



Rit Veðurstofu Íslands

Sigurður Th. Rögnvaldsson

*Kortlagning virkra misgengja með
smáskjálftamælingum - yfirlit*

VÍ-R00001-JA01
Reykjavík
Janúar 2000

ISSN 1025-0565
ISBN 9979-878-16-9

Sigurður Th. Rögnvaldsson

*Kortlagning virkra misgengja með
smáskjálftamælingum - yfirlit*

VÍ-R00001-JA01
Reykjavík
Janúar 2000

*Tekið saman af Þóru Árnadóttur og Kristínu S. Vogfjörð,
byggt á fyrirlestri Sigurðar á haustráðstefnu Eðlisfræðis-
félags Íslands 17. - 18. september 1999*

EFNISYFIRLIT

1	ÁGRIP	5
2	AÐFERÐIR	5
3	DÆMI UM KORTLAGNINGU BROTFLATA MEÐ UPPTAKAGREININGU	6
3.1	Virkar jarðskjálftasprungur á skjálftasvæði Norðurlands	6
3.2	Virkar jarðskjálftasprungur á Hengilssvæðinu	8
3.2.1	Skjálftahrina í Ölfusi í nóvember 1998	9
3.2.2	Nesjavellir og nágrenni	10
4	SAMANTEKT	12
5	ENGLISH SUMMARY	13
6	HEIMILDIR	14



1 ÁGRIP

Nota má víxlfylgni (e. *cross-correlation*) skjálftalínurita til að mæla mjög nákvæmlega mun í komutíma skjálftabylgna frá hrinum smáskjálfta. Út frá slíkum mælingum er unnt að reikna innbyrðis afstöðu skjálftanna með mun meiri nákvæmni en algildar staðsetningar þeirra. Dæmigerð óvissa í innbyrðis staðsetningum er 5–20 m, samanborið við 0.5–2.0 km ef notast er við hefðbundnar staðsetningaradferðir. Því má nota innbyrðis staðsetningar til að skorða stefnu sameiginlegs brotflatar skjálftanna. Brotlausnir skjálftanna gefa óháð mat á stefnu brotflatar hvers skjálfta, auk færslustefnunnar í upptökunum. Með því að beita þessum aðferðum saman má kortleggja virk misgengi í skorpunni með góðum árangri.

Upptakagreiningu af þessu tagi hefur verið beitt á nokkur þúsund skjálfta í á annað hundrað hrinum, einkum á Hengilssvæðinu og í Tjörnesbrotabeltinu. Helstu niðurstöður eru að í Grímseyjar- og Dalvíkurbeltunum eru þau misgengi sem kortlögð hafa verið nær hornrétt á rekstefnu platananna á Norðurlandi. Skjálftar nærri Flateyjarmisgenginu verða hins vegar á sprungum samsíða plötuskilunum. Á Hengilssvæðinu er breytileiki í striki virkra misgengja mun meiri en kemur fram við kortlagningu misgengja á yfirborði.

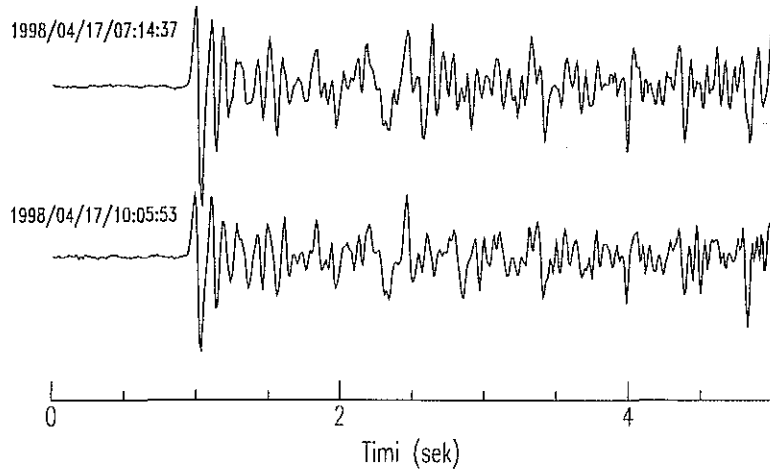
Nákvæm ákvörðun á striki og halla virkra misgengja getur einnig gefið mikilvægar upplýsingar um legu aðfærsluæða jarðhitakerfa. Aðalaðfærsluæð jarðhitakerfisins á Nesjavöllum virðist tengd virku misgengi undir Völlum með strikstefnu nærri NNA.

2 AÐFERÐIR

Stafrænt landsnet jarðskjálftamæla, SIL-netið (Södra Islands Lågland), er rekið af Veðurstofu Íslands. Mælingar þess eru notaðar til að staðsetja og reikna brotlausnir fyrir alla skjálfta sem skráðir eru (Ragnar Stefánsson o.fl. 1993; Reynir Böðvarsson o.fl. 1996). Við útreikninga brotlausna er leitað kerfisbundið að þeirri samsetningu striks, halla og færslustefnu misgengis, sem best fellur að mældum gildum á sveifluvidd P- og S-bylgna og stefnu fyrsta útslags P-bylgna. Fyrir hvern skjálfta eru athugaðar rúmlega 40000 brotlausnir og reiknað hversu vel þær falla að mældri sveifluvidd og fyrstu hreyfistefnu á hverri stöð. Besta lausnin er sú sem gefur minnstan mun reiknaðra og mældra gilda. Í flestum tilfellum gefur innan við 1% af þeim brotlausnum sem prófaðar eru viðunandi nálgun við mæld gildi og eru slíkar lausnir geymdar sem mögulegar brotlausnir (Slunga 1981; Sigurður Th. Rögnvaldsson og Slunga 1993) Af samhverfuástæðum er ekki hægt að greina milli misgengisflatarins og svonefnds aukaflatar (e. *auxiliary plane*) sem er hornréttur á færslustefnuna í misgengisfletinum. Brotlausn jarðskjálfta er því aldrei einræð (e. *unique*), til dæmis er brotlausn skjálfta sem verður við hægri handar sniðgengishreyfingu á N-S fleti nákvæmlega eins og hefði skjálftinn orðið við vinstri handar sniðgengishreyfingu á A-V fleti. Nota þarf önnur gögn til að greina milli misgengisflatarins og aukaflatarins, svo sem sjáanlegt brot, mælda færslu á yfirborði eða upptakadreifingu skjálfta sem afmarkar brotflötinn.

Útlit skjálftalínurita ræðst einkum af eðli brotsins, afstöðu þess og slóð bylgna frá upptökum að mælistöð. Þegar jarðskjálftahrinur eiga sér stað, þ.e. fjöldi skjálfta verður á tiltölulega afmörkuðu svæði á skömmum tíma, eru bylgjuhreyfingar einstakra atburða oft svipaðar (mynd 1) og tímamun þeirra má ákvarða mjög nákvæmlega með víxlfylgnireikningum. Ef spennusvið breytist lítið með tíma má einnig búast við að skjálftar á tilteknu (litlu) svæði séu hver öðrum líkir, jafnvel þótt mánuðir eða ár líði milli skjálftanna. Ef gert er ráð fyrir að innbyrðis tímamunur á mælistöðvum fyrir mismunandi skjálfta stafi eingöngu af mun í staðsetningu atburðanna má reikna innbyrðis afstöðu þeirra mjög nákvæmlega. Skekkja í afstæðri staðsetningu tveggja skjálfta getur verið innan við 10 m. Sú aðferð sem hér er lýst notar bæði algildan tíma og

SOL



Mynd 1. Jarðskjálftalínurit tveggja smáskjálfta á Nesjavöllum sem skráðir voru í Sölvholti í Flóa. Skjálftarnir eru staðsettir um það bil 117 m hvor frá öðrum og bylgjuform þeirra eru mjög lík.

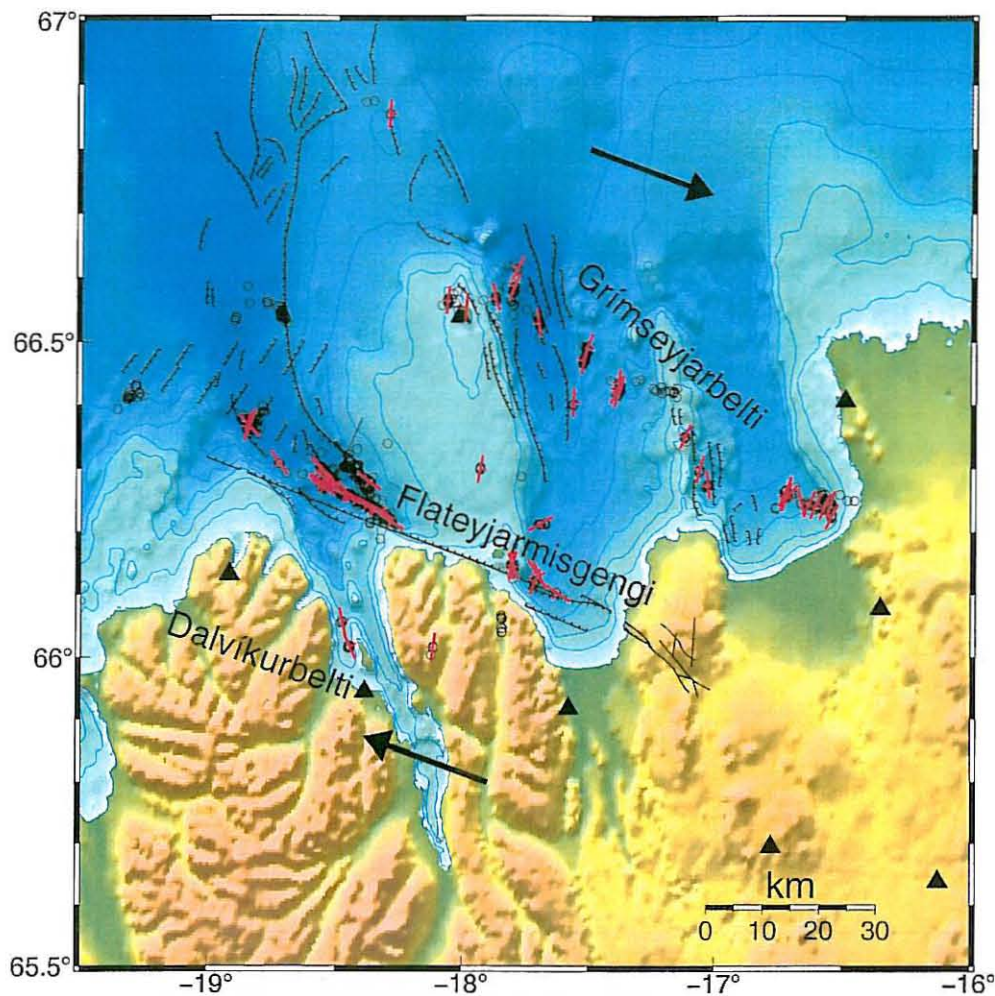
mælingar á tímamun og bætir því jafnframt algilda staðsetningu hrinunnar (Slunga o.fl. 1995). Aðferðin verður hér eftir nefnd upptakagreining jarðskjálfta, til styttingar (Sigurður Th. Rögnvaldsson og Grímur Björnsson 1995). Jarðskjálftar sem staðsettir hafa verið á þennan hátt falla oft á plön í jarðskorpunni og er þá líklegt að þar séu virkir sprungufletir, en aðferðin getur þó ekki gefið upplýsingar um færslustefnur á þessum sprunguflötum.

Eftir upptakagreiningu skjálftaþyrpingar eru brotlausnir skjálftanna reiknaðar að nýju, enda er brotlausn háð staðsetningu skjálfta. Að því búnu eru staðsetningar skjálftanna athugaðar og sérstaklega leitað að skjálftum sem liggja á sama plani. Ef slíkt plan finnst er kannað hvort brotlausnir skjálftanna sem notaðir voru til að ákvarða planið séu í samræmi við stefnu þess. Samtúlkun upptakagreiningar og brotlausna getur þannig gert upp á milli allra mögulegra brotlausna fyrir hvern skjálfta og valið þann brotlausnarflöt sem best fellur að plani skjálftadreifingarinnar. Með slíkri svæðisbundinni samtúlkun jarðskjálftaþyrpinga má kortleggja virkar sprungur í skorpunni.

3 DÆMI UM KORTLAGNINGU BROTFLOATA MEÐ UPPTAKAGREININGU

3.1 Virkar jarðskjálftasprungur á skjálftasvæði Norðurlands

Tjörnesbrotabeltið tengir saman eystra gosbeltið og Kolbeinseyjarhrygg norður af Íslandi. Dreifing jarðskjálfta bendir til að brotasvæðið samanstandi af þremur meginmismisgengjum eða veikleikabeltum með stefnu VNV-ANA (mynd 2). Nyrst er Grímseyjarbeltið sem liggur frá Grímsey inn á Öxarfjörð, þá Flateyjar-Húsavíkurmisgengið, sem liggur með norðurströnd Flateyjarskaga og tekur land nærri Húsavík, og syðst er Dalvíkurbeltið. Á öllum beltunum hafa orðið sniðgengisskjálftar af stærðinni 6 á Richter kvarða eða þar yfir. Skjálftahrinur eru tíðar í nyrðri beltunum tveimur en auk þess ber Grímseyjarbeltið merki nýlegrar eldvirkni þar sem einnig sést óregla



Mynd 2. Jarðskjálftasvæðið út af Norðurlandi. Svörtu þríhyrningarnir tákna skjálftamæla Veðurstofu Íslands og örvarnar sýna færslustefnu Evrasíu- og Ameríkuflekanna. Svört strik eru sprungur kortlagðar með beinum athugunum eða endurkastsmælingum en rauðu strikin eru sprungur sem kortlagðar hafa verið með upptakagreiningu smáskjálfta. Skjálftarnir eru táknaðir með hringjum.

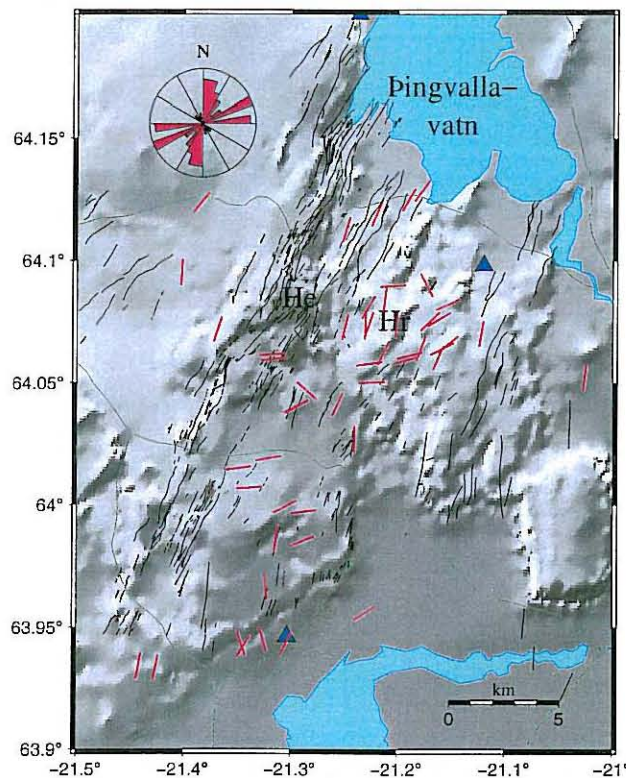
í segulsviði (McMaster o.fl. 1977). Flateyjar-Húsavíkurmisgengið er þróað hægri handar sniðgengi sem verið hefur virkt í 7–9 milljónir ára. Heildarfærsla um misgengið er 10–60 km lárétt og 200–1400 m lóðrétt (Ágúst Guðmundsson o.fl. 1993). Dalvíkurbeltið liggur að mestu á landi en þess sjást lítil merki á yfirborði. Þar eru skjálftar fátíðari en í hinum beltunum.

Valdar hafa verið 62 skjálftaþyrpingar í Tjörnesbrotabeltinu frá árunum 1994–1997, alls 888 skjálftar, og ákvarðaðar innbyrðis og algildar staðsetningar hverrar þyrpingar fyrir sig. Skjálftaknippan dreifast þannig að 25 eru í Grímseyjarbeltinu, 34 á Flateyjarmisgenginu, þrjú í Dalvíkurbeltinu og þrjú utan meginbeltanna (Sigurður Th. Rögnvaldsson o.fl. 1998c). Óvissan í innbyrðis staðsetningum er yfirleitt 2–20 m, en fyrir algildar staðsetningar er hún 2–3 km. Ef gert er ráð fyrir að skjálftar í hverri þyrpingu séu allir á sama misgengi má ákvarða strik þess og halla með því að fella plan í gegnum þyrpinguna. Í Flateyjar-Húsavíkurbeltinu hafa brotflétir, sem þannig eru ákvarðaðir, strik N122°A–N140°A og halla 72°–90° til suðurs. Strik Flateyjarmisgengisins á þessum slóðum er um N120°A. Brotlausnir skjálftanna sýna hægri handar sniðgengishreyfingar, í samræmi við niðurstöður yfirborðsathugana á Húsavíkurmisgenginu.

Strik sprungna í Grímseyjarbeltinu er að meðaltali N14°A, þ.e. þær eru u.þ.b. 70° frá stefnu skjálftabeltisins. Brotlausnir benda flestar til vinstri handar sniðgengishreyfinga á N-S sprungum. Grímseyjarbeltinu svipar því til skjálftabeltis Suðurlands, þar sem ekki sjást merki samfellds A-V misgengis heldur verður hreyfingin í víxlenginu á tugum samsíða sprungna með stefnu N-S. Skjálftaþyrpingar í Dalvíkurbeltinu virðast hafa orðið á vinstri handar sniðgengisprungum með norðlæga stefnu.

3.2 Virkar jarðskjálftasprungur á Hengilssvæðinu

Á Hengilssvæðinu hefur verið mikil skjálftavirkni síðan á miðju ári 1994. Þar hefur fjöldi brotflata verið kortlagður og hafa þeir ekki alltaf fallið að sprungustefnum sem sjást á yfirborði (Kristján Sæmundsson 1995; Sigurður Th. Rögnvaldsson o.fl. 1998a; Sigurður Th. Rögnvaldsson og Slunga 1999). Mynd 3 sýnir niðurstöður úr upptakagreiningu smáskjálfta á Hengils-

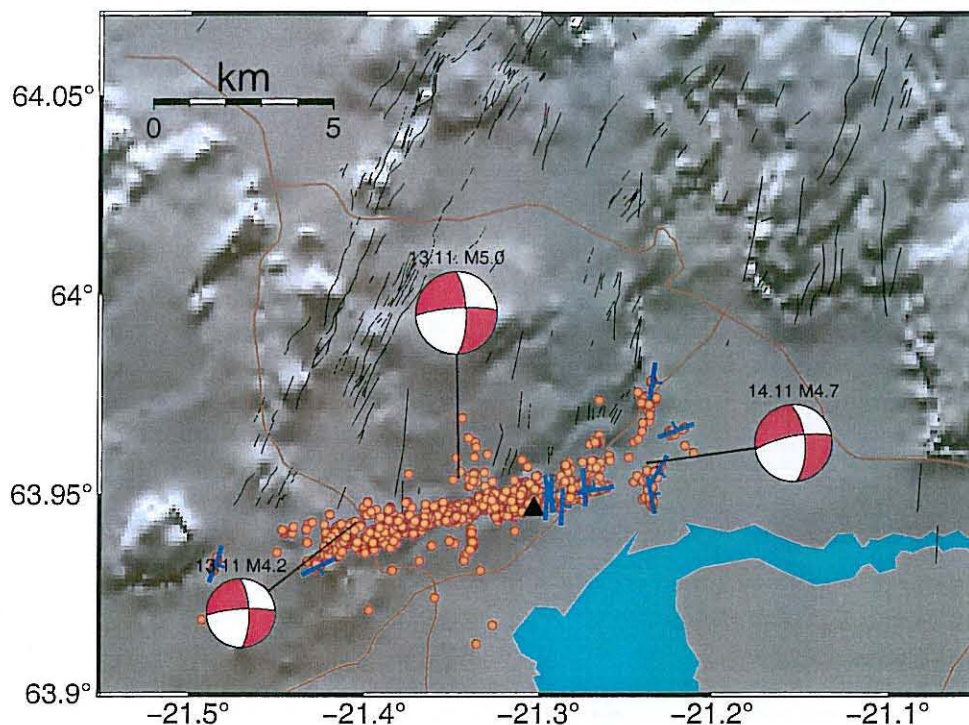


Mynd 3. Sprungur á Hengilssvæðinu. Rauð strik sýna virkar sprungur sem kortlagðar hafa verið með upptakagreiningu smáskjálfta frá árunum 1993–1998. Þríhyrningar eru skjálftamælar Veðurstofunnar, grænar línur eru vegir. Grannar svartar línur sýna misgengi sem kortlögð hafa verið á yfirborði (Kristján Sæmundsson 1995). Efst í vinstra horninu eru virku sprungurnar flokkaðar eftir stefnu þeirra. Syðst á Hengilssvæðinu er algengasta stefnan rétt austan við norður, nyrst er hún nálægt N25°A–N30°A, en á miðju svæðinu er hún breytilegri og stefnur nálægt N70°A algengastar. He er Hengill og Hr er Hrómundartindur.

svæðinu í um 50 hrinum frá árinu 1993 og fram í febrúar 1998. Syðst á svæðinu, í Hjallahverfi, er algengast að brotflétirnir hafi strikstefnu nærri N-S, eða svipaða og sýnileg misgengi, en þegar norðar dregur, á Hellisheiði og Ölkelduhálsi, fer einnig að bera á A-V stefnum. Nyrst á svæðinu, við Nesjavelli, eru sprungustefnur aftur í betra samræmi við sýnilegar sprungur á yfirborði, en þar eru N25°A–N30°A stefnur algengar. Þessi frávik virkra sprungna frá sýnilegum misgengisstefnum benda til þess að núverandi spennusvið á Hengilssvæðinu sé frábrugðið spennusviðinu sem þar ríkti þegar stóru siggengin, sem mest eru áberandi á yfirborði, mynduðust.

3.2.1 Skjálftahrina í Ölfusi í nóvember 1998

Föstudaginn 13. nóvember 1998, kl. 10:38, varð skjálfti af stærðinni 5.0 á Richterkvarða 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 tvo dagana, en 16. nóvember dró verulega úr henni. Staðsetningar skjálfta í hrinunni og brotlausnir þriggja stærstu skjálftanna eru sýndar á mynd 4. Flestir stærri skjálftarnir í hrinunni hafa svipaðar brotlausnir og þeir þrír stærstu. 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. 1998d) og mynd 4 benda þó



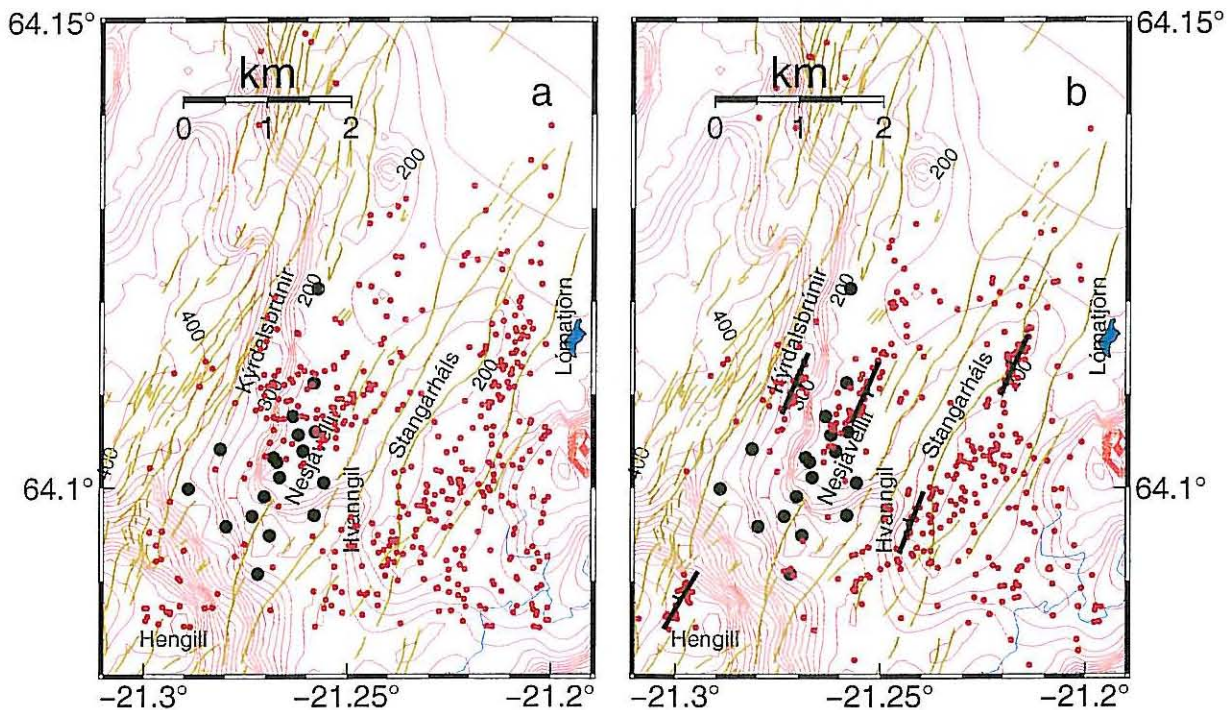
Mynd 4. Brotlausnir stærstu skjálftanna í Ölfusi 13.–15. nóvember 1998. Flestir skjálftarnir urðu á 6–8 km dýpi. Litlir appelsínugulir hringir eru skjálftar sem staðsettir hafa verið með innan við ± 1 km láréttri óvissu og minna en ± 2 km óvissu í dýpi. Brotlausnirnar eru sýndar með jafnflatarvörpun (e. equal-area projection) á neðri hálfkúlu. Virk misgengi sem kortlögð hafa verið með upptakagreiningu smáskjálfta eru sýnd sem blá strik. Grannar svartar línur sýna misgengi sem kortlögð hafa verið á yfirborði (Kristján Sæmundsson 1995). Skjálftastöðin á Bjarnastöðum er sýnd með svörtum þríhyrningi.

fremur til að skjálftarnir hafi orðið á mörgum N-S sprungum. Hrinan í nóvember 1998 hófst nærri suðurenda jarðskjálftahrinu sem varð í júní 1998 á Hellisheiði (Kristján Ágústsson 1998). Staðsetningar skjálfta í júníhrinunni, og líkanreikningar fyrir stærsta skjálftann í hrinunni, sem var 5.1 á Richter kvarða, benda til hægri handar sniðgengishreyfingar á N-S sprungu (Þóra Árnadóttir o.fl. 1999). Þetta eru samskonar brotahreyfingar og talið er að orðið hafi í stórum Suðurlandsskjálftum (Páll Einarsson og Jón Eiríksson 1982).

Meðan á nóvemberhrinunni stóð birti Veðurstofan upplýsingar um framvindu hennar á vefsíðum sínum. Nú eru birt kort af Íslandi og nokkrum smærri svæðum, þar á meðal Hengilssvæðinu, sem sýna staðsetningar skjálfta síðastliðnar 48 klukkustundir, og eru kortin uppfærð á 10 mínútna fresti. Slóðin er <http://www.vedur.is/ja>.

3.2.2 Nesjavellir og nágrenni

Skjálftavirkni á sprungu er líklega nauðsynleg til að viðhalda lekt hennar og þar með mikilvægi hennar sem rennislíeðar í jarðhitakerfi. Þessi tilgáta var könnuð með leit að virkum misgengjum í nágrenni Nesjavalla. Skoðaðir voru allir skjálftar á Nesjavallasvæðinu, stærri en 0.0 á Richter kvarða, á tímabilinu 1. janúar 1998 til 31. janúar 1999 (Sigurður Th. Rögnvaldsson o.fl. 1999). Skjálftarnir, alls 427, eru sýndir á mynd 5a. Eftir upptakagreiningu þeirra koma fram þrjár nokkuð greinilegar meginþyrpingar skjálfta og tvær minni eins og sýnt er á mynd 5b. Hver

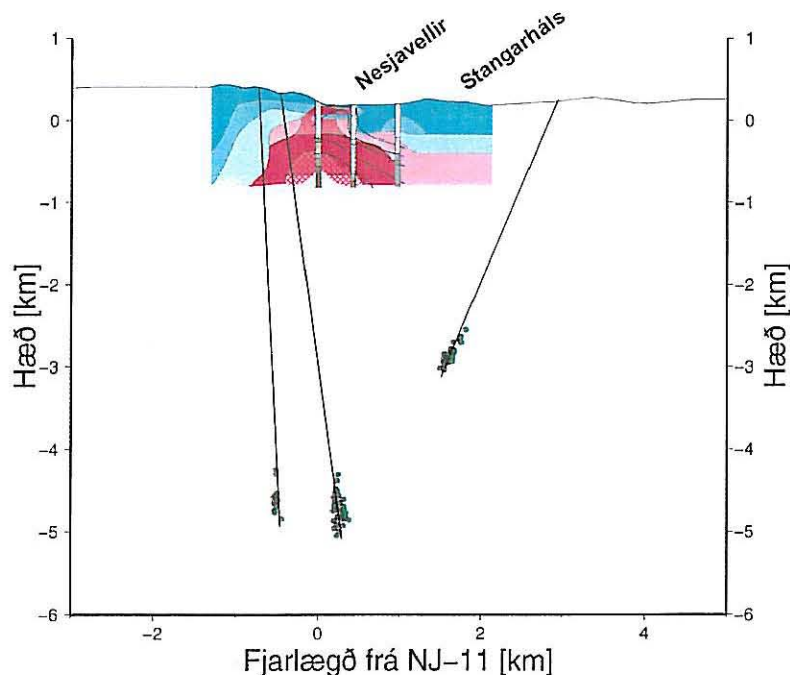


Mynd 5. Staðsetning jarðskjálfta nærri Nesjavöllum 1. janúar 1998 til 31. janúar 1999 ákvörðuð með hefðbundnum aðferðum (a) og eftir upptakagreiningu (b). Skjálftar eru merktir með litlum rauðum hringjum, svartir hringir eru borholur Orkuveitu Reykjavíkur á Nesjavöllum. Grænar línur eru misgengi á yfirborði (Kristján Sæmundsson 1995) en bestu plön gegnum skjálftaþyrpingar eru merkt með þykkum svörtum strikum, þverstrikin sýna halla plananna. Eftir upptakagreiningu verða greinilegar þrjár meginþyrpingar skjálfta, undir Kýrdalsbrúnum, Nesjavöllum og Stangarhálsi, auk minni þyrpinga undir Hengli norðanverðum og nærri Hvanngili.

Þyrping inniheldur eina til þrjár skjálftahrinur. Fjórar þyrpinganna hafa vel skilgreind plön. Sú vestasta liggur undir Kýrdalsbrúnum og besta plan gegnum valda skjálfta hefur strik N23°A og halla 87° til austurs. Þar fyrir austan er þyrping sem liggur eftir Nesjavöllum miðjum. Strik og halli besta plans gegnum þyrpinguna eru N24°A og 82° til austurs. Austasta þyrpingin liggur samsíða Stangarhálsi og er strik plansins í gegnum þyrpinguna N204°A og halli 67° til vesturs. Þar fyrir sunnan, nærri Hvanggili, er fjórða skjálftaþyrpingin og er stefna brotflatarins N201°A og hallinn 85° til vesturs. Besta plan gegnum hverja þyrpingu um sig hefur því strik nærri N25°A, sem er svipað striki misgengja og gossprungna á yfirborði. Áætluð óvissa í innbyrðis staðsetningum skjálftanna er á bilinu 2–30 m, en óvissa í algildum staðsetningum á milli 50 og 500 m. Meðalfjarlægð skjálftanna frá besta plani er í kringum 15 m, eða oftast innan óvissumarka.

Brotlausnir skjálftanna í þyrpingunum fjórum styðja þá túlkun að skjálftar hverrar þyrpingar skilgreini sameiginlegan brotflöt. Samkvæmt brotlausnunum er færslustefnan undir Kýrdalsbrúnum vinstri handar sniðgengi með örlitlum samgengisþætti. Þetta er nokkuð óvenjulegt því miðað við ríkjandi spennusvið á svæðinu er fremur von á hægri en vinstra sniðgengi (Freysteinn Sigmundsson o.fl. 1997; Sigurður Th. Rögnvaldsson o.fl. 1998b). Líklegasta skýringin er að spennusviðið hafi breytst á upptakasvæði skjálftanna, enda hafa töluverðar jarðhræringar verið á Hengilssvæðinu undanfarið ár. Undir Nesjavöllum er ríkjandi færslustefna hægri sniðgengi með smávægilegum siggengisþætti. Undir Stangarhálsi sýna skjálftarnir blöndu af siggengi og sniðgengisfærslu, en undir Hvanggili eru hægri sniðgengi ríkjandi.

Innbyrðis afstaða skjálftaþyrpinganna og þriggja borholna á Nesjavöllum er sýnd á mynd 6, sem er þversnið frá NV til SA yfir Kýrdal, Nesjavelli og Stangarháls. Láréttur kvarði sýnir fjarlægð



Mynd 6. Þversnið NV-SA sem sýnir skjálftadreifina undir Kýrdalsbrúnum, Nesjavöllum og Stangarhálsi (grænir hringir). Plönin sem skjálftarnir ákvarða eru framlengd alla leið til yfirborðs. Borholur NJ-11, NG-7 og NG-10 eru sýndar. Botn NJ-11 er um 2.0 km undir sjávarmáli. Viðnámsþversnið og hitastigsferlar eru einnig sýnd.

í kílómetrum frá borholu NJ-11. Á mynd 6 er einnig teiknað þversnið sem sýnir eðlisviðnám jarðlaga í efsta kílómetranum undir yfirborði. Viðnámssniðið sýnir háviðnámskjarna (ljósrautt tígloft svæði) umlukinn lágviðnámskápu (dökkrautt svæði), ásamt hitastigsferlum metnum út frá hitamælingum í þremur borholum, NJ-11, NG-7 og NG-10, sem sýndar eru á myndinni (Knútur Árnason o.fl. 1985). Ytri mörk lágviðnámsins falla saman við 100°C hitastigsferil, en ytri mörk háviðnámsins falla saman við 250°C ferilinn. NJ-11 er heitasta hola svæðisins og á um 2.0 km dýpi (um 1.7 km undir sjávarmáli) sker hún vökvakerfi með 380°C hita og mikinn þrýsting, þ.e. kerfi yfir vendimörkum vatns (Benedikt Steingrímsson o.fl. 1986). Skjálftaþyrpingin undir Nesjavöllum er því nokkurn veginn beint undir heitasta svæðinu og hola NJ-11 virðist komast næst því að skera brotflötinn.

4 SAMANTEKT

Upptakagreiningu nálægra jarðskjálfta má nota til að ákvarða stefnu og halla brotflatarins sem skjálftarnir urðu á. Brotlausnir skjálftanna gefa óháð mat á striki og halla, ásamt færslu og færslustefnu á fletinum. Brotflötur er ekki ótvírætt ákvarðaður af brotlausninni einni saman, en með samtúlkun upptakagreiningar og brotlausna má ákvarða hann ótvírætt. Þessi aðferð er því öflugt tæki til að kortleggja sprungur undir yfirborði og fá mynd af virkri höggun svæðis.

Upptakagreining jarðskjálfta á jarðhitasvæðum hefur mikilvæga þýðingu fyrir nýtingu jarðhita, því sprungur eru líklegar aðveituaðar jarðhitakerfanna og til að viðhalda lekt þurfa sprungurnar einnig að vera virkar. Nákvæm kortlagning virkra sprungna undir jarðhitasvæðum getur því gefið afgerandi upplýsingar um rennislísiðir vökvans í jarðhitageyminum.

Í Tjörnesbrotabeltinu hefur upptakagreining skýrt þá grófu mynd af höggunarsögu beltisins sem áður var þekkt. Nærri Flateyjarmisgenginu, sem markar legu plötuskila Evrasíu- og Ameríkuflekanna, er stefna flestra sprungnanna svipuð stefnu meginmisgengisins, þ.e. VNV-ASA, en í Grímseyjar- og Dalvíkurbeltunum er sprungustefnan yfirleitt nærri N-S. Hugsanlega valda veikleikar í skorpunni því að hún brotnar í fyrstu eftir mörgum norðlægum sprungum, fremur en samsíða flekahreyfingunum. Með tímanum fjölgar þessum sprungum og þær mynda samfelld misgengi samsíða flekahreyfingunni og þar með ný plötuskil. Sé þetta rétt er líklegt að í Grímseyjar- og Dalvíkurbeltunum muni á nokkrum milljónum ára verða til samfelld misgengi með vestnorðvestlæga stefnu.

Á Hengilssvæðinu hefur komið í ljós mjög flókið mynstur virkra sprungna, sem bendir til að spennusviðið þar sé breytilegt. Syðst er virkni á N-S sprungum ríkjandi. Þegar norðar dregur fer einnig að bera á færslum á misgengjum með stefnu A-V, sem fellur ekki saman við stefnu misgengja á yfirborði. Nyrst á Nesjavallasvæðinu eru virkar sprungur samsíða kortlögðum misgengjum, þ.e. NA-SV. Brotlausnir stærstu skjálfta í hrinunni sem varð í Ölfusi í nóvember 1998, upptakagreining 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 orðið í stórum Suðurlandsskjálftum. Strik virkra misgengja nærri Nesjavöllum eru N20°–25°A og samsvara ríkjandi sprungustefnu í vestra gosbeltinu. Staðsetning og stefna brotflatar undir Nesjavöllum, í nánd við lágviðnám og gjöfular borholur, bendir til að brotið tengist lekt svæðisins, og hugsanlegt er að sumar borholurnar nái niður að brotflötinum sjálfum.

5 ENGLISH SUMMARY

The shape of the waveforms recorded from an earthquake, at a given station, depends on the hypocenter location, the focal mechanism, and the source time function. Earthquakes occurring at nearly the same location (e.g. on the same fault) are therefore likely to generate similar waveforms. The strong similarity often observed between the signals of closely spaced earthquakes recorded at the same station means that cross-correlation techniques can be used to accurately measure arrival time differences of seismic waves from swarms of small earthquakes. Timing accuracy achieved by this method allows one to determine relative locations of the earthquakes more accurately than the absolute locations of individual events. A typical standard deviation in relative locations is 5–20 m, compared with 0.5–2.0 km obtained from conventional methods. Assuming that a swarm is generated by slip on a single fault, the relative locations can be used to determine the strike and dip of the master fault. Focal mechanism of individual events give independent information on the strike and dip, in addition to the slip direction, or rake. Together these methods provide a powerful tool to map active faults in the crust. They have been used on thousands of microearthquakes generated in over a hundred earthquake swarms, mostly in the Hengill area and the Tjörnes fracture zone.

For clusters near the Húsavík-Flatey fault the fault planes are right-lateral and strike N122°E–N140°E, similar to the overall strike of the Húsavík-Flatey fault. This agrees with the right-lateral displacement on the fault as well as with field observations of numerous transform-parallel right-lateral faults associated with the main fault. By contrast, earthquake clusters on the lineaments of Grímsey and Dalvík define (mostly) left-lateral planes striking roughly north-south, i.e. at a 40°–90° angle to the overall trend of these lineaments.

In the Hengill area the orientation of the faults mapped with this method is far more varied than what is observed at the surface. Accurate mapping of active faults in the Nesjavellir geothermal reservoir has provided important information about the system's plumbing. The main source of fluid appears to be linked to an active fault under the area, that strikes nearly NNE.

6 HEIMILDIR

- Ágúst Guðmundsson, Sigurður Brynjólfsson og Magnús Þór Jónsson 1993. Structural analysis of a transform fault-rift zone junction in North Iceland. *Tectonophysics* 220, 205-221.
- Benedikt Steingrímsson, Ásgrímur Guðmundsson, Hilmar Sigvaldason, Ómar Sigurðsson og Einar Gunnlaugsson 1986. Nesjavellir, hola NJ-11. Borun, rannsóknir og vinnslueiginleikar. *Skýrsla Orkustofnunar OS-86025/JHD-05*. Orkustofnun, Reykjavík.
- 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.
- Knútur Árnason, Guðmundur I. Haraldsson, Gunnar V. Johnsen, Gunnar Þorbergsson, Gylfi Páll Hersir, Kristján Sæmundsson, Lúðvík S. Georgsson og Snorri P. Snorrason 1985. Nesjavellir. Jarðfræði- og jarðeðlisfræðileg könnun 1985. *Skýrsla Orkustofnunar OS-93037/JHD-10*. Orkustofnun, Reykjavík.
- Kristján Ágústsson 1998. Jarðskjálftahrina á Hellisheiði 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, Hita-veita Reykjavíkur og Landmælingar Íslands, Reykjavík.
- McMaster, R.L., J.-G.E. Schilling og P.R. Pinet 1977. Plate boundary within Tjörnes fracture zone on northern Iceland's insular margin. *Nature* 269, 663-668.
- Páll Einarsson og Jón Eiríksson 1982. Earthquake fractures in the districts Land and Rangárvellir in the South Iceland seismic zone. *Jökull* 32, 113-120.
- Ragnar Stefánsson, Reynir Böðvarsson, R. Slunga, Páll Einarsson, Steinunn S. Jakobsdóttir, H. Bungum, S. Gregersen, J. Havskov, J. Hjelm 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. *Seismol. Res. Lett.* 67, 35-46.
- 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.
- Sigurður Th. Rögnvaldsson og Grímur Björnsson 1995. Upptakagreining smáskjálfta á Nesjavöllum í ársbyrjun 1995. *Skýrsla Orkustofnunar OS-95034/JHD-05*. Orkustofnun, Reykjavík.
- Sigurður Th. Rögnvaldsson og R. Slunga 1999. Kortlagning virkra misgengisflata. <http://www.vedur.is/~sr/sprungur.html>, síðast breytt 4. mars 1999. Veðurstofa Íslands, Reykjavík.
- Sigurður Th. Rögnvaldsson, Kristján Ágústsson, Bergur H. Bergsson og Grímur Björnsson 1998a. Jarðskjálftamælanet í nágrenni Reykjavíkur - lýsing á mælaneti og fyrstu niðurstöður. *Rit Veðurstofu Íslands VÍ-R98001-JA01*. Veðurstofa Íslands, Reykjavík.
- Sigurður Th. Rögnvaldsson, Gunnar B. Guðmundsson, Kristján Ágústsson, Steinunn S. Jakobsdóttir, R. Slunga og Ragnar Stefánsson 1998b. Overview of the 1993-1996 seismicity near Hengill. *Rit Veðurstofu Íslands VÍ-R98006-JA05*. Veðurstofa Íslands, Reykjavík.
- Sigurður Th. Rögnvaldsson, Ágúst Guðmundsson og Ragnar Slunga 1998c. Seismotectonic

analysis of the Tjörnes fracture zone, an active transform fault in North Iceland. *J. Geophys. Res.* 103, 30117–30129.

- Sigurður Th. Rögnvaldsson, Þóra Árnadóttir, Kristján Ágústsson, Þórunn Skaftadóttir, Gunnar B. Guðmundsson, Grímur Björnsson, Kristín S. Vogfjörð, Ragnar Stefánsson, Reynir Böðvarsson, R. Slunga, Steinunn S. Jakobsdóttir, Bergþóra Þorbjarnardóttir, Pálmi Erlendsson, Bergur H. Bergsson, Sturla Ragnarsson, Páll Halldórsson, Barði Þorkelsson og Margrét Ásgeirsdóttir 1998d. Skjálftahrina í Ölfusi í nóvember 1998. *Greinargerð Veðurstofu Íslands VÍ-G98046-JA09*. Veðurstofa Íslands, Reykjavík.
- Sigurður Th. Rögnvaldsson, Kristín S. Vogfjörð og R. Slunga 1999. Kortlagning brotflata á Hengilssvæði. *Rit Veðurstofu Íslands VÍ-R99002-JA01*. Veðurstofa Íslands, Reykjavík.
- 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.
- Þóra Árnadóttir, Sigurður Th. Rögnvaldsson, Kristján Ágústsson, Ragnar Stefánsson, Sigrún Hreinsdóttir, Kristín S. Vogfjörð og Gunnar Þorbergsson 1999. Seismic swarms and surface deformation in the Hengill area, SW Iceland. *Seismol. Res. Lett.* 70, 269.

ISSN 1025-0565
ISBN 9979-878-16-9

Kápmynd: Klósigar (vatnslær)
Ljós.: Guðmundur Hafsteinsson, veðurfræðingur