



ORKUSTOFNUN  
Jarðhitadeild

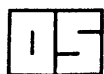
Raunvísindastofnun  
Háskólans

**Bryndís Brandsdóttir RH**  
**Páll Einarsson RH**  
**Knútur Árnason OS**  
**Hrefna Kristmannsdóttir OS**

**Smáskjálfta- og bylgjubrotsmælingar í tengslum  
við niðurdælingu affallsvatns í jarðhitasvæðið  
við Svartsengi sumarið 1993**

Samvinnuverkefni Raunvísindastofnunar Háskólans, Orkustofnunar  
og Hitaveitu Suðurnesja um umhverfisáhrif jarðhitavinnslu

**OS-94016/JHD-05**  
**RH-03-94**  
Reykjavík, apríl 1994



ORKUSTOFNUN  
Jarðhitadeild

Raunvísindastofnun  
Háskólans

**Bryndís Brandsdóttir og Páll Einarsson**  
Raunvísindastofnun Háskólans

**Knútur Árnason og Hrefna Kristmannsdóttir**  
Orkustofnun - Jarðhitadeild

**Smáskjálfta- og bylgjubrotsmælingar  
í tengslum við niðurdælingu affallsvatns  
í jarðhitasvæðið við Svartsengi  
sumarið 1993**

Samvinnuverkefni Raunvísindastofnunar Háskólans, Orkustofnunar  
og Hitaveitu Suðurnesja um umhverfisáhrif jarðhitavinnslu

RH-03-94 - OS-94016/JHD-05

Reykjavík, apríl 1994

Raunvísindastofnun Háskólans, Dunhaga 5, 107 Reykjavík  
Orkustofnun, Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verknúmer: 760 144

ISBN 9979-827-44-0

## ÁGRIP

Vorið 1993 voru settir upp færnanlegir jarðskjálftamælar umhverfis Svartsengi með það að meginmarkmiði að kanna smáskjálftavirkni innan jarðhitasvæðisins og skrásetja hugsanlegar breytingar á henni, í kjölfar niðurdælingar affallsvatns í jarðhitakerfið. Einnig voru gerðar bylgjubrots- og jarðóróamælingar til þess að fá upplýsingar um hljóðhraða svæðisins, til kvörðunar á skjálftaupptökum og til þess að meta hvar best sé að hafa skjálftamælistöð sem reka á til frambúðar.

Óróamælingar leiddu í ljós að jarðórói á utanverðum Reykjanesskaga liggur á mismunandi tíðnisviðum og má skipta honum í a.m.k. 4 flokka eftir tíðniinnihaldi. Órói á tíðnibilinu 8-20 Hz innan virkjunarsvæðisins er mjög mikill og mestur við borholurnar. Einnig kemur fram órói á 4-6 Hz sem sennilegast tengist jarðhitakerfinu. Vert er að kanna upptök hans nánar. Órói með tíðniinnihald 16–24 Hz kom fram á nokkrum stöðvum utan jarðhitasvæðisins í Svartsengi, nálægt gjám. Hugsanlega stafar þessi órói frá vatnsrennsli um gjárnar.

Þar sem jarðórói er mjög mikill innan vinnslusvæðisins í Svartsengi verður skjálftamælistöð sem reka á til frambúðar að vera utan þess, en þó sem næst því. Fjórir vænlegir staðir fundust.

Niðurstöður bylgjubrotsmælinga benda til þess að hægt sé að staðsetja upptök smáskjálfta í jarðhitasvæðinu með innan við 100 m óvissu í láréttu plani og 200 m óvissu í dýpi, ef notaðar eru 6 mælistöðvar eða fleiri. Afstæðar staðsetningar má gera með mun meiri nákvæmni.

Skjálftavirkni á Reykjanesskaga var með minnsta móti þá mánuði sem mælingarnar stóðu yfir. Engir skjálftar mældust við Svartsengi hvorki fyrir né við niðurdælingu í borholu H-6. Með samanburði við niðurdælingartilraunir erlendis verður að telja þetta eðlilegt. Magn affallsvatns var allt of lítið og lekt svæðisins of mikil til þess að niðurdælingin hefði nokkur áhrif á vökvaprýsting svæðisins. Þessu til viðbótar má benda á að brotmörk bergs hækka ef grunnvatnsborð lækkar. Niðurdrátturinn í Svartsengi hefur þannig hækkað brotmörk bergsins en ein afleiðing þess er tímabundin fækkun smáskjálfta.

Þótt lítil virkni hafi verið í næsta nágrenni Svartsengis, mældust skjálftar á Reykjanesskaga með mjög mismunandi P- og S-bylgjudeyfinu, eftir skráningarstað. Deyfingin var mest í nágrenni Eldvarpa. Þar verða S-bylgjur óþekktanlegar sem gefur vísbindingar um tilvist grunnstæðs kvikuhólfs þar í nágrenninu.

## EFNISYFIRLIT

### ÁGRIP

EFNISYFIRLIT	2
MYNDA- OG TÖFLUSKRÁ	2
1. INNGANGUR	3
2. JARÐSKJÁLFTAVIRKNI Á REYKJANESSKAGA	5
3. JARÐSKJÁLFTAMÆLINGAR Í SVARTSENGI	5
4. ÓRÓAMÆLINGAR	11
5. BYLGJUBROTSMÆLINGAR	16
6. NIÐURDÆLING OG ÁHRIF HENNAR Á SKJÁLFTAVIRKNI	20
7. NIÐURSTÖÐUR	21
8. TILLÖGUR UM FRAMHALDSVERKEFNI	22
8.1 Skjálftamælingar	22
8.2 Óróamælingar	22
8.3 Er kvikuhólf í nágrenni Eldvarpa?	23
ÞÁTTTAKENDUR	23
HEIMILDIR	23
ENGLISH SUMMARY	26
VIÐAUKI A: SKJÁLFTAMÆLISTÖÐVAR	28
VIÐAUKI B: FRÁVIK FRÁ REIKNADRI STAÐSETNINGU Á SKOTUM	29

### MYNDA- OG TÖFLUSKRÁ

Mynd 1. Kort af rannsóknarsvæðinu.	4
Mynd 2. Kort af upptökum jarðskjálfta á Reykjanesskaga, árið 1993.	6
Mynd 3. Skjálftarit jarðskjálfta við Krísuvík, 09. júní 1993.	8
Mynd 4. Skjálftarit jarðskjálfta við Reykjanes, 06. júlí 1993.	9
Mynd 5. Bylgjuleiðir frá jarðskjálfta við Reykjanes og í Krísuvík.	10
Mynd 6. Lægsta meðalgildi jarðóróa á mælistöðvum við Svartsengi.	12
Mynd 7. Lægsta meðalgildi jarðóróa á mælistöðvum á Eldvarpaleið.	13
Mynd 8. Bylgju- og tíðniróf jarðóróa á stöðvum umhverfis Svartsengi.	14
Mynd 9. Bylgju- og tíðniróf jarðóróa á stöðvum á Eldvarpaleið.	15
Mynd 10. Fartímar sem fall af fjarlægð.	19
Tafla 1. Jarðskorpulíkon fyrir Reykjanesskaga og Svartsengi.	17
Tafla 2. Samanburður á mismunandi staðsetningum sprenginga.	18
Tafla 3. Vatnsmagn og dagsetning niðurdælingar í borholu H-6.	20

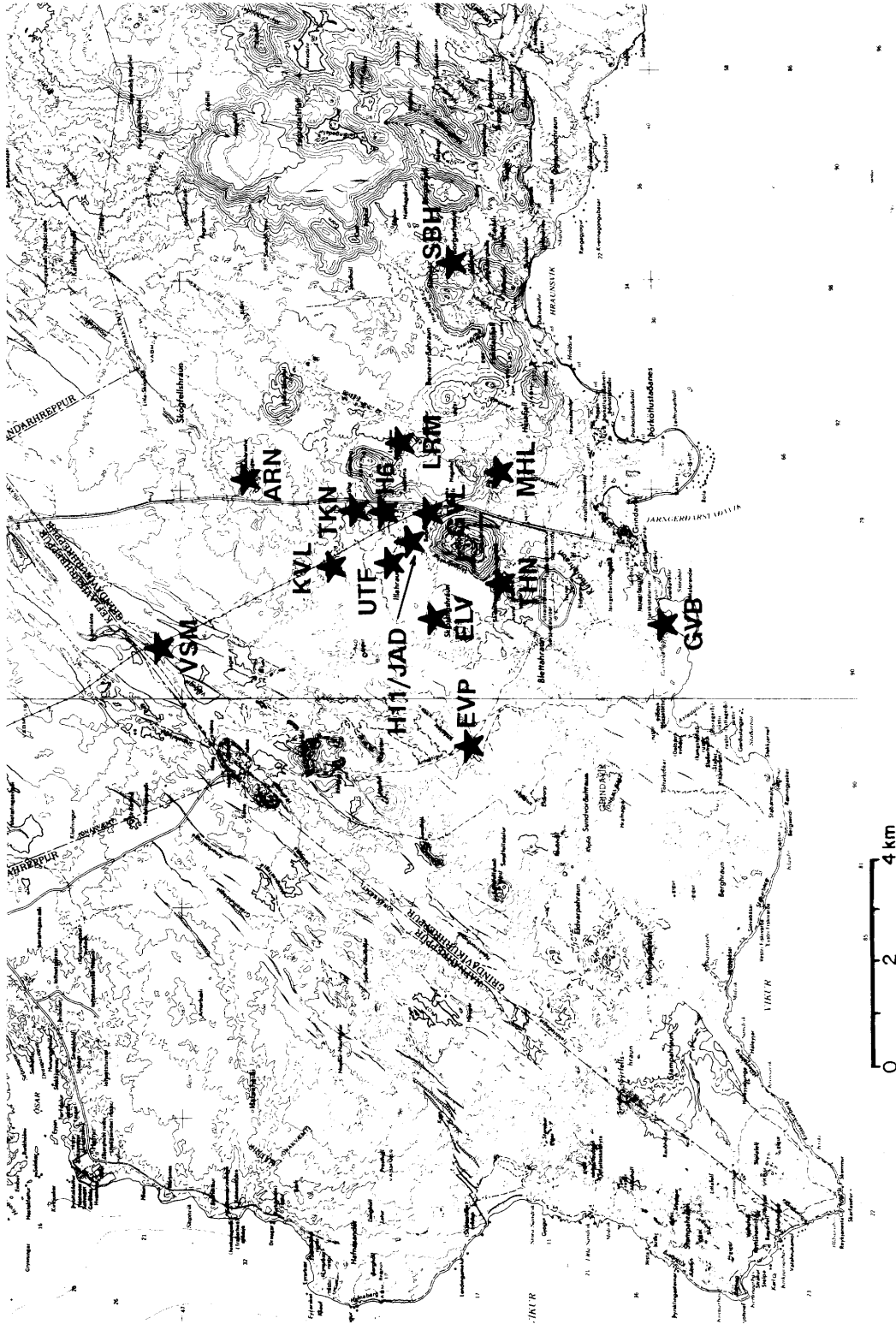
## 1. INNGANGUR

Helstu aðferðir hérlendis til að fylgjast með jarðhitasvæðum í vinnslu eru hita- og þrýstingsmælingar í borholum, og í minna mæli landhæðar- og þyngdarmælingar. Jarðskjálftamælingar má einnig nota til að fá upplýsingar um innri gerð jarðhitakerfa og til að fylgjast með breytingum sem verða við vinnslu yfir langan tíma. Smáskjálftavirkni og órói gefa upplýsingar um ástand jarðhitakerfa, en notagildi þeirra til eftirlits með vinnslu hefur enn lítt verið kannað hér á landi.

Hitaveita Suðurnesja hefur sýnt því áhuga að setja upp net skjálftamæla til þess að fylgjast náið með smáskjálftavirkni við vinnslusvæðið í Svartsengi. Hún hafði frumkvæði að umræðu við Orkustofnun, Raunvísindastofnun og Veðurstofu Íslands um uppsetningu og rekstur slíks nets í Svartsengi og Eldvörpum. Markmiðið með uppsetningu skjálftamælanna er að kanna áhrif jarðhitavinnslunnar á skjálftavirkni svæðisins og nota upplýsingar um tíðni, útbreiðslu og gerð skjálfta til að fylgjast með breytingum á jarðhitakerfinu í kjölfar vinnslunnar. Haldnir voru nokkrir samráðsfundir og tekin saman greinargerð um uppbyggingu og rekstur skjálftamælanets. Ákveðið var að stefna að uppsetningu skjálftamæla í fjórum áföngum. Fyrstu tveir áfangarnir miða að því að fá grunnupplýsingar um skjálftavirkni svæðisins en seinni áfangarnir taka til kvörðunar og lokahönnunar mælanetsins. Eftirfarandi áfangaskipting var talin heppileg:

- Sett verði upp net færanlegra skjálftamæla og skjálftavirkni á svæðinu skráð í nokkrar vikur, í þeim tilgangi að fá upplýsingar um viðvarandi virkni svæðisins og hvar best verði að koma fyrir varanlegum skjálftamælum.
- Á grundvelli gagna úr fyrsta áfanga verði síðan settar upp þrjár fastar stöðvar sem viðbót við SIL-kerfi Veðurstofu Íslands. Ein stöð í Svartsengi og hinar tvær t.d. í Höfnum og Vogum. Þessar þrjár stöðvar ásamt stöð sem rekin er í Krísuvík munu mynda sjálfstætt mælanet á Reykjanesskaga sem tengist SIL-kerfinu. Skjálftavirkni svæðisins yrði könnuð með þessu neti í um það bil eitt ár. Úrvinnsla verður sjálfvirk en daglegt eftirlit þarf til þess að yfirfara og endurbæta skjálftastaðsetningar og aðra framsetningu gagna. Með þessu neti ætti að fást gott yfirlit yfir virkni svæðisins. Þó má búast við að virknin sé ekki jafn dreifð í tíma heldur komi í hrinum og því er möguleiki á því að lítið mælist.
- Gerðar verði ítarlegar hljóðhraðamælingar á svæðinu til þess að auka nákvæmni í staðsetningum skjálfta. Bætt verði við færanlegum skjálftamælum á meðan mælingar standa yfir. Jafnframt verði leitast við að finna fleiri staði fyrir varanlegar stöðvar ef ástæða þykir til að fjölga þeim.
- Að loknum öðrum og þriðja áfanga verði síðan tekin ákvörðun um hvort og þá hversu mörgum varanlegum mælum verði bætt við. Mögulegt er að sameina þriðja og fjórða áfanga.

Vorið 1993 var ákveðið að hrinda fyrsta áfanga áætlunarinnar í framkvæmd og setja upp net færanlegra skjálftamæla, bæði til þess að kanna smáskjálftavirkni innan jarðhitasvæðisins og einnig til þess að skrásetja hugsanleg áhrif niðurdælingar í jarðhitakerfið í Svartsengi á jarðskjálftavirkni. Sett var upp net færanlegra jarðskjálftamæla við Svartsengi og það rekið frá miðjum maí til ágústloka.



**Mynd 1.** Kort af rannsóknarsvæðinu. Skjálftamælistöðvar eru merktar með stjörnu og skammstöfum á stöðvarheiti. GPS-staðsetning hverrar stöðvar er í Víðauka A.

Fyrstu vikurnar var fylgst með viðvarandi skjálftavirkni og jarðóróa (suði) við Svartsengi í þeim tilgangi að afla upplýsinga um hvar best sé að staðsetja varanlegar skjálftamælistöðvar og til þess að fá samanburð á smáskjálftavirkni fyrir og við niðurdælingu. Jafnhliða voru gerðar bylgjubrotsmælingar til þess að afla upplýsinga um hljóðhraða svæðisins, sem aftur eru notaðar til kvörðunar á staðsetningum smáskjálfta. Niðurstöður eru birtar í þessari skýrslu.

## 2. JARÐSKJÁLFTAVIRKNI Á REYKJANESSKAGA

Upptök jarðskjálfta á Reykjanesskaga eru bundin við 2-5 km breitt belti sem liggur í sveig frá Reykjanestá, um miðjur eldstöðvakerfanna á Reykjanesskaga og austur í Hengil, þar sem það tengist landskjálftasvæði Suðurlands. (Klein, Páll Einarsson og Wyss, 1977; Páll Einarsson og Sveinbjörn Björnsson, 1979; Einarsson, 1991). Skjálftabeltið markar flekaskil Norður-Ameríku og Evrasíu og virkni þess einkennist af misstórum og tíðum skjálftahrinum. Brotlausnir skjálfta sýna að vestantil á skaganum eru siggengishreyfingar ráðandi en austan Kleifarvatns eru sniðgengishreyfingar algengari og þar verða ennfremur færri, en stærri skjálftar (Páll Einarsson og Sveinbjörn Björnsson, 1979 og 1987). Háhitasvæði á Reykjanesskaga er yfirleitt að finna þar sem sprungukerfi skáskera skjálftabeltið. Skjálftabeltið liggur um háhitasvæðið í Svartsengi og tengir það háhitasvæðinu í Eldvörpum (Grímur Björnsson og Benedikt Steingrímsson, 1991).

Jarðskjálftamælingar hafa leitt í ljós að skjálftavirkni innan gosbeltanna einkennist oft af viðvarandi smáskjálftavirkni á háhitasvæðum sem talin eru tengjast kólnandi innskotum eða kvikuhólfum í rótum virkra megineldstöðva (Ward og Sveinbjörn Björnsson, 1971; Páll Einarsson, 1991). Skjálftavirknin er þó mjög breytileg frá einu svæði til annars, sums staðar er hún nokkuð stöðug (nokkrir smáskjálftar á viku) á meðan virknin annars staðar er bundin við misstórar og mistíðar skjálftahrinum. Þar sem smáskjálftavirknin er mjög breytileg er varhugavert að nota mælingar af einu jarðhitasvæði til að draga ályktanir um virkni annars. Einnig geta breytingar á hita- og þrýstingsástandi í jarðhitakerfum svo og breytingar á grunnvatnsstreymi haft áhrif á skjálftavirkni.

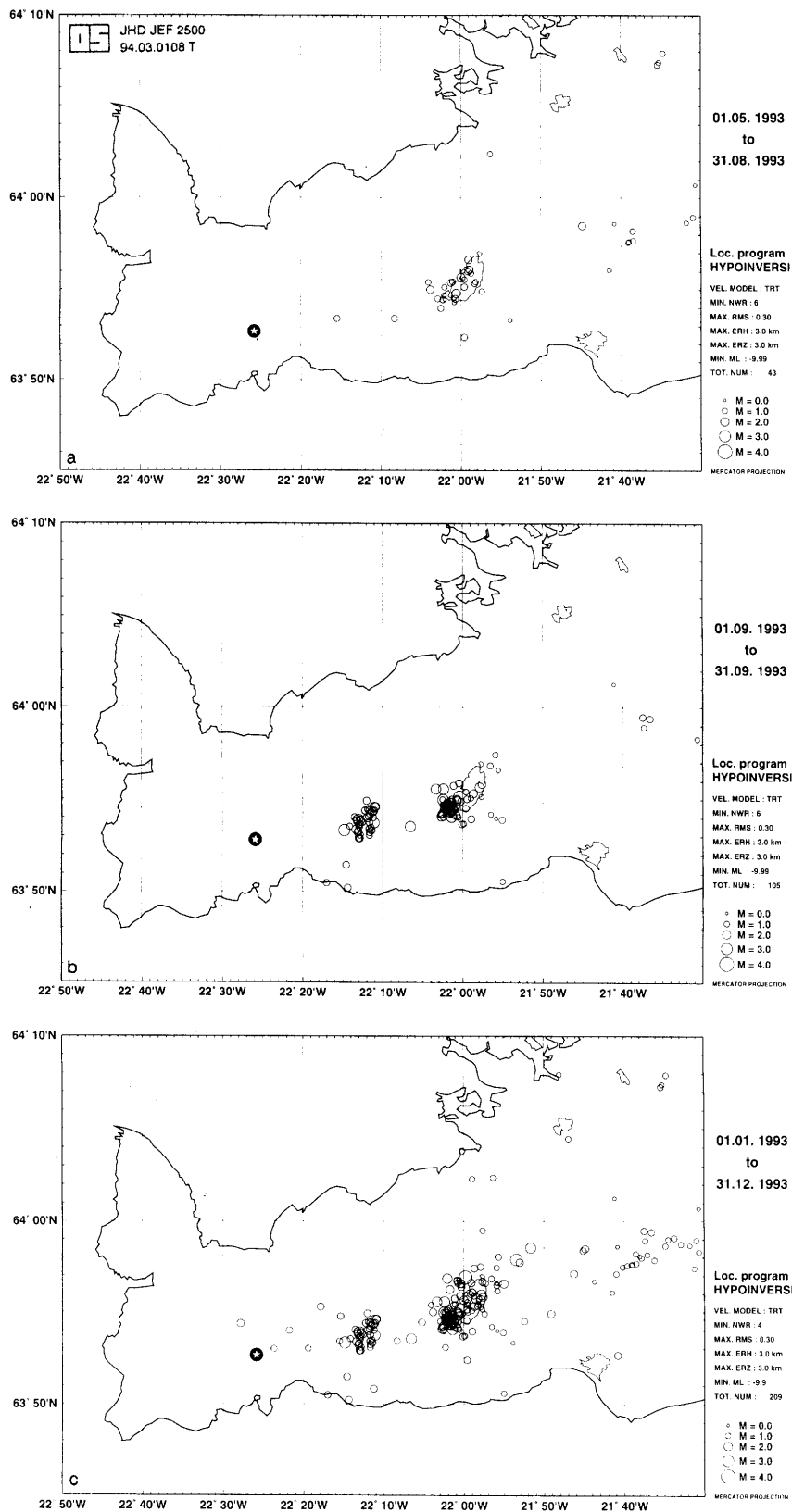
Rannsóknir á smáskjálftavirkni geta gefið mikilvægar upplýsingar um staðsetningu og hreyfingar á virkum sprungum og misgengjum innan háhitasvæða. Smáskjálftar geta jafnframt gefið upplýsingar um hvar varmanám á sér stað í rótum eldstöðva (Gillian Foulger, 1988; Gillian Foulger o. fl., 1989; Stark, 1990). Víða erlendis þar sem stöðugt er fylgst með smáskjálftavirkni hafa skjálftamælingar veitt upplýsingar um viðbrögð jarðhitakerfa við vinnslu og niðurdælingu affallsvatns (Stark, 1990). Einnig má nota jarðskjálftamæla til þess að fylgjast með óróa (suði) í jarðhitakerfum sem talið er stafa frá suðu eða brestum í bergi sem er að dragast saman vegna kólnunar.

## 3. JARÐSKJÁLFTAMÆLINGAR Í SVARTSENGI

Skjálftamælingar við Svartsengi hófust 15. maí, 1993. Þá voru settir upp fjórir stafrænir mælar með þriggja rása nema, þrír innan virkjunarsvæðisins í Svartsengi og sá fjórði austan Svartsengisfells. Síðan var stöðvum fjölgað í áföngum fram til 9. júní. Alls voru settir skjálftamælar á fimmtán staði sem mynduðu net umhverfis virkjunarsvæðið (mynd 1 og viðauki A).

Skjálftavirkni á Reykjanesskaga var lítil þá mánuði sem mælingarnar stóðu yfir (mynd





GMT 10/21/93

**Mynd 2.** Kort af upptökum jarðskjálfta á Reykjanesskaga sem sýnir reiknaðar staðsetningar með innan við 3 km óvissu. Svartsengi er merkt með stjörnu. Kortin eru unnin af Gunnari Guðmundssyni, Veðurstofu Íslands. a) Upptök jarðskjálfta á tímabilinu 01.05-31.08, 1993; b) Upptök jarðskjálfta í september, 1993; c) Upptök jarðskjálfta á síðactliðnu ári.

2a). Mjög hefur dregið úr skjálftavirkni á skaganum síðastliðin tuttugu ár en þar voru tíðar skjálftahrinur á árunum 1967-1973. Stærsta hrinan varð í september 1973 með tveimur skjálftum, um 5 að stærð, og tók hún til alls svæðisins frá Kleifarvatni og vestur undir Reykjanes. Eftir þessa hrinu varð mun rólegra á skaganum (Páll Einarsson og Sveinbjörn Björnsson, 1979 og 1987; Páll Einarsson, 1991). Aðalvirknin á síðastliðnu ári var við Krísuvík, en einnig urðu nokkrir skjálftar vestar, við Fagradals- og Fiskidalsfjall, og austan Kleifarvatns. Nokkrir smáskjálftar komu fram á mælum við Þorbjörn. Skjálftarnir voru mjög litlir, líklega minni en 0 stig á Richterkvarða og mældust því ekki á nægjanlega mörgum stöðum til þess að hægt væri að reikna út nákvæma staðsetningu á þeim.

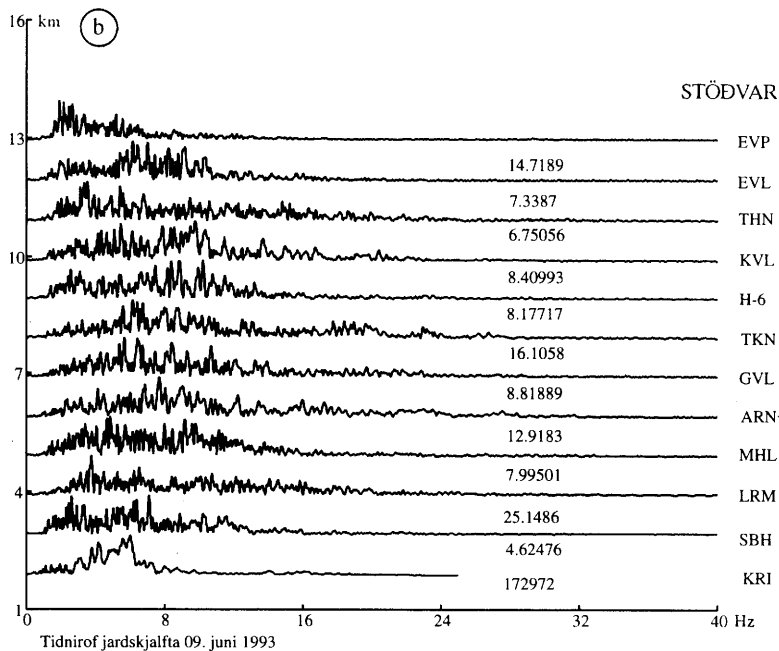
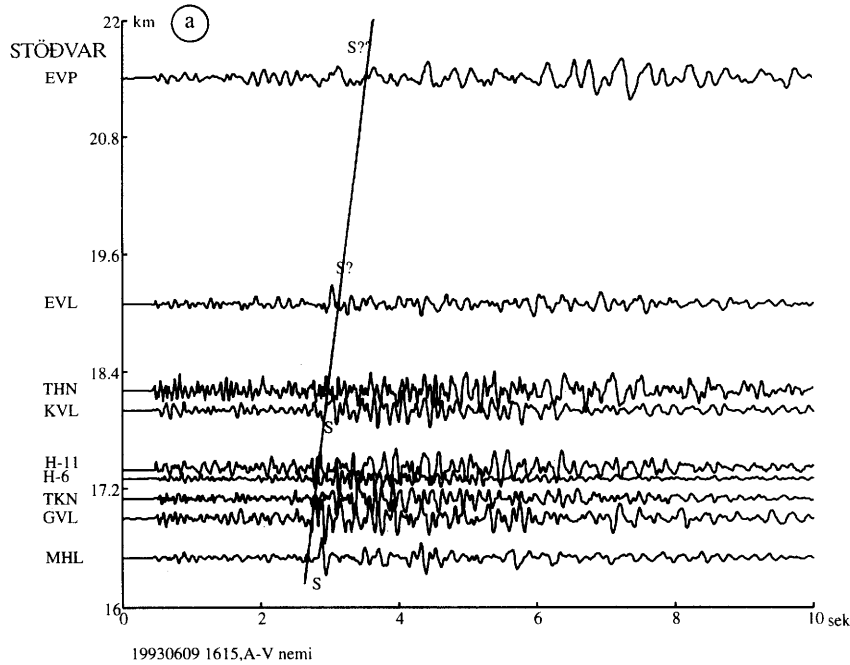
Þann 18. september, eftir að mælingum var lokið, hófst skjálftahrina við Fagradalsfjall. Hrinan stóð í 3 sólarhringa. Virknin var mest við Fagradalsfjall í byrjun, en færðist síðan til austurs, að Krísuvík (mynd 2b). Í lok hrinunnar urðu nokkrir smáskjálftar enn austar, við Grindaskörð. Stærstu skjálftar hrinunnar voru 2.5-3 stig á Richterskala og fundust sumir þeirra í Svartsengi.

Skjálftavirkni á Reykjanesskaga var fremur lítil allt síðastliðið ár (mynd 2c). Aðalvirknin var við Krísuvík, þar sem segja má að smáskjálftavirkni hafi verið nokkuð stöðug (nokkrir skjálftar í hverjum mánuði). Lítil sem engin virkni var annars staðar á skjálftabelti Reykjanesskagans, að undanskilinni áður nefndri hrinu við Fagradalsfjall og í Krísuvík í september. Einungis tvær fastar jarðskjálftamælistöðvar eru nú á Reykjanesskaga, í Þorbirni og Krísuvík. Því þurfa skjálftar einnig að koma fram á jarðskjálftamælum á Suðurlandi til þess að hægt sé að reikna út staðsetningu upptaka. Vegna fjarlægðar og óheppilegrar dreifingar skjálftamæla á Suðvesturlandi með tilliti til Reykjanesskaga verða allar skjálftastaðsetningar á skaganum ónákvæmar, nema við Svartsengi og í Krísuvík. Til þess að skjálftar vestantil á Reykjanesskaga sjáist á Suðurlandi þurfa þeir að ná 1 stigi á Richterkvarða.

Þótt lítil virkni hafi verið í næsta nágrenni Svartsengis, mældust skjálftar frá öðrum stöðum á skjálftabelti Reykjanesskagans. Bylgjuform þeirra er mjög breytilegt á jarðskjálftamælistöðvunum við Svartsengi og endurspeglar mjög mismunandi P- og S-bylgjudeyfingu innan svæðisins.

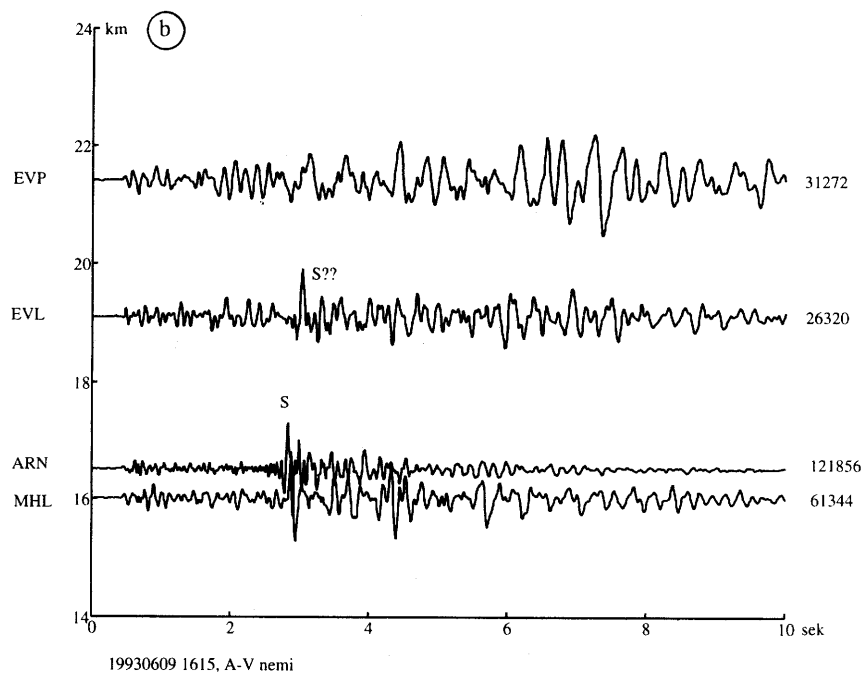
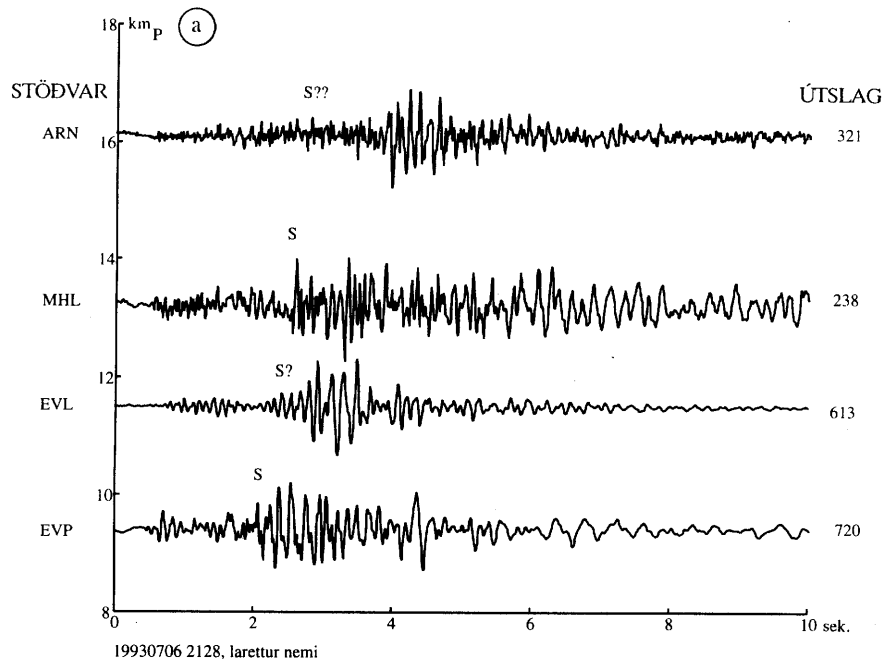
Skjálfti 9. júní 1993 með upptök á rúmlega 6 km dýpi, 200 m austan við stöðina í Krísuvík, hefur mjög skýra S-bylgju þar og einnig á flestum mælistöðvunum við Svartsengi, þrátt fyrir að bylgjudreifing sé tiltölulega mikil á sumum þeirra (myndir 3a og 4b). Við Eldvörp er S-bylgjan aftur á móti óþekktanleg og einnig er tíðniróf skjálftans þar gjörólíkt öðrum stöðvum þar sem mikil deyfing hefur átt sér stað á hærri tíðnunum (mynd 3b). Aftur á móti hefur skjálfti 6. júlí 1993, með upptök við Reykjanes, skýra S-bylgju við Eldvörp og á stöðvum EVL og MHL en ekki við Arnarsetur (ARN) (mynd 4a). Þessi skjálfti var svo lítil að hann mældist einungis á 4 stöðvum. Sams konar deyfing og sást á mælistöðinni við Eldvörp kemur í þessu tilfelli fram við Arnarsetur, í 16 km fjarlægt frá skjálftaupptökum. Þar sést engin aukning á útslagi á þeim tíma sem S-bylgjan ætti að koma, einungis einhvers konar yfirborðsbylgur 1 sek. seinna. Aftur á móti er greinileg S-bylgja á Arnarsetri frá skjálftanum í Krísuvík (mynd 4b), í svo til sömu upptakafjarlægð. Sama munstur kemur fram á stöðinni við Eldvörp (EVP). Þar er S-bylgjan þokkalega skýr í rúmlega 9 km fjarlægð frá Reykjanesskjálftanum (mynd 4a) en óþekktanleg í rúmlega 21 km fjarlægð frá Krísuvíkurskjálftanum (mynd 4b). S-bylgjudeyfin er því ekki háð upptakafjarlægð heldur stefnu frá skjálftaupptökum. Geisli sem skráður er í 21 km fjarlægð frá skjálftaupptökum á 6 km dýpi við Krísuvík nær niður á rúmlega 6 km dýpi undir suðurenda Fagradalsfjalls. Þessi geisli kemur uppundir Svartsengi með eðlilega S-bylgju,

JHD JEF 2500 B: B/KÁ  
94.03.0114 T



**Mynd 3.** a) Skjálftarit jarðskjálfta við Krísuvík, 9. júní 1993, skráð á láréttan nema á öllum skráningarstöðvum umhverfis Svartsengi. Komutími P-bylgju á hverja stöð er núllstilltur og skjálftariti hvernar stöðvar raðað eftir upptakafjarlægð (y-ás). Reiknaður komutími S-bylgju sem fall af tíma er merktur með striki. S-bylgja er sein á stöð MHL miðað við aðrar stöðvar innan 18 km fjarlægðar frá upptakastað. Ekki er hægt að segja með vissu hvort útslag rétt á undan reiknuðum S-bylgjutíma á stöð EVL er S-bylgjan en hún er orðin óþekktanleg á stöð EVP; b) tíðniróf sama skjálfta. Útslag er merkt við hverja stöð.

JHD JEF 2500 BrB/KÁ  
94.03.0113 T



**Mynd 4.** a) Skjálftarit jarðskjálfta við Reykjanes, 6. júlí 1993, og b) Skjálftarit jarðskjálfta við Krísuvík, 9. júní 1993, skráð á lárétta nema á stöðvum EVP, EVL, ARN, og MHL. Komutími P-bylgju á hverja stöð er núllstilltur. Reiknaður komutími S-bylgju er merktur með S, S?, eða S??. Mælarnir eru ekki kvarðaðir þannig að stærð skjálftanna er ekki þekkt. Útslag í nanom/s er sýnt við hverja stöð.

sem týnist vestan Svartsengis. Skjálftinn við Reykjanes er ekki eins vel staðsettur og dýpi hans er óvísst. Þó má ætla að geisli frá honum sem skráður er í 16 km fjarlægð botni á 3-6 km dýpi rétt vestan Eldvarpa.

Samanburður á bylgjuleiðum með og án S-bylgjudeyfingar (mynd 5) bendir til þess að upptök hennar séu í nágrenni Eldvarpa (eða rétt vestan þeirra). S-bylgjudeyfingin leiðir líkur að því að á þessu svæði geti verið kvikuhólf (hlutbráð) á 3-5 km dýpi, þar sem S-bylgjur deyja í fljótandi efni. Í ljósi þess að innskot ná allt að 90% þéttleika neðan 800 m dýpis í jarðlagastaflanum undir Svartsengi (Hjalte Franzson, 1990) er ekki ólíklegt að stutt sé þaðan niður í kviku. Æskilegt væri að gera frekari mælingar á svæðinu á milli Svartsengis og Eldvarpa til þess að ganga úr skugga um tilvist kvikuhólfs.

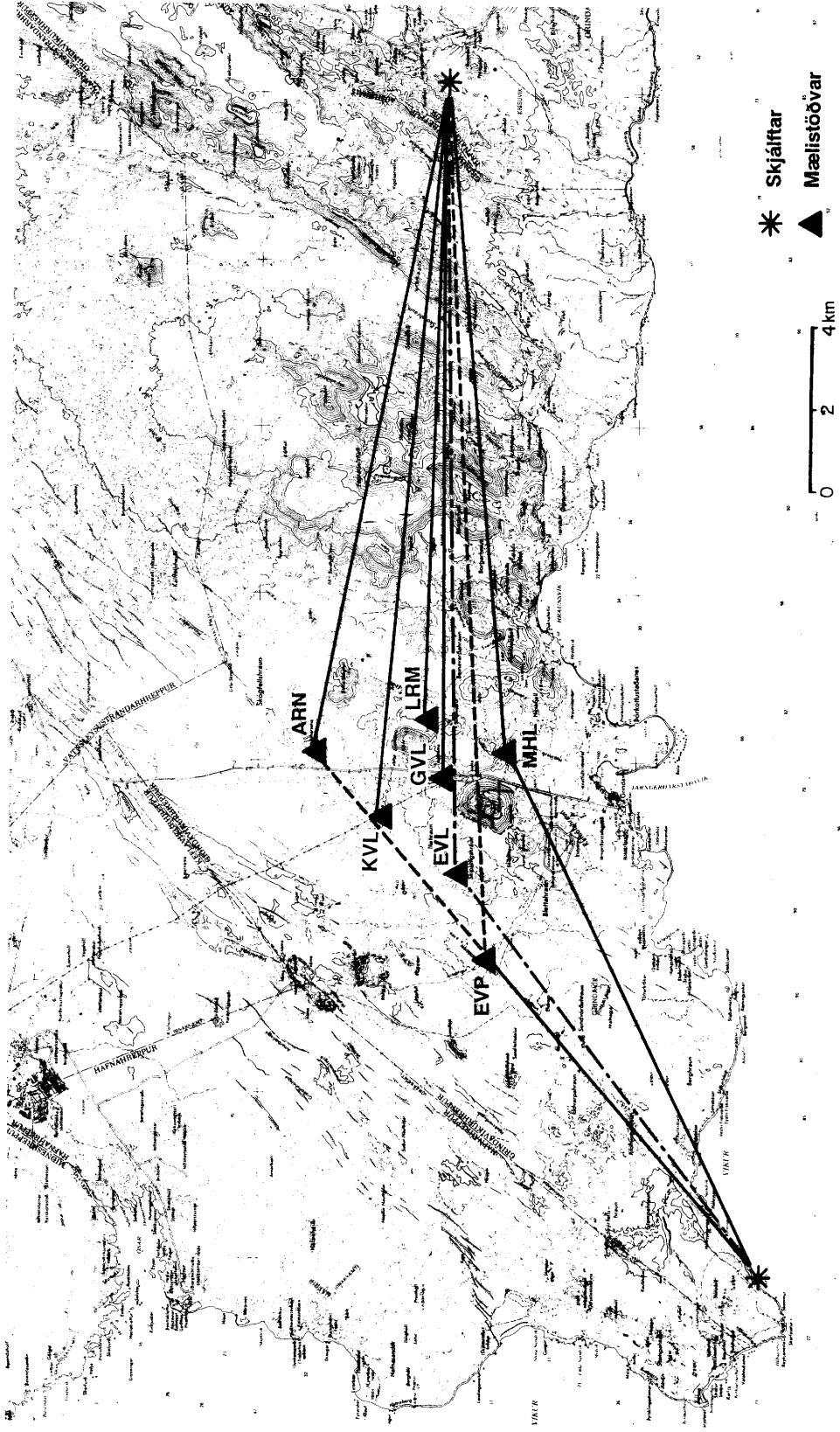
#### 4. ÓRÓAMÆLINGAR

Mælingar á jarðóróa voru gerðar samhliða jarðskjálfta- og bylgjubrotsmælingunum. Jarðórói var skráður í 5-10 sekúndur tvisvar sinnum á sólarhring, samtímis á hverri stöð, á meðan að jarðskjálftamælingar stóðu yfir. Með því að skrá óróa á 12 klst fresti fékkst samanburður á milli stöðva, í mismunandi veðri og vindum. Jarðskjálftanemarnir voru ekki niðurgrafnir heldur látnir standa á yfirborði (hrauni) huldur sandi og mól. Þeir voru því mun næmari fyrir veðri en þegar gengið er frá þeim til frambúðar. Jarðóróinn var einnig skráður samhliða bylgjubrotsmælingunum þar sem mælarnir voru forritaðir til að kveikja á sér í 60 sekúndur á fyrirfram ákveðnum tímum. Skráningartímar sem ekki var sprengt á sýna jarðóróann á viðkomandi stöð.

Nauðsynlegt er að mæla jarðóróa til þess að gera sér grein fyrir því hversu vel skjálfta-bylgjur sjást á hverri mælistöð. Gerð yfirborðslaga, sem getur verið mjög breytileg innan tiltölulega þröngs svæðis, hefur áhrif á bylgjusvörun og jarðóróa. Miklar sveiflur í hljóðhraða á litlu svæði geta ýmist deyft eða magnað upp skjálftabylgjurnar. Óróamælingar eru einnig nauðsynleg forsenda þess að hægt sé að ákveða staðsetningu á skjálftamælistöð sem reka á til frambúðar.

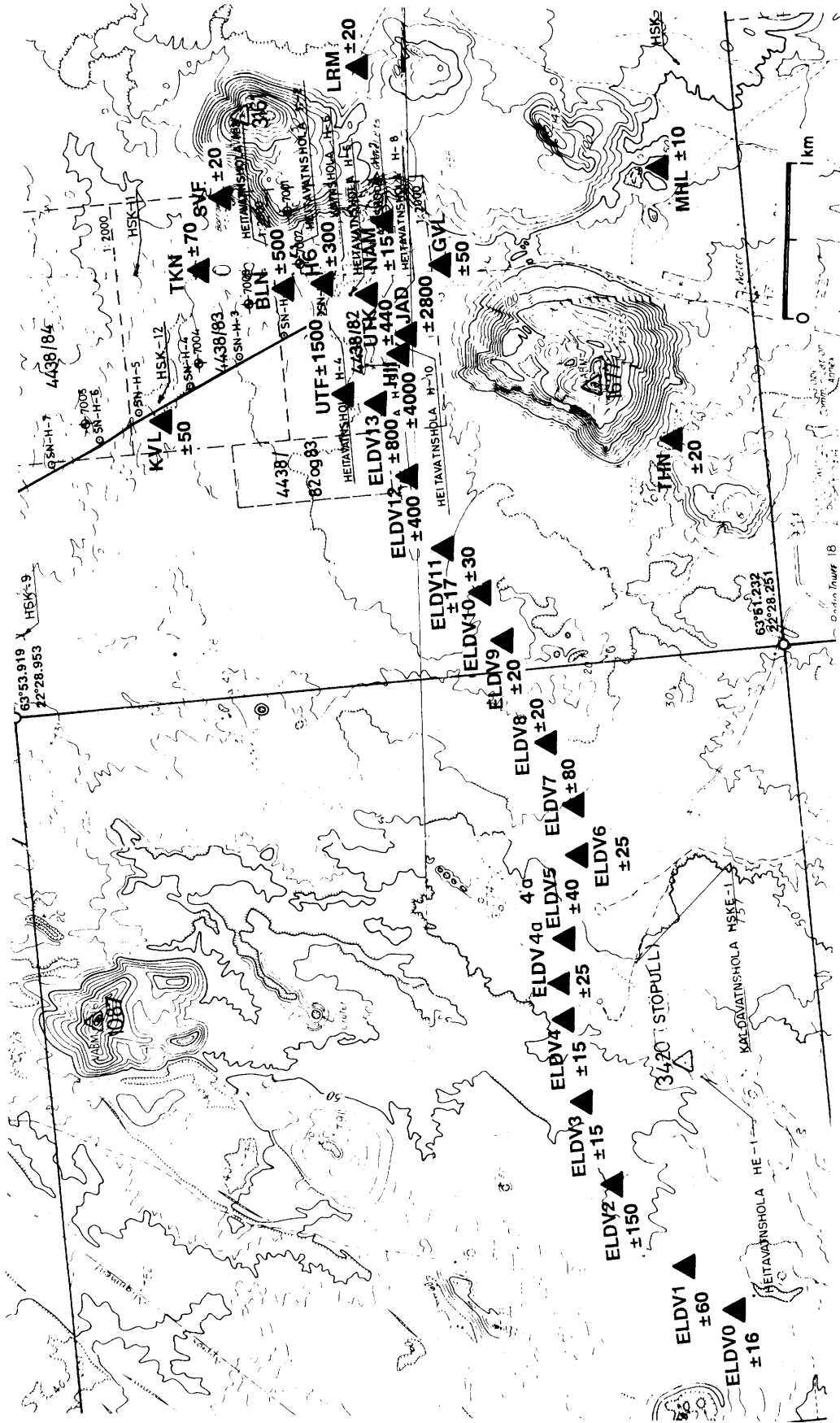
Fljótt kom í ljós að jarðórói innan virkjanasvæðisins er mjög mikill og mestur við borholurnar. Óróinn er mismikill við borholurnar en dvínar tiltölulega hratt með fjarlægð (myndir 6 og 7). Jarðórói innan virkjunarsvæðisins er að meðaltali um  $\pm 300$ , sem er 10–20 sinnum meira en við venjulegar aðstæður.

Tíðniróf óróans er nokkuð mismunandi milli stöðva. Þó má greina ákveðin einkenni sem eru sameiginleg nálægum mælistöðvum. Greina má óróann í fimm flokka eftir ríkjandi tíðni,  $\leq 1$  Hz, 4–6 Hz, 8–20 Hz, 16–24 Hz, og 24–25 Hz (mynd 8). Svæðisbundinn jarðórói er greinilegur í kringum 1 Hz. Jarðórói með tíðni 4–6 Hz kemur einungis fram á stöðvum í og við jarðhitasvæðið í Svartsengi svo líklegast tengist hann jarðhitakerfinu. Óróinn innan virkjanasvæðisins næst borholunum (borholuhávaði) hefur frekar háa tíðni, 8–20 Hz, og svo mikinn styrk að hann yfirgnæfir annan óróa (mynd 8, JAD2, H-6, og UTK). Einnig kemur fram órói með tíðni 16–24 Hz á stöðvum GVB (Gerðuvallabrunnar við Grindavík) og VSM (Vogasprungusveimur). Báðar þessar stöðvar eru nálægt gjám sem kalt vatn rennur um og getur óróinn stafað frá þeim. Enn hærri tíðni, 24–32 Hz, virðist bundin við stöð EVP (við Eldvörp) og einnig kemur fram þröngur toppur við 24.5 Hz á mörgum stöðvum. Ekki er ljóst hvað veldur þessu 24.5 Hz merki. Það gæti þó verið ættað frá virkjuninni í Svartsengi eða fjarskiptastöðinni við Þorbjarnarfell. Stöð THN er næst fjarskiptastöðinni og þar er mest áberandi toppur á 26.25 Hz ásamt tveim minni á 24–25 Hz.



**Mynd 5.** Bylgjuleiðir frá jarðskjálfta við Reykjanes og í Krísuvík til mælistöðva ARN, EVP, EVL, GVL, KVL, MHL, og LRM. Brotnar línur tákna bylgjuleiðir með S-bylgjudeyfingu. S-bylgjur verða óþekktanlegar á leiðinni frá Krísuvík til Eldvarpa (EVP) og frá Reykjanesi til Arnarseturs (ARN). Einnig er erfitt að greina S-bylgju á stöð EVL.

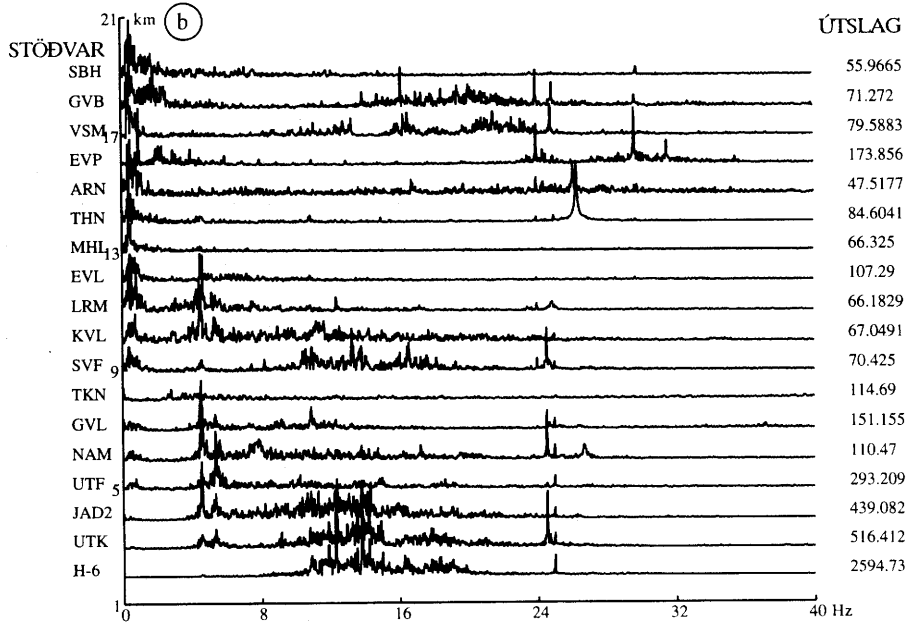
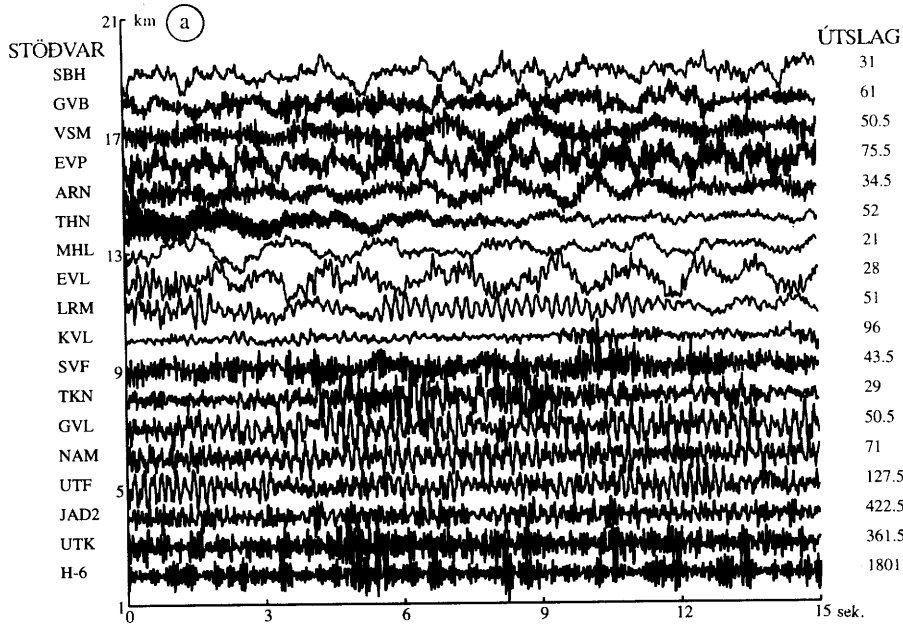




Mynd 7. Jarðórói á mælistöðvum á Eldvarpaleið. Lægsta meðalútslag jarðóróans í báðar áttir (±gildi) er sýnt á hverri stöð.



JHD JEF 2500 BrB/KÁ  
94.03.0110 T



Mynd 8. a) Jarðrói á stöðvum umhverfis Svartsengi. b) Tíðniróf jarðróans.

Dagana 7.–8. október voru gerðar bylgjubrotsmælingar á línu frá hliðinu við virkjunina í Svartsengi og um 2 km vestur fyrir Eldvörp (myndir 7 og 9). Mælamiðskræðu fyrirfram ákveðin tímabil (glugga) sem síðan var sprengt í. Þær skráningar sem ekki innihalda sprengingar sýna jarðóróann á viðkomandi stöð. Óróinn er  $\pm 830$  við hliðið en deyr hratt til vesturs og er komin niður í lægsta meðalgildi ( $\pm 25$ ) 1 km vestan við hliðið. Jarðóróinn vex síðan snögglega aftur, í  $\pm 150$  á einni stöð, um 1 km austur af Eldvarpagígaröðinni (ELDV7, sem hefur lægsta meðalgildi  $\pm 80$ , sbr. mynd 7) og á tveimur stöðvum sem liggja rúmlega 1 km vestan við samsíða gígaröðinni við Eldvörp.

Tíðniróf jarðóróans er mismunandi eftir mælinunni. Borholuhávaðinn á 8–20 Hz er greinilegur næst virkjunarsvæðinu í Svartsengi (stöðvar ELDV13 og ELDV12). Jarðórói með tíðni 4–6 Hz kemur vel í ljós á stöð ELDV11 sem er um 1 km vestan við hliðið á Eldvarpalciðinni og einnig á stöð ELDV4a sem var staðsett við einn Eldvarpagíganna. Órói með tíðni 16–24 Hz er afgerandi á ELDV7, 1 km austur af Eldvörpum, en óróinn vestan Eldvarpa liggur á bilinu 18–30 Hz (stöðvar ELDV1 og ELDV2). Ekki er hægt að segja nákvæmlega til um hvað veldur auknum jarðóróa (á 16–30 Hz) sitt hvorum megin við Eldvörpin. Til þess þarf þéttari og umfangsmeiri mælingar. Verið getur að óróinn stafi frá jarðhitasvæðinu við Eldvörp en einnig getur hann tengst rennsli vatns í gjám.

Þrýstingsmælingar í borholum sýna víðfeðma þrýstingslækkun sem nær frá Svartsengi til Eldvarpa. Þrýstingslækkunin veldur smávægilegri samþjöppun jarðlaga (landsigi) sem teygir sig til VSV frá borholunum í Svartsengi. Sambærileg teygning sést ekki til austurs sem bendir til að jarðhitakerfið sé mun styttra í þá átt (Grímur Björnsson og Benedikt Steingrímsson, 1991). Verið getur að jarðóróinn á tíðnibilinu 4–6 Hz endurspegli að einhverju leyti sama mynstur því hann deyr mishratt út frá virkjunarsvæðinu. Óróinn dvínar mun hægar í VSV-ANA en NNV-SSA því hann sést austan og norðan Svartengisfells (stöðvar SVF og LRM, Mynd 5) en ekki suðvestan undir og austan við Þorbjarnarfell (THN og MHL). Einnig sést hann lítið sem ekkert á stöð KVL, við Keflavíkurlciðsluna.

Ef óróinn á 4–6 Hz tengist jarðhitasvæðinu þá er líklegt að hann endurspegli að einhverju leyti þrýstingsdreifingu í jarðhitakerfinu. Þrýstifall vegna vinnslu veldur suðu í efsta hluta jarðhitakerfisins og hugsanlegt er að jarðóróinn endurspegli útbreiðslu gufupúða jarðhitasvæðisins. Mælingar á jarðóróa sem gerðar voru í Kröflusprungusveimnum nyrst í Öxarfirði, í tengslum við viðnámsmælingar benda til þess að aukning í jarðóróa á takmörkuðu svæði stafi frá suðu í jarðhitasvæðinu sem þar er að finna, eða brestum í bergi sem er að dragast saman vegna kólnunar (Rykounov o. fl., 1992; Knútur Árnason og Ólafur G. Flóvenz, 1992). Þó er líklegra að jarðóróinn við Svartsengi stafi frá suðu í jarðhitasvæðinu þar sem hann er tiltölulega stöðugur en ætla má að órói sem stafar frá kólnunarbrestum sé það ekki, þar sem ólíklegt er að bergið sé stöðugt að springa.

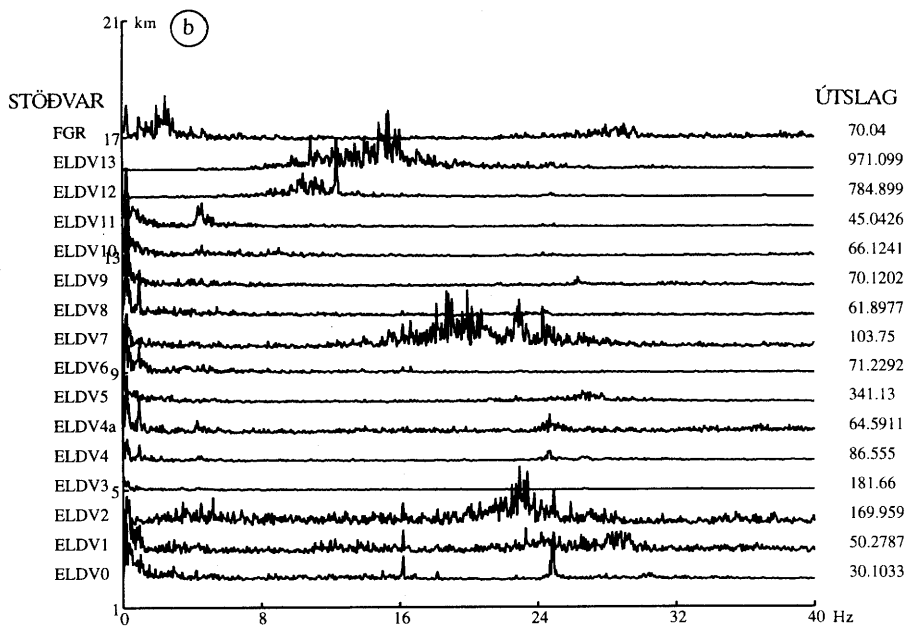
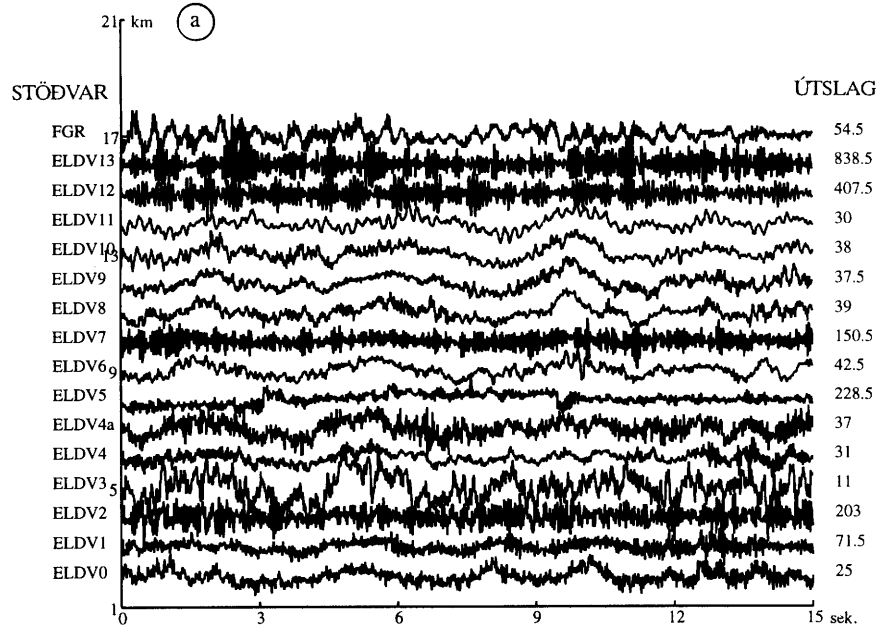
Ofangreindar athuganir sýna að vert er að gera frekari jarðóróamælingar á svæðinu með það að markmiði að finna upptök óróans og til þess að öðlast betri skilning á orsökum hans.

## 5. BYLGJUBROTSMÆLINGAR

Bylgjubrotsmælingar eru nauðsynlegar til kvörðunar á staðsetningu skjálftaupptaka. Þær gefa upplýsingar um hljóðhraðadreifingu innan rannsóknasvæðisins og með því að endurtaka þær að einhverjum tíma liðnum má kortleggja breytingar á hljóðhraða við jarðhitavinnslu.

Dagana 15.–16. júlí og 7.–8. október voru gerðar bylgjubrotsmælingar innan jarðhitakerfisins og í nágrenni þess. Skjálftar voru framkallaðir með sprengingum í tveimur

JHD JEF 2500 BrB/KÁ  
94.03.0109 T



Mynd 9. a) Jarðrói á stöðvum á Eldvarpaleið. b) Tíðniróf jarðróans.

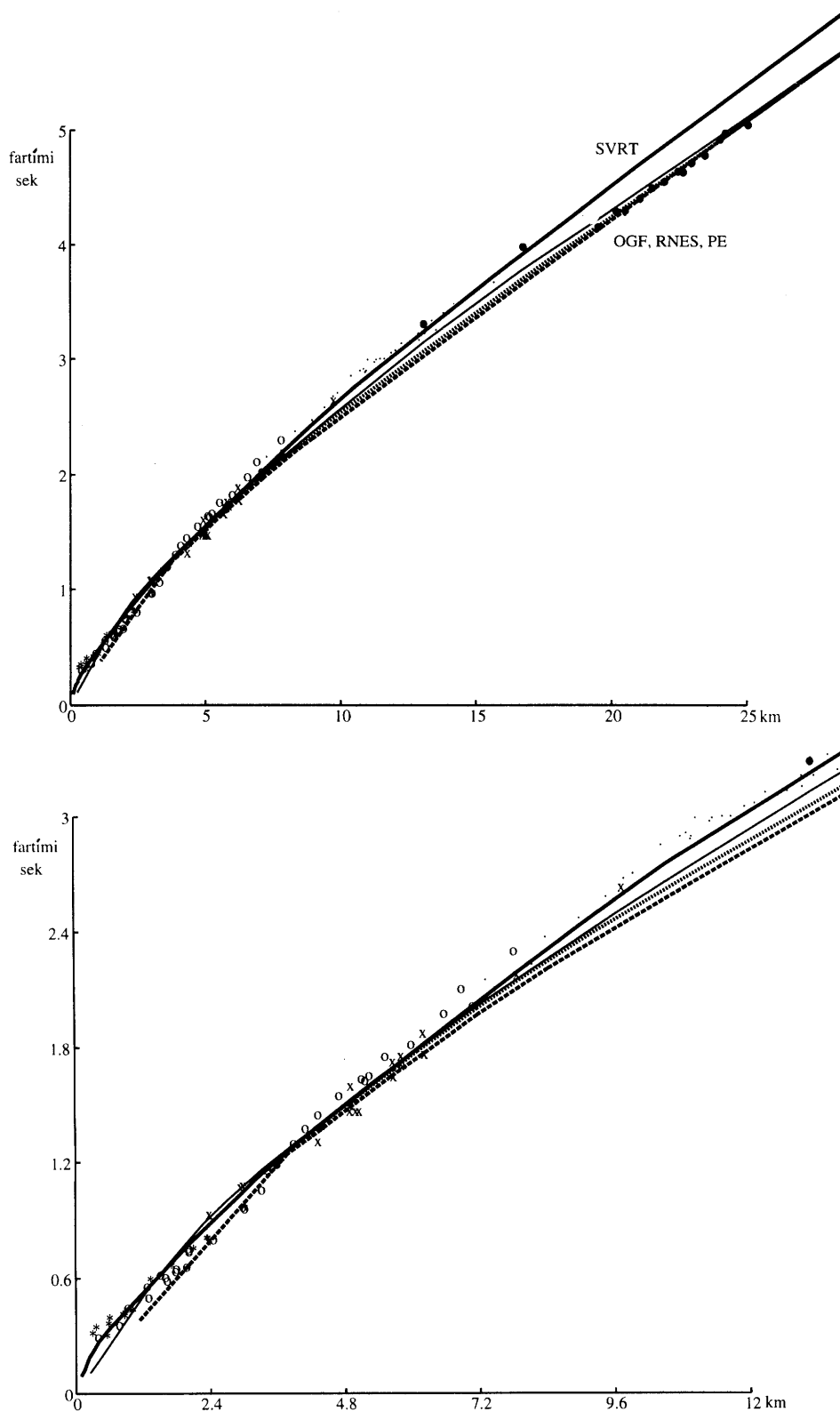
**Tafla 1.** P-bylgjuhraði sem fall af dýpi. Ný jarðskorpulíkon fyrir Reykjanesskaga og Svartsengi ásamt eldra líkani sem byggt var á endurtúlkun Páls Einarssonar (GP\_PE) og Ólafs G. Flóvenz (GP\_ÓGF) á mælingum Guðmundar Pálmasonar.

Jarðskorpulíkan		Jarðskorpulíkan		Jarðskorpulíkan			
Svartsengi (SVRT)		Reykjanes (RNES)		Reykjanes-GP_PE		Reykjanes-GP_ÓGF	
hljóðhraði	dýpi	hljóðhraði	dýpi	hljóðhraði	dýpi	hljóðhraði	dýpi
km/s	km	km/s	km	km/s	km	km/s	km
1.1	0.0	1.1	0.0	3.0	0.0	2.3	0.0
3.2	0.2	3.2	0.2	3.3	0.4	3.3	0.5
3.5	0.4	3.5	0.4	4.5	1.2	4.3	1.0
4.3	1.0	4.5	1.0	5.8	2.5	4.8	1.5
5.5	3.0	5.2	2.0	7.0	10.8	5.2	2.0
7.0	10.8	5.7	3.5			5.7	3.0
		6.0	4.0			6.2	4.0
		6.3	5.0				
		6.6	7.0				
		7.0	10.8				

borholum (HSK-1 og H-4), í Grindavíkurhöfn, í Grænavatni, við Hafnir og við Reykjanes. Mældir voru fartímar hljóðbylgna frá sprengingunum að skjálftamælistöðvum. Í júlí var sprengt í borholum H-4 og HSK-1 og í Grindavíkurhöfn. Fartímar voru mældir með mælanetinu sem sett hafði verið upp til að staðsetja smáskjálfta innan jarðhitasvæðisins. Í október var 15 skjálftamælum raðað með 500 m millibili eftir veginum til Eldvarpa, frá hliðinu við virkjunina í Svartsengi og um 2 km vestur fyrir Eldvörp. Einnig voru settir upp mælar á tveimur stöðvum austan Svartsengis, við Lyngrima (LRM) og Fagradalsfjall (FGR), til þess að fá samanburð á hljóðhraða eftir jafnlögum bylgjuferlum austan og vestan Svartsengis.

Bylgjubrotsmælingarnar leiddu í ljós töluverð frávik frá því jarðskorpulíkani (GP\_PE) sem notað hefur verið við staðsetningu skjálftaupptaka á Reykjanesskaga (tafla 1, Mynd 10). Það líkan var byggt á meðaltali frá stuttum (< 60 km) mælinum á utanverðum skaganum, ásamt mælinu frá Grænavatni og austur undir Eyjafjöll (Guðmundur Pálmason, 1971). Mælingar Guðmundar Pálmasonar (1971) sýndu töluverðar breytingar á P-bylgjuhraða í efstu jarðlögum á Reykjanesskaga. Sem dæmi má nefna að bylgjubrotsmælingar í báðar áttir á línu milli Grindavíkur og Voga sýndu að jarðskorpuþykkt eykst til norðurs. Bylgjubrotsmælingarnar í sumar leiddu m.a. í ljós að yfirborðshraði hefur verið ofmetinn, en hann er mjög lágur (1.1 km/sek) ofan grunnvatnsborðs í apalhraunum eins og í Svartsengi.

Nýja jarðskorpulíkanið fyrir Svartsengi (SVRT) passar vel að bylgjubrotsgögnum frá öllum skotstöðum nema Grænavatni. Fyrstu bylgjur frá skoti í Grænavatni hafa eðlilega fartíma til stöðva austan Svartsengis en koma um 0.25 s of fljótt á stöðvar á Eldvarpaleið, vestan Svartsengis (mynd 10b). Gögnin gefa til kynna tilvist háhraðalaga undir eða vestan við Svartsengisfell sem ekki er hægt að staðsetja nánar. Okkar útgáfa af líkani fyrir Reykjanesskaga (RNES) byggir á meðaltali allra mældra fartíma frá sprengingum sumarið 1993 og er nánast eins og líkan Ólafs G. Flóvenz (1980), neðan grunnvatnsborðs. Það fylgir jarðskorpulíkani fyrir Svartsengi í efstu jarðlögum en tekur síðan mið af hugsanlegum



**Mynd 10.** Fartímar sem fall af fjarlægð ásamt reiknuðum fartímum samkvæmt jarðlagalíkönum fyrir Svartsengi (þykk lína), Reykjanesskaga (punktalína), ásamt eldri líkönum sem byggð voru á endurtúlkuðum mælingum Guðmundar Pálmasonar, 1971. Jarðlagalíkon Páls Einarssonar (strikalína) og Ólafs G. Flóvenz, 1980 (heil lína) eru byggð á meðaltölum nokkurra mæli lína Guðmundar Pálmasonar (1971) á Reykjanesskaga. Fartímar frá skoti í borholu HSK-1 eru sýndir með hring, frá skoti í borholu H-4 með stjörnu, frá skoti í Grindavíkurhöfn með x, og frá Grænavatni með fylltum hring. Skot við Hafnir og undan Reykjanesi eru sýnd með punkti.

**Tafla 2.** Samanburður á GPS-mældri staðsetningu og reiknuðum staðsetningum sprenginga (RH, VÍ). (RH), reiknaðar staðsetningar með mælaneti á Reykjanesskaga. (VÍ), sjálfvirkar staðsetningar með mælaneti Veðurstofu Íslands í Krísuvík og á suðvesturlandi.  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ , og  $\Delta Z$  er mismunur á GPS-mældri og reiknaðri staðsetningu í tvær láréttar og lóðrétta stefnu. ERH og ERZ er reiknuð staðsetningaróvissa í lárétta og lóðrétta stefnu.

Skotstaður	Lamberthnit		dýpi m	$\Delta X$ m	$\Delta Y$ m	$\Delta Z$ m	ERH m	ERZ m
borhola H-4								
GPS	382750.9	717636.8	560					
RH	382774.1	717642.9	400	6.1	23.2	160	140	160
borhola HSK-1								
GPS	383935.5	717283.6	40					
RH	383865.2	717262.5	190	11.1	70.3	150	190	200
VÍ	380403.5	715091.5	1144	2192.1	3532	1104		
Grindavíkurhöfn								
GPS	377764.8	717937.0	7					
RH	377785.4	717433.8	400	503.2	20.6	393	680	3080
Grænavatn								
GPS	381980.62	699190.8	20					
RH	380862.8	701775.3	2030	2584.4	1117.9	2010	4570	820
VÍ	382824.2	700720.3	1359	1529.5	843.5	1339		
Hafnir								
GPS	390159	729851.5	5					
RH	378595.9	723339.7	4730	6511.8	11563	4725	11450	8600
Reykjanes								
GPS	380236.78	731740.4	15					
RH	381515.8	729392.4	1130	2348	1279	1115	75150	64450
VÍ	379113.2	744457.6	5942	12717.3	1123.6	5927		

háhraðalögum á meira dýpi.

Þó að jarðskorpulíkanið fyrir Svartsengi passi vel að bylgjubrotsgögnunum þá koma fram fartímafrávik á einstökum stöðvum. Frávikin eru margbreytileg og geta verið mismunandi á hverri stöð eftir því hvaðan bylgjurnar berast. Gögnin gefa ekki heildstætt yfirlit yfir hraðafrávik og þarf mun þéttari mælingar til þess að hægt sé að afmarka hraðabreytingar á rannsóknarsvæðinu.

Jarðskorpulíkanið var prófað með því að nota það við útreikning á staðsetningu sprenginga (tafla 2 og viðauki B). Mismunur á GPS-mældri og reiknaðri staðsetningu er innan reiknaðra skekkjumarka fyrir borholuskotin og skotið í Grindavíkurhöfn enda er afstaða mælistöðva til skotstaðar góð. Skot við Hafnir og út af Reykjanestá eru hins vegar illa staðsett þar sem næsta mælistöð (ELDVO) er í 10.98 km og 7.34 km fjarlægð og allar mælistöðvar í svo til sömu stefnu frá skotstað. Skot í Grænavatni er líka illa staðsett á sömu ástæðu þó ein stöð sé í Krísuvík.

Reiknuð staðsetning á skoti á 560 m dýpi í heitavatnsholu H-4 hefur 24 m frávik í lárétta plani og 160 m frávik í dýpi. Reiknuð staðsetning á skoti á 40 m dýpi í kaldavatnsholu HSK-1 hefur 71 m frávik í lárétta plani og 150 m frávik í dýpi (tafla 2). Frávik frá reiknuðum fartíma ( $t_m - t_r$ ) eru mismunandi eftir stöðvum en hvergi meiri en 0.11 s (Viðauki B). Hægt er að nota meðaltal mældra fartímafrávik frá borholuskotunum sem stöðvaleiðréttingar við staðsetningu jarðskjálfta við Svartsengi en frávikin þarf að endurskoða eftir að aflað hefur

verið frekari gagna.

Niðurstöður reiknaðra staðsetninga á skotum benda til þess að hægt sé að staðsetja upptök smáskjálfta í jarðhitasvæðinu í Svartsengi með innan við 100 m óvissu í láréttu plani og 200 m óvissu í dýpi, ef notaðar eru 6 stöðvar eða fleiri. Afstæðar staðsetningar má gera með mun meiri nákvæmni.

## 6. NIÐURDÆLING OG ÁHRIF HENNA Á SKJÁLFTAVIRKNI

Lækkun vökvaþrýstings og niðurdráttur hefur valdið landsigi í Svartsengi sem teygir sig í áttina að Eldvörpum. Til þess að vega á móti lækkun grunnvatnsborðs hefur affallsvatni verið dælt í borholur með nokkrum hléum allt frá 1982 (Grímur Björnsson og Benedikt Steingrímsson, 1991). Ekki er vitað til þess að smáskjálftavirkni í Svartsengi hafi aukist í kjölfar niðurdælingarinnar.

Við niðurdælingu kaldara vatns í heitt berg skapast mismunaspenna í berginu. Hækkandi vökvaþrýstingur lækkar einnig brotmörk bergsins, jafnvel svo að það brotni snögglega. Undir þrýstingi leitar vatnið strax út í nýmyndaðar sprungur. Þessu getur fylgt smáskjálftavirkni og hefur stundum verið mögulegt að rekja slóð vatnsins neðanjarðar á meðan á niðurdælingu stendur (Stark, 1990). Þannig má fylgjast með breytingum á jarðhitakerfinu sem stafa frá breytingum í vökvaþrýstingi í holrými bergsins og sprunguvirkni samfara varmanámi vegna aðstreymis kaldara vatns.

Niðurdæling hófst í holu H-6 í Svartsengi þann 20. júlí, 1993. Heitavatnshola H-6 er um 2000 m djúp en affallsvatnið sem dælt var niður rann út í æð á um 350 m dýpi. Alls var 217.555 tonnum ( $217 \times 10^6$  l) af um 70–80°C heitu vatni dælt í holuna frá júlí til desemberloka (tafla 3). Ætla má að niðurdælingarvatnið hafi leitað til suðurs frá holunni þar sem mikill hluti niðurdælingarvatns í holu H-12, skilaði sér til suðurs í holu H-6 (Vatnaskil 1989).

**Tafla 3.** Niðurdæling í H-6, 1993. Gögn frá Geir Þórólfsyni, Hitaveitu Suðurnesja.

Dags.	Tímabil (d) dagafjöldi	Meðalrennsli (l/s áætlað)	Magn (Tonn)
19. 07 – 20. 07	1	30	2.592
20. 07 – 22. 07	2	22	3.802
23. 07 – 27. 07	4	15	5.184
28. 07 – 04. 08	8	10	6.912
04. 08 – 10. 08	6	11	5.702
11. 08 – 28. 09	48	18.5	76.723
15. 10 – 15. 11	30	15	38.880
01. 12 – 31. 12	30	30	77.760
		samtals	217.555

Fyrri niðurdælingartilraunir gefa til kynna að lekt jarðhitageymisins er aðallega eftir flóknu neti láréttra og lóðréttra sprunguflata. Bergeiningarnar milli sprungna einkennast hins vegar af lágri lekt en háum poruhluta (Grímur Björnsson og Benedikt Steingrímsson, 1991) og vatnsæðar innan jarðhitakerfisins liggja eftir jöðrum innskota og eftir sprunguflötum misgengja með NNV-SSA og NA-SV stefnu (Hjalti Franzson, 1990). Því má ætla að niðurdælingin hafi strax áhrif á lekt sprungunetið, vatnið leiti út í sprungurnar en breiðist mun hægar um bergið á milli þeirra. Grunnvatnsborð í H-6 liggur á um 200 m dýpi. Vatnsborð í holunni hækkaði einungis um 1 m fyrir hvern sekúndulíttra sem dælt var niður (Sverrir Þórhallsson, pers. uppl.). Lektin er það mikil að til þess að fylla holuna hefði þurft að dæla í hana um 200 l/s, en niðurdælingin náði aðeins 30 l/s hámarksrennsli, í lok niðurdælingartímans.

Niðurdælingartilraunir erlendis hafa sýnt að ekki er einhlítt að hægt sé að rekja rennsleiðir vatns út frá smáskjálftavirkni og virðist grunnvatnsstaða svæðisins og þrýstingur við niðurdælingu skipta þar höfuðmáli (Davis og Frohlich, 1993). Sem dæmi má nefna að fjöldi smáskjálfta á jarðhitasvæðinu í Wairakei óx til muna í niðurdælingartilraun árið 1984 en engrar aukningar varð vart við niðurdælingu á sama stað 1988–1989 (Sherburn o. fl., 1990). Árið 1984 var vatninu dælt með 20–30 bara þrýstingi niður í svæðið en 1988–1989 hafði vökvaþrýstingur svæðisins minnkað það mikið að engrar dælingar var þörf, vatnið rann sjálft niður.

Engrar aukningar í smáskjálftavirkni varð vart samfara niðurdælingunni í Svartsengi. Með samanburði við niðurdælingartilraunir erlendis verður að telja þetta eðlilegt (Davis og Frohlich, 1993). Magn affallsvatns var allt of lítið og lekt svæðisins of mikil til þess að niðurdælingin hefði nokkur áhrif á vökvaþrýsting svæðisins. Þessu til viðbótar má benda á að brotmörk bergs hækka ef grunnvatnsborð lækkar. Niðurdrátturinn í Svartsengi hefur þannig hækkað brotmörk bergsins en ein afleiðing þess er fækkun smáskjálfta.

## 7. NIÐURSTÖÐUR

Skjálftavirkni á Reykjanesskaga var með minnsta móti árið 1993. Virknin var aðallega bundin við Krísuvík en einnig urðu smáskjálftahrinur við Fagradals- og Fiskidalsfjall, og austan Kleifarvatns. Nokkrir smáskjálftar komu fram á mælum við Þorbjörn en ekki var hægt að staðsetja þá nánar. Bylgjuform þessarra skjálfta er mjög breytilegt á jarðskjálfta-mælistöðvunum við Svartsengi og endurspeglar mjög mismunandi P- og S-bylgjudeyfingu innan svæðisins. Samanburður á bylgjuleiðum með og án S-bylgjudeyfingar bendir til þess að upptök hennar séu í nágrenni Eldvarpa og leiðir líkum að því að á því svæði geti verið kvikuhólf (hlutbráð) á 3–5 km dýpi.

Niðurstöður reiknaðra staðsetninga á skotum benda til þess að hægt sé að staðsetja upptök smáskjálfta í jarðhitasvæðinu í Svartsengi með innan við 100 m óvissu í láréttu plani og 200 m óvissu í dýpi, ef notaðar eru 6 stöðvar eða fleiri.

Óróamælingar leiddu í ljós að jarðórói á utanverðum Reykjanesskaga liggur á mismunandi tíðnisviðum. Órói með tíðni 16–24 Hz kom fram á nokkrum stöðvum utan jarðhitasvæðisins í Svartsengi, nálægt gjám. Hugsanlega stafar þessi órói frá vatnsrennsli um gjárnar. Aftur á móti er jarðórói á tíðnibilinu 8–20 Hz mjög mikill innan virkjana-svæðisins og mestur við borholurnar. Órói innan virkjunarsvæðisins er að meðaltali 10–20 sinnum meira en utan þess. Jarðórói með tíðni 4–6 Hz virðist tengiast jarðhitakerfinu. Vert er að gera frekari mælingar á þessum óróa til þess að öðlast betri skilning á orsökum hans.



Niðurstöður óróa- og bylgjubrotsmælinga gefa til kynna að best sé að staðsetja skjálftamælistöð sem reka á til frambúðar utan við vinnslusvæðið í Svartsengi, en þó sem næst því. Af þeim stöðum þar sem reknar voru færnanlegir skjálftamælar virðist staður á Eldvarpaleið (EVL), 1750 m vestan við heitavatnsholu H-4 koma best út. Einnig reyndust stöðvar KVL, TKN, og GVL ágætlega.

Engrar aukningar í smáskjálftavirkni varð vart samfara niðurdælingunni í Svartsengi. Sennilega var magn affallsvatns of lítið og lekt svæðisins of mikil til þess að niðurdælingin hefði áhrif á vökvapbrýsting svæðisins.

## **8. TILLÖGUR UM FRAMHALDSVERKEFNI**

### **8.1. SKJÁLFTAMÆLINGAR**

Þar sem smáskjálftar í Svartsengi koma í hrinum og ekki náðist að staðsetja neina skjálfta innan svæðisins sumarið 1993, er ástæða til þess að setja færnanlega skjálftamæla upp á svæðinu þegar næsta skjálftahrina ríður yfir. Hægt væri að setja upp 6 mæla með stuttum fyrirvara á fyrirfram valda staði og þannig minnka óvissu í staðsetningum niður fyrir 500 m. Helstu mælingastaðir umhverfis vinnslusvæðið gætu verið GVL, KVL, LRM, EVL, THN, og ARN. Einnig kemur til greina að setja mæla á TKN, VSM, og EVP (Viðauki A). Umfang mælanetsins mun væntanlega ráðast af staðsetningu og umfangi hrinunnar.

Stefna ber að uppsetningu skjálftamælanets í Svartsengi sem yrði hluti af skjálftamælaneti Reykjanesskaga. Nauðsynlegt er að reka mælanetið í nokkur ár til þess að fá haldbært yfirlit yfir skjálftavirkni svæðisins. Skjálftamælanetið mun veita margþættar upplýsingar. Jafnhliða því að veita hagnýtar upplýsingar um upptök og eðli skjálftavirkinnar, sem nýttast virkjunaraðila beint, fást almennar vísindalegar niðurstöður og reynsla sem kemur að góðum notum við rannsóknir á öðrum svæðum. Einnig mun slíkt net skjálftamæla gegna mikilvægu vöktunarhlutverki í þágu Almannavarna.

### **8.2. ÓRÓAMÆLINGAR**

Vert er að kanna upptök jarðóróans á jarðhitasvæðunum í Svartsengi og við Eldvörp. Þessi mæling er tiltölulega einföld í framkvæmd. Skjálftamælir er settur upp á rannsóknarsvæðinu og látinn skrá óróa á sama stað á meðan þéttar mælingar eru gerðar með öðrum mæli eftir mæлилínunum. Æskilegt er að mæla þétt net við virkjanasvæðið í Svartsengi og síðan nokkrar línur út frá því. Best er að mæлилínur lægju eftir hæðar- og þyngdarmælingaleiðum á utanverðum Reykjanesskaga (Hjálmar Eysteinnsson, 1993) þannig að sem best sé að bera niðurstöður óróamælinganna saman við aðrar jarðeðlisfræðilegar athuganir á yfirborði. Úrvinnsla óróamælinganna er mun flóknari og tímafrekari en gagnasöfnunin. Úrvinnslan er fólgin í því að bera saman mismunandi tíðniróf óróans og með tölulegri greiningu (s.s. þverfylgni) að ákvarða fjarlægð og stefnu í uppsprettu óróa á mismunandi tíðnisviðum.

### **8.3. ER KVIKUHÓLF Í NÁGRENNI ELDVARPA?**

Þar sem S-bylgjur deyja í hlutbráðnu bergi, s.s. kvikuhólfum eldstöðva og hraði P-bylgna dvínar töluvert má nota jarðskjálftamælingar og bylgjubrotsmælingar til þess að kortleggja kvikuhólf. Kortlagning á deyfingu S-bylgna við Kröflu staðfesti tilvist og gaf hugmynd um útreiðslu kvikuhólfisins þar (Páll Einarsson, 1978) og bylgjubrotsmælingar frá Vík í Mýrdal

og NNV yfir Mýrdalsjökul, sumarið 1991, leiddu í ljós tilvist grunnstæðs kvikuhólfs, um 1 km að þykkt, undir suðaustanverðum Mýrdalsjökli (Ólafur Guðmundsson o. fl., 1994). Æskilegt væri að gera slíkar mælingar á utanverðum Reykjanesskaga, í nágrenni Eldvarpa, þar sem óeðlileg bylgjudeyting á sér stað, til þess að ganga úr skugga um tilvist kvikuhólfs þar.

## ÞÁTTTAKENDUR

Smáskjálfta- og bylgjubrotsmælingar í Svartsengi eru liður í verkefninu Umhverfisáhrif jarðhita, sem Orkustofnun hefur unnið að, í samvinnu við Hitaveitu Suðurnesja. Umsjón með verkefninu höfðu Albert Albertsson og Geir Þórólfsson, Hitaveitu Suðurnesja, Bryndís Brandsdóttir og Páll Einarsson, Raunvísindastofnun Háskólans og Knútur Árnason, Orkustofnun. Hrefna Kristmannsdóttir, Orkustofnun, var verkefnisstjóri. Bryndís Brandsdóttir og Benedikt Halldórsson sáu um rekstur skjálftamæla. Jósef Hólmjárn, Karl Gunnarsson, Knútur Árnason og Ólafur G. Flóvenz sáu um sprengingar. Egill Axelsson, William H. Menke og Brandur Bj. Karlsson ásamt stúdentum í jarðskjálftafræði aðstoðuðu við útvinnu. Ólafur G. Flóvenz las handrit þessarrar skýrslu og færði margt til betri vegar.

## HEIMILDIR

- Davis, S.D., and C. Frohlich, 1993. Did (or will) fluid injection cause earthquakes? – Criteria for a rational assessment. *Seismological Research Letters*, 64, 207-224.
- Foulger, G. R., 1988a. Hengill triple junction, SW Iceland. 1. Tectonic structure and the spatial and temporal distribution of local earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 93, 13.493-13.506.
- Foulger, G.R., 1988b. Hengill triple junction, SW Iceland. 2. Anomalous earthquake focal mechanisms and implications for process within the geothermal reservoir and at accretionary plate boundaries. *J. Geophys. Res.*, 93, 13.507-13.523.
- Foulger, G.R., R.E. Long, Páll Einarsson, og Axel Björnsson, 1989. Implosive earthquakes at the active accretionary plate boundary in northern Iceland. *Nature*, 337, 640-642.
- Grímur Björnsson og Benedikt Steingrímsson, 1991. Hiti og þrýstingur í jarðhitakerfinu í Svartsengi: Upphafsstand og breytingar vegna vinnslu. *Skýrsla Orkustofnunar OS-91016/JHD-04*, 69 s.
- Guðmundur Pálmason, 1971. Crustal structure of Iceland from explosion seismology. *Rit Vísindafélags Íslendinga*, XL, 187 s.
- Halldór Ármannsson, Hrefna Kristmannsdóttir, Guðný Pálsdóttir, og Jón Árni Reginsson, 1993. Áhrif vinnslu jarðhita á umhverfið. Framvinduskýrsla um forverk og mótun samvinnuverkefnis. *Skýrsla Orkustofnunar OS-93034/JHD-09*, 239 s.
- Hjálmar Eysteinnsson, 1993. Hæðar- og þyngdarmælingar á utanverðum Reykjanesskaga 1992. *Skýrsla Orkustofnunar OS-93029/JHD-08*, 53 s.
- Hjalti Franzson, 1990. Svartsengi. Jarðfræðilíkan af háhitakerfi og umhverfi þess. *Skýrsla Orkustofnunar OS-90050/JHD-08*, 41 s.
- Knútur Árnason og Ólafur G. Flóvenz, 1992. Evaluation of physical methods in geothermal exploration of rifted oceanic crust. *Geothermal Resources Council TRANSACTIONS*, 16, 207-214.

- Klein, F.W., Páll Einarsson og M. Wyss, 1977. The Reykjanes Peninsula, Iceland, Earthquake Swarm of September 1972 and Its Tectonic Significance. *J. Geophys. Res.*, 82, 865-888.
- Páll Einarsson, 1978. S-wave Shadows in the Krafla Caldera in NE-Iceland, Evidence for a Magma Chamber in the Crust. *Bull. Volcanol.*, 41, 187-195.
- Páll Einarsson og Sveinbjörn Björnsson, 1979. Earthquakes in Iceland. *Jökull*, 29, 37-43.
- Páll Einarsson og Sveinbjörn Björnsson, 1987. Jarðskjálftamælingar á Raunvísindastofnun Háskólans. *Í hlutarins Eðli*, Afmælisrit Þorbjarnar Sigurgeirssonar, Menningarsjóður, 251-278.
- Páll Einarsson, 1991. Earthquakes and present-day tectonism in Iceland. *Tectonophysics*, 189, 261-279.
- Ólafur G. Flóvenz, 1980. Seismic structure of the Icelandic crust above layer three and the relation between body wave velocity and the alteration of the basaltic crust. *J. Geophys.*, 47, 211-220.
- Ólafur Guðmundsson, Bryndís Brandsdóttir, William H. Menke, og Guðmundur E. Sigvaldason, 1994. The crustal magma chamber of the Katla volcano in south Iceland revealed by two-dimensional seismic undershooting. Í prentun hjá *J. Geophys. Int.*
- Rykounov, L.N., B.M. Shoubik, V.L. Kiselevich, V.B. Smirnov and Ólafur G. Flóvenz, 1992. Seismic noise studies in Öxarfjörður, N-Iceland. *Orkustofnun, greinargerð.*
- Sherburn, S., R. Allis, og A. Clotworthy, 1990. Microseismic activity at Wairakei and Ohaaki geothermal fields. *Proc. 12th New Zealand Workshop*, 51-55.
- Stark, M.A., 1990. Imaging injected water in the Geysers reservoir using microearthquake data. *Geothermal Resources Council TRANSACTIONS*, Vol. 14, Part II, 1697-1704.
- Vatnaskil 1989. Svartsengi – Reikniflkan af jarðhitakerfinu. *Orkustofnun*, OS-89031/JHD-05, 111 s.
- Ward, P., og Sveinbjörn Björnsson, 1971. Microearthquakes, swarms, and the geothermal areas of Iceland. *J. Geophys. Res.*, 76, 3.953-3.982.

## SUMMARY

### REFRACTION MEASUREMENTS AND SEISMIC MONITORING DURING AN INJECTION EXPERIMENT AT THE SVARTSENGI GEOTHERMAL FIELD IN 1993.

Microearthquake activity in and near the Svartsengi geothermal field was monitored during May - August 1993 in order to detect the effect, if any, of the injection of waste water from the Svartsengi geothermal power plant, into a geothermal borehole. Seismic monitoring was facilitated by the installation of a network of portable seismographs. Refraction and seismic noise measurements were also made in order to obtain information on the regional seismic structure of the crust and to gather information pertinent to the siting of future seismograph sites.

The seismic activity on the Reykjanes peninsula is confined to a 2-5 km wide zone which trends N80°E, and extends from the western tip of the peninsula through the high-temperature geothermal fields of three westernmost volcanic systems of the Western Volcanic Zone and towards the Hengill triple junction, where it merges with the South Iceland Seismic Zone. The seismic zone transects the Svartsengi geothermal field, as well as the Eldvörp geothermal field 7 km to the west.

Seismicity along the Reykjanes peninsula was low in 1993 and mostly confined to small swarms in the Krísuvík region and beneath the mountain Fagradalsfjall. No detectable microearthquakes occurred within the Svartsengi geothermal field. The fluid injection thus did not induce earthquakes.

A total of 217555 tons of water was injected into borehole H-6 from July 19th through December, at a maximum rate of 30 l/s. The borehole accepted the injection fluid under gravity and no pumping was required. Foreign injection tests indicate that the wellhead pressure needs to exceed 20-40 bars in order to induce seismicity (Sherburn et al., 1990; Davis and Frolich, 1993). Applying the same criteria to Svartsengi, we conclude that the injection pressure into the Svartsengi geothermal field was far below the pressure needed to induce seismicity. Another factor which affects the likelihood of induced seismicity is fluid drawdown caused by the exploitation. Drawdown decreases the pore pressure, i.e. increases rock strength, which again reduces microseismic activity. The drawdown of 20 bars in the Svartsengi field and 10 bars in the adjacent Eldvrp field, since the start of production in 1976, may thus reduce the microseismic activity temporarily in these geothermal fields, or until the tectonic stress reaches the new fracture limit.

Seismograms from earthquakes occurring in Krísuvík and Reykjanes exhibit a large variety in compressional and shear wave attenuation. This, along with large variations in the seismic coda, reflects the heterogeneous crustal structure within the Western Volcanic Zone. Intense shear wave attenuation was observed in vicinity of the Eldvörp geothermal field, which is most likely caused by absorption of energy as the shear waves pass through a shallow (3-5 km deep) crustal magma chamber beneath this area. However, further analysis is needed in order to confirm this interpretation.

Crustal structure of the Svartsengi region deviates slightly from the regional structure of the Reykjanes peninsula as determined from the data of Pálmason (1971). Our refraction measurements show that compressional velocity in surface layers is as low as 1.1 km/s above the ground water table, 3.2 km/s below the ground water table, i.e. at a depth of 200 m, and 5.5 km/s at 3 km depth. Calculated hypocenters of dynamite detonations in two

boreholes within the Svartsengi geothermal field indicate that microearthquakes originating within the field can be located with an uncertainty of about 200 m in depth and about 100 m in horizontal directions, using six seismographs. Relative location techniques will provide an order of magnitude better accuracy in hypocentral determinations.

The frequency content of seismic noise is highly variable around the Svartsengi region. Seismic noise with frequency between 8-20 Hz dominates around the geothermal boreholes (borehole noise) whereas 4-6 Hz noise seems to be related to geothermal processes, as it is confined to the geothermal region. Seismic noise with frequency between 16-24 Hz was recorded at stations located close to NE-SW striking faults and open fissures of the Reykjanes fissure swarm. The 16-24 Hz noise is most likely caused by groundwater flow along the fissures. Due to the high amplitude of the borehole noise a permanent seismic station will have to be located outside the borehole region. Four suitable sites for future seismic stations were found within 2 km distance from the Svartsengi power plant.

## VIÐAUKI A. Skjálftamælistöðvar

<b>Færanlegir skjálftamælar við Svartsengi</b>		breidd	lengd	hæð
Vogasveimur,	vsm	63 55.19	22 28.61	15
Siglubergsháls,	sbh	63 51.99	22 19.39	85
Gerðuvallabrunnar,	gvb	63 49.87	22 28.49	07
Keflavíkurleiðsla,	kvl	63 53.41	22 26.68	32
Arnarsetur,	arn	63 54.32	22 24.61	75
Eldvarpaleið,	evl	63 52.28	22 28.05	20
Náma, Svartengisfelli,	nam	63 52.73	22 25.18	25
Hraunjaðar við H-1,	jad	63 52.51	22 26.02	22
norðan Svartengisfells,	syl	63 53.14	22 24.91	50
Grindavíkurleiðsla,	gvl	63 52.39	22 25.48	25
Útfall úr Bláa lóninu,	utf	63 52.71	22 26.55	27
Hola H-11,	h11	63 52.51	22 26.02	22
Hola-6,	h6	63 52.75	22 25.55	22
við virkjun,	utk	63 52.63	22 25.67	25
norðan vatnstanks,	tkn	63 53.23	22 25.51	45
Eldvörp,	evp	63 52.01	22 30.88	50
Þorbjörn,	thn	63 51.62	22 26.89	20
Melhóll,	mhl	63 51.64	22 24.77	40
Lyngrimi,	lrn	63 52.87	22 23.83	80
Fagradalsfjall,	fgr	63 52.81	22 19.40	75

<b>Bylgjubrotsmælingastöðvar á Eldvarpaleið</b>				
eld0		63 51.38	22 33.89	50
eld1		63 51.67	22 32.96	50
eld2		63 51.88	22 32.77	50
eld3		63 51.97	22 32.06	50
eld4		63 52.02	22 31.48	50
eld4a		63 52.03	22 31.09	55
eld5		63 52.01	22 30.88	55
eld6		63 51.98	22 30.24	45
eld7		63 51.99	22 29.68	40
eld8		63 52.07	22 29.13	30
eld9		63 52.21	22 28.48	25
eld10		63 52.28	22 28.05	20
eld11		63 52.37	22 27.29	20
eld12		63 52.50	22 26.75	20
eld13		63 52.63	22 26.25	20

<b>Skjálftamælistöðvar Veðurstofu Íslands á Reykjanesskaga og vestanverðu Suðurlandi</b>				
Krísuvík	kri	63 52.690	22 04.574	130
Þjarnastaðir	bja	63 56.773	21 18.172	58
Heiðarbær	hei	64 11.999	21 14.187	160
Sölvholt	sol	63 55.758	20 56.649	31

## VIÐAUKI B. Reiknuð staðsetning á skotum.

ERH og ERZ er staðsetningaróvissa í láréttu og lóðréttu plani. RMS er root-mean-square allra mælinganna og GAP er stærsta horn á milli upptaka og tveggja mælistöðva.

Skot í H-4		dagsetning		klst	sek	63°N52.81 22°V25.89		dýpi	rms	erh	erz	gap
93	7	15		20:00	0.09			0.40	0.05	0.14	0.16	80
stöð	fjarl	stefna	horn	s	( $t_m$ )	( $-t_r$ )	=frávik)					
h6	0.3	117	90	0.31	0.22	0.22	0.00					
utk	0.4	154	90	0.34	0.25	0.25	0.00					
utf	0.6	250	95	0.36	0.27	0.31	-0.04					
jad	0.6	191	95	0.30	0.21	0.31	-0.10					
nam	0.6	106	95	0.39	0.30	0.31	-0.01					
tkn	0.8	21	100	0.40	0.31	0.36	-0.05					
gvl	0.9	158	101	0.41	0.32	0.38	-0.06					
syl	0.9	54	102	0.43	0.34	0.40	-0.06					
kvl	1.2	330	106	0.59	0.50	0.49	0.01					
lrm	1.6	87	111	0.66	0.57	0.60	-0.03					
evl	2.0	241	65	0.75	0.66	0.70	-0.04					
mhl	2.4	157	62	0.89	0.80	0.78	0.02					
thn	2.4	201	62	0.80	0.71	0.79	-0.08					
arn	3.0	20	58	0.96	0.87	0.94	-0.07					
evp	4.3	250	52	1.37	1.28	1.26	0.02					
vsm	4.9	334	50	1.51	1.42	1.38	0.04					
gvb	5.8	202	48	1.69	1.60	1.58	0.02					

Skot í HSK-1		dagsetning		klst	s	lengd	breidd	dýpi	rms	erh	erz	gap
93	7	15		21:00	0.07	63°N53.41	22°V25.52	0.19	0.06	0.19	0.20	94
stöð	fjarl	stefna	horn	s	( $t_m$ )	( $-t_r$ )	=frávik)					
tkn	0.3	179	90	0.29	0.22	0.19	0.03					
syl	0.8	137	90	0.35	0.28	0.33	-0.05					
kvl	0.9	269	90	0.44	0.37	0.40	-0.03					
h6	1.2	182	101	0.48	0.41	0.49	-0.08					
nam	1.3	167	102	0.55	0.48	0.51	-0.03					
utk	1.5	185	72	0.61	0.54	0.56	-0.02					
utf	1.6	213	70	0.60	0.53	0.59	-0.06					
lrm	1.7	126	67	0.74	0.67	0.63	0.04					
jad	1.8	194	66	0.63	0.56	0.65	-0.09					
arn	1.9	23	65	0.64	0.57	0.68	-0.11					
gvl	1.9	179	64	0.65	0.58	0.69	-0.11					
evl	3.0	225	50	0.95	0.88	0.98	-0.10					
mhl	3.4	169	48	1.15	1.08	1.07	0.01					
thn	3.5	199	47	1.18	1.11	1.12	-0.01					
vsm	4.2	323	45	1.37	1.30	1.26	0.04					
evp	5.1	240	42	1.62	1.55	1.47	0.08					
sbh	5.7	117	41	1.69	1.62	1.59	0.03					
gvb	7.0	201	39	2.01	1.94	1.88	0.06					