



# **Veðurstofa Íslands Greinargerð**

**Sigurður Th. Rögnvaldsson, Þóra Árnadóttir, Kristján Ágústsson, Þórunn Skaftadóttir, Gunnar B. Guðmundsson, Grímur Björnsson, Kristín Vogfjörð, Ragnar Stefánsson, Reynir Böðvarsson, Ragnar Slunga, Steinunn S. Jakobsdóttir, Bergþóra Þorbjarnardóttir, Pálmi Erlendsson, Bergur H. Bergsson, Sturla Ragnarsson, Páll Halldórsson, Barði Þorkelsson, Margrét Ásgeirsdóttir**

## **Skjálftahrina í Ölfusi í nóvember 1998**

# Skjálftahrina í Ölfusi í nóvember 1998

Sigurður Th. Rögnvaldsson, Þóra Árnadóttir, Kristján Ágústsson,  
Þórunn Skaftadóttir, Gunnar B. Guðmundsson, Grímur Björnsson,\* Kristín Vogfjörð\*,  
Ragnar Stefánsson, Reynir Böðvarsson,† Ragnar Slunga†, Steinunn S. Jakobsdóttir,  
Bergþóra Þorbjarnardóttir, Pálmi Erlendsson, Bergur H. Bergsson,  
Sturla Ragnarsson, Páll Halldórsson, Barði Þorkelsson og Margrét Ásgeirsdóttir

---

\*Orkustofnun

†Uppsala Háskóla

## **EFNISYFIRLIT**

<b>1</b>	<b>INNGANGUR</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>SKJÁLFTAMÆLAKERFI VEÐURSTOFU ÍSLANDS</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>AÐDRAGANDI HRINUNNAR OG FRAMVINDA</b>	<b>6</b>
3.1	Forvirkni . . . . .	6
3.2	Hrinan . . . . .	7
3.3	Frammistaða SIL kerfisins . . . . .	10
<b>4</b>	<b>STAÐSETNINGAR OG BROTLAUSNIR STÆRSTU SKJÁLFTANNA Í HRINUNNI</b>	<b>11</b>
<b>5</b>	<b>ÁHRIF JARÐSKJÁLFTANNA Á HEITAVATNSHOLUR</b>	<b>13</b>
<b>6</b>	<b>LANDMÆLINGAR Í KJÖLFAR JARÐSKJÁLFTAHRINUNNAR</b>	<b>14</b>
<b>7</b>	<b>NÍÐURSTÖÐUR</b>	<b>15</b>
<b>8</b>	<b>ENGLISH SUMMARY</b>	<b>16</b>
<b>9</b>	<b>HEIMILDIR</b>	<b>19</b>

## 1 INNGANGUR

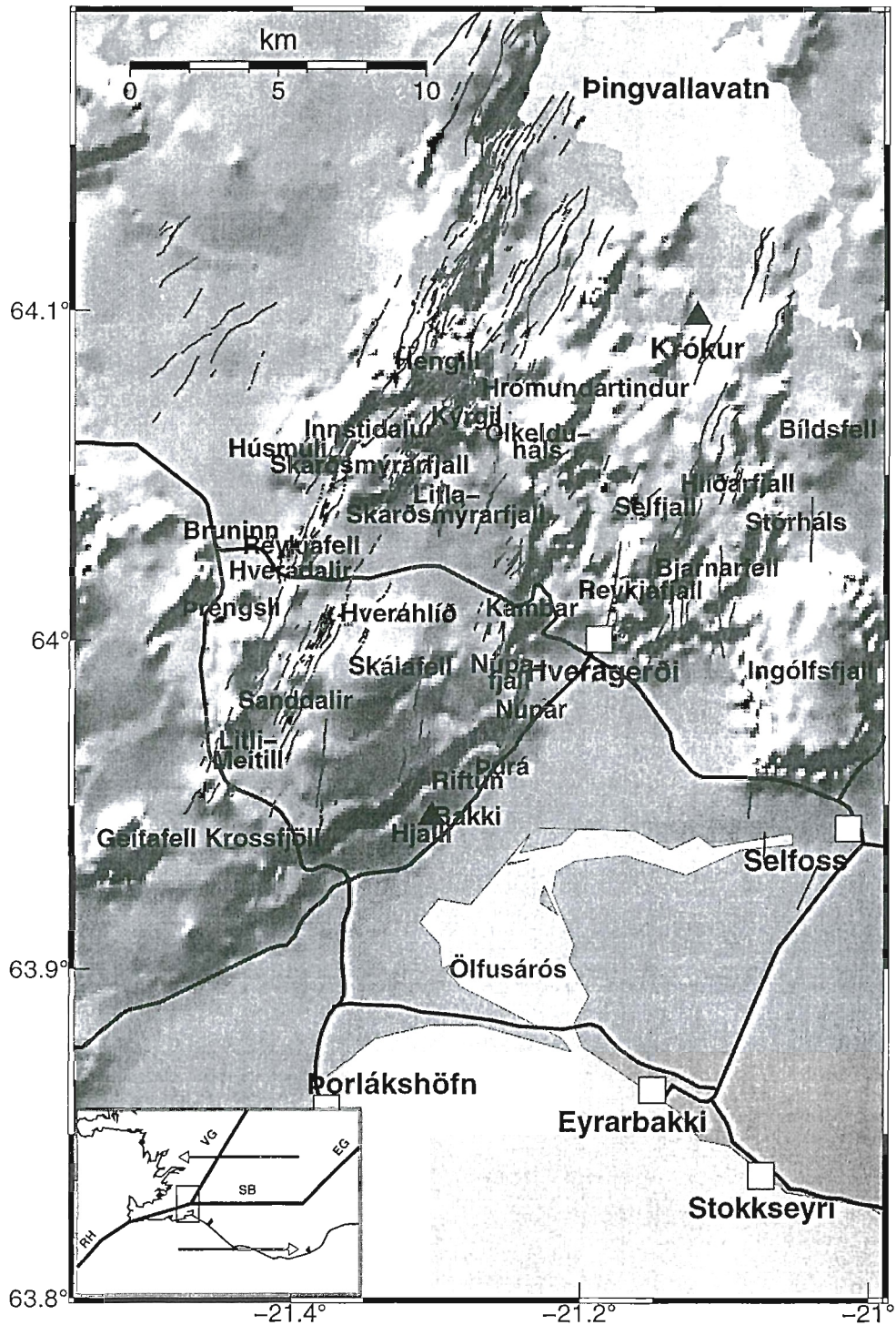
Föstudaginn 13. nóvember 1998, kl. 10:38, varð skjálfti af stærðinni 5.0 á Richter kvarða nærri Hjalla í Ölfusi. Í kjölfarið fylgdu margir smærri skjálftar í nágrenninu, sá stærsti 4.7 þann 14. nóvember kl. 14:23. Virkni hélst jöfn og mikil næstu daga, en 16. nóvember dró verulega úr henni. Hér eru teknar saman niðurstöður fyrstu athugana á hrinu þessari, byggðar á gögnum úr skjálftamælaneti Veðurstofu Íslands. Þar eð stutt er um liðið frá því skjálftarnir urðu er úrvinnslu þeirra hvergi nærri lokið. Í þessum rituðum orðum er þó búið að yfirfara staðsetningar stærstu skjálftanna og reikna brotlausnir þeirra. Aðrar upplýsingar um hrinuna byggja enn að mestu á sjálfvirkri úrvinnslu skjálftagagnanna. Enda þótt sú úrvinnsla sé ekki án hnökra hefur reynslan sýnt að hún gefur dágóða mynd af megindráttum virkninnar.

Hjallahverfið í Ölfusi og bæirnir til norðausturs frá því að Núpum eru á svæði þar sem jarðskjálftabelti Suðurlands mætir jarðskjálftasvæðinu sem liggur út eftir Reykjanesi (mynd 1). Þessir bæir eru einnig í vestra gosbelti Íslands sem nær frá Langjökli og liggur um Þingvelli, Hengil og allt suður í Selvog. Í Ölfusi mætast því þrjú svæði þar sem eiga sér stað skorpuhreyfingar og eldvirkni.

Yfirborð svæðisins er að mestu þakið hraunum frá síðjökultíma og nútíma. Móbergsfjöll og hryggir frá jökulskeiðum standa upp úr hraununum. Elstu myndanirnar eru hraun í rótum Núpafjalls, en efri hluti þess er móberg. Svæðið austan Hjalla að Ölfusá er mýrlendi. Tvö sprungugos eru frá nútíma, 5500 ára og 2000 ára, og liggja sprungurnar nálægt hvor annarri frá Litla–Meitli og norður í Þingvallavatn. Þær eru meira en 20 km langar, en ekki samfelldar, því gosin hafa ekki náð upp í gegnum Hengil (Kristján Sæmundsson 1995). Algengasta sprungustefna er NNA–SSV (mynd 1) en það er stefna sprungusveimsins sem kenndur er við Hengil. Víða eru einnig N–S lægar sprungur og hafa margar slíkar verið kortlagðar í Núpafjalli og nokkrar í Skálafelli (Kristján Sæmundsson 1995).

Heimildir eru um að bæirnir á Hjalla og í nágrenni hafi fallið a.m.k. 6 sinnum af völdum jarðskjálfta frá landnámi til 1789 og tjón af þeirra völdum nokkru oft (Páll Halldórsson 1996). Miklir jarðskjálftar urðu í Ölfusi 1706 frá því í janúar og fram á vor og voru þeir líkast til á sömu slóðum og skjálftinn af stærðinni 4.7, 14. nóvember 1998. Stærsti skjálftinn í hrinunni 1706 varð 20. apríl. Upptök þess skjálfta eru talin liggja um Núpafjall og stærð hans er metin 6.0 á Richter kvarða. Í Setbergsannál er svohljóðandi lýsing af einum skjálftanum í þeirri hrinu: „Á skírdag, þegar fólk var á götum og sá til, hafði svo verið að sjá til Gnúpafjalls, sem logandi væri framan björgin, þar grjótið barðist saman. Ítem sprungu í sundur jarðfastir steinar á sléttlendi, og líka hrærðist grjót úr jörðu.“ Ekki varð manntjón í þessum skjálfta í Ölfusi (Páll Halldórsson 1996). Sumarið 1789 urðu miklar hræringar á Hengilssprungusveimnum. Land seig og skældist allt frá Þingvöllum í Selvog. Samfara hræringunum urðu miklir skjálftar og hús á Hjalla féllu. Mikil skjálftahrina gekk yfir Suðurland árið 1896. Þann 6. september varð skjálfti sem talinn er hafa átt upptök sín í Ölfusi og hefur stærð hans verið metin 6.0 á Richter kvarða. Hús í Hjallahverfi sköðuðust. Vitað er um tvo stóra skjálfta á Hengilssvæðinu á fyrri hluta þessarar aldar. Þann 9. október 1935 varð skjálfti sem metinn er 6 að stærð og átti hann upptök nálægt Stóra–Meitli. Þann 1. apríl 1955 varð skjálfti af stærðinni 5.5, u.p.b. 10 km norðan við Hveragerði (Páll Halldórsson 1996).

Frá miðju ári 1994 hefur verið mikil skjálftavirkni á Hengilssvæðinu. Hengilssvæðið er hér talið ná allt frá Þingvallavatni í norðri og suður í Ölfus, og frá Þrengslum í vestri og austur fyrir Ingólfsfjall. Skjálftum tók að fjölga þar í júní 1994 og náði virknin hámarki í ágúst, en þá mældust um 5000 skjálftar. Þungamiðja hræringanna hefur oftast verið nærri Ölkelduhálsi.



Mynd 1. Yfirlitskort af svæðinu þar sem skjálftahrinan í nóvember 1998 átti upptök sín. Helstu örnefni og bæir sem vísað er til í textanum eru sýnd á myndinni. Vegir eru táknaðir með svörtum línum en kortlögð misgengi með gráum línum (Kristján Sæmundsson 1995). Þríhyrningar tákna skjálftamæla Vedurstofunnar í Króki í Grafningi og að Bjarnastöðum í Ölfusi. Í vinstra horninu neðst er lega plötuskilanna á Suðvesturlandi sýnd í grófum dráttum. RH er Reykjaneshryggur, VG og EG eru vestra og eystra gosbeltið og SB er Suðurlandsbrotabeltið. Örvarnar tákna afstæða færslu um flekamótin, þ.e. svæðið norðan SB og vestan EG færirst til vesturs, en svæðið sunnan við SB og austan RH færirst í austur.





frá sama atburðinum. Þegar þrír eða fleiri slíkir fasar finnast er reynt að staðsetja upptök skjálfta sem þeim hefur valdið og bæta við fleiri fösum sem átt gætu við atburðinn. Þannig fæst nokkurs konar „skjálftalisti“, þ.e. listi yfir staðsetta atburði sem hugsanlega eru jarðskjálftar. Listinn inniheldur að sjálfsögðu fjölmarga falska skjálfta og því er hverjum atburði gefin einkunn eða gæðastuðull, sem er mat á líkum á því að um raunverulegan jarðskjálfta sé að ræða (Reynir Böðvarsson o.fl. 1996). Ef gæði atburðar fara yfir fyrirfram skilgreind mörk er hann talinn raunverulegur jarðskjálfti og beiðni send til útstöðva um að senda bylgjugögn fyrir skjálftann til miðstöðvar. Sótt eru bylgjugögn frá öllum stöðvum sem greindu atburðinn, auk annarra stöðva sem eru svo nærri áætluðum upptökum skjálftans að gögn þaðan geti nýst við úrvinnsluna. Yfirleitt eru sóttar 15–40 s frá hverri stöð, en lengd tímaraðarinnar fer eftir fjarlægð stöðvar frá upptökum skjálftans.

Ýmislegt annað en jarðskjálftar, s.s. traðk búfenaðar, umferð, frostbrestir og bilanir í tækjum, geta valdið útslagi á einstökum jarðskjálftamælum. Því eru sjálfvirku staðsetningarnar yfirfarnar af jarðskjálftafræðingum Veðurstofunnar, tímaaflestrar lagfærðir ef þurfa þykir og bætt við aflestrum ef hægt er. Þá eru staðsetningar reiknaðar að nýju, brotlausn skjálftans og stærð. Lætur nærri að vanur maður geti með þessu móti staðsett 100–300 jarðskjálfta á dag. Þegar virkni er mikil, líkt og í nóvemberhrinunni, skráir kerfið mörg þúsund skjálfta á sólarhring. Við þær aðstæður er vonlaust að ætla sér að yfirfara hvern einstakan atburð jafnharðan og verður því algerlega að treysta á niðurstöður sjálfvirku úrvinnslunnar meðan mest gengur á.

Þegar jarðskjálftahrinur eiga sér stað, þ.e. fjöldi skjálfta verður á tiltölulega takmörkuðu svæði á skömmum tíma er bylgjuhreyfing einstakra atburða oft svipuð og tímamun þeirra má ákvarða mjög nákvæmlega með víxlfylgnireikningum (e. *cross-correlation*). Ef gert er ráð fyrir að innbyrðis tímamunur á mælistöðum fyrir mismunandi skjálfta stafi af mun í staðsetningu atburðanna má reikna innbyrðis staðsetningu þeirra mjög nákvæmlega. Skekkja í afstæðri staðsetningu tveggja skjálfta getur verið minni en 10 m. Sú aðferð sem notuð er á Veðurstofunni notar hvorutveggja algildan tíma og mælingar á tímamun og bætir því jafnframt algilda staðsetningu hrinunnar (Slunga o.fl. 1995). Jarðskjálftar sem staðsettir hafa verið á þennan hátt falla oft á plön í jarðskorpunni og þá er líklegt að þau séu virkir sprungufletir. Slík plön má síðan bera saman við þau plön sem finnast í brotlausnunum og þannig kortleggja virkar sprungur í skorpunni.

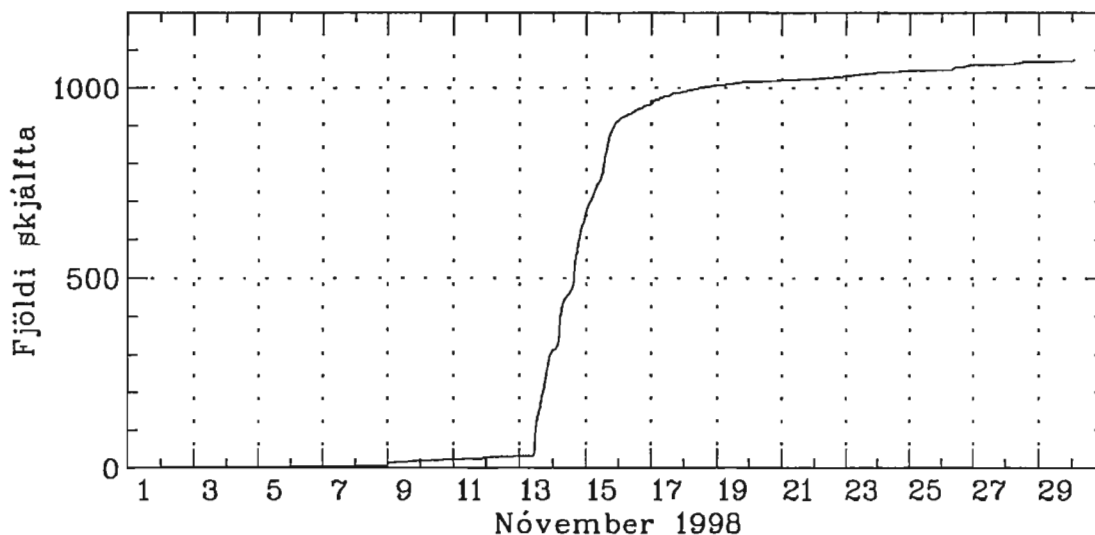
Einn þáttur SIL kerfisins er sjálfvirk vöktun á virkni og byggir vöktunin á sjálfvirkum staðsetningum jarðskjálfta. Á mínútu fresti eru metnar ýmsar stærðir sem lýsa virkninni og fari þær yfir fyrirfram skilgreind mörk er gefin viðvörðun. Landinu er skipt í nokkur allstór svæði, en vegna hrinanna í Ölfusi voru sett upp nokkur smærri viðvörðunarsvæði til að geta fylgst með finni dráttum virkninnar og breytingum á henni.

### 3 AÐDRAGANDI HRINUNNAR OG FRAMVINDA

#### 3.1 Forvirkni

Ef athugaður er fjöldi skjálfta í Ölfusi í nóvembermánuði 1998 (mynd 2) má merkja nokkra aukningu í virkni eftir 8. nóvember. Skjálftarnir urðu flestir í tveim smáhrinum. Sú fyrri varð austur af Geitafelli þann 9. en hin síðari skammt vestur af Bjarnastöðum 12.–13. nóvember, á sömu slóðum og stóri skjálftinn föstudaginn 13. Slíkar smáhrinur eru þó engan veginn óalgengar í Ölfusi og því varasamt að túlka þær sem forboða stærri atburða.

Frá miðnætti aðfaranótt 12. nóvember fram til kl. 10:30 þann 13. mældust um 80 smáskjálftar og einn skjálfti af stærðinni 3.3 í grennd við upptök stóra skjálftans kl. 10:38. Reiknaðar



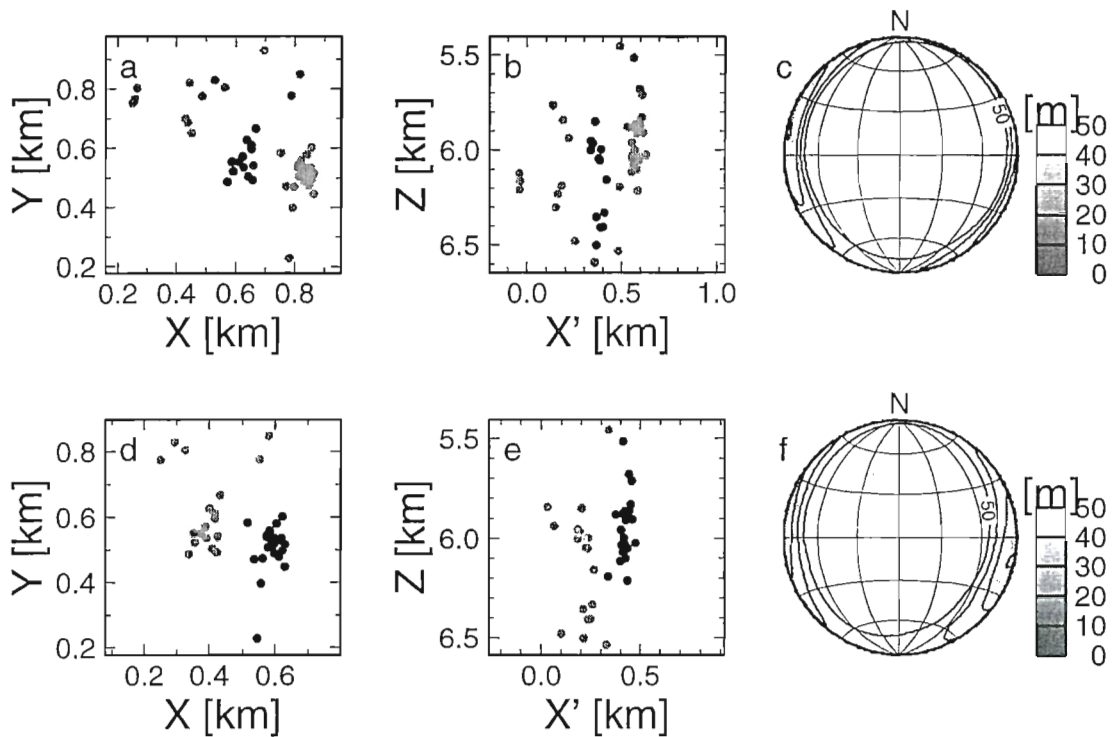
Mynd 2. Uppsafnaður fjöldi skjálfta í Ölfusi í nóvember 1998 sem fall af tíma. Aðeins eru taldir þeir skjálftar sem hlotið hafa hærrí einkunn en 89.5 í sjálfvirku úrvinnslunni og eru innan svæðis sem afmarkast af 63.9° og 64.0°N og 21.15° og 21.5°V. Lauslega áætlað er þetta um fimmtungur þeirra skjálfta sem kerfið skráði á tímabilinu. Skjálftum tók að fjölga á svæðinu eftir 8. nóvember en hrina hófst með stórum skjálfta kl. 10:38 þann 13. Mikið dró úr virkninni 15. og 16. nóvember.

hafa verið nákvæmar innbyrðis staðsetningar 59 þessara skjálfta og eru niðurstöðurnar sýndar á mynd 3. Heildardreifing skjálftanna eftir endurstaðsetningu getur bent til að þeir hafi orðið á misgengi með austlæga eða austsuðaustlæga stefnu. Ef reiknað er besta plan gegnum alla þyrpinguna reynist meðalfjarlægð skjálftanna frá því vera um 65 m. Þar sem innbyrðis staðsetningar flestra skjálftanna eru ákvarðaðar með innan við 10 m óvissu, en þeir falla þó ekki betur að besta plani en þetta, er ósennilegt að þeir hafi allir orðið á sama fletinum. Því voru valdar úr tvær undirþyrpingar, sú fyrri með 13 skjálftum en hin síðari með 24, og reiknuð bestu plön gegnum þær (mynd 3). Bæði plönin eru nærri lóðrétt og hafa strik nálægt norðri (13° og 193°). Meðalfjarlægð skjálfta í hvorri þyrpingu frá besta plani gegnum hana er um 19 m í báðum tilfellum (myndir 3c og 3f). Þetta túlkum við sem vísbendingu um að skjálftarnir sem urðu á upptakasvæði stóra skjálftans síðustu klukkustundirnar áður en hann reið yfir hafi orðið vegna hreyfinga á misgengjum með N-S stefnu.

### 3.2 Hrinan

Hrinan hófst eftir nokkra forskjálfta með skjálfta af stærðinni 5.0, kl. 10:38:34, föstudaginn 13. nóvember. Upptök skjálftans voru á um 5 km dýpi um 2 km vestur af Bjarnastöðum og eru merkt með grænum hring á mynd 4a. Fram til hádegis urðu hundruð smærri skjálfta í grenndinni, flestir á um 2 km breiðu (N-S) svæði sem náði frá upptökum stóra skjálftans og 4–5 km til austurs. Skjálftasvæðið lengdist smám saman, einkum til vesturs. Mynd 4 sýnir sjálfvirkt ákvarðaðar staðsetningar skjálfta í Ölfusi dagana 13.–15. nóvember. Aðeins eru teknir með skjálftar sem hlotið hafa háa einkunn (gæði > 60) í sjálfvirku úrvinnslunni. Þetta eru að öðru jöfnu stærstu og best staðsettu skjálftarnir. Hver rammi á mynd 4 spannar 12 klukkustundir og er staðsetning jarðskjálfta sem urðu á því tímabili merkt á kortinu. Litur hringsins segir til um hvenær tímabilsins skjálftinn varð, þannig að skjálftar frá upphafi hvers tímabils eru bláir eða bláleitir en skjálftar sem urðu undir lok hvers tímabils eru rauðir. Á miðnætti aðfaranótt laugardagsins 14.

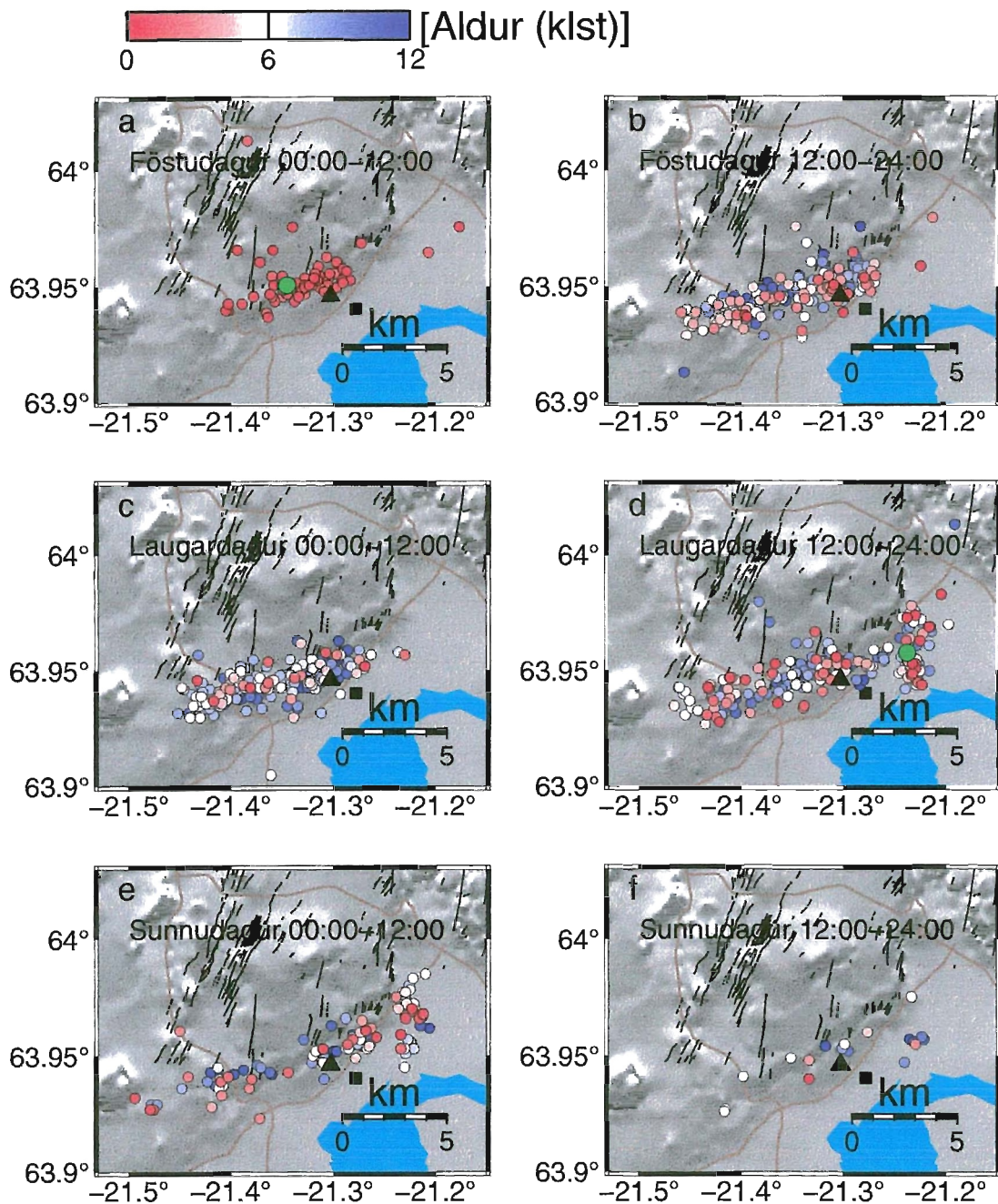




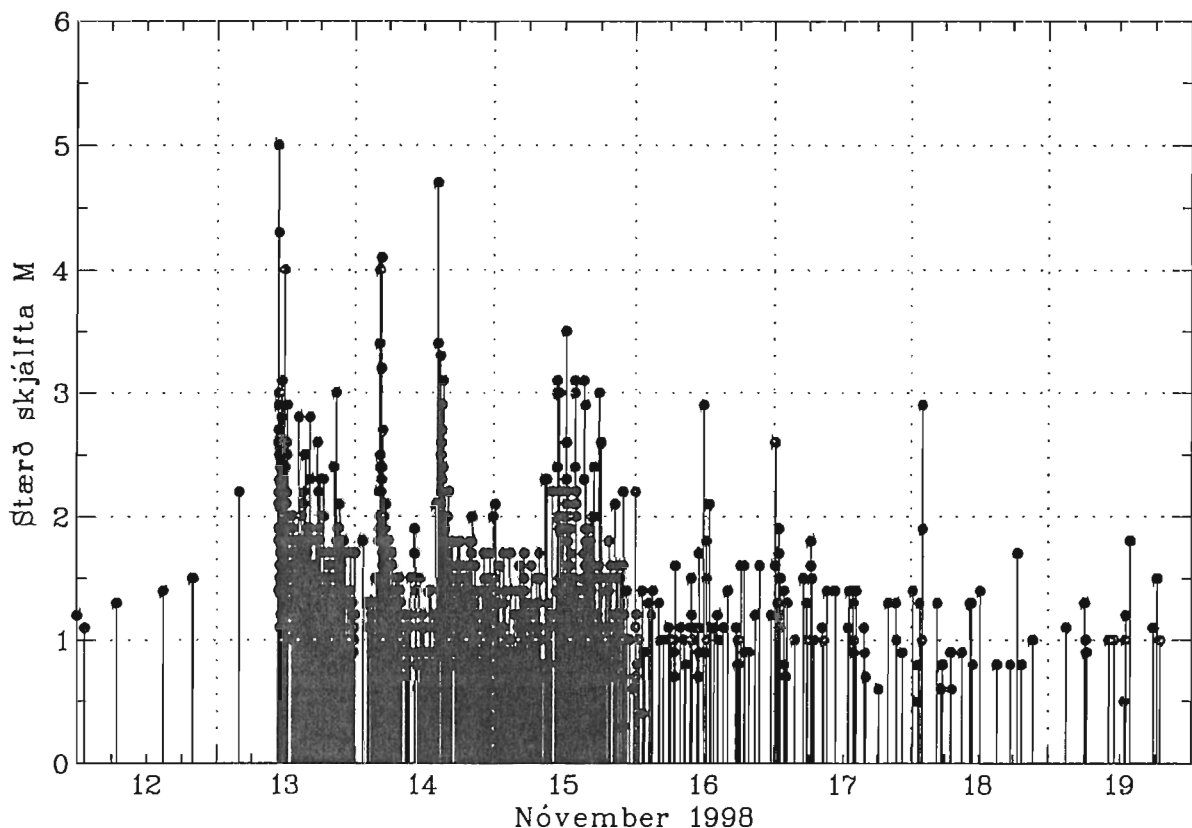
Mynd 3. Innbyrðis staðsetningar skjálfta sem urðu síðustu 30 klukkustundirnar fyrir stóra skjálftann 13. nóvember 1998. Dökkir hringir tákna skjálfta sem notaðir voru til að ákvarða stefnu misgengja sem þeir urðu á. Myndir a) og d) sýna staðsetningar skjálftanna í láréttum fleti, X-ás vex í austur og Y-ás í norður. Myndir b) og e) eru lóðrétt snið þvert á strik besta plans gegnum hvora þyrpingu fyrir sig, Z er dýpi og X'-ás er láréttur og hornréttur á strikstefnuna. Myndir c) og f) sýna póla eða þvervektora allra plana gegnum þyrpingarnar tvær, þannig að meðalfjarlægð skjálftanna frá planinu er innan við 50 m. Pólarnir eru teiknaðir á neðri hálfkúlu þannig að póll lóðrétt N-S plans er láréttur og sker hálfkúluna í austri eða vestri. Halli beggja plananna er vel skorðaður en strikið síður. Þó falla N-S plön augljóslega betur að staðsetningunum en A-V fletir. Staðsetning misgengisflatanna tveggja er sýnd á mynd 6.

nóvember náði virknin yfir 2–3 km breitt og 10 km langt svæði frá Krossfjöllum í vestri og austur að Riftúni (mynd 4b). Undir hádegi á laugardegi varð nokkur breyting á skjálftamynstrinu, en þá tók að skjálfa á N-S línu austur af svæðinu sem mest hafði hreyfst fram að því. Sú lína nær frá Ölfusá í suðri og norður að þjóðveginum nærri Núpum (mynd 4d) og er í beinu framhaldi af jarðskjálftasprungu í Núpafjalli. Núpasprungan nær að öllum líkindum a.m.k. 2 km norður fyrir þjóðveginn í Kömbum. Næst stærsti skjálftinn í hrinunni, 4.7 á Richter kvarða, varð kl. 14:24:07 laugardaginn 14. og voru upptök hans á ríflega þriggja kílómetra dýpi skammt austur af bænum á Þurá í beinu framhaldi af Núpasprungunni. Staðsetning skjálftans er merkt með grænum hring á mynd 4d. Skjálftum tók heldur að fækka sunnudaginn 15. nóvember (myndir 2 og 5), en þó urðu skjálftar víða allt frá Geitafelli austur að Núpasprungunni (myndir 4e og 4f). Eftir 15. nóvember róaðist svæðið mjög og í kringum 18. var virknin orðin svipuð og dagana fyrir hrinuna (mynd 2).

Ef stærð skjálftanna er teiknuð sem fall af tíma (mynd 5) sést að allir stærstu atburðir hrinunnar ( $m \geq 4$ ) urðu fyrstu 30 klukkustundirnar sem hún stóð. Stærð forskjálftanna er nokkuð vanmetin í sjálfvirku úrvinnslunni.



Mynd 4. Staðsetning vel ákvarðaðra skjálfta í Ölfusi föstudaginn 13. til sunnudagsins 15. nóvember 1998, skv. niðurstöðum sjálfvirkar úrvinnslu. Hver mynd spannar 12 klukkustundir og sýnir staðsetningar skjálfta sem urðu á því tímabili. Litur hringjanna fer eftir því hvenær innan tímabilsins skjálftinn varð. Bláir hringir eru skjálftar sem urðu í upphafi hvers tímabils, hvítir hringir eru skjálftar sem urðu um mitt tímabilið og skjálftar sem urðu undir lok hvers tímabils eru rauðir. Stærstu skjálftarnir í hrinunni eru merktir með grænum hringjum. Svartur þríhyrningur sýnir staðsetningu skjálftamælisins á Bjarnastöðum. Jarðskjálftasprungur sem kortlagðar hafa verið á yfirborði eru teiknaðar með svörtum lit, vegir eru brúnir. Vinnslusvæði Hitaveitu Þorlákshafnar er merkt með svörtum ferningi.



Mynd 5. Stærðir skjálfta í Ölfusi á tímabilinu 13.–20. nóvember 1998. Valdir hafa verið úr vel staðsettir skjálftar (gæði > 80) úr sjálfvirkri úrvinnslu SIL kerfisins. Stærstu skjálftarnir voru þann 13. nóvember, kl. 10:38, 5.0 stig og þann 14. nóvember, kl. 14:24, 4.7 stig. Fyrstu 2 dagana í hrinunni í Ölfusi mældust a.m.k. 6 skjálftar að stærð 4 eða stærri.

### 3.3 Frammistaða SIL kerfisins

Hrina sem þessi, þegar staðsetja þarf allt að nokkra skjálfta á mínútu, er mikil áraun á SIL kerfið og þá koma villur og veikir hlekkir í ljós. Einnig þarf að fylgjast með að diskar fyllist ekki og álagið á gagnanetið (X.25) er þó nokkurt. Nokkrar villur komu í ljós og hafa flestar verið lagfærðar, en aðrar krefjast meiri aðgerða. Að kvöldi 12. nóvember fraus að hluta til hugbúnaður sem tekur á móti fasaskeytum frá stöðvunum, svo aðeins helmingur stöðvanna sendi upplýsingar til miðstöðvar. Þar sem tölvan sjálf var ekki sambandslaus, uppgötvaðist þetta ekki fyrr en næsta morgun. Endurkeyrslu staðsetninga á skjálftum næturinnar var þó lokið áður en stóri skjálftinn reið yfir. Enn er ekki vitað hvað olli trufluninni, en móttökuvélarnar eru gamlar með gömlu stýrikerfi. Í undirbúningi er að skipta þeim út fyrir nýjar.

Í nokkurn tíma fyrir hrinuna hafði verið unnið að því að þjappa betur bylgjugögnum fyrir flutning og geymslu. Var það skref stigið til fulls eftir að hrinan hófst. Það bæði minnkar álag á gagnanetið og þörf á diskarými og auðveldar þannig til muna eftirlit með kerfinu í hrinum.

Um klukkan 20:50 þann 13. nóvember bilaði skjálftamælirinn að Bjarnastöðum. Sækja þurfti tækið og var viðgerð ekki lokið fyrr en um hádegi 15. nóvember. Mælirinn var aftur kominn í

gang um klukkan 14:30 sama dag. Þetta var sérlega bagalegt þar eð Bjarnastaðir er sú mælistöð sem næst var skjálftasvæðinu og því mjög mikilvæg við að ákvarða staðsetningar skjálftanna. Þann tíma sem mælirinn var óvirkur er því meiri óvissa í staðsetningum en ella. Þetta á einkum við ákvörðun á dýpi skjálftanna.

Meðan á hrinunni stóð birti Veðurstofan upplýsingar um framvindu hennar á vefsíðum sínum. Birtar voru niðurstöður úrvinnslu jafnharðan og henni var lokið, s.s. staðsetningar stærstu skjálftanna og brotlausnir þeirra, upplýsingar um fjölda skjálfta o.fl. Einnig var sett upp vefsíða með korti sem sýndi sjálfvirkt ákvarðaðar staðsetningar skjálfta í Ölfusi og var það uppfært á 30 mínútna fresti. Um 700 manns skoðuðu síður tengdar Ölfushrinunni dagana 13.–20. nóvember. Í ljósi þessa þykir rétt að halda áfram að birta niðurstöður sjálfvirku úrvinnslunnar með svipuðum hætti. Til að byrja með er þó aðeins birt kort yfir Hengilssvæðið (þar með talið Ölfus) og sýndar staðsetningar skjálfta sem þar hafa orðið síðastliðnar 48 klukkustundir. Myndin er nú uppfærð á 10 mínútna fresti. Slóðin er <http://www.vedur.is/ja>.

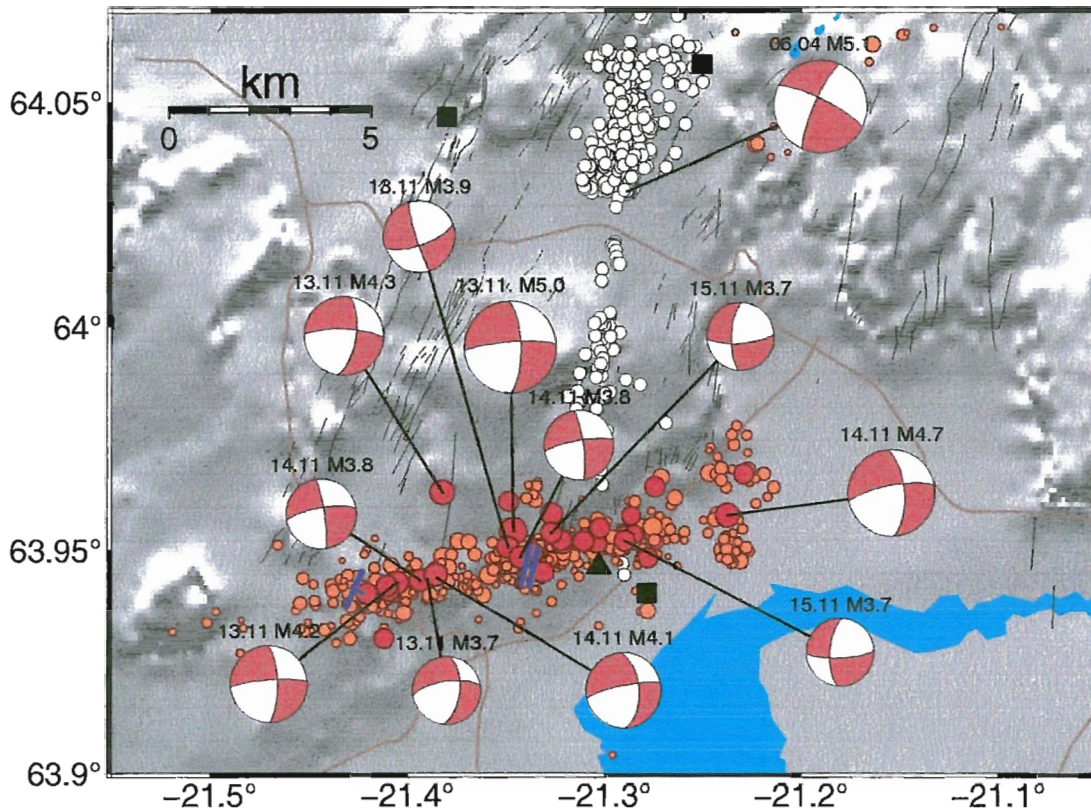
## 4 STAÐSETNINGAR OG BROTLAUSNIR STÆRSTU SKJÁLFTANNA Í HRINUNNI

Þegar þetta er ritað hafa staðsetningar um 1100 skjálfta í hrinunni verið yfirfarnar. Flestir skjálftanna urðu á 6–8 km dýpi. Þeir skjálftar sem búið er að yfirfara og eru staðsettir með innan við  $\pm 1$  km óvissu í láréttar stefnur og innan við  $\pm 2$  km óvissu í dýpi eru sýndir á mynd 6. Dreifing þessara skjálfta er svipuð og fram kemur í sjálfvirku staðsetningunum (mynd 4). Skjálftar stærri en 3.5 á Richter kvarða eru táknaðir með rauðum hringjum.

Á mynd 6 eru einnig sýndar brotlausnir 11 stærstu skjálftanna. Með brotlausn er átt við ákvörðun á legu brotflatar sem hreyfing verður á í jarðskjálfta og stefnu færslunnar á fletinum. Brotlausnin gefur einnig vissar upplýsingar um það spennusvið sem veldur skjálftanum. Auk fyrstu hreyfistefnu P bylgna gefa sveifluvíddir P og S bylgna upplýsingar um brotahreyfinguna í skjálftaupptökunum og eru þær notaðar til að skorða brotlausnirnar frekar (Slunga 1981; Sigurður Th. Rögnvaldsson og Slunga 1993). Við útreikning brotlausnanna er leitað kerfisbundið að þeirri samsetningu striks, halla og færslustefnu misgengisins sem best fellur að mældum gildum á sveifluvídd P og S bylgna og stefnu fyrsta útslags P bylgna. Fyrir hvern skjálfta eru athugaðar yfir 40000 lausnir og reiknað hversu vel þær falla að mældri sveifluvídd og fyrstu hreyfistefnu skjálftans á hverri stöð. Besta lausnin er sú sem gefur minnstan mun reiknaðra og mældra gilda. Fyrir stóru skjálftana á mynd 6 eru brotlausnirnar vel skorðaðar, þ.e. viðunandi lausnir eru tiltölulega fáar fyrir hvern skjálfta og allar svipaðar bestu lausninni. Í flestum tilfellum gefa innan við 1% af þeim 40000 lausnum sem prófaðar eru viðunandi nálgun við mæld gildi. Af samhverfuástæðum er ekki hægt að greina milli misgengisflatarins og flatar sem er hornréttur á færslustefnunna í misgengisfletinum. Brotlausn jarðskjálfta er því aldrei einræð (*e. unique*). Brotlausn skjálfta sem verður við hægri handar sniðgengishreyfingu á N-S fleti er t.d. nákvæmlega eins og hefði skjálftinn orðið við vinstri handar sniðgengishreyfingu á A-V fleti. Því þarf að nota aðrar aðferðir til að greina milli misgengisflatarins og aukaflatarins (*e. auxiliary plane*).

Stærsti skjálftinn í hrinunni var 5.0 á Richter kvarða að stærð og voru upptökin skammt vestan við Hjallahverfi í Ölfusi, á 63.954°N og 21.346°V og 5.3 km dýpi. Áætluð óvissa er um 450 m í N-S stefnu, 250 m í A-V og 500 m í dýpi. Skjálftinn hefur aðeins verið staðsettur með hefðbundnum aðferðum, en athugun á aukafösum skjálftans, þ.e. bylgjum sem endurkastast hafa af yfirborði á leið sinni að skjálftamæli, kemur heim og saman við þessar niðurstöður. Brotlausn skjálftans sýnir hægri handar sniðgengi á sprungu með stefnu 359° og halla 71° til austurs eða





Mynd 6. Brotlausnir stærstu skjálftanna 13.–15. nóvember 1998. Gulleitir hringir eru skjálftar sem staðsettir hafa verið með innan við  $\pm 1$  km láréttri óvissu og minna en  $\pm 2$  km óvissu í dýpi. Skjálftar stærri en 3.5 á Richter kvarða eru táknáðir með rauðum hringjum. Brotlausnirnar eru sýndar með jafnflatarvörpun (e. equal-area projection) á nedri hálfkúlu. Brotlausnirnar benda til sniðgengishreyfinga á N-S eða A-V sprungum. Einnig eru sýndar staðsetningar nokkur hundruð skjálfta úr júníhrinunni á Hellisheiði (ljósir hringir) og brotlausn stærsta skjálftans 4. júní (stærð 5.1). Virk misgengi sem kortlögð hafa verið með nákvæmum staðsetningum smáskjálfta (mynd 3) eru sýnd sem blá strik. Borholur eru merktar með svörtum ferningum.

vinstra sniðgengi á sprungu með strik  $266^\circ$  og halla  $81^\circ$  til norðurs. Enda þótt skjálftarnir sem fylgdu í kjölfar stóra skjálftans raði sér á aust-vestlæga línu (mynd 4) benda innbyrðis staðsetningar smáskjálfta sem urðu síðasta sólarhringinn fyrir megin skjálftann til hreyfinga á N-S sprungum (mynd 3). Norðlægar sprungur sjást einnig á yfirborði í grennd við upptökin. Því túlkum við brotlausnina sem vísbendingu um hægra sniðgengi á N-S sprungu, fremur en vinstra sniðgengi á A-V fleti. Áætlað þvermál brotflatarins er um 1060 m og heildarfærslan 17 cm. Í töflu 1 eru teknar saman brotlausnir stærstu skjálftanna. Einnig er gefið gróft mat á stærð brotflatar, spennufalli og færslu í upptökum, reiknað út frá horntíðni og mati á skjálftavægi (e. seismic moment) hvers atburðar.

Næststærsti skjálftinn, sem var 4.7 á Richter kvarða, átti upptök nærri Þurá á  $63.958^\circ\text{N}$  og  $21.237^\circ\text{V}$  og um 3 km dýpi. Óvissan er um 450 m í N-S, 300 m í A-V og 1700 m í dýpi. Mikil óvissa í mati á dýpi upptakanna stafar af því að skjálftamælirinn á Bjarnastöðum var óvirkur þegar skjálftinn varð. Athuganir á aukafösum skjálftans eru í samræmi við það að skjálftinn sé grynri en stærsti skjálftinn og líklega grynri en 4 km. Brotlausn sýnir hægra sniðgengi á sprungu með stefnu  $356^\circ$  og halla  $65^\circ$  til austurs eða vinstra sniðgengi á sprungu með strik  $259^\circ$

Dagsetn.	Breidd (N)	Lengd (V)	Stærð	$\phi$	$\delta$	$\lambda$	a [m]	$\Delta\sigma$ [MPa]	u [mm]
13111998	63.954	21.346	5.0	359	71	-170	1060	10	171
13111998	63.951	21.349	3.9	163	83	-159	232	32	117
13111998	63.963	21.338	4.3	9	65	-164	862	3	33
13111998	63.944	21.390	3.7	6	58	-153	726	1	7
13111998	63.944	21.408	4.2	359	71	-170	726	3	43
14111998	63.943	21.394	3.8	352	82	-165	726	1	11
14111998	63.944	21.385	4.1	356	55	-167	726	2	31
14111998	63.958	21.237	4.7	356	65	-164	474	18	166
14111998	63.948	21.343	3.8	352	79	-168	690	1	11
15111998	63.952	21.290	3.7	184	65	-165	690	1	10
15111998	63.953	21.327	3.7	183	68	-162	726	1	7

Tafla 1. *Dagsetningar, staðsetningar, stærðir og brotlausnir stærstu skjálftanna í hrinunni.  $\phi$  er strik misgengisins,  $\delta$  halli og  $\lambda$  færslustefna (e. rake), a er þvermál misgengisflatarins,  $\Delta\sigma$  spennulækkunin við skjálftann og u mesta færslan sem verður á brotflatinum við skjálftann.*

og halla 76° til norðurs. Sprungustefnur á yfirborði og dreifing eftirskjálfta (myndir 4d og 4e) styðja þá túlkun að brotflöturinn hafi norðlæga stefnu fremur en austlæga. Þvermál brotflatarins er um 470 m og færslan á honum tæpir 17 cm (tafla 1).

Hinir stóru skjálftarnir í hrinunni hafa svipaðar brotlausnir og þeir tveir stærstu (mynd 6). Dreifing skjálftanna og brotlausnir einar sér gætu bent til vinstri handar sniðgengishreyfinga á A-V misgengi, samsíða plötuskilunum í Ölfusi. Sprungustefnur á yfirborði og afstæðar staðsetningar smáskjálfta á svæðinu (Sigurður Th. Rögnvaldsson o.fl. 1998 og myndir 3 og 6) benda þó fremur til að skjálftarnir hafi orðið á mörgum N-S sprungum. Stærsti skjálftinn í júníhrinunni 1998 á Hellisheiði varð einnig við hægri handar sniðgengishreyfingu á N-S sprungu (mynd 6). Þetta eru samskonar brotahreyfingar og talið er að orðið hafi í stórum Suðurlandsskjálftum (Páll Einarsson og Jón Eiríksson 1982).

## 5 ÁHRIF JARÐSKJÁLFTANNA Á HEITAVATNSHOLUR

Stóri skjálftinn sem varð eftir hádegi laugardaginn 14. nóvember (stærð 4.7) átti upptök sín austur af vinnslusvæði Hitaveitu Þorlákshafnar á Bakka. Undir kvöld brá svo við að Hjallakróks-holan hætti að blása meðan Bakkaholan lækkaði um örfáar gráður í blásturshita. Fjarlægðin milli holnanna er aðeins um 200 m og er staðsetning þeirra sýnd sem einn ferningur á mynd 6. Svipaðar breytingar áttu sér stað eftir stóra skjálftann í júní 1998 á Hellisheiði. Breytingarnar voru þá í öfuga átt, þ.e. urðu til þess að blásturshiti beggja holna hækkaði.

Á þessari stundu er talið langlíklegast að sveiflurnar sem verða í blásturshitanum megi rekja beint til spennubreytinga í jarðskorpunni. Þannig varð sumarskjálftinn á Hellisheiði til þess að átak á bergið við Bakka jókst, átaksbreytingin kreisti holrýmið í berginu lítilega saman og þar með hækkaði þrýstingur í jarðhitakerfinu. Við það hækkaði suðuborð í holunum tveimur og þar með blásturshitinn. Skoðun vinnslueftirlitsgagna sýnir að þessi þrýstibreyting gekk til baka á 2–3 vikum.

Skjálftinn 14. nóvember verkaði á hinn veginn, þ.e. bergátakið lækkaði og þar með jókst holrýmið í berginu lítilega. Það útheimtir vatn og því lækkaði þrýstingur jarðhitakerfisins. Blásturshiti



Bakkaholunnar lækkaði en Hjallakróksholan dó. Eftir vettvangsskoðun starfsmanna Orkustofnunar á sunnudeginum 15. nóvember, var talið að áhrif þessa gengju til baka á 2–3 vikum, líkt og í skjálftanum í sumar. Gekk það eftir og er svæðið óðum að færast til fyrra horfs þegar þetta er ritað í byrjun desember 1998.

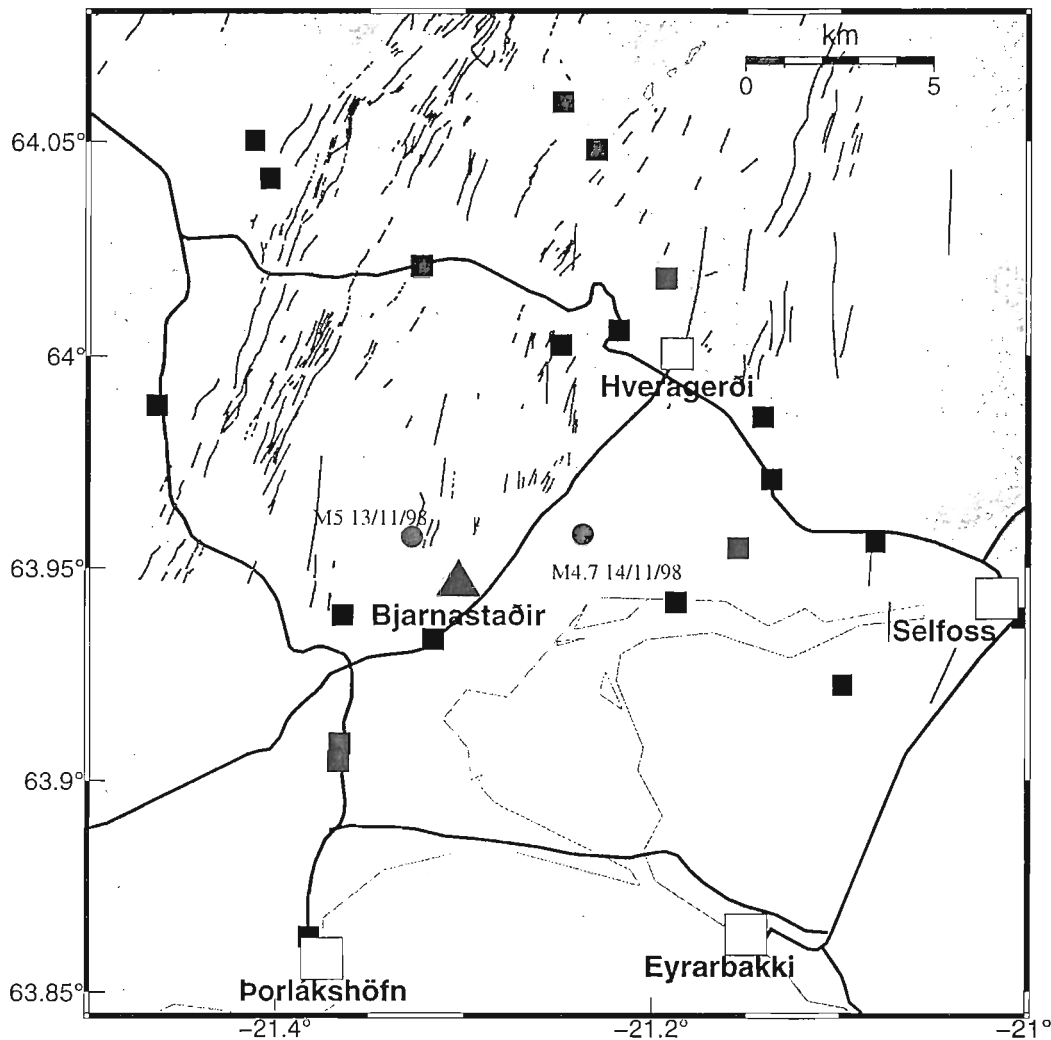
Rétt er að geta um tvö önnur dæmi frá þessu ári um að heitavatnsholur breyttu sér í kjölfar stórra jarðskjálfta í Hengli og Ölfusi. Þannig sáu fiskeldismenn á Þóroddsstöðum í Ölfusi 3 m vatnsborðshækkun í vinnsluholu eftir skjálftann 14. nóvember. Eins höfðu fiskeldismenn á Klausturhólum í Grímsnesi samband og vottfestu breytingar á 3 holum sem gætu tengst júní- og nóvemberskjálftunum. Breytingarnar benda til spennuhækkunar, líkt og á Þóroddsstöðum og á Bakka í júní. Sagt hefur verið frá þessum breytingum í greinargerð (Sverrir Þórhallsson og Grímur Björnsson 1998), í Ossa, innanhússblaði Orkustofnunar, í nóvember og desember 1998 (<http://www.os.is/ossi/index.html>) og vonandi tekst einnig að gera sémilega grein fyrir þeim í skýrslu fyrir áramótin 1998/1999.

Taka ber fram að þrýstibreyting í holunum við Bakka kom ekki fram fyrr en 2–3 klst eftir að skjálftarnir urðu. Eins virðist af breytingum í holum að dæma, að stórir skjálftar á Hengilssvæði létti spennum suðvestan við sig en hækki spennu suðaustan við sig. Þrýstingsbreytingar þessar eru í grófum dráttum í samræmi við það að skjálftarnir sem þeim valda verði við hægri sniðgengishreyfingar á N-S sprungum (mynd 6). Ljóst er að almannahagsmunir felast í því að hitaveitur á Suðurlandi eigi viðbragðsáætlun gagnvart fallandi þrýstingi í jarðhitasvæðum eftir skjálfta. Einkum er hér hugsað til staða þar sem heitt vatn sjálfrennur eða „kaldar“ holur (110–130°C) eru í blæstri.

## 6 LANDMÆLINGAR Í KJÖLFAR JARÐSKJÁLFTAHRINUNNAR

Vegna skjálftahrinunnar nærri Litla-Skarðsmýrarfjalli á Helligheiði í júní 1998, var haldinn fundur í lok september með þeim aðilum sem stunda landmælingar og aðrar rannsóknir á Hengilssvæðinu. Fulltrúar frá Hitaveitu Reykjavíkur, Landsvirkjun, Norrænu eldfjallastöðinni, Orkustofnun, Raunvísindastofnun Háskólans, Veðurstofu Íslands og Verkfræðistofu Suðurlands komu saman og ákveðið var að hefja samvinnu um landmælingar á Hengilssvæði og Ölfusi. Landmælingar með Global Positioning System (GPS) tækni voru gerðar á Hengilssvæðinu af Orkustofnun í júní og júlí, á meðan á jarðskjálftahrinunni stóð (Gunnar Þorbergsson og Guðmundur H. Vigfússon 1998). Ákveðið var að mæla á nokkrum af þessum stöðvum í vetur, auk stöðva nærri Hveragerði og Þorlákshöfn, til að fylgjast með áframhaldandi jarðhniki í kjölfar skjálftahrinunnar í júní og landrisi við Ölkelduháls. Páll Bjarnason (Verkfræðistofu Suðurlands) og Theodór Theodórsson (Landsvirkjun) tóku að sér að framkvæma mælingarnar og var fyrsta mælingalotan í lok október. Nokkrar þessara stöðva eru nálægt upptakasvæði stærstu skjálftanna í hrinunni í nóvember. Mælingar voru því endurteknar 28.–30. nóvember af Verkfræðistofu Suðurlands og Landsvirkjun og auk þess mælt á fleiri stöðum á svæðinu af Raunvísindastofnun Háskólans og Norrænu eldfjallastöðinni 19.–30. nóvember (mynd 7).

Þessar mælingar eru mikilvægar til að ákvarða færslur á yfirborði jarðar sem urðu vegna skjálftahrinunnar í nóvember. Mælingarnar munu verða grunnur að þéttu landmælinganeti til aukins eftirlits með hreyfingum á svæðinu í framtíðinni. Auk þess hefur fengist styrkur frá Hitaveitu Reykjavíkur til að kaupa tvö GPS landmælingatæki, sem verða sett upp til samfelldra mælinga á Hengilssvæðinu í vetur.



Mynd 7. Staðsetningar GPS stöðva þar sem mælt var í lok nóvember 1998 (svartir ferningar). SIL stöðvar eru sýndar með svörtum þríhyrningum og staðsetningar stærstu skjálftanna í hrinunni með fylltum hringjum.

## 7 NIÐURSTÖÐUR

Helstu niðurstöður þessarar samantektar eru:

- Skilin milli Evrasíu- og Ameríkuflekanna liggja um Ölfus og þar eru jarðskjálftar tíðir. Heimildir eru um tjón af völdum skjálfta í Hjallahverfi fyrr á öldum.
- Daga 13.–15. nóvember 1998 mældust þúsundir skjálfta á plötuskilunum á 2–3 km breiðu svæði frá Geitafelli og austur fyrir Hjallahverfi í Ölfusi. Stærstu skjálftarnir voru um 2 km vestur af Hjallahverfi af stærðinni 5.0 og um 1 km austur af Þurá, 4.7 á Richter-kvarða. Þeir ollu nokkru tjóni í nágrenni upptakanna.
- Brotlausnir stærstu skjálftanna í hrinunni, dreifing smáskjálfta og stefna eldri sprungna á yfirborði benda til að skjálftarnir hafi orðið við hægri handar sniðgengishreyfingar á mörgum norðlægum sprungum. Þetta eru samskonar hreyfingar og talið er að hafi verið í stórum Suðurlandsskjálftum.

- Skjálftarnir ollu tímabundinni þrýstingslækkun í heitavatnsholum í Ölfusi. Mikilvægt er að hitaveitur á Suðurlandi eigi viðbragðsáætlun gagnvart fallandi þrýstingi í jarðhitasvæðum af völdum jarðskjálfta. Þetta á einkum við um staði þar sem heitt vatn sjálfrennur eða tiltölulega kaldar holur (110-130°C) eru í blæstri.
- GPS landmælingar voru framkvæmdar í kjölfar skjálftahrinunnar og munu þær mælingar verða grunnur að eftirlitsneti á svæðinu. Sett verða upp tvö GPS tæki til samfelldra mælinga á jarðskorpuhreyfingum á Hengilssvæðinu með styrk frá Hitaveitu Reykjavíkur.

Óvenju mikil jarðskjálftavirkni á Hengilssvæði síðan 1994 hefur gjarna verið borin saman við virknina þar á árunum 1953 til 1955. Því virkni tímabili lauk með skjálfta af stærðinni 5.5 á Richterkvarða. Varlega áætlað svarar heildar orkuútlausn nóvemberhrinunnar til eins skjálfta af stærðinni 5.5. Eftir skjálftana í júní og nóvember 1998 er sú hryðja sem nú stendur yfir því orðin miklu stærri en hrinan sem endaði 1955.

Þó aðeins hafi skolfið á 2–3 km breiðu svæði í nóvember 1998 þá er hugsanlegt að sumar sprungnanna sem hreyfðust séu mun lengri, jafnvel 15–20 km. Í ljósi þess að skjálftar af stærðinni 5.5–6 hafa átt sér stað á svæðinu og atburðirnir í þessari hrinu virðast vera á N-S lögum sprungum er líklegt að spenna sé enn bundin á nyrðri hluta þessara sprungna. Þar gætu því orðið skjálftar allt að 5.5 að stærð.

Fljótlega eftir að nóvemberhrinan hófst var gefin út viðvörðun um að líkur væru á skjálfta allt að 5.5 að stærð. Auk sögulegra gagna um skjálfta á Hellisheiði og í Ölfusi var viðvörðunin byggð á hugmyndum um að samfelld missgengi lægi frá Litla-Skarðsmýrarfjalli suður um Hellisheiði. Norðurhluti þess hreyfðist í júníhrinunni, en hugsanlegt var talið að há skerspenna væri enn á suðurhlutanum. Breytingar á skjálftavirkninni laugardaginn 14. nóvember (mynd 4) bentu til að stærri skjálfti gæti allt eins orðið á Núpamisgenginu. Þriðjudaginn 17. nóvember var Almanna-vörnum send tilkynning um að líkur á stórum jarðskjálfta hefðu minnkað þar sem verulega hafði dregið úr skjálftavirkninni.

Með hrinunni nú í nóvember virðist hafa orðið breyting á skjálftavirkni á Hengilssvæðinu. Hvað það táknar er erfitt að segja til um. Ekki er útilokað að nú sé lokið því virkni tímabili sem hófst í ágúst 1994. Í öðru lagi er hugsanlegt að skjálftar eigi enn eftir að verða á N-S sprungum á Hellisheiði, t.d. í Núpafjalli. Í þriðja lagi gæti virkni verið að aukast á plötuskilunum á Suðvesturlandi, þ.e. á Suðurlandsskjálftabeltinu og út á Reykjanes. Fylgst verður náið með þessari þróun í framtíðinni.

## 8 ENGLISH SUMMARY

On November 13, 1998, at 10:38 am (GMT), a  $M=5.0$  earthquake occurred west of Hjalli in Ölfus. The second largest event was a  $M=4.7$  on November 14, at 14:24 (GMT), close to Þurá in Ölfus. Aftershock activity continued for a few days, but by November 16 the seismicity had decreased considerably.

The Hengill and Ölfus areas are at a triple junction in SW Iceland, where the South Iceland seismic zone meets the western rift zone and the Reykjanes peninsula oblique rift zone (Figure 1). It is therefore a zone of intense crustal deformation due to earthquake and volcanic activity associated with the plate boundary spreading. The orientation of the Hengill fissure swarm is NNE–SSW, but many mapped faults have N–S orientations (Figure 1). Several large ( $m>6$ ) damaging earthquakes have occurred in the Hengill-Ölfus area, particularly in the

earthquake swarms of 1706 and 1896.

Since 1994 there has been increased seismic activity in the Hengill area (Rögnvaldsson et al. 1998). The seismic activity has been linked to uplift near Ölkelduháls (Sigmundsson et al. 1997). In this period there have been several earthquake swarms with thousands of earthquakes recorded over a period of days to a month. The largest swarm to this date, since 1994, started on June 3, 1998, on Hellisheiði near Ölkelduháls, and culminated with a flurry of aftershocks following a  $M=5.1$  earthquake on June 4, at 21:37 (GMT), close to Litla-Skarðsmýrarfjall ( $64.0299^\circ\text{N}$ ,  $21.2880^\circ\text{W}$ ) at about 4.6 km depth.

On October 27, 1998, Stuart Crampin at the University of Edinburgh, UK, sent a message to the Department of Geophysics, Icelandic Meteorological Office (IMO), that his observations of shear-wave splitting (SWS) at seismic stations Bjarnastaðir (BJA) and Krísuvík (KRI) indicated stress build-up, which he predicted would be released in a  $M=5-6$  earthquake or an eruption within 3 months. The location of the event was uncertain since he had only studied SWS at these two stations, but he concluded that if the event occurred in the vicinity of the two stations it would be smaller than if the measured increase in SWS indicated stress build-up further away from BJA and KRI. A meeting of the science council of the Icelandic Civil Defence was held where the warning was discussed, but the conclusion of the council was that no special actions were required. However, the IMO increased their monitoring efforts in the area.

The Icelandic Meteorological Office runs an array of 35 digital seismometers in Iceland, the SIL network (Stefansson et al. 1993). The network uses automatic detection and location algorithms to monitor seismicity in Iceland.

A  $M=5.0$  earthquake occurred on November 13, 1998, at 10:38 am (GMT) at  $63.954^\circ\text{N}$  and  $21.346^\circ\text{W}$ , about 2 km west of the seismic station at Bjarnastaðir. The uncertainty in its location is 450 m N-S and 250 m E-W. The hypocenter depth was determined at  $5.3 \pm 0.5$  km depth. The second largest earthquake of the sequence was an  $M=4.7$  event at 14:24 (GMT) on November 14, located at  $63.958^\circ\text{N}$ ,  $21.237^\circ\text{W}$ , about 1 km SE of Þurá. The uncertainty in the location of this event is 450 m N-S and 300 m E-W. The hypocenter depth was about  $3 \pm 1.7$  km. The large uncertainty in depth is caused by lack of data from the seismic station at Bjarnastaðir, which was malfunctioning at the time.

Figure 4 shows the automatic locations of earthquakes in the swarm, determined by the SIL system. Each frame shows a 12 hours long period, starting on Friday, November 13 at midnight (Figure 4a), until midnight Monday, November 16 (Figure 4f). The time since the earthquake occurred within the period, is shown by the color of the dots (red is most recent, blue is oldest). The largest events are shown with green dots. On November 18 the earthquake activity was back to a similar rate as before the swarm (see Figure 2). Figure 5 shows the size of the earthquakes as a function of time. All the largest ( $M \geq 4$ ) events occurred in the first 30 hours of the swarm. The zone activated in the November earthquake sequence was about 14 km long (E-W) and 2-3 km wide (N-S). The focal mechanisms of the 11 largest earthquakes in the November swarm are shown in Figure 6. Relative locations of earthquakes that occurred less than 30 hours before the main shock, indicate that these events occurred on N-S oriented faults (Figure 3). Mapped surface faults in the area are mostly oriented N-S. It is therefore concluded that the largest earthquakes in the November swarm ruptured N-S oriented faults, rather than an E-W structure. Focal mechanism of the  $M=5.1$ , June 4 earthquake on Hellisheiði and the aftershock zone of that event (shown on Figure 6) indicate rupture on a N-S oriented fault. This is the same style of faulting as is associated with large ( $M > 6$ ) historical earthquakes in the South Iceland seismic

zone.

Coseismic stress changes due to the  $M=4.7$  earthquake on November 14, 1998, disrupted flow in several geothermal drill holes in Ölfus and Grímsnes, particularly at Bakki in Ölfus, decreasing or disrupting their productivity. These effects seem to disappear again after a few weeks.

Geodetic surveying using Global Positioning System (GPS) was conducted in the area during November 19–30, 1998, to measure coseismic deformation (Figure 7). This network will be used to monitor the crustal deformation of the area in the future. Two GPS receivers for continuous monitoring of the Hengill area have been funded by the Reykjavík Municipal District Heating Service.

## 9 HEIMILDIR

- Freysteinn Sigmundsson, Páll Einarsson, Sigurður Th. Rögnvaldsson, G. Foulger, K. Hodkinson og Gunnar Þorbergsson 1997. 1994–1995 seismicity and deformation at the Hengill triple junction, Iceland: triggering of earthquakes by an inflating magma chamber in a zone of horizontal shear stress. *J. Geophys. Res.* 102, 15151–15161.
- Gunnar Þorbergsson og Guðmundur H. Vigfússon 1998. Nesjavallaveita. Fallmælingar og GPS-mælingar á Hengilssvæði 1998. *Skýrsla Orkustofnunar OS-98060*. Orkustofnun, Reykjavík.
- Kristján Ágústsson 1998. Jarðskjálftahrina á Hellsheiði og í Hengli í maí-júlí 1998. *Greinargerð Veðurstofu Íslands VÍ-G98040-JA06*. Veðurstofa Íslands, Reykjavík.
- Kristján Sæmundsson 1995. Hengill, jarðfræðikort (berggrunnur) 1:50000. Orkustofnun, Hítaveita Reykjavíkur og Landmælingar Íslands, Reykjavík.
- Páll Einarsson og Jón Eiríksson 1982. Earthquake fractures in the districts Land and Rangárvellir in the South Iceland seismic zone. *Jökull* 32, 113–120.
- Páll Halldórsson 1996. Skjálftasaga Íslands. Handrit.
- Ragnar Stefánsson, Reynir Böðvarsson, R. Slunga, Páll Einarsson, Steinunn S. Jakobsdóttir, H. Bungum, S. Gregersen, J. Havskov, J. Hjelme og H. Korhonen 1993. Earthquake prediction research in the South Iceland seismic zone and the SIL project. *Bull. Seism. Soc. Am.* 83, 696–716.
- Reynir Böðvarsson, Sigurður Th. Rögnvaldsson, Steinunn S. Jakobsdóttir, R. Slunga og Ragnar Stefánsson 1996. The SIL data acquisition and monitoring system. *Seism. Res. Lett.* 67, 35–46.
- Sigurður Th. Rögnvaldsson, Kristján Ágústsson, Bergur H. Bergsson og Grímur Björnsson 1998. Jarðskjálftamælanet í nágrenni Reykjavíkur - lýsing á mælaneti og fyrstu niðurstöður. *Rit Veðurstofu Íslands VÍ-R98001-JA01*. Veðurstofa Íslands, Reykjavík.
- Sigurður Th. Rögnvaldsson og R. Slunga 1993. Routine fault plane solutions for local and regional networks: a test with synthetic data. *Bull. Seism. Soc. Am.* 11, 1247–1250.
- Slunga, R. 1981. Earthquake source mechanism determination by use of body-wave amplitudes - an application to Swedish earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.* 71, 25–35.
- Slunga, R., Sigurður Th. Rögnvaldsson og Reynir Böðvarsson 1995. Absolute and relative location of similar events with application to microearthquakes in southern Iceland. *Geophys. J. Int.* 123, 409–419.
- Sverrir Þórhallsson og Grímur Björnsson 1998. Áhrif jarðskjálftahrinu á borholur Hítaveitu Þorlákshafnar og tillögur til úrbóta. *Greinargerð Orkustofnunar SP/GrB-98/01*. Orkustofnun, Reykjavík.