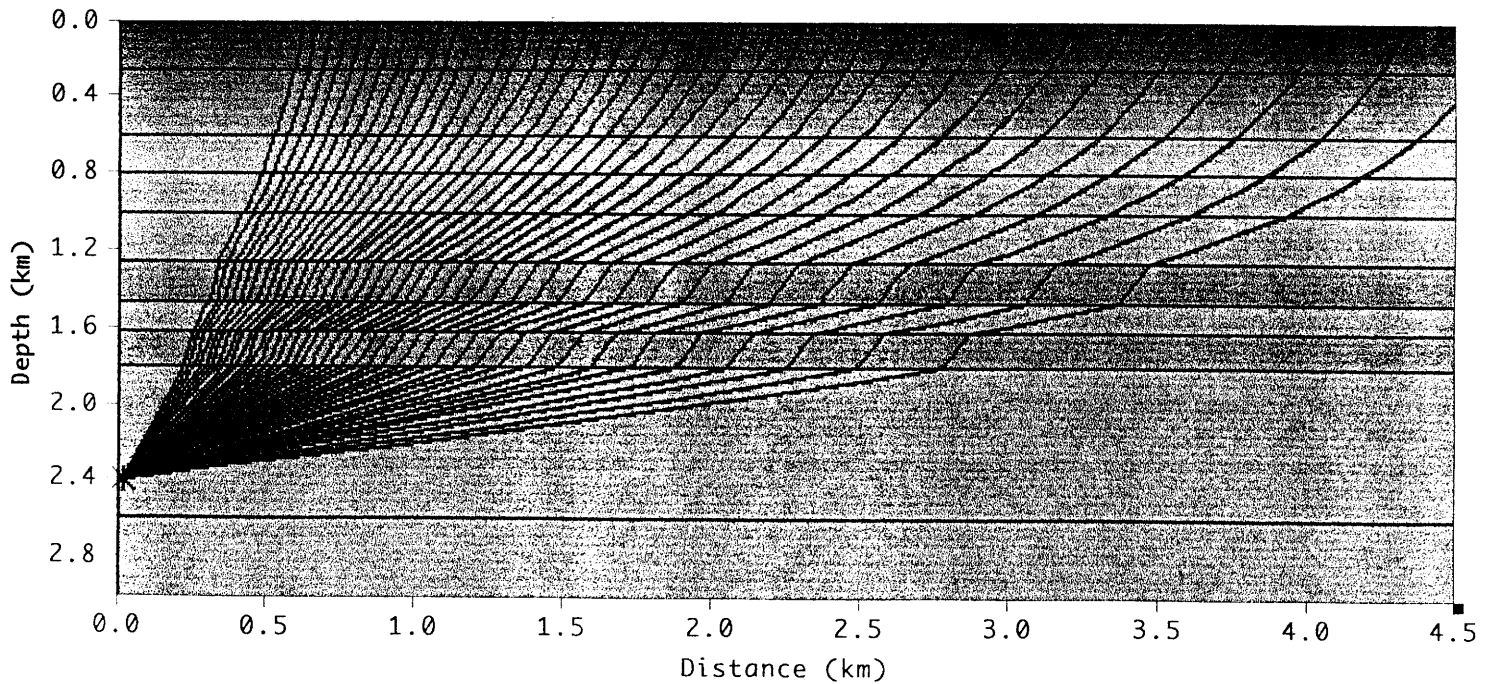


Mynd 3. Hraða- og deyfingarlíkön fyrir Kröflusvæðið. a) Hraðalíkan kra3l (heil lína) sem inniheldur tvö lághraðalög, nálgunarlíkan kra3z (punktalína) sem notað er fyrir upptök á dýptarbilinu 1,25-1,8 km, og nálgunarlíkan kra3y (brotin lína), sem notað er fyrir upptök undir 1,8 km. b) Hraðalíkon kra3l (heil lína) og kra3 (punktalína), sem er án lághraðalaga. c) Hraðalíkan kra3l (brotin lína) og nálgunarlíkön, sem notuð eru við hermireikninga: kra3l-c (punktalína), sem nálgar líkan kra3l, og kra3-c (heil lína), sem nálgar líkan kra3. d) Deyfingarlíkan sem notað er við hermireikninga.

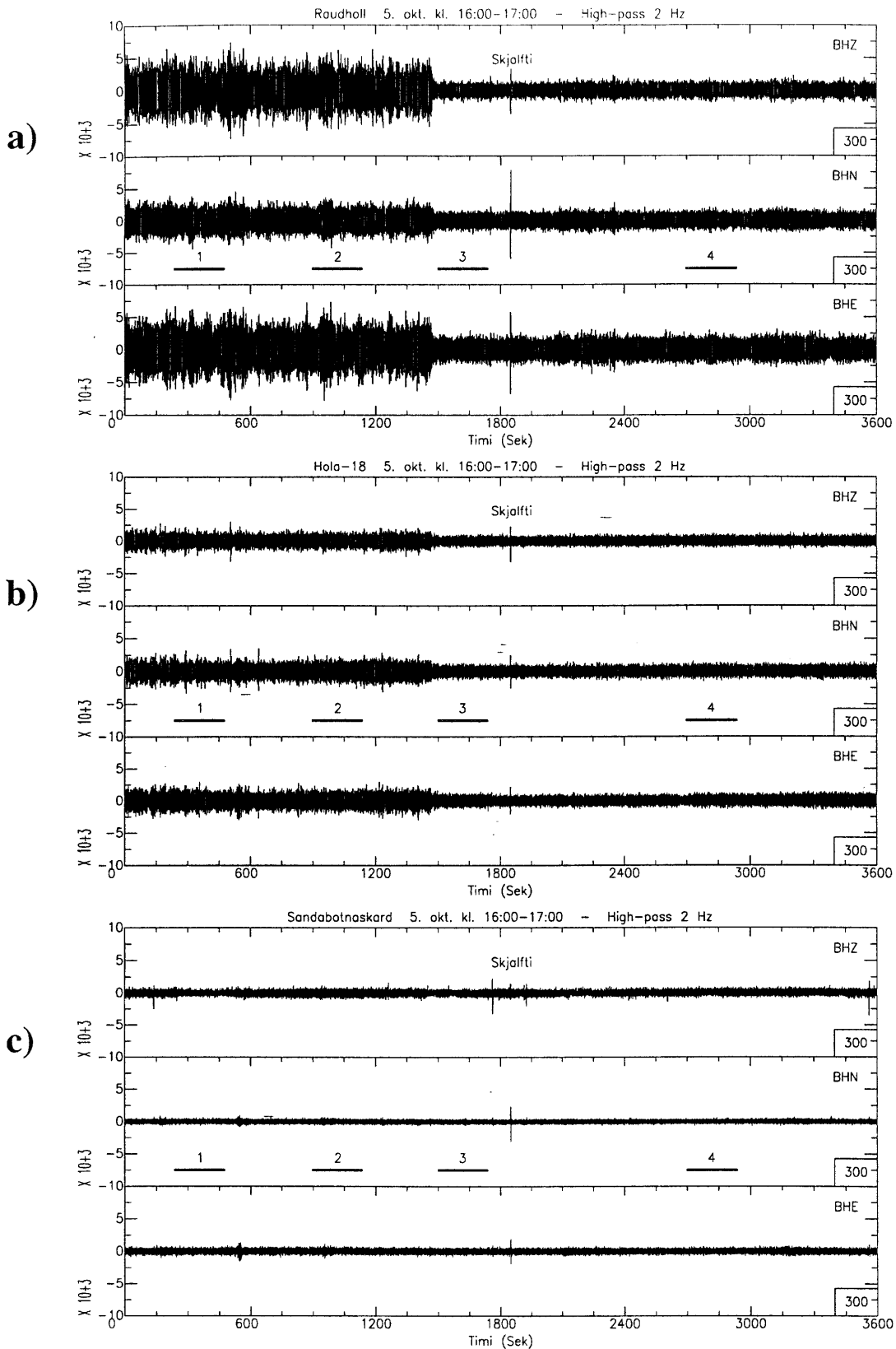
a)



b)

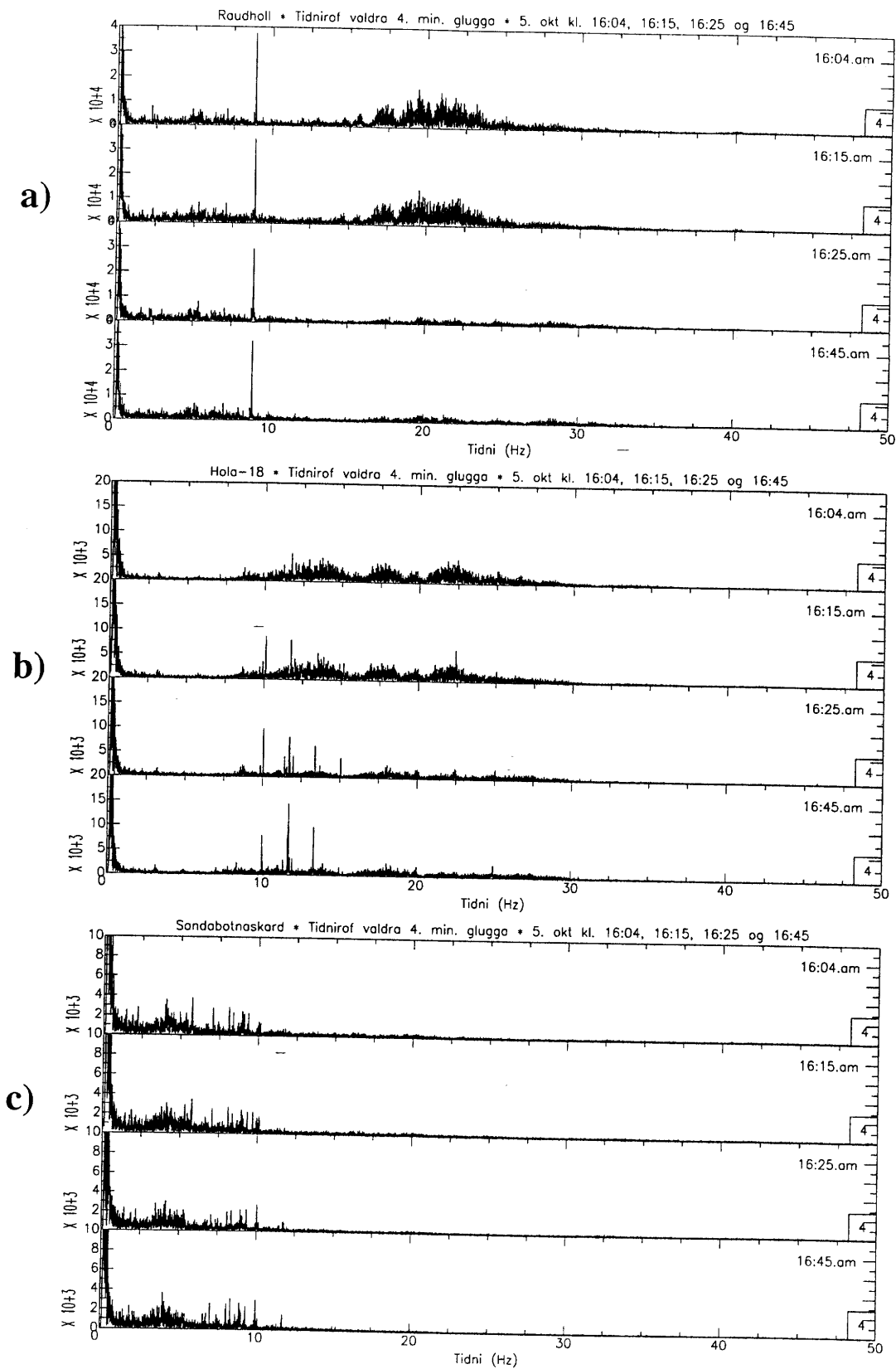


Mynd 4. Geislabrautir í líkani kra3l, frá upptökum. (a) Á 0,4 km dýpi (fyrir ofan lághraðalögin); (b) á 2,4 km dýpi (fyrir neðan lághraðalögin).



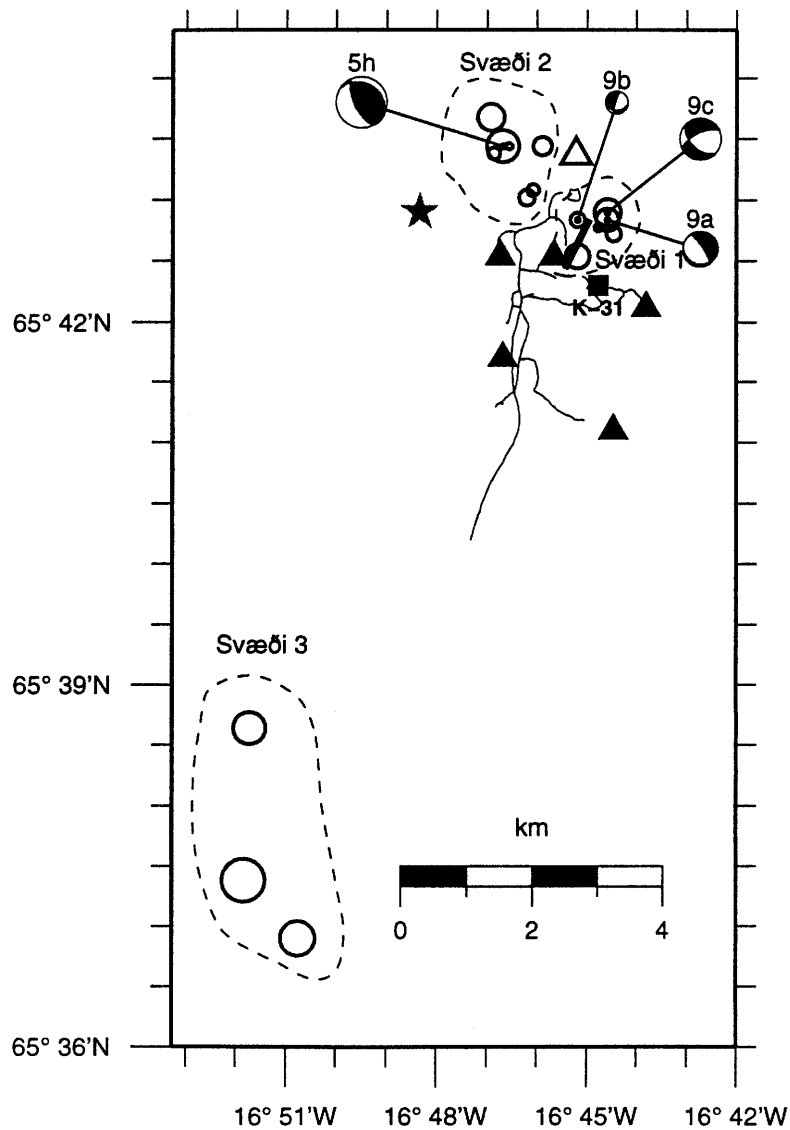
Mynd 5. Þrjár þættir hreyfingarinnar (BHZ=lóðrétt, BHN=norður, BHE=austur) á mælistöðvunum á: a) Rauðhól (RAH), b) Hóla 18 (H18), c) Sandabotnaskarði (SND). Tímalengdin er 1 klst. Mjög hátt suð vegna blásandi holu sést á RAH, heldur minna á H18, en lítið á SND sem er utan vinnslusvæðisins. Blásturinn hættir við ~1500 s og skjálfti 2-5e sést við ~1800 s. Fjórir gluggar, 4 mín. hver eru valdir til spekturgreiningar.



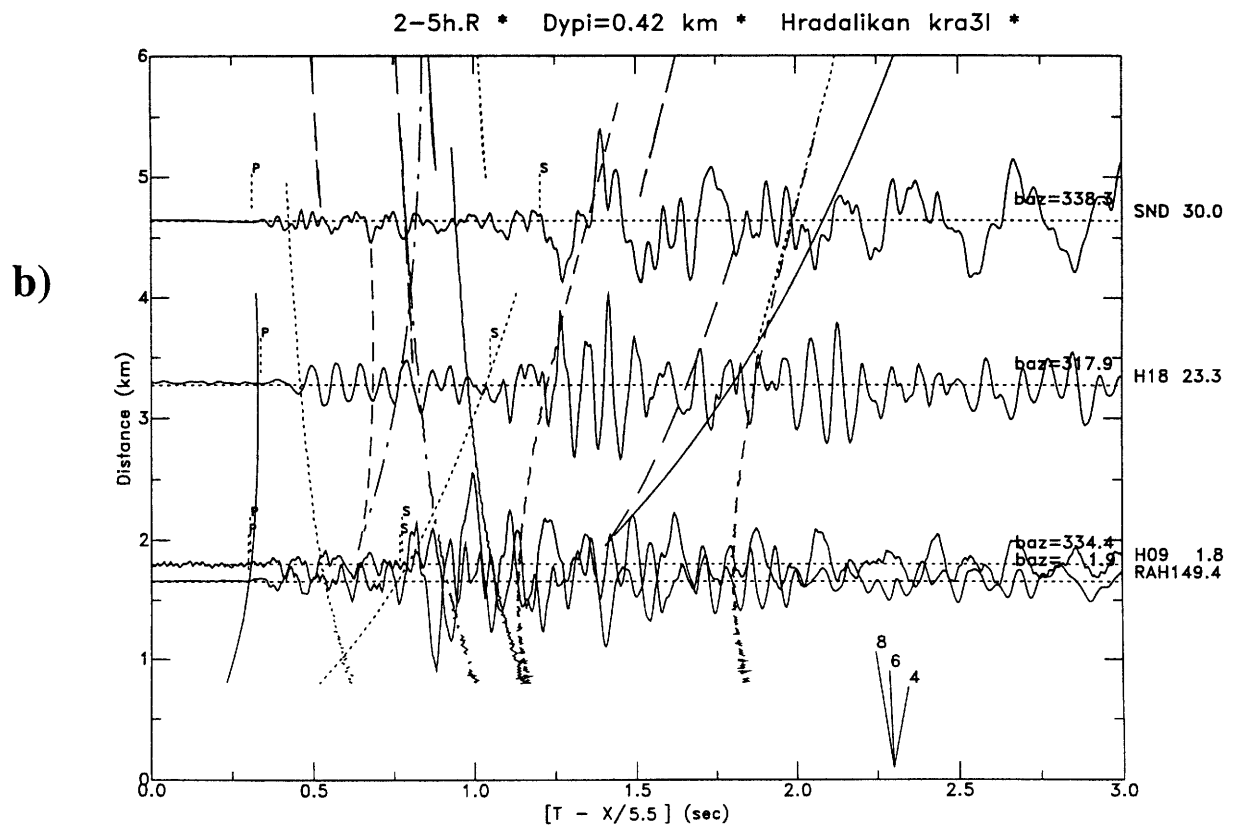
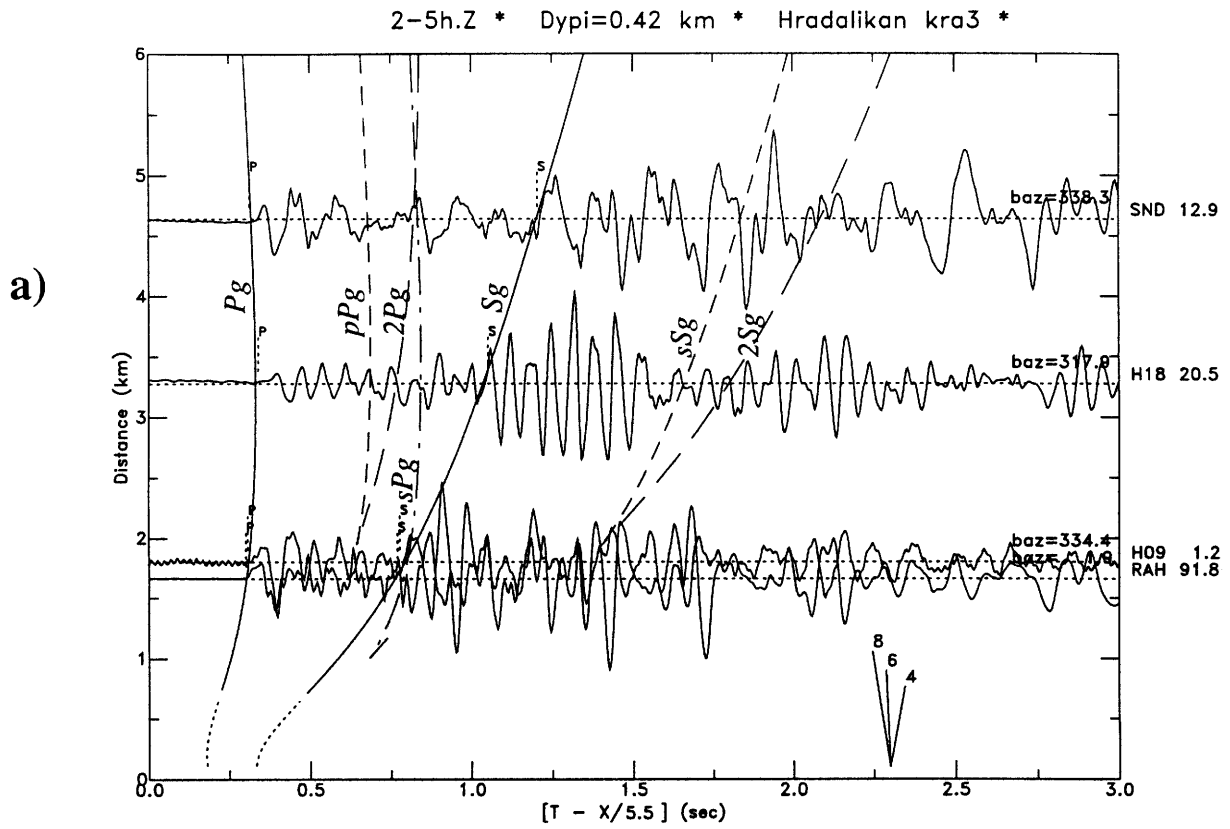


Mynd 6. Tíðnirof í gluggunum fjórum sem sýndir eru á mynd 5. a) RAH, b) H18, c) SND.

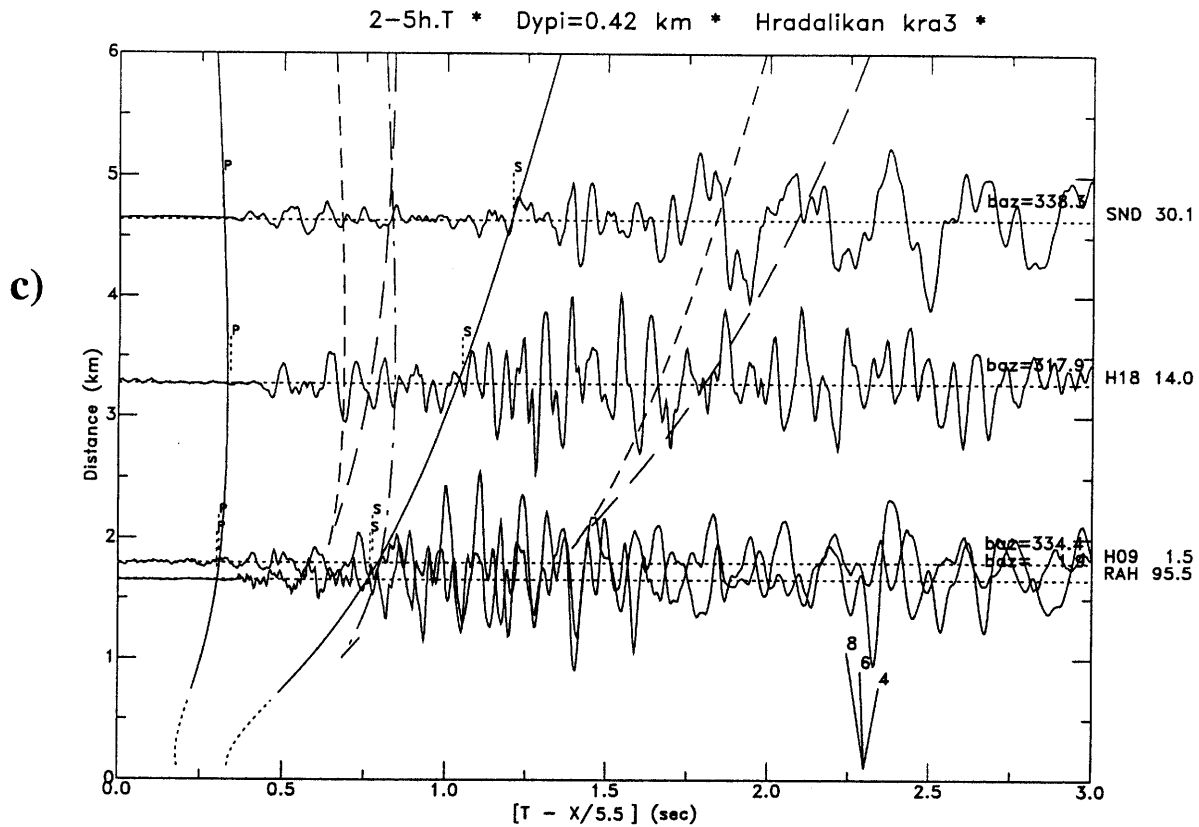
## Staðsetningar Skjálfta



Mynd 7. Staðsetningar skjálfta (opnir hringir) á Kröflusvæði m.t.t. mælistöðva (þríhyrningar) Óvirk stöð við Víti er sýnd með opnum þríhyrningi. Hóla KJ-31 er merkt með ferningi og miðja kvikuhólfs er sýnd með stjörnu. Hveragilssprungu er sýnd með þykkri línu og brotlausnir fyrir fjóra skjálfta eru teiknaðar.

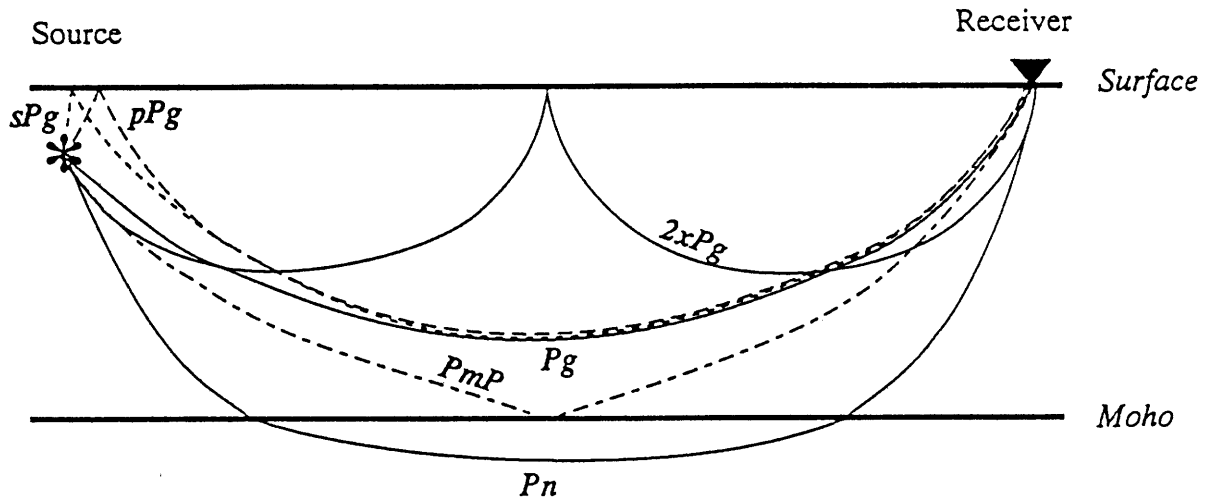


Mynd 8. a) Lóðrétt (Z), b) radíal (R) (frh...)

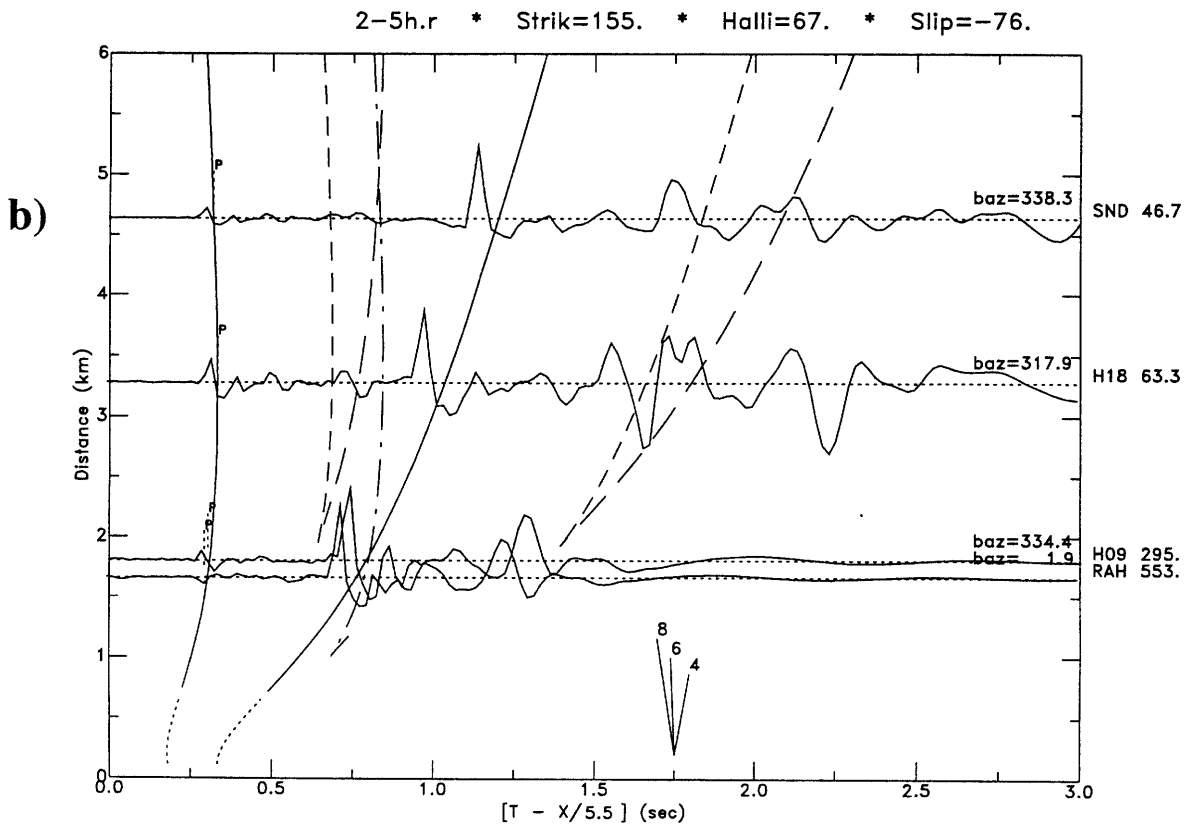
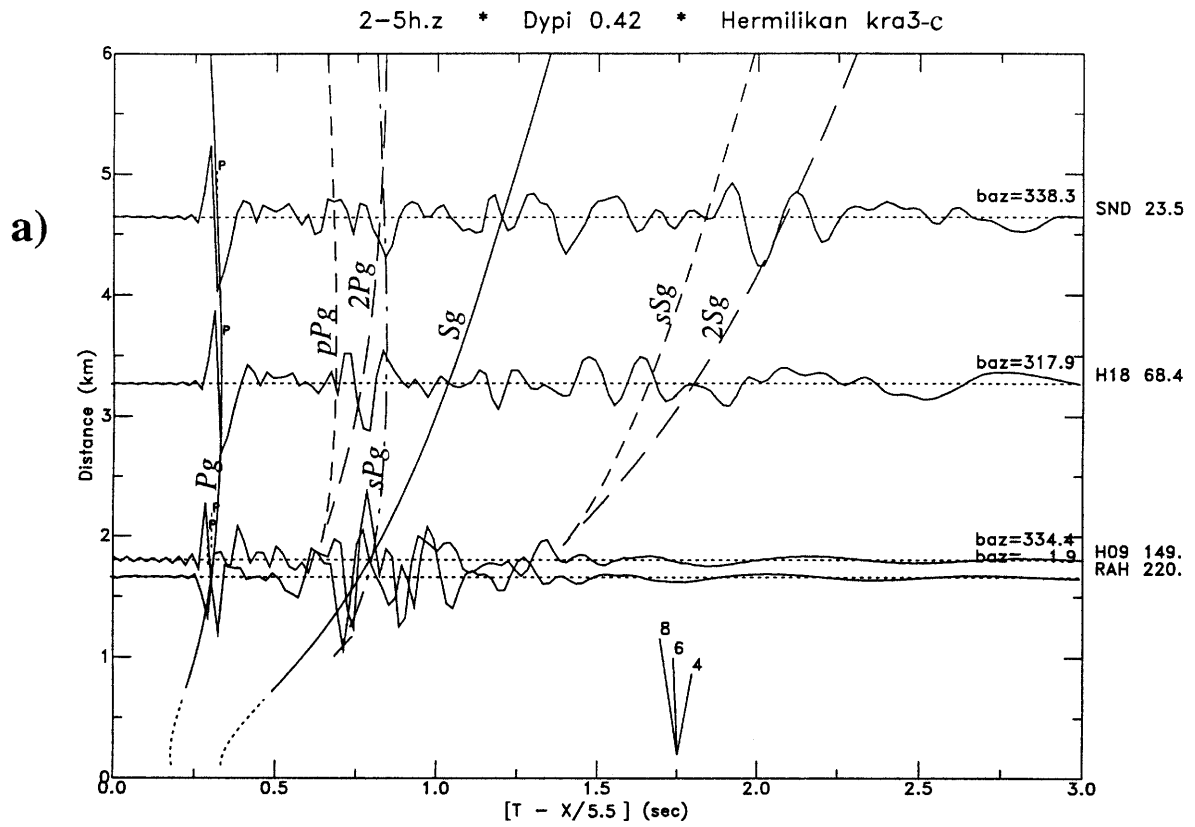


Mynd 8 (frh). c) tangent (T) skjálftarit frá skjálfta 2-5h, teiknuð sem fall af fjarlægð frá upptökum á lóðrétta ásnum, með 'redúseraðan' tíma á þeim lárétta. Komutími fyrstu P og S bylgna er merktur inn á skjálftaritin og stefna frá mælistöð í skjálfta (baz) er sýnd ofan við hvert skjálftarit. Sveifluviddin, í míkro-m/s er einnig sýnd hægra megin við hverja stöð. Ferðatímaferlar helstu fasa í líkani kra3 eru lagðir yfir Z og T þættina. Á R þættinum eru ferðatímaferlar í líkani kra3l lagðir yfir. Fasahraðann á ferlunum er hægt að meta út frá mælistikunni í neðra hægra horni, sem sýnir halla fyrir fasahraða 4, 6 og 8 km/s.

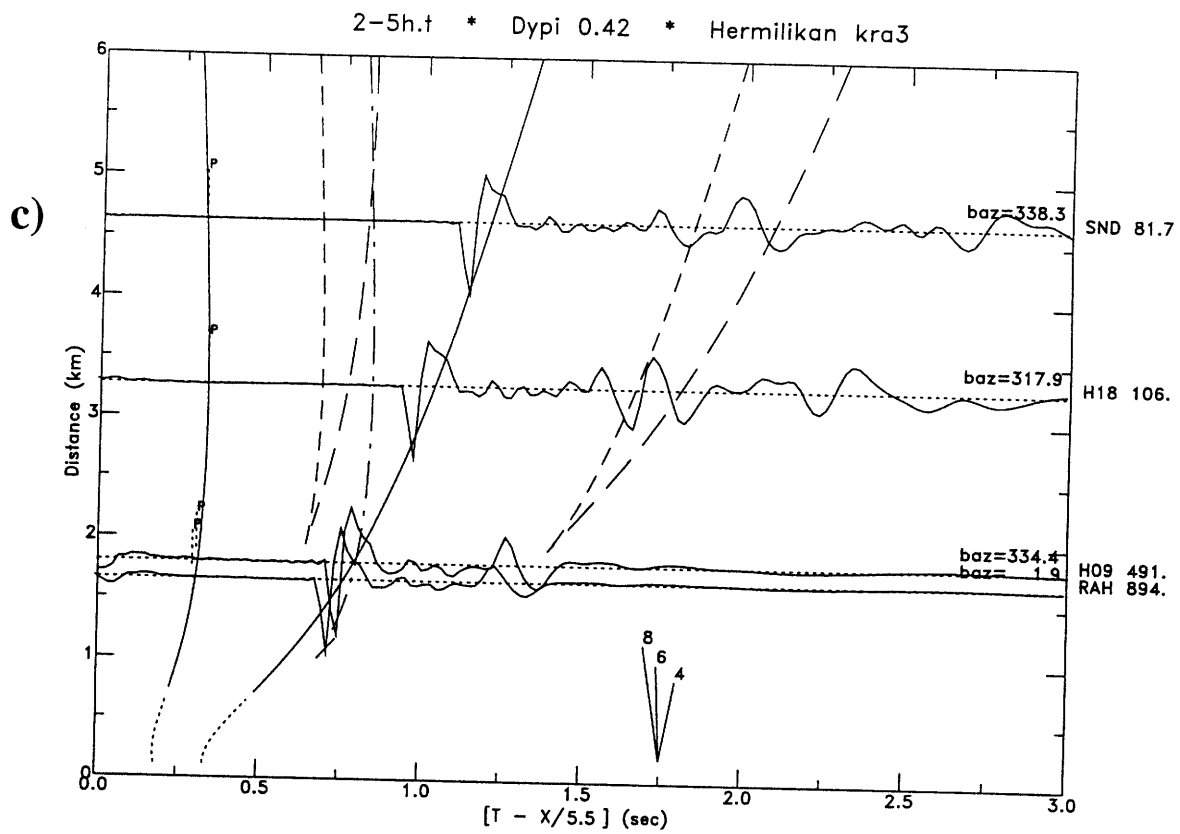
## NOTATION



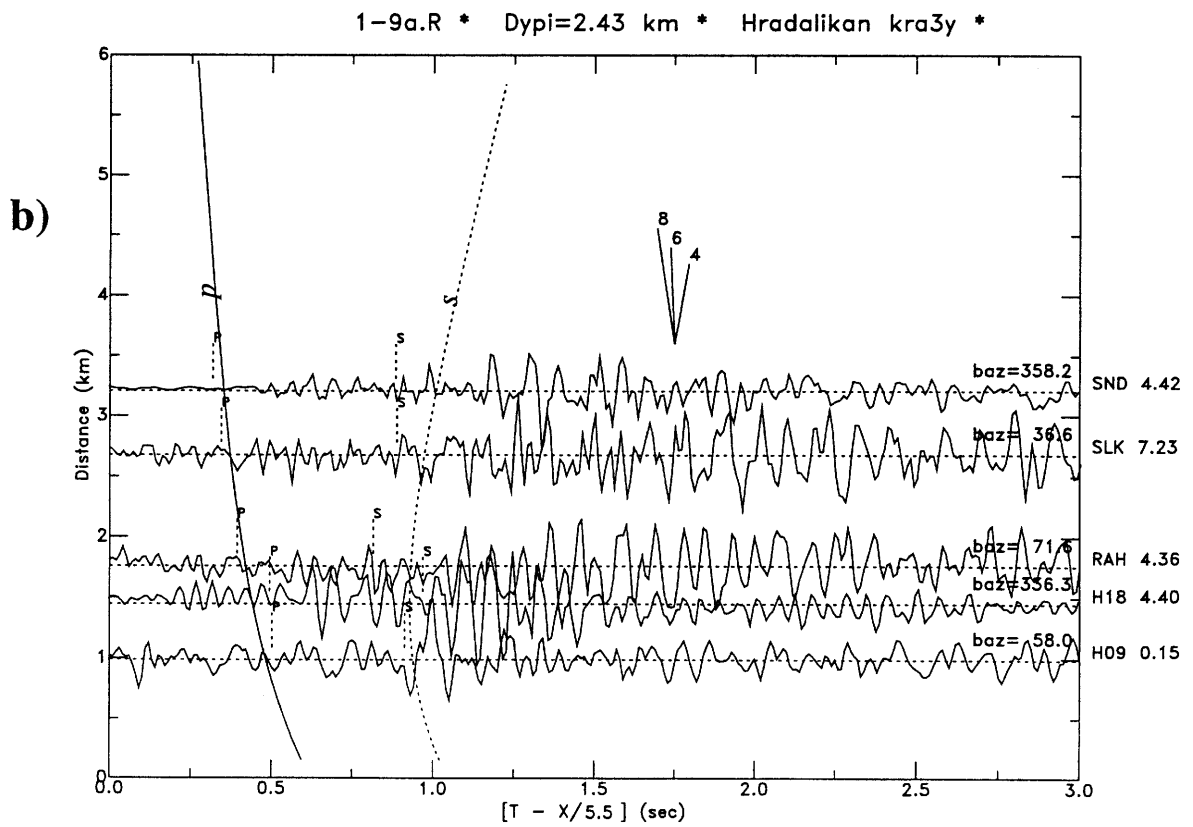
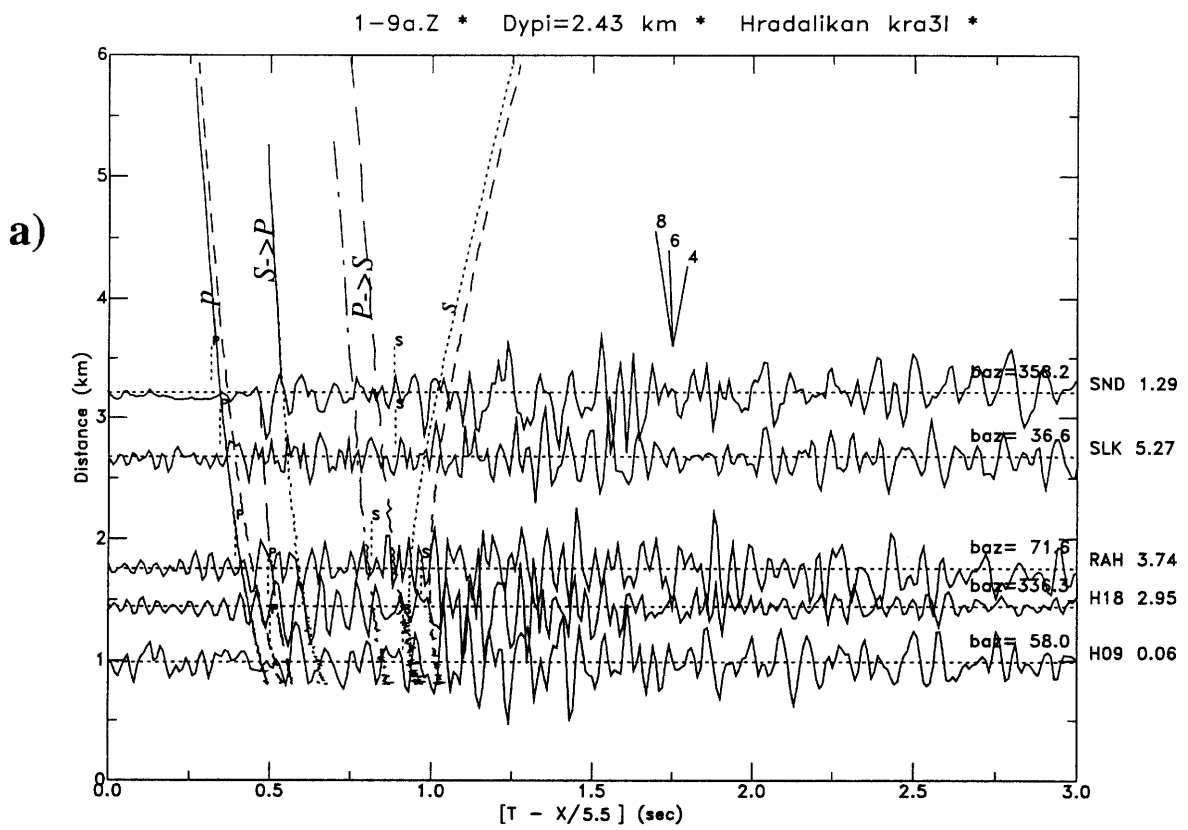
Mynd 9. Skýringarmynd sem sýnir bylgjubrautir og merkingar helstu P bylgna sem sjást frá jarðskjálfta-upptökum í jarðskorpunni. Ferlar S bylgna eru samsvarandi.



Mynd 10. a) Lóðrétt (Z), b) radíal (R), (frh...)

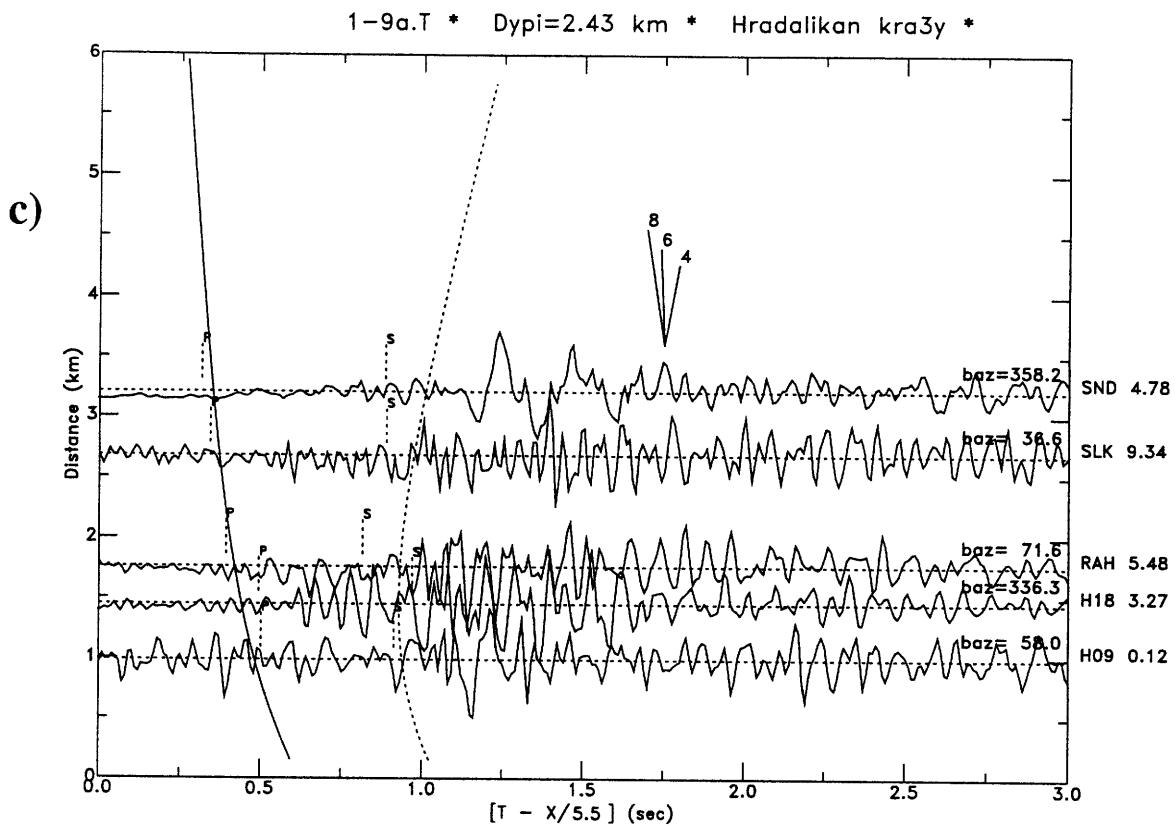


Myn10 (frh.) c) tangent (T) hermiskjálftarit með staðsetningu og brotlausn skjálfta 2-5h í líkani kra3-c, teiknuð sem fall af fjarlægð frá upptökunum. Ferðatímaferlar helstu fasa í hraðalíkani kra3 eru lagðir yfir. Sveifluviddin, sem sýnd er hægra megin við skjálftaritin er í einingunum. 0,1 míkró-m/s.

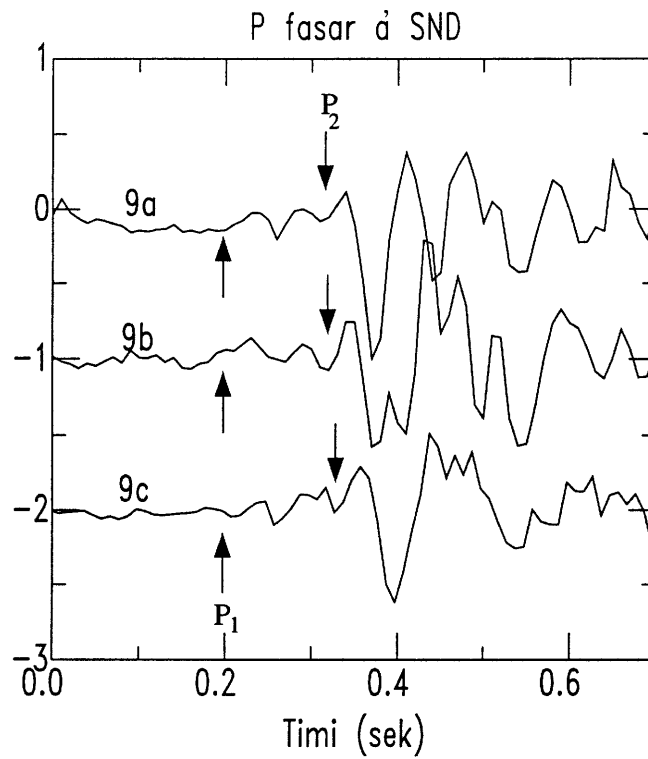


Mynd 11. a) Lóðrétt (Z), b) radfál (R) (frh...)

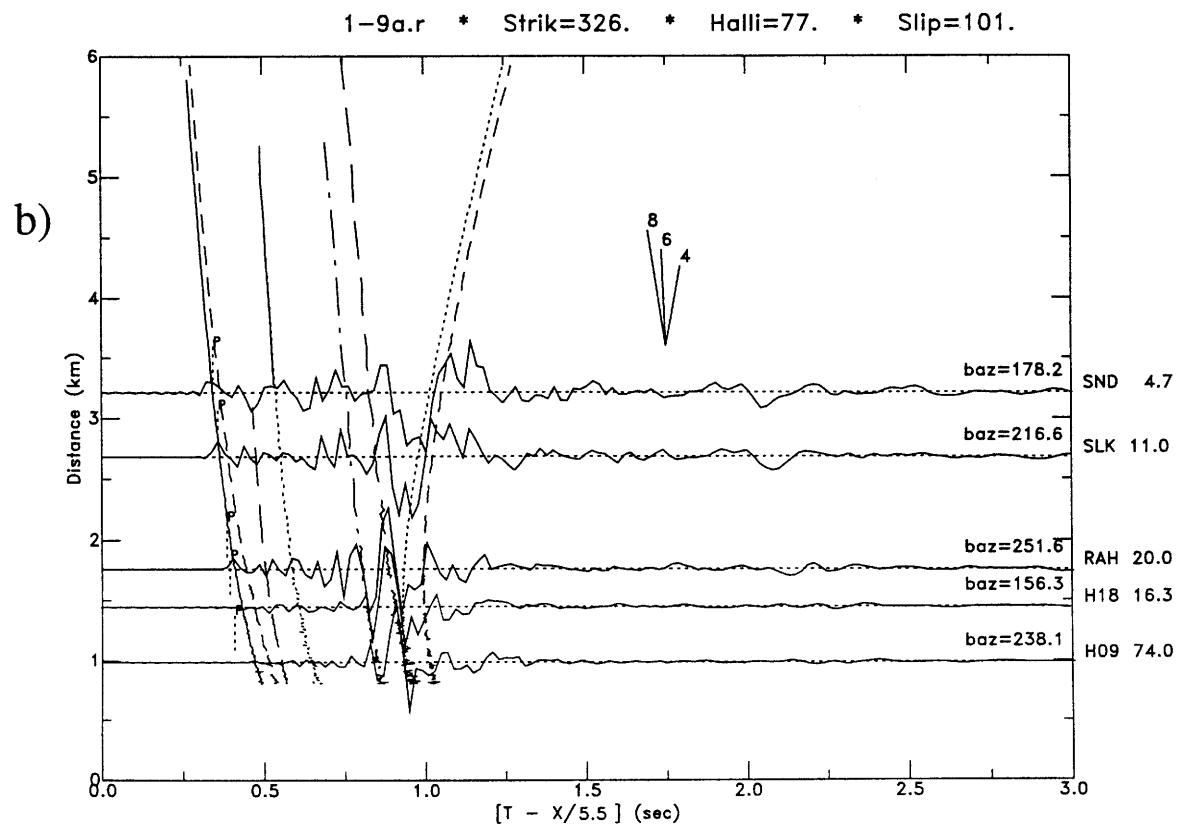
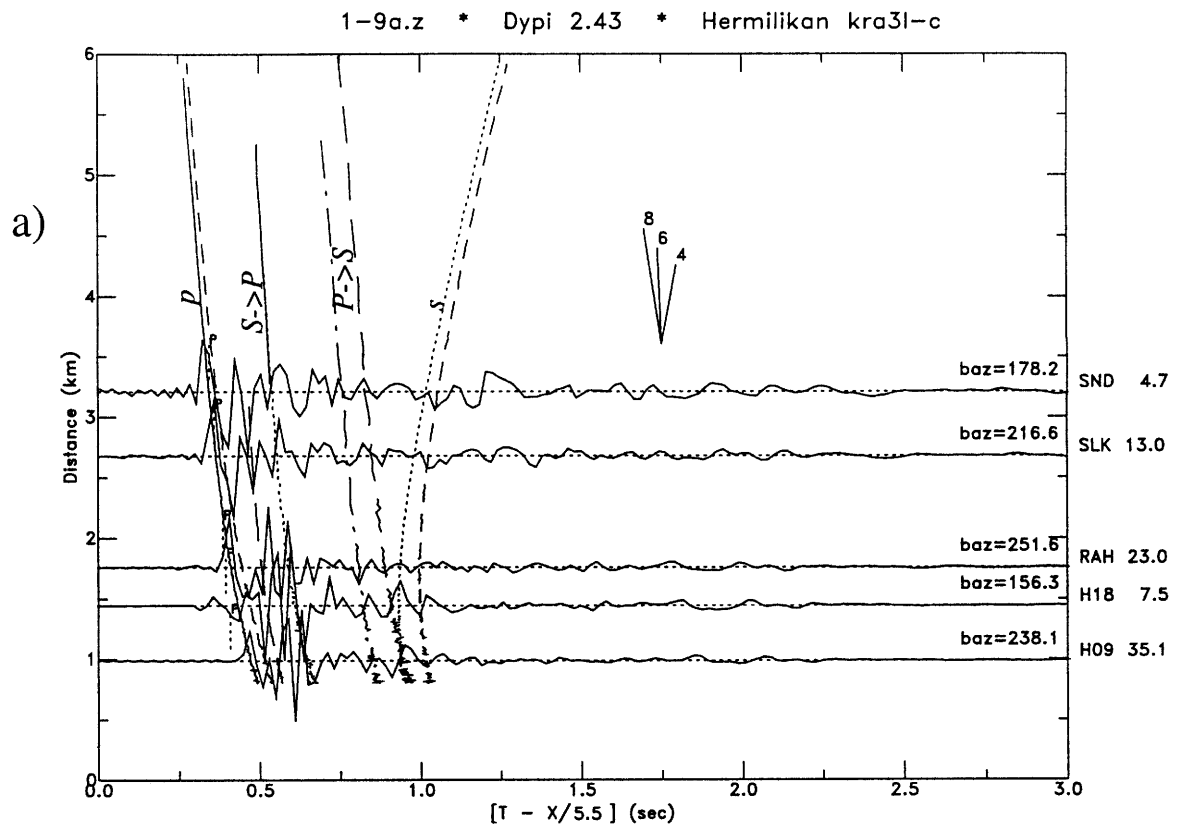




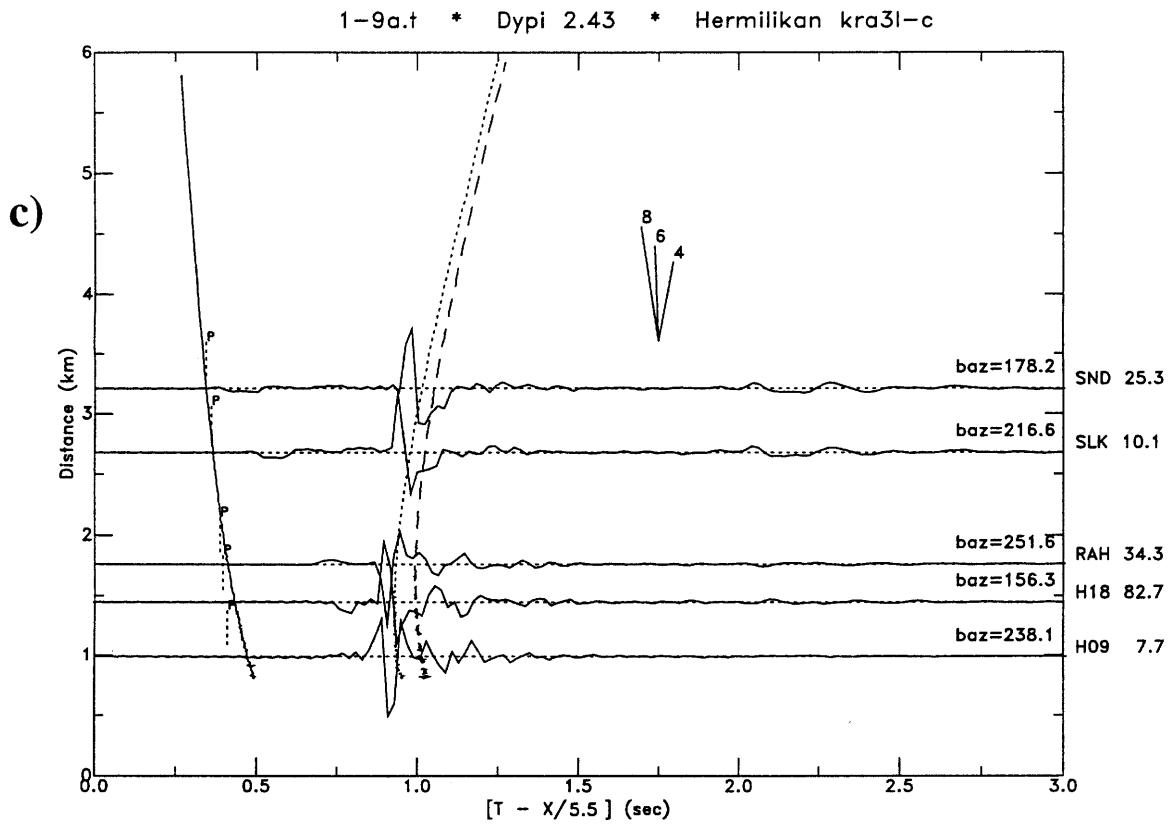
Mynd 11 (frh). c) tangent (T) skjálftarit frá skjálfta 1-9a, sem fall af fjarlægð frá upptökum. Komutími fyrstu P og S bylgna er merktur inn og ferðatímaferlar nokkurra fasa í líkani kra3l eru lagðir yfir lóðrétta þáttinn. Ferðatímafasar helstu fasa í nálgunarlíkani kra3y eru lagðir yfir radíal og tangent þættina. Í því líkani koma aðeins einn P og einn S fasi. Sveifluvíddin í míkro-m/s er sýnd hægra megin við hvert skjálftarit.



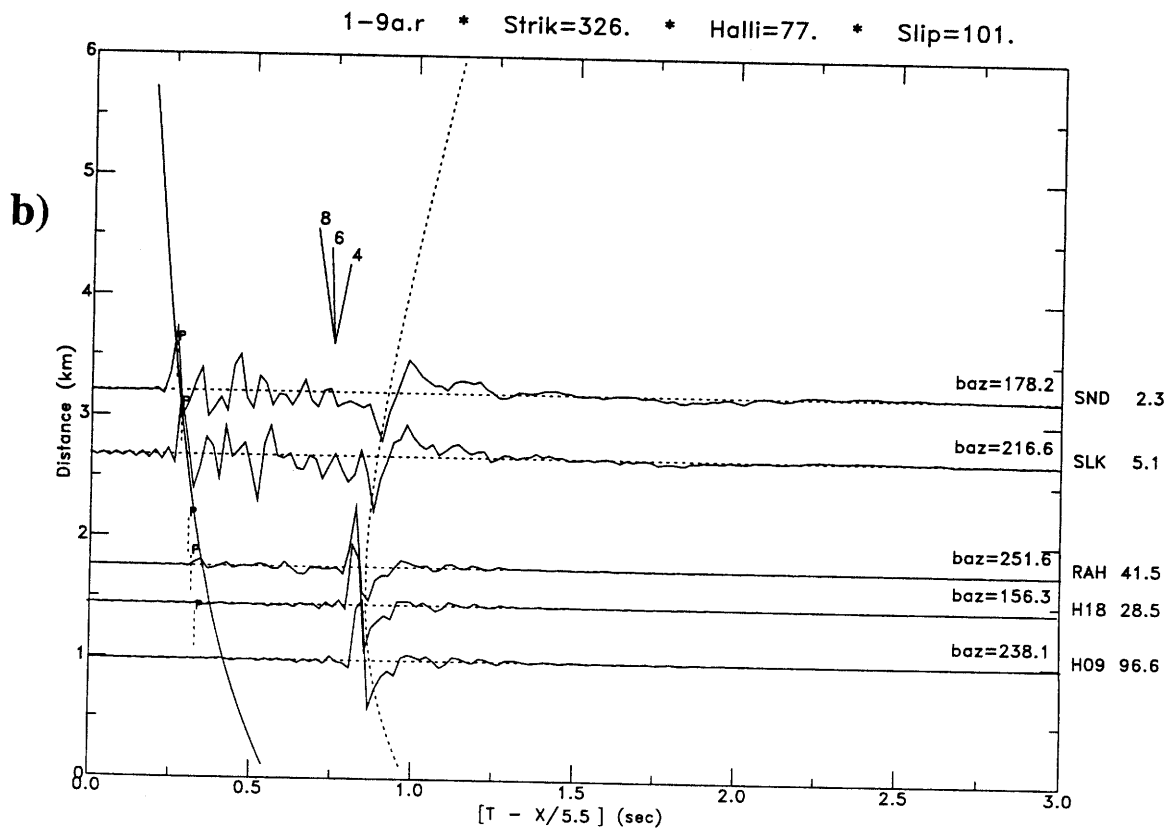
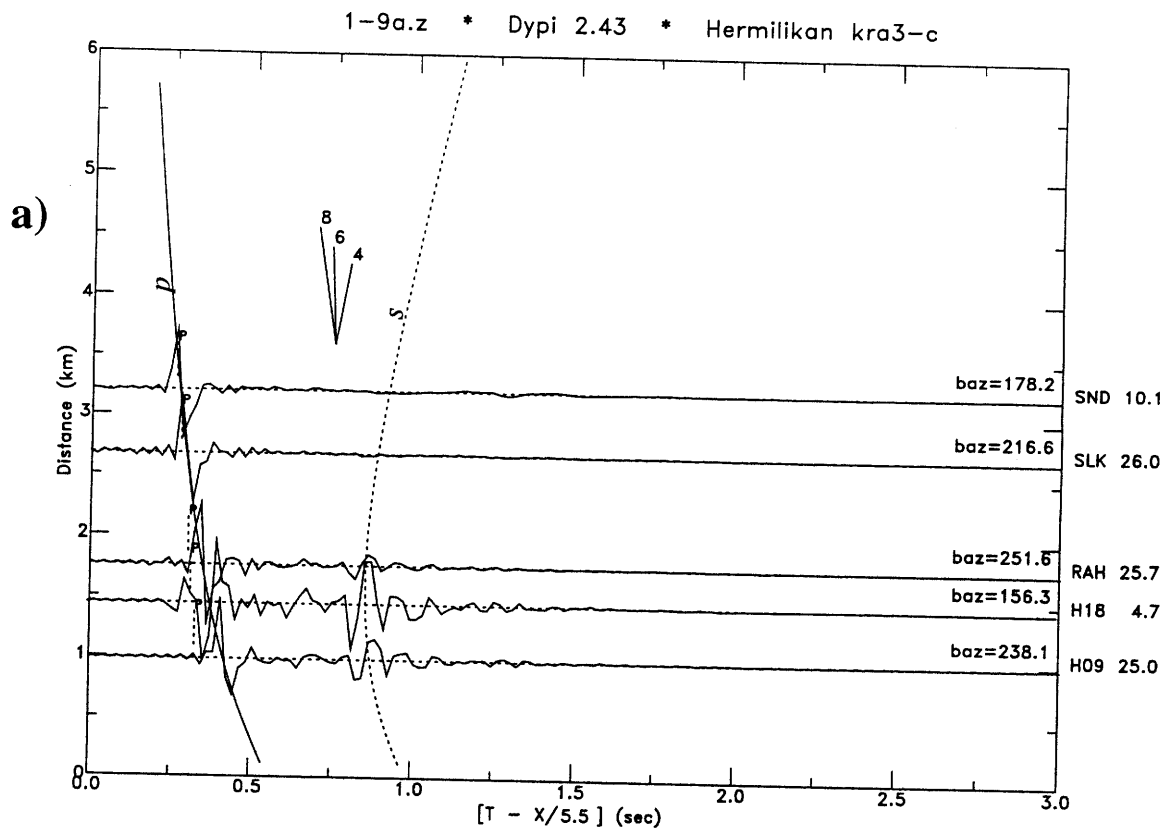
Mynd 12. Fyrstu P fasar á lóðréttu þætti mælistöðvarinnar á SND, frá þrem skjálftum við Hveragil, 9a, 9b, 9c. Samsvarandi fasar sjást frá öllum skjálftunum. P1 markar komutíma fyrsta P fasans, en hann er mun minni en næsti fasi, P2. Komutími P2 er dálítið seinkaður í grynna skjálftanum (9c) miðað við hina tvo.



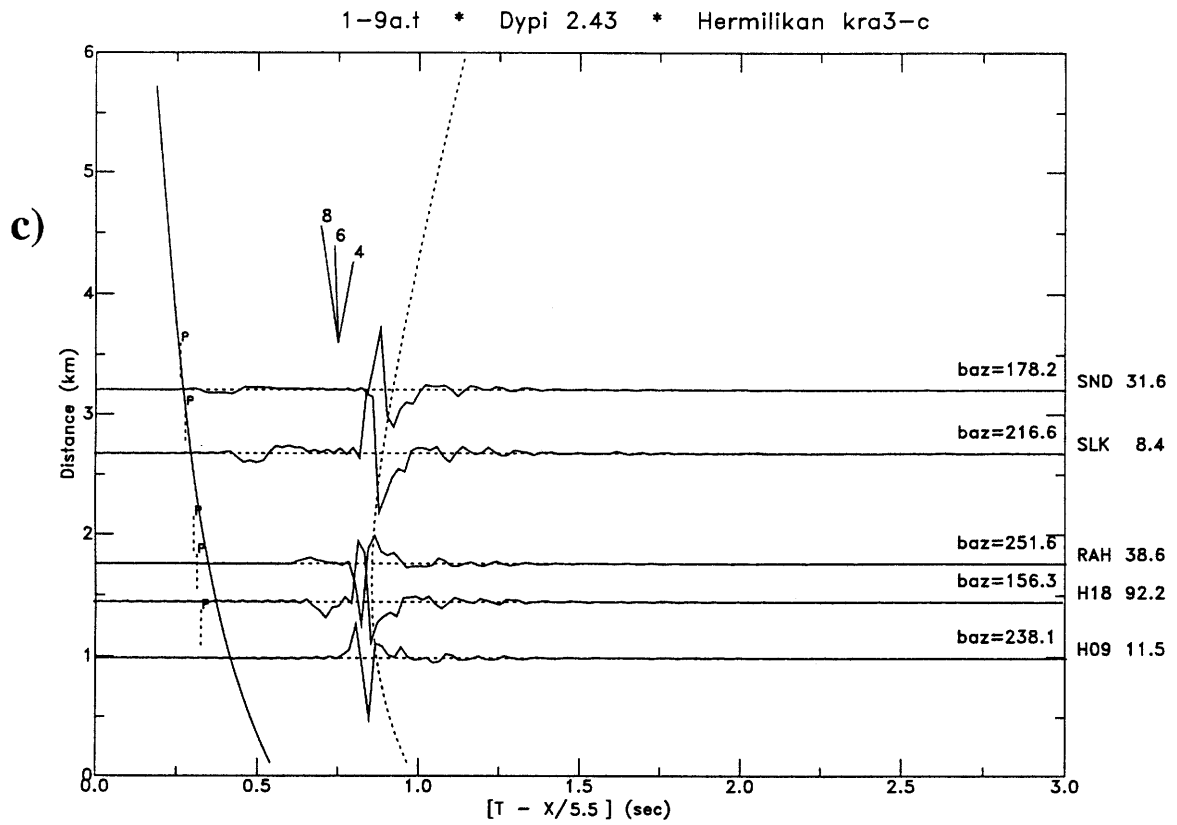
Mynd 13. a) Lóðrétt (Z), b) radíal (R), (frh...)



Mynd 13 (frh.) c) tangent hermiskjálftarit með upptök og brotlausn skjálfta 9a í líkani kra3l-c. Sveifluviddin (í 0,1 míkro-m/s) er sýndi til hægri við skjálftaritin og ferðatímaferlar nokkurra fasa í líkani kra3l eru lagðir yfir.



Mynd 14. a) Lóðrétt (Z), b) radíal (R), (frh...)



Mynd 14 (frh.) c) tangent (T) hermiskjálftarit fyrir upptök og brotlausn skjálfta 9a í líkani kra3-c, ásamt ferðatímaferlum einu fasanna sem sjást: beinu P og S bylgna. Sveifluvíddin í 0,1 míkro-m/s er sýnd til hægri við hermiskjálftaritin.

## 8 VIÐAUKI

### 8.1 Uppsetning tækja

Við stillingu Orion söfnunartækisins var fylgt leiðbeiningum frá Háskólanum í Uppsölum og frá fyrri skráningu á Veðurstofu Íslands og var hún í aðalatriðum á eftirfarandi hátt:

Gagnasöfnun:

```
No of channels: 3
Sample rate: 250 sps
Recording mode: continuous
IIR filter freq.: 1000 mHz
```

Skrár:

```
Auto file sizing: on
Data buffer type: ring
Soh buffer type: ring
```

GPS klukka:

```
Tracking mode: single sat
Power mode: dutycycled
duty cycle interval: 60 min
max GPS-on time: 10 min
```

Með þessum stillingum skráðu söfnunartækin í u.þ.b. 10 daga, en þá höfðu hringormsskrámar oftast fyllst og skrifast aftur yfir fyrstu gögn, þar til hleðslan kláraðist af rafhlöðunum.

Til að koma gögnum af Orion söfnunartækjunum yfir á disk, þurfti að tengja söfnunardiskana við SCSI rofa og aflgjafa sem keypur var á Veðurstofu Íslands til þessara verka. Rofinn var tengdur í SCSI port á vélinni *keilu*, þar sem hægt var að ná sambandi við Orion diskinn undir Windows95 stýrikerfi (nánar útskýrt í óbirtum fróðleiksmola frá Sigurði Th. Rögnvaldssyni). Á Orion disknum eru gögnin geymd á slóðinni */user/data*. Þær skrár sem þarf að ná í eru hringormsskrámar þrjár (ein fyrir hvern þátt mælisins), og nefndar eru t.d. *RSILKJ1S.BHZ* (—*.BHN*, —*.BHE*) ásamt *state-of-health* skránni sem er þá *RSILKJ1.SOH*. Ennfremur þarf að ná í skránar *ORIONxxx.INI* og *ORIONxxx.LBF* af slóðinni */user* (*xxx* táknar númer skráningartækis). Fyrri skráin geymir upplýsingar um upphafsstillingu söfnunartækisins og sú seinni skráir allar helstu aðgerðir sem fara fram í söfnunartækinu á skráningartímabilinu. Í sumum skráningartækjunum voru engar upplýsingar í —*.SOH* skránni og þá var mikilvægt að hafa *ORIONxxx.LBF* skrána líka.

Af */user/data* slóðinni á söfnunardiskinum er náð sambandi við einhverja Unix vél Veðurstofunnar með ftp, og gögnin síðan flutt yfir á harðan disk á Unixkerfinu með *put* eða *mput*. Í Unix umhverfinu er síðan hægt að keyra forrit sem keypt voru frá Nanometrics til að umrita gögnin á það form sem þarf til að gera gögnin aðgengileg til úrvinnslu.

Þegar búið er að afrita Orion disk þarf að hreinsa gömlu gögnin af honum, áður en farið er með hann út í skráningu aftur. Þetta kemur í veg fyrir að fjöldi eldri —*.LBF* skráa (u.þ.b. 1Mb hver) safnist upp undir */user* slóðinni og einnig að gleymst geti að eyða seinustu hringormsskrám (u.þ.b. 350 Mb hver) og *state-of-health* skrá (u.þ.b. 80 Mb) til að skapa pláss fyrir ný gögn. Auðveldast er að eyða bæði data og *user* slóðunum. Skráningartækið mun búa til nýjar þegar það er sett af stað, með öllum þeim skráum sem nauðsynlegar eru (sbr. bls 17. í *Playback Manual*).

## 8.2 Ferli frá Orion formi yfir á SEED/AH/SAC form

Til að fá upplýsingar um ástand tækja og gagna á skráningartímabilinu er sótt afrit af orion.msg skrá sem inniheldur upplýsingar um form skráningar í LBF skrá. Síðan eru keyrð eftirfarandi forrit:

```
logview ORIONxxx.LBF
og
sohextrp RSILKJS1.SOH
```

Þá fást textaskrár, væntanlega með öllum þeim upplýsingum sem óskað er, um ástand skráningarinnar yfir tímabilið, en eins og áður sagði eru stundum engar upplýsingar í SOH skránni.

RSILKJS1.loc skráin inniheldur GPS staðsetningar skráningartækisins, eina fyrir hvert sinn sem læsing náðist á gervihnött. Svo framarlega að tækið hafi læst oft ætti miðgildi þessara aflestra að gefa nógu góða staðsetningu. Þetta er hægt á einfaldan hátt með:

```
sort -k 4,4 RSILKJS1.loc > median-lat
sort -k 5,5 RSILKJS1.loc > median-lon
```

Henda síðan gildum sem eru mjög vitlaus (outliers) og finna miðgildið. Miðgildið er skrifað í *slk.ini* skrána, í stað upphaflegu staðsetningarinnar sem má finna í ORIONxxx.INI skránni, en hún er líklega ónákvæm. Nákvæmnina má síðan bæta eftir því sem fleiri diskar frá þessum stað koma inn. Upplýsingar skráðar í *slk.ini* skrána eru notaðar til að lagfæra og breyta hausnum á X-skránum eftir því sem með þarf. Ef uppsetning hefur verið rétt ætti einungis að þurfa að breyta staðsetningunni. Uppsetning skrárinnar fæst með því að keyra:

```
headedit -t
```

en þá verður til skrá, *temp.ini* sem inniheldur öll svæði sem hægt er að breyta í haus X-skránna. Einungis línur með svæðum sem þarf að breyta eru notaðar í *slk.ini* skrána sem er síðan geymd undir stöðvar slóðinni.

Til að skrifa svörun kerfisins í response skrá, sem forritið *makeseed* notar við að skrifa hausinn á SEED-blokk, þarf að keyra:

```
response,
```

gagnvirkt forrit sem spyr um söfnunartíðni, A/D gain skráningartækisins, horntíðni DC filtersins, og tegund skjálftanema. Forritið þekkir ekki Lennarz nema, þannig að velja má L4-C nema sem er líkastur Lennarz. Þessi keyrsla býr til skrána *seed.rsp* og hana þarf að editera áður en *makeseed* getur notað hana, þ.e. leiðrétt þarf póla og núll nemans í skránni til að samsvara Lennarz/5s nema, og breyta *rtmStartDate* og *rtmEndDate* þannig að þeir innihaldi skráningartímabilið.

Búa þarf til slóðirnar XDATA, SEEDDIR, og RESPONSES undir stöðvarslóðinni og flytja *seed.rsp* skrána undir RESPONSES slóðina. Þá er loks keyrð skriftin *buff2seed*, sem býr til X-skrár, editerar haus þeirra, skrifar SEED-blokk (með því að keyra *makeseed*) undir slóðinni SEEDDIR og eyðir loks X-skránum. Skriftin, sem gerir ráð fyrir að hringormsskrámar séu undir slóðinni RINGBUFF, þarf 3 inngildi (argument) til að keyrast, t.d.:

```
buff2seed 1997-10-09-00-00-00 86430 SLK
```

Fyrsta er byrjunartíminn á SEED-blokkinni sem á að skrifa, annað er tímalengdin í sekúndum, sem hér er 24 klst + 30 s, þriðja er stöðvarnafn. SEED-blokkir sem verða til heita t.d. S19971005.235958, en það er blokk sem byrjar kl. 23:59:58, 5.okt., 1997. Af SEED formi er auðveldlega hægt að komast yfir á AH form sem notað er í SIL hugbúnaðinum og SAC form sem notað er við ýmsa aðra úrvinnslu og teikningu. Það er gert með því að keyra gagnvirka forritið *rdseed* (fæst frá IRIS-DMC í Seattle):



```
rdseed < spitout
```

Þar sem inntaksupplýsingunum hefur verið safnað saman í skrána spitout. Ef búa á til margar seedblokkir í einu er hins vegar hentugast að keyra perlskrift Pálma Erlendssonar á VÍ. Síðan má alltaf komast á milli SAC og AH með forritunum ah2sac og sac2ah. Áður en hægt er að keyra forritið lokimp á AH skrárnar þarf þó að breyta eftirfarandi í haus skrána:

```
ahmodhead -s Z lenn5 -d -i ah-skrá
```

Nú þegar formi gagna hefur verið breytt á VÍ mun ferlið sem hér er lýst breytast eitthvað, en þeirri útgáfu forritapakans sem var aðlöguð að staðsetningu með smáneti hefur ekki verið breytt, þannig að fyrst um sinn verður líklega haldið áfram að nota gögn á AH formi.

### 8.3 Skriftir og skrár

**slk.ini:**

```
[_slk.ini_]
  _NumComponents=3
```

```
[_ChangeAll_]
  _NetworkId=SLK_
  _SensorType=LE-3D/5
  _Sensitivity=1.0000
  _SensFreq=1.00
  _SensUnits=M/S
```

```
[_Component_1_]
  _STNID=SILKJS1BHZ
  _NewSTNID=SLK_ S1BHZ
  _Latitude=65.6947
  _Longitude=-16.7778
  _Elevation=490.00
```

```
[_Component_2_]
  _STNID=SILKJS1BHN
  _NewSTNID=SLK_ S1BHZ
  _Latitude=65.6947
  _Longitude=-16.7778
  _Elevation=490.00
```

```
[_Component_3_]
  _STNID=SILKJS1BHE
  _NewSTNID=SLK_ S1BHZ
  _Latitude=65.6947
  _Longitude=-16.7778
  _Elevation=490.00
```

```
+++++
```

**buff2seed:**

```
# Extract data from Orion ringbuffers. Write them as X-files
# in directory XDATA. Then edit the headers in the X-files,
# with headedit, to correct for incorrect or missing
# information. (Sensor dip cannot be changed). Run makeseed
# on the X-files to create one SEED volume in directory
# SEEDDIR. Finally clean up the X-files.
#
# The headedit program assumes there exists an inifile, with
# the information on which header fields need to be changed.
# A template for the inifile is created by running headedit -t.
# headedit dumps the changes made into file message.txt
#
# The makeseed program assumes there is a file, seed.rsp in
# the RESPONSES directory, describing the appropriate system
# response. The file is created by running response and
# supplying the appropriate gains, sampling frequency and
# sensor type. The file must be edited to represent the
# LENN5 sensor.
#
# Run with 3 arguments:
#
# First argument is the date and time to start on, in the
# format: yyyy-mm-dd-hh-mm-ss
#
# Second argument is duration of data volume in seconds
# 86430 will write one day + 30 seconds to overlap with
# next day.
#
# Third argument is name of station directory where the
# ringbuffer is located
#
rm $3/XDATA/X*
#
extractp -m $1 -d $2 -i "$3/RINGBUFF/*" -o "$3/XDATA/" -f
#
rm message.txt
headedit "$3/XDATA/X*" -i $3.ini
cat message.txt >> SEEDDIR/xheader-changes
#
makeseed "$3/XDATA/" -r "RESPONSES/" -o "$3/SEEDDIR/"
#
rm $3/XDATA/X*
+++++
```

Dæmi um spitout skrá fyrir rdseed:

```
slk/SEEDDIR/S19971008.235958
```

```
d
```

```
1 % 1 fyrir SAC; 2 fyrir AH
```

```
0
```

```
1997,282,00:00:00.0000
```

```
1997,282,01:00:30.0000
```

```
quit
```

```
+++++
```

## 8.4 Pólar og núll Orion-Lennarz/5s kerfisins

Transferfall A/D breytunnar er gefið á bls. 63 í Orion Playback Manual. Það hefur 5 póla og engin núll. Kvörðunarstuðullinn (normalization constant) er  $8.4655e+20$  og pólarnir eru:

```
-14723.11    765.48
-14723.11   -765.48
 -8026.92   12330.48
 -8026.92  -12330.48
-14202.00     0.00
```

---

DC sían er gefin sem IIR filter (bls. 63 og 67 í Orion Playback Manual):

$$Y(n) = K[X(n) - X(n-1)] + F1*Y(n-1)$$

$$Y(n) - F1*Y(n-1) = K[[X(n) - X(n-1)]]$$

Z-transform síu:  $T(Z) = K(1-1/Z)/(1-F1/Z)$

Þá er transfer fallið:  $T(s) = s/[(1-F1)*SR/K + s]$

(sjá F. Scherbaum, Of poles and zeroes, kafli 9.2). SR er söfnunartíðnin og F1 og K eru föll af SR og horn tíðninni sem valin er. Þau eru gefin á bls. 67 í Playback Manual. Fyrir horn tíðni við 1 Hz hefur transferfallið,

núll í:

```
0.0  0.0
```

pól í:

```
-6.2835  0.0.
```

Mögnun Orion söfnunartækisins er: 200 uV/bit (Reynir Böðvarsson, pers. upplýs. 1998).

---

Lennarz/5S neminn hefur,

tvö núll í:

0.0 0.0

0.0 0.0

tvö póla í:

-0.888 -0.889

-0.888 -0.889

og mögnun hans er 400 V/m/s.

---

Heildar svörun kerfisins er þá:

Mögnun = 400 [V/m/s] / 200 [nV/bit] = 2.0e+09 count/m/s

Núll = 3

0.0 0.0

0.0 0.0

0.0 0.0

Pólar = 8

-14723.11 765.48

-14723.11 -765.48

-8026.92 12330.48

-8026.92 -12330.48

-14202.00 0.00

-6.2835 0.0

-0.888 -0.889

-0.888 -0.889

Stuðull = 8.4655e+20 \* Mögnun = 1.6931e+30

Mögnun SIL kerfisins er 2.72e+8 count/m/s, þ.a. mögnun Orions er 7.35 sinnum meiri en SIL kerfisins. Stærðir skjálfta sem fundnar eru með því að gera ráð fyrir að Orion kerfið sé SIL kerfi eru því of stórar um  $\log(7.35) = 0.87$ .