

3417/SF



ORKUSTOFNUN

RANNSÓKNASVIÐ - Reykjavík, Akureyri

**Kortlagning brotflata
með smáskjálftum
í nágrenni Grændals**

Kristín Vogfjörð

Unnið fyrir Sunnlenska orku ehf.

2000

OS-2000/031





Skýrsla nr: OS-OS-2000/031	Dags: Maí 2000	Dreifing: <input type="checkbox"/> Opin <input checked="" type="checkbox"/> Lokuð til 2005.12.31
Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill: Kortlagning brotflata með smáskjálftum í nágrenni Grændals	Upplag: 30	
	Fjöldi síðna: 20	
Höfundar: Kristín S. Vogfjörð	Verkefnisstjóri: Ómar Sigurðsson	
Gerð skýrslu / Verkstig: Skjálftamælingar, sprungukortlagning	Verknúmer: 8-630875	
Unnið fyrir: Sunlenska orku ehf.		
Samvinnuaðilar:		
Útdráttur: Gerð er grein fyrir mælingum á smáskjálftavirkni í Grændal norðan Hveragerðis í tengslum við fyrirhugaða borun eftir heitu vatni þar. Byggt er á stafrænu landsneti Veðurstofu Íslands sem skráir og staðsetur sjálfvirkt skjálfta. Beitt er nýjum staðsetningaraðferðum, en þegar vel tekst til geta þær gefið næga nákvæmni til að skilgreina virkar sprungur undir yfirborði jarðar, allt í senn strik, halla og færslustefnu. Slíkar sprungur eru reennslisleiðir vatns í berggrunninum og geta ásamt öðrum mælingum gefið upplýsingar um innviði jarðhitakerfa. Með greiningu á upptökum skjálfta innan Grændalssvæðisins, úr fjórum helstu skjálftahrinum ársins 1999, er unnt að afmarka sex misgengisfleti af nokkru öryggi og mögulega aðra fimm til viðbótar. Niðurstöður benda til að mesta virknin sé á norðurjaðri Grændalssvæðisins þar sem stefna virkra misgengja undir yfirborði er frá 40° til 67°, og halli þeirra oftast nálægt lóðréttu, og að misgengin eru nokkurn veginn á sama stað og yfirborðsjarðhitinn fer frá því að vera NV-SA lægur yfir í að vera N-S lægur eftir endilöngum Grændal. Sunnar á svæðinu eru virk misgengi með bæði norðlæga og austlæga stefnu, en ekki er unnt að ákvarða strikstefnu þeirra ótvírætt. Verkið er unnið fyrir Sunlenska orku ehf.		
Lykilorð: Grændalur, skjálftavirkni, brotflétir, sprungur, jarðhitakerfi	ISBN-númer:	
	Undirskrift verkefnisstjóra: <i>Ómar Sigurðsson</i>	
	Yfirfarið af: KÁ, PI	



ORKUSTOFNUN
Rannsóknasvið

Verknr. 8-630875

Kristín S. Vogfjörð

Kortlagning brotflata með smáskjálftum í nágrenni Grændals

Unnið fyrir Sunnlenska Orku ehf.

OS-2000/031

Maí 2000

ORKUSTOFNUN - RANNSÓKNASVIÐ
Reykjavík: Grensásvegi 9, 108 Rvk. - Sími 569 6000 - Fax 568 8896
Akureyri: Glerárgötu 36, 600 Ak. - Sími 463 0957 - Fax 463 0998
Netfang os@os.is - Veffang: <http://www.os.is>

EFNISYFIRLIT

1	Inngangur	3
2	Aðferðir	3
3	Gögn og úrvinnsla	6
	3.1 Skjálftavirkni svæðisins	6
	3.2 Niðurstöður upptakagreiningar	7
4	Samantekt og umræða	13
5	Þakkir	18
6	Heimildir	19

1 INNGANGUR

Vegna fyrirhugaðrar borunar eftir heitu vatni í Grændal, norðan Hveragerðis (sjá mynd 1), á vegum Sunnlenskrar Orku ehf., var ráðist í að kortleggja skjálftavirknina á svæðinu með nýjustu staðsetningaraðferðum. Þegar vel tekst til geta slíkar aðferðir gefið næga nákvæmni til að skilgreina virkar sprungur undir yfirborði jarðar; allt í senn, strik, halla og færslustefnu. Líklegt er að vatnið í berggrunninum finni sér rennislísiðir um neðanjarðarsprungur og til að viðhalda lekt þeirra yfir langan tíma þurfa sprungurnar að vera virkar. Þess vegna getur kerfisbundin kortlagning virkra sprungna undir yfirborði gefið upplýsingar um mögulegar rennislísiðir vatns í berggrunninum. Samtúlkaðar með niðurstöðum annarra athugana, eins og t.d. kortlagningar jarðviðnáms í berggrunninum, fela þessar mælingar í sér möguleika á að veita afgerandi upplýsingar um innviði jarðhitakerfa, og gera þar með vinnslu þeirra markvissari og ódýrari.

Sprungur hafa áður verið kortlagðar á þennan hátt norðar á Hengilssvæðinu og við Nesjavelli (Sigurður Th. Rögnvaldsson et al. 1999), en einnig sunnar og vestar á Hengilssvæðinu (Sigurður Th. Rögnvaldsson et al. 1998a,b; Sigurður Th. Rögnvaldsson 2000). Undir Nesjavöllum virðist einn slíkur kortlagður brotflötur tengjast lágviðnámi og gjöfulegum borholum og hugsanlegt er að þar hafi tekist að kortleggja aðfærsluæð til jarðhitakerfisins. Á svæðinu umhverfis Grændal hefur verið mikil skjálftavirkni undanfarin ár og því mætti ætla að þar væri ákjósanlegur staður til sprungukortlagningar undir yfirborði.

2 AÐFERÐIR

Stafrænt landsnet Veðurstofu Íslands, SIL netið, skráir og staðsetur sjálfvirkt skjálfta á skjálftasvæðum Íslands (Ragnar Stefánsson et al. 1993; Reynir Böðvarsson et al. 1996). Í núverandi mynd getur netið staðsett alla skjálfta á Hengilssvæðinu, sem eru stærri en $M_L = -0.3$ (á Richterkvarða) (Sigurður Th. Rögnvaldsson et al. 1998b). Nákvæmni skjálftastaðsetninga í kerfinu fer eftir því á hvaða svæði skjálftinn er, og hver stærð hans er, en að jafnaði er nákvæmnin nokkur hundruð metrar. Auk staðsetninganna metur SIL kerfið einnig brotlausnir allra skjálfta út frá fyrstu hreyfistefnu P -bylgna ásamt sveifluvidd (*e. amplitude*) P - og S -bylgna, og geymir þær lausnir sem falla innan ákveðinna marka frá mældu gildunum sem mögulegar brotlausnir (Sigurður Th. Rögnvaldsson og Ragnar Slunga 1993). Hver brotlausn lýsir í raun tveim hornréttum brotflötum sem báðir geta uppfyllt sömu útgeislunarskilyrði, þ.e. þeir búa til nákvæmlega eins útgeislunarmynstur. Til að gera upp á milli þeirra þurfa að koma til aðrar mælingar, eins og sjáanleg brot á yfirborði, mælanlegt hník á yfirborði (t.d. með GPS mælingum) eða nógu nákvæmt ákvörðuð upptakadreifing smáskjálftaþyrpingar á svæðinu til að afmarka sameiginlegan brotflöt.

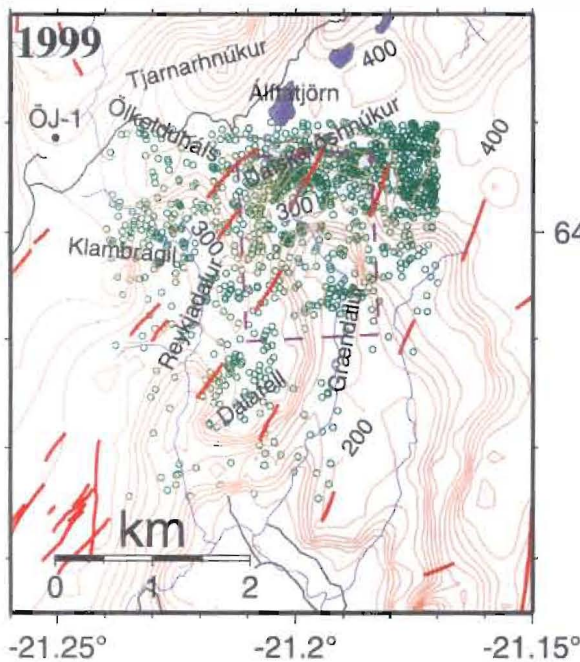
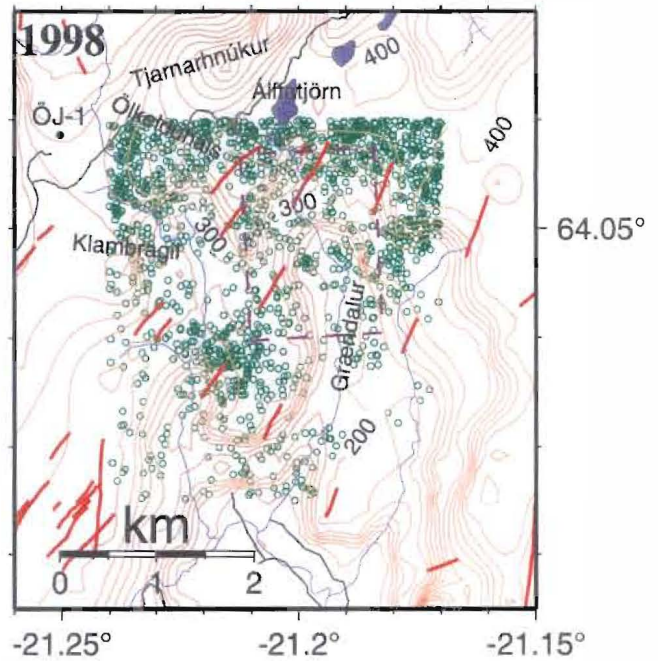
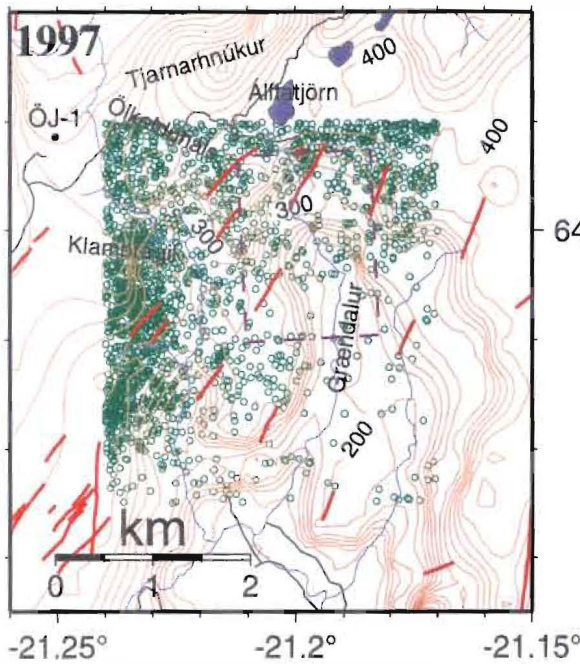
Hægt er að bæta nákvæmni jarðskjálftastaðsetninganna til muna með því að beita afstæðum staðsetningaraðferðum, sem einnig hafa verið nefndar upptakagreining. Þá er tímamunur á hverri mælistöð, fyrir mismunandi skjálfta, fundinn mjög nákvæmlega með víxlfylgni-

reikningum (*e. cross-correlation*) (Ragnar Slunga et al. 1995). Hver skjálfti er þannig staðsettur með tilliti til u.þ.b. 10-20 nálæggra skjálfta, eftir því hvernig stærð hveðrar grúppu er skilgreind. Þessi aðferð getur við bestu skilyrði gefið innbyrðis nákvæmni upp á ~10 m, en bætir einnig algilda staðsetningu skjálftanna, þannig að óvissa í algildri staðsetningu er oftast innan við 300 m, en fer stundum upp í nokkur hundruð metra og þá aðallega vegna aukinnar óvissu í dýpi. Aðferðin nýtir sér þá staðreynd að nálægir smáskjálftar, sem verða í ákveðnu spennusviði hafa mjög svipað útgeislunarmynstur og valda því mjög svipuðum bylgjuhreyfingum á hverri mælistöð. Innbyrðis tímamismun bylgna á mælistöðvum er því hægt að ákvarða mjög nákvæmlega með víxlfulgnireikningum, og sú nákvæmni leiðir svo áfram til mikillar nákvæmni í innbyrðis staðsetningum.

Með svo vel staðsetta skjálfta er hægt að hefja leit að brotplönunum sem þeir verða á, en þá er gert ráð fyrir að hver smáskjálfti hreyfi aðeins hluta heildarbroftatarins. Upptakadreif skjálftaþyrpingar getur þá sýnt útlínur þessa broftatar, og þar með ákvarðað strík hans og halla.

Eftir upptakagreiningu hafa útreiknuð upptök skjálfta stundum færst nokkuð til og þar með afstaða stöðva og upptaka. Þó að þessi breyting sé í flestum tilvikum lítil getur hún bjagað og snúið brotlausninni dálítið og því þarf að reikna brotlausnir skjálftanna að nýju fyrir nýju staðsetningarnar. Þetta á einkum við ef breyting verður á dýpi skjálfta, þannig að hraðinn í upptökunum breytist verulega, en þá getur orðið talsverð breyting á útfallshorni geislanna sem fara til mælistöðvanna. Loks er reynt að samtúlka nýju brotlausnirnar og sameiginlega planið sem dreifing skjálftaupptakanna skilgreinir, en þá ætti annar brotlausnarflötur hvers skjálfta að falla nokkurn veginn að heildarsprunguflötinum. Ef slíkt samræmi kemur í ljós er hægt að álykta að tekist hafi að kortleggja sprunguflöt með áreiðanlegum hætti. Út frá færslustefnunni í hverjum einstökum skjálfta er síðan hægt að meta meðalfærslustefnuna á sprungunni.

Hugbúnaðurinn sem notaður er við jarðskjálftaúrvinnslu á Veðurstofu Íslands er í stöðugri þróun. Brotlausnaforritunum hefur til dæmis nýlega verið breytt. Enn fremur framkvæmdi höfundur afstæða staðsetningarhugbúnaðarins, Ragnar Slunga hjá Háskólanum í Uppsölum, miklar endurbætur á kóðanum á síðastliðnu ári, en þá var breytt aðferðum við víxlfulgnireikninga og einnig umsýslu niðurstaðna. Í stað þess að staðsetja hvern skjálfta með tilliti til n nálægustu skjálfta, þá er hann staðsettur með tilliti til n líkustu skjálfta, þ.e.a.s. skjálfta sem hafa líkasta útgeislun á nokkrum nálægustu stöðvum. Einnig er hægt að meðhöndla stærra safn skjálfta en áður, velja stöðvar í úrtakið og velja tímalengd gluggans sem notaður er í víxlfulgnireikningana. Þá er einnig notast við breiðara tíðniband í víxlfulgnireikningunum en áður, en það ætti að auðvelda meðhöndlun stærra skjálfta. Í fyrstu var þessum nýja hugbúnaði beitt á skjálftaúrvalið sem hér er til umfjöllunar, en ekki tókst að fá forritin til að nálgast lausn (*e. converge*), þ.e. staðsetningarnar urðu ekki stöðugar. Þess vegna var horfið til fyrra fyrirkomulags, og eldri útgáfu hugbúnaðarins beitt á gagnasafnið. Eitthvað af villum í nýja hugbúnaðinum hafa verið leiðréttar, en hann hefur hins vegar ekki verið fullprófaður aftur.



Mynd 1. Kort af Grændalssvæðinu, sem sýnir skjálftavirkni árána 1997 (efst), 1998 (miðju) og 1999 (neðst). Skjálftarnir eru sýndir með grænum hringjum, sprungur á yfirborði með rauðum þykku línunum og vegir og slóðar með svörtum og brúnum línunum. Helstu kennileiti eru merkt inn á kortið og einnig staðsetning borholunnar, ÖJ-1 á Ölkelduhálsi. Útlínur svæðisins sem er til athugunar, eru dregnar með fjólubláum brotnum línunum.

3 GÖGN OG ÚRVINNSLA

3.1 Skjálftavirkni svæðisins

Skjálftavirkni á Hengilssvæðinu hefur aukist mikið síðan í júlí árið 1994 (Sigurður Th. Rögnvaldsson et al. 1998b,a), en á því tímabili hafa mörg þúsund skjálftar orðið á hverju ári. Þessi virkni náði hámarki í júní árið 1998, þegar þúsundir skjálfta urðu á nokkurra vikna tímabili. Hrinan hófst á Ölkelduhálsi, á norðanverðu Hengilssvæðinu (sjá mynd 1), og breiddist út til suðurs, allt suður í Ölfus. Margir stórir skjálftar urðu í hrinunni, m. a. einn af stærð $M_L = 5.1$ á norðanverðri Hellisheiði (Kristján Ágústsson 1999; Þóra Árnadóttir et al. 1999; Ragnar Stefánsson et al. 1999). Í nóvember sama ár varð aftur mikil virkni í Ölfusi, en nyrðri hluti Hengilssvæðisins var áfram virkur, þó mikið hafi dregið úr virkninni. Frá miðju ári 1999 virðist virknin vera komin í samt horf og fyrir árið 1994 (Gunnar Guðmundsson, pers. upplýs., 2000). Á þessum sama tíma og skjálftavirkni hefur aukist hefur land einnig risið um nokkra cm á Hengilssvæðinu, en það hefur verið túlkað sem kvikuinnflæði inn í skorpuna, á ~6 km dýpi undir Hrómundartindseldstöðinni, á svæði sem afmarkast af Tjarnarhnúki í norðri, Dalafelli í suðri, Grændal í austri og Klambragili í vestri (Freysteinn Sigmundsson et al. 1997). Seinni tíma GPS mælingar sýna áframhaldandi landris, allt fram til júní 1998 (Sigrún Hreinsdóttir 1999). Líkanreikningar byggðir á þessum mælingum ásamt hallamælingum Norrænu Eldfjallastöðvarinnar á Ölkelduhálsi, gefa hins vegar tvær uppsprettur fyrir landrisið. Aðra á 8 km dýpi, við botn Grændals, rétt austur af Klambragili, og hina á 400 m dýpi á vestanverðum Ölkelduhálsi, í námunda við holu ÖJ-1 (Þóra Árnadóttir, pers. upplýs., 2000). GPS mælingar frá mars 1999 sýna mjög litlar færslur milli 1998 og 1999, sem bendir til að landrisið verði í hrinum líkt og skjálftarnir (Sigrún Hreinsdóttir 1999), eða jafnvel að dregið hafi úr því eins og skjálftavirkninni.

Við áramótin 1996/1997 bættust við fjórir skjálftamælar á Hengils- og Bláfjallasvæðinu og juku þar með næmni SIL kerfisins og nákvæmni staðsetninga á svæðinu frá Hengli að Kleifarvatni (Sigurður Th. Rögnvaldsson et al. 1998b). Næmni kerfisins á Grændalssvæðinu, sem hér er til athugunar, er eins og hún getur best orðið, þ.e. skjálftar af stærð $M_L \geq -0,4$ skrást á fjórar mælistöðvar. Í úrvalinu var þó lágmarkið sett við $M_L \geq 0$. Hin aukna nákvæmni í staðsetningum frá árslokum 1996, olli því einnig að einungis var athuguð skjálftavirkni síðustu þriggja ára innan Grændalssvæðisins. Svæðið er merkt er með fjólubláum brotnum línunum á mynd 1, þar sem einnig eru sýnd kortlögð misgengi á yfirborði (Kristján Sæmundsson 1995a), og skjálftavirkni hvers árs fyrir sig. Þó dregið hafi úr skjálftavirkni á Hengilssvæðinu árið 1999, er mesta virknin innan Grændalssvæðisins það ár, eða 453 skjálftar af stærð $M_L \geq 0$. Árið 1997 urðu 282 skjálftar á þessu stærðarbili á svæðinu, og 1998 voru þeir 341. Vegna hinnar miklu virkni var valið að skoða einungis skjálfta ársins 1999 í þetta sinn. Skjálftarnir eru yfirleitt á 1,5–5,5 km dýpi og oft á hallandi brotplönum. Til að ná yfir sem flesta fleti, sem skera yfirborð innan rammans, var stærð svæðisins sem leitað var á, aukin um 100 m í allar áttir. Þá fjölgaði skjálftum í 535 árið 1999. Flestir skjálftanna urðu í fjórum nokkurra daga hrinum: 28.–29. apríl urðu 43 skjálftar, 25.–30. maí urðu 242 skjálftar, 8.–10. júní urðu 46 skjálftar og 27.–28. september urðu 26 skjálftar.

3.2 Niðurstöður upptakagreiningar

Í upphafi verkefnisins fór umtalsverður tími í að reyna að fá staðsetningarnar með nýja hugbúnaðinum til að verða stöðugar, en kerfisbundinn munur var á niðurstöðum eftir því á hvaða vélum (sparc eða intel) forritin voru keyrð. Í septemberhrinunni var þessi munur til dæmis innan við 100 m í lengd og breidd, en allt að 600 m í dýpi. Það samsvarar um 0,1 sek. kerfisbundnum tímamismun, sem er stærri en algild óvissa og er því ekki ásættanlegt. Líklegra orsaka er að leita í forritunum sjálfum (þ.e. í þeim gæti verið að safnast upp skekkja vegna forritunarvillu), eða hugsanlega í tímahliðrun sem var gerð í SIL kerfinu, 1. september á síðastliðnu ári. Þessi hliðrun (um 69 ms) stafar af nýrri tegund stafsetjara sem þá fóru að bætast við kerfið. Eldri stafsetjararnir, frá Nanometrics eru með um 69 ms seinkun og fyrir tilkomu þeirra nýju var allt kerfið seint um þennan tíma. Fram að 1. sept. á síðastliðnu ári var gögnum frá stöðvum með nýju stafsetjarana seinkað til að vera í fasa við önnur gögn, en eftir þann tíma var öllu kerfinu flýtt til að vera á réttum tíma. Þá þurfti að flýta gögnum úr gömlu stafsetjurunum um 69 ms, á meðan gögn úr þeim nýju voru óbreytt. Villur í þessum tímahliðrunum gætu valdið allt að 400 m kerfisbundinni hliðrun á niðurstöðunum.

Til samanburðar var eldri útgáfa staðsetningarforritanna keyrð á gagnasafnið og fengust þá betri niðurstöður, þ.e.a.s. upptakadreifin varð þéttari. Kerfisbundinn mismunur reyndist þó enn vera til staðar, eftir því á hvaða vél var keyrt. Mismunurinn var þó um tíu sinnum minni en í nýju útgáfunni, eða innan við 20 m í lengd og breidd, og 40 m í dýpi, sem er langt innan óvissumarka í algildri staðsetningu skjálftanna. Hann samsvarar um 8 ms kerfisbundnum tímamismun. Vegna ófullnægjandi frammistöðu nýja hugbúnaðarins var fallið frá því að nota hann og þess í stað notuð eldri útgáfa forritanna. Niðurstöðurnar sem hér eru sýndar eru allar fengnar með eldri útgáfunni og keyrðar á aðal-sparcvél VÍ til að auka ekki við kerfisbundinn mismun á milli einstakra keyrslna (skjálftahrina). Orsök þessara mismunandi niðurstaðna þarf þó að finna í náninni framtíð svo hægt verði að beita nýja hugbúnaðinum og keyra hann á hraðvirkari vélum. Hinar nýgerðu breytingar á brotlausnaforritunum ollu einnig vandræðum, því ekki tókst að fá þau til að virka á niðurstöður eldri staðsetningarforritanna, innan þess tímaramma sem verkefninu var gefinn. Þess vegna er notast við upphaflegu brotlausnirnar í samtúlkun upptakagreiningar og brotlausna. Afleiðingarnar eru sennilega heldur meiri mismunur á milli einstakra brotflata og heildarmisgengisflatar en ella hefði fengist, þ.e. ef tími hefði gefist til að endurreikna brotlausnir.

Vegna framantalinna hindrana sem seinkuðu verkefninu umtalsvert, var einnig horfið til þess ráðs að meðhöndla einungis hrinurnar fjórar frá árinu 1999 hverja fyrir sig, í stað þess að upptakagreina allt jarðskjálftasafnið frá árinu í einni keyrslu. Í úrtakinu lenda allar þær stöðvar sem hafa gögn, en þær eru allar stöðvar á Suðvesturlandi, vestan við Miðmörk, að jafnaði 15–17 stöðvar, og í u.þ.b 5–80 km fjarlægð. Fjallað er um niðurstöður hvernar hrinu fyrir sig og hlestu niðurstöður, eins og strik og halli plana, eru svo teknar saman í töflu 1, í kafla 4.

Hrina 1: 28.–29. apríl

Hrina 1 stóð í tvo daga innan leitarsvæðisins, og á þeim tíma urðu 43 skjálftar af stærð $0 \leq M_L \leq 1,7$. Mynd 2 sýnir staðsetningar fyrir og eftir upptakagreiningu. Skjálftarnir mynda tvær þyrpingar, sem þéttast við upptakagreininguna. Nyrðri þyrpingin, við Dalaskarðshnúk, virðist samsett úr tveim brotplönum, með svipaða strikstefnu og halla en hliðruð um ~ 150 m á 3,2 km dýpi. Skjálftadreifin sem skilgreinir efra planið inniheldur 18 skjálfta sem mynda strikstefnu um 39° og halla til suðausturs. Upphaf hrinunnar er í norðvestur horninu, á 1,8 km dýpi, en virknin breiðist út til norðausturs og síðan niður eftir brotflatinum til suðurs. Á efri hluta plansins er hallinn um 75° , en minnkar í 65° á neðri hluta þess, á milli 2,4–3,2 km dýpis, þar sem 14 skjálftar skorða flötinn. Syðst á fletinum, á 3,2 km dýpi hliðrast virknin til suðausturs um ~ 150 m og heldur svo áfram þar niður eftir nýjum brotflat. Á honum eru þó einungis 5 skjálftar og þvermál flatarins sem þeir dreifast yfir er einungis um 150 m og því ekki nóg til að skorða flöt. Efri flöturinn er hins vegar vel skorðaður, því þar hafa skjálftarnir um 770 m lárétta dreifingu og um 800 m lóðrétta dreifingu. Áætluð innbyrðis óvissa í staðsetningum skjálftanna er yfirleitt 5–20 m, en óvissa í algildri staðsetningu er 200–450 m. Meðalfjarlægð skjálftanna 14 frá sameiginlegu plani er 14 m, sem er innan óvissumarkanna. Skurðlína plansins við yfirborð er um 400 m norðvestar, á Ölkelduhálsi.

Brotlausnir skjálftanna falla þökkalega að planinu, en miðgildi minnsta fráviks brotlausnanna frá planinu er um 12° . Færslustefnan í skjálftunum er mjög breytileg, en þó virðist sambland af vinstri handar sniðgengi og samgengi vera algengt. Þessi breytileiki getur stafað af því að við upptakagreiningu færðust flestir skjálftanna um 1 km ofar í skorpuna og það gæti hafa breytt útfallshorni geisla til stöðva verulega og þar með gert þessar gömlu brotlausnir vafasamar. Mynd 3a sýnir brotflat skjálftanna. Þar er horft ofan á yfirborð jarðar og má sjá stærð hvers einstaks brotlausnarflatar. Mynd 3b sýnir lóðrétt þversnið, hornrétt á planið, og þar sést einnig að halli sameiginlega flatarins minnkar með dýpi, og að hann hliðrast til suðausturs á um 3,2 km dýpi.

Syðri skjálftaþyrpingin, undir Dalafelli, samanstendur af 11 skjálftum. Lárétt dreifing þeirra er um 300 m og dreifing þeirra í dýpi er um 500 m, frá 3,5–4,0 km dýpis. Skjálftarnir eru of fáir til að hægt sé að skorða strik eða halla plans út frá skjálftadreifinni.

Hrina 2: 25-30 maí

Hrina 2 stóð í fimm daga og framkallaði 243 skjálfta innan leitarsvæðisins, af stærð $0 \leq M_L \leq 3,5$, en 10 þeirra er hafnað í staðsetningarferlinu. Mynd 4 sýnir staðsetningar fyrir og eftir upptakagreiningu og eins og áður þéttist upptakadreifin við endurstaðsetningu. Breytingar í dýpi skjálftanna eru oftast innan við ± 500 m. Skjálftarnir mynda nyrðri þyrpingu, undir og austur af Dalaskarðshnúki, og syðri þyrpingu, undir Grændal, og inniheldur sú nyrðri mun fleiri skjálfta.

Flestir skjálftarnir í þyrpingunni undir Grændal urðu þann 28. maí. Besta plan sem 13 skjálftar í þessari þyrpingu skorða hefur strik 266° og halla 79° . Dreifing skjálftanna er um flöt, 360 m að þvermáli, á dýptarbilinu 4,5–4,8 km og meðalfrávik þeirra frá planinu er um 21 m. Innbyrðis og algild óvissa sumra skjálftanna er hins vegar mjög stór og gerir staðsetningar vafasamar. Framlengdur til yfirborðs sker þessi flötur um 900 m sunnar, í austurhlíðum Dalafells.

Brotlausnir skjálftanna í Þyrpingunni falla vel að fletinum sem skjálftadreifin afmarkar. Miðgildi minnsta fráviks brotlausna frá planinu er 7° og færslustefnan er nær hreint vinstri handar sniðgengi.

Í nyrðri Þyrpingunni er hægt að skilgreina tvo misgengisfleti, sem liggja norðar og neðar en hrina 1; nánar tiltekið, suður af Álfatjörn og undir austurhlíðum Dalaskarðshnúks. Skjálftadreifin sem skilgreinir flöt a hefur um 810 m lárétta dreifingu og um 500 m dýptardreifingu, frá 4,6 niður á 5,1 km dýpi. Þessi flötur virðist afmarka virknina, þ.a. hún er að mestu fyrir sunnan flötinn. Strikstefnan, sem er ákvörðuð af 40 skjálftum, er 67° og hallinn er 89° til suðvesturs, þ.e. flöturinn er nokkurn veginn lóðréttur og sker yfirborð um 80 m norðvestan við skjálftadreifina. Virknin byrjaði eftir miðnætti þann 26. á nyrðri hluta sprungunnar og breiddist út til suðurs á næstu dögum. Hún var mest fyrstu tvo sólarhringana, en entist þó fram til 29. maí. Innbyrðis óvissa skjálftanna er yfirleitt á bilinu 7–22 m, en algild óvissa 120–280 m. Meðalfjarlægð skjálftanna frá sameiginlegu plani er 18 m, sem er nálægt óvissumörkum staðsetninganna.

Brotlausnir skjálftanna falla þokkalega að misgengisfletinum, en miðgildi minnsta fráviks brotlausnanna frá fletinum er 14° . Strikstefna brotflatanna er almennt í góðu samræmi við besta plan, en halli þeirra er yfirleitt $\sim 77^\circ$ í andstæða átt og er því aðalorsakavaldur fráviksins. Færslustefna í skjálftunum er oftast sambland af siggengi og hægri handar sniðgengi. Skjálftadreifin getur einnig afmarkað flöt b í þessari Þyrpingu, sem greinist suður úr miðju flatar a og liggur meðfram vestari hluta hans. Strikstefna flatarins er nokkuð norðlægari en a , eða 55° , en hallinn sá sami, 89° . Þetta misgengi var að hreyfast í um tvo sólarhringa, frá því snemma morguns þann 26., þar til árla þann 28. Dýptardreifingin er frá 4,5–5,0 km og lárétt dreifing um 260 m. Innbyrðis óvissa í staðsetningum er á bilinu 5–15 m, en algild óvissa er á bilinu 120–240 m. 36 skjálftar skorða flötinn, þar sem meðalfjarlægð skjálfta frá planinu er 17 m, en það er heldur meira en innbyrðis óvissa staðsetninganna. Þetta gæti verið sökum þess að skjálftarnir væru á fleiri en einu plani.

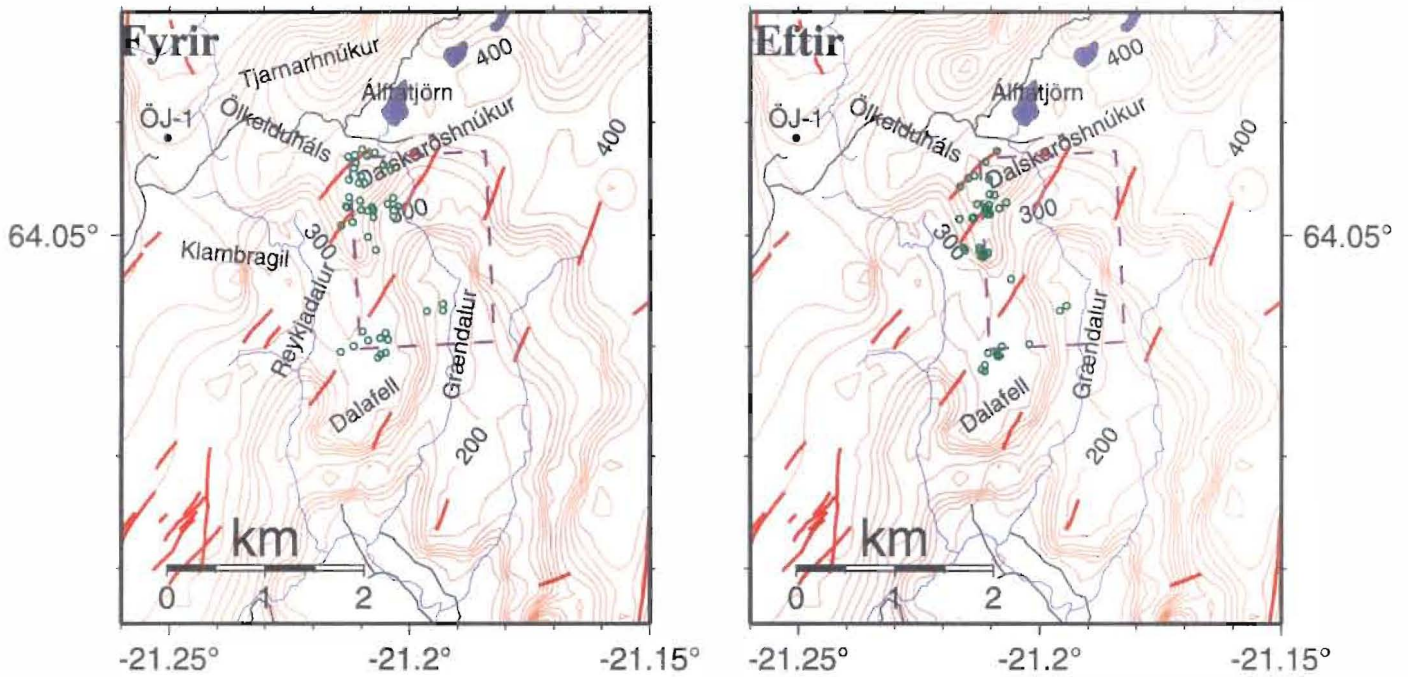
Brotlausnir falla betur að þessum misgengisfleti, en miðgildi minnsta fráviks brotlausnanna frá honum er 9° . Ríkjandi færslustefna í skjálftunum er oftast hægri handar sniðgengi, stundum með dálitlum siggengisþætti.

Ekki tókst að skilgreina ótvíræð plön út frá leifinni sem eftir er, en hún inniheldur um 140 skjálfta.

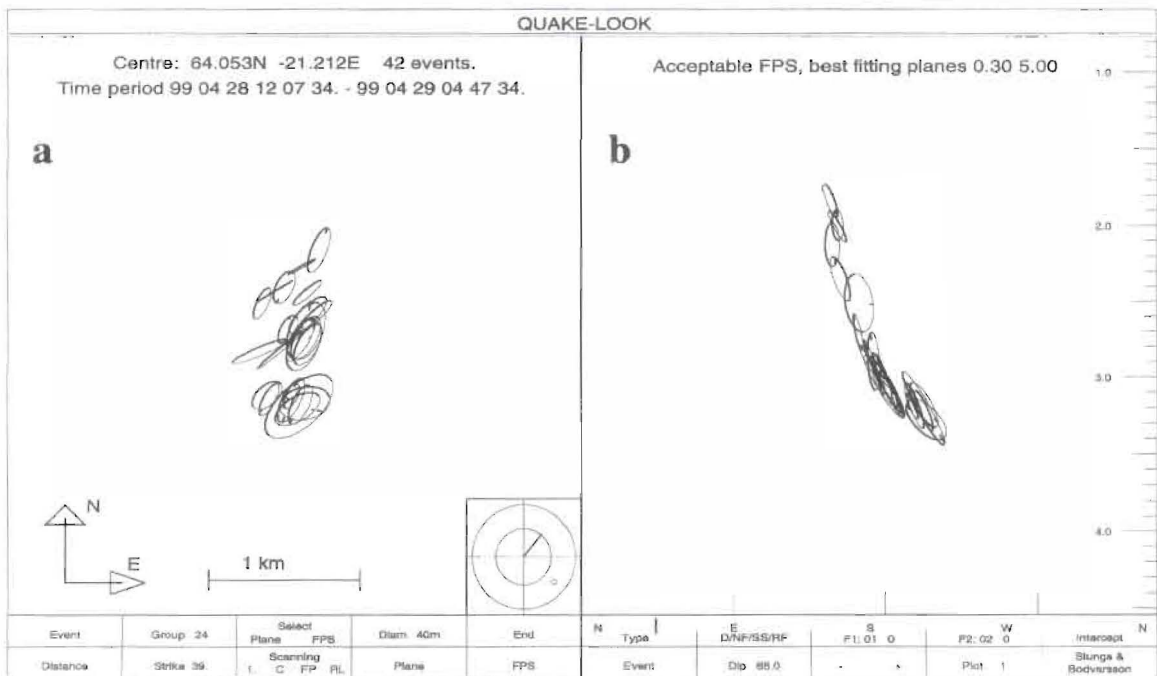
Hrina 3: 8.–10. júní

Hrina 3 varaði í tvo sólarhringa. Hún hófst upp úr miðnætti 18. júní og lauk laust eftir miðnætti 10. júní. Á því tímabili urðu 46 skjálftar af stærð $0 \leq M_L \leq 1,5$ innan leitar-svæðisins. Staðsetningar fyrir og eftir upptakagreiningu eru sýndar á mynd 5, þar sem sjá má að upptakagreiningin skilur skjálftana að í tvær mjög þéttar Þyrpingar. Breyting í dýpi skjálftanna við upptakagreiningu er innan við ± 500 m.

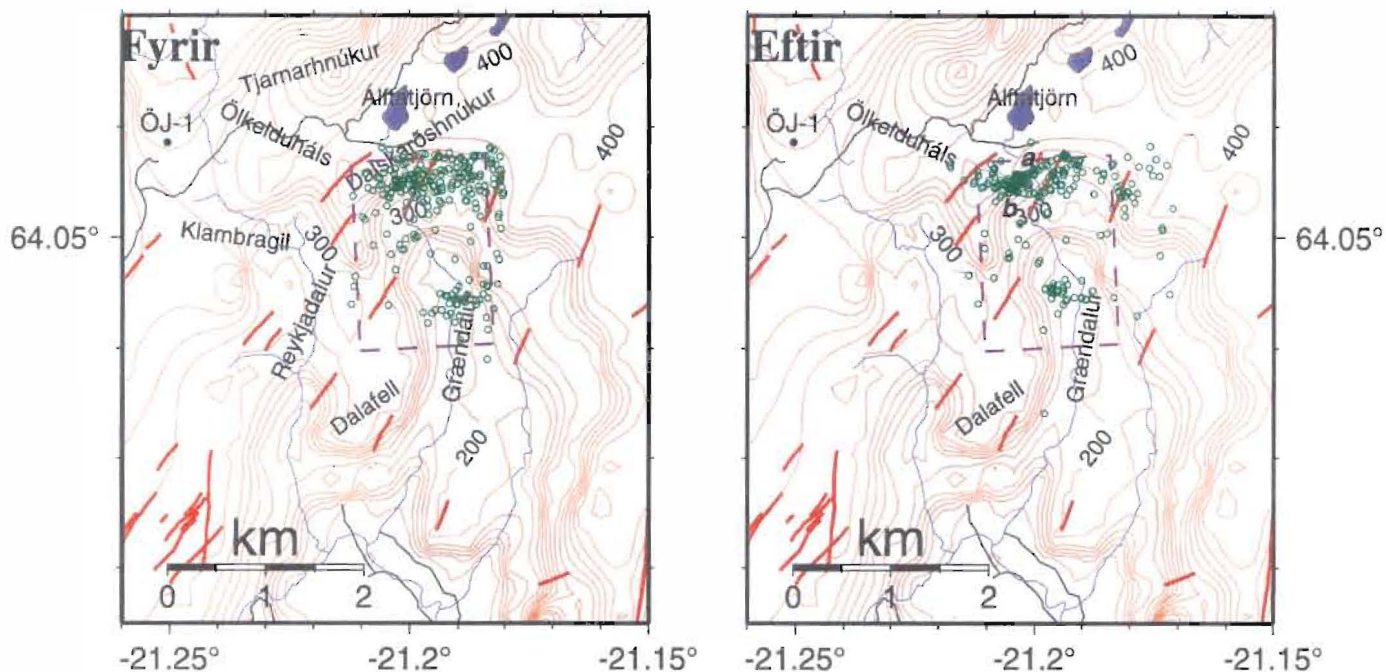
Syðri Þyrpingin, austur af Reykjadal, samanstendur af 8 skjálftum. Þeir urðu í hálf tímalangri hrinu, sem hófst upp úr miðnætti 10. júní og skilgreina plan með strikstefnu 97° og halla 87° til suðurs, þannig að flöturinn sker yfirborð um 200 m norðan við skjálftaklasann. Skjálftarnir dreifast á 520 m langa lárétta línu og dýptardreifing þeirra er frá 3,6–4,1 km. Innbyrðis óvissa í staðsetningum er á bilinu 9–40 m á meðan algild óvissa er milli 280 og 370 m. Meðalfjarlægð skjálftanna frá planinu er 17 m, sem er inna óvissumark.



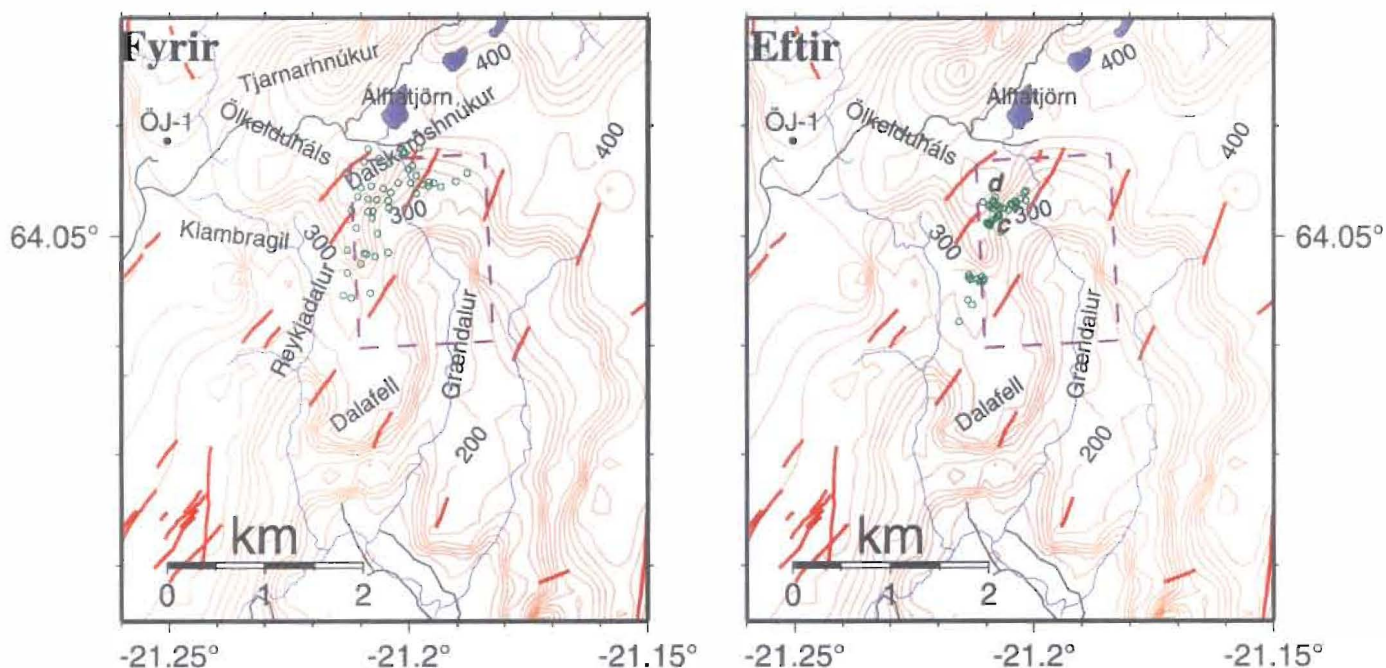
Mynd 2. Staðsetningar skjálfta úr hrinu 1, frá 28. til 29. apríl 1999, fyrir (vinstri) og eftir (hægri) upptakagreiningu. Skjálftarnir eru sýndir með grænum hringum og borholan á Ölkelduhálsi með svörtum fylltum hring. Kortlögð misgengi á yfirborði eru sýnd með rauðum þykkum línum og helstu kennileiti eru merkt inn á. Eftir upptakagreiningu koma í ljós tvær skjálftaþyrpingar. Sú nyrðri er suður af Dalaskarðshnúki, en sú syðri er undir Dalafelli.



Mynd 3. Brotfletir skjálftanna í þyrpingunni suður af Dalaskarðshnúki. Hver skjálfti er sýndur með hringlaga fleti, þar sem þykkari rönd hringins snýr að áhorfanda og færslustefnan er sýnd með striki í hringinn. Á mynd a) er horft ofan á yfirborð jarðar, norður er upp og austur til vinstri. Kvarðinn er neðst fyrir miðju og neðst í hægri horni sýnir línun á hringnum áttina sem hoft er horft eftir á mynd b). Þar er horft eftir lóðréttu sniði í gegnum þyrpinguna, í stefnu N39A og sér þá á rönd brotflatanna. Dýpi í km er sýnt á lóðréttu ásnum og sami skali er á þeim lárétta. Sjá má að halli flatarins minnkar með dýpi, og að á 3,2 km dýpi hliðrast sprungan um ~150 m.



Mynd 4. Staðsetningar skjálfta úr hrinu 2, frá 25. til 30. maí 1999, fyrir (vinstri) og eftir (hægri) upptakagreiningu. Skjálftar eru sýndir með grænum hringjum og borhola á Ölkelduhálsi með svörtum fylltum hring. Kortlögð misgengi eru sýnd með rauðum þykkum línun og helstu kennileiti eru einnig merkt. Eftir upptakagreiningu þéttast þyrpingarnar. Sú syðri sem liggur undir Grændal hefur A-V-læga stefnu og 79 halla til norðurs. Í nyrðri þyrpingunni koma fram útlínur tveggja flata, sem báðir eru nær lóðréttir. Flötur a hefur stefnu N67A og flötur b N55A.



Mynd 5. Staðsetningar skjálfta úr hrinu 3, frá 8. til 10. júní 1999, fyrir (vinstri) og eftir (hægri) upptakagreiningu. Skjálftaþyrping austan við Reykjadal skilgreinir nær lóðrétt, A-V-lægt misgengi og þyrpingin austan í Dalaskarðshnúki skilgreinir plan c, með stefnu N52A og 85 halla til suðurs. Skjálftadreif d, norð-vestur úr plani c hefur strikstefnu N123A og hallar ~77 til suðurs.

Brotlausnir falla þokkalega að þessu plani, en miðgildi minnsta fráviks brotlausnar frá planinu er 15° . Brotlausnirnar sýna nær hreinar vinstri handar sniðgengishreyfingar.

Nyrðri þyrpingin, sem eins og hrina 2 er undir austurhlíðum Dalaskarðshnúks, stóð í einn og hálfan sólarhring, frá 8.–9. júní sýnir hreyfingu á tveim brotflötum. Hrinan hefst í suðvestri og breiðist út norður eftir fleti *c*, sem skilgreindur er af 23 skjálftum, með 52° stríkstefnu og 85° halla. Lárétt dreifing þeirra er 530 m og lóðrétt dreifing er 400 m, á dýptarbilinu 4,2–4,6 km. Þetta er rétt ofan við hrinu 2, en um 200 m sunnar. Flöturinn sker yfirborð 450 m suðaustan við skjálftaþyrpinguna, norður af botni Grændals. Algild óvissa í staðsetningum skjálftanna er 210–350 m og innbyrðis óvissa 8–19 m. Meðalfjarlægð skjálftanna frá planinu er við óvissumörkin, eða 18 m.

Nálægt miðju flatar *c* hleypur virknin einnig í norðvestur í stefnu 303° og teygir sig norður að efri brún plans *b* í hrinu 2. Skjálftadreifin, sem 10 skjálftar afmarka þarna, liggur á 4,4–4,6 km dýpi og getur skilgreint plan *d* með halla $\sim 77^\circ$ til suðvesturs. Lárétt dreifing á plani *d* er 210 m og lóðrétt dreifing 160 m. Algild óvissa skjálftanna er 230–260 m, en innbyrðis óvissa 7–23 m sem er heldur stærri en meðalfjarlægð skjálftanna frá planinu, en hún er 20 m. Vegna þess hve skjálftadreifin á planinu er lítil, er það hins vegar ekki vel skilgreint.

Brotlausnir falla vel að plönunum *c* og *d*, jafnvel þó skjálftadreifin skorði plan *d* ekki vel. Miðgildi minnstu fráviks einstakra brotlausnanna frá sameiginlegum brotfloti er 9° frá plani *c* og algengasta færslustefnan sem þær brotlausnir sýna er hægri handar sniðgengi með litlum siggengispætti. Miðgildi minnstu fráviks brotlausnanna frá plani *d* er 8° og ríkjandi færslustefnan þeirra er vinstri handar sniðgengi.

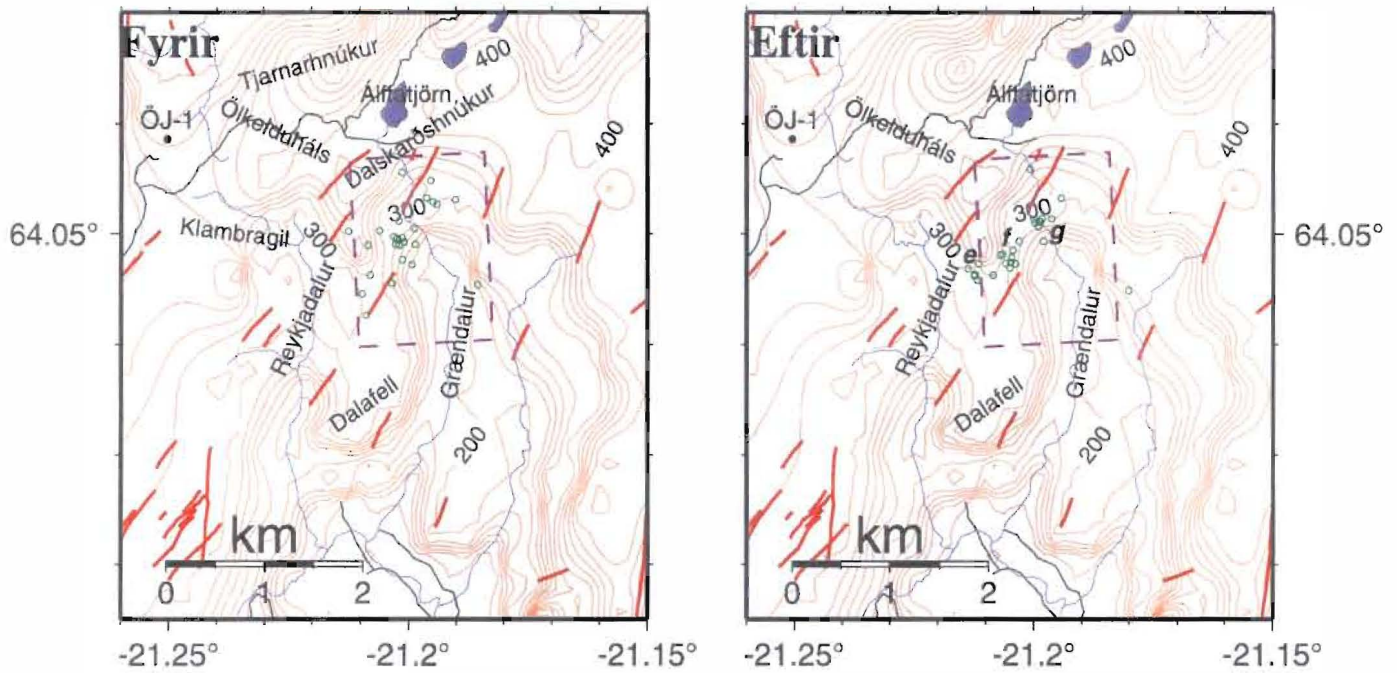
Hrina 4: 27.–28. september

Hrina 4 hófst að kvöldi 27. september og stóð í 13 klukkustundir. Þá urðu 26 skjálftar af stærð $0 \leq M_L \leq 2,2$. Af þeim, var einum hafnað í upptakagreiningunni. Við endurstaðsetningu færðust skjálftarnir ofar í skorpuna, að jafnaði um 1–2 km og er það líklegt til að breyta brotlausnunum nokkuð. Hrinan, sem var grynri en hinar þrjár fyrri, dreifði sér yfir dýptarbilið 1,3–2,0 km. Mynd 6 sýnir staðsetningar fyrir og eftir upptakagreiningu og þar sést að skjálftarnir þéttast í þrjár litlar þyrpingar eftir endurstaðsetningu. Virknin byrjaði í miðþyrpingunni og breiddist út þaðan, fyrst til suðurs og svo til norðurs. Óvissa í þessum staðsetningum er heldur meiri en í hinum hrinunum þrem, því algild óvissa er á bilinu 250–710 m og innbyrðis óvissa oftast á bilinu 8–20 m, en fer upp í 70 m í nokkrum skjálftum. Byggt á upptakadreifinni einni saman gæti hrinan hafa orðið á SV-NA misgengi sem hallar til suðausturs. Þá geta 19 skjálftanna skilgreint flöt með 990 m þvermál, stríkstefnu 49° og halla 79° . Meðalfrávik skjálftanna frá þessu plani er hins vegar mikið, eða 60 m sem er utan staðsetningaróvissumarka flestra skjálftanna. Enn fremur ef tekið er tillit til brotlausnanna, þá er miðgildi minnstu fráviks þeirra 18° , sem er í stærra lagi. Með tilliti til brotlausna, sem þó ber að hafa í huga að gætu verið eitthvað bjagaðar, er líklegra að hér sé um a.m.k. þrjá nær lóðréttu fleti að ræða, með stríkstefnu $\sim 24^\circ$ og halla $\sim 82^\circ$, því þá er miðgildi minnstu fráviks brotlausnanna einungis 4° . Á mynd 7 eru brotflétirnir sýndir (vinstri) í láréttu og (hægri) lóðréttu þversniði, þar sem horft er úr SSA (í stefnu 348°), skáhalt á sameiginlega stríkstefnu flatanna, og þar virðist raunverulega vera um a.m.k. þrjár aðskildar þyrpingar, *e*, *f* og *g* að ræða. Á lóðréttu þversniðinu sést einnig greinilega að hökin á brotflötunum sem

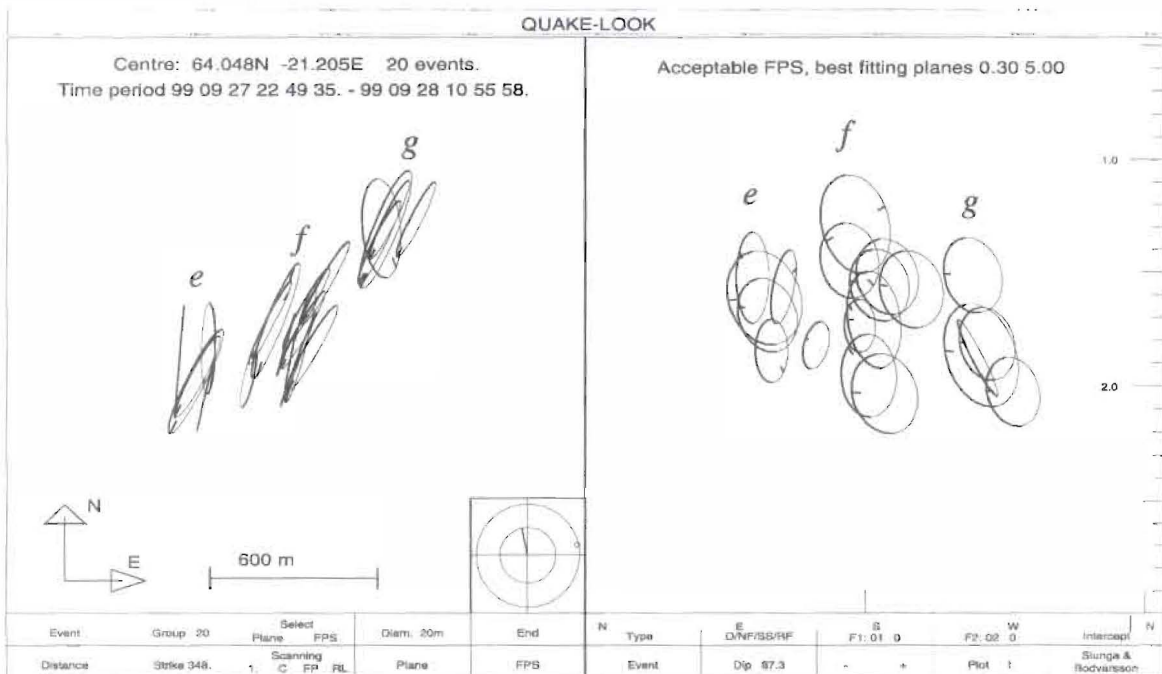
að áhorfandanum snúa, og lýsa færslustefnu á suðausturhlið misgengisins, gefa til kynna að algengasta hreyfingin er til vinstri. Það þýðir að heildarfærslustefnan á misgenginu er hægri handar sniðgengishreyfing. Vegna þess hve fáir skjálftar skilgreina hvert plan, er ekki hægt að ákvarða þau ótvírætt, en plönin mætti þó hugsanlega skorða betur, með því að stækka safnið, og bæta við smærri skjálftum, t.d. niður í $M_L = -0,4$. Það reyndist vel við aðgreiningu þriggja brotflata við Katlatjarnir (Sigurður Th. Rögnvaldsson et al. 1999), norðaustur af Álftatjörn.

4 SAMANTEKT OG UMRÆÐA

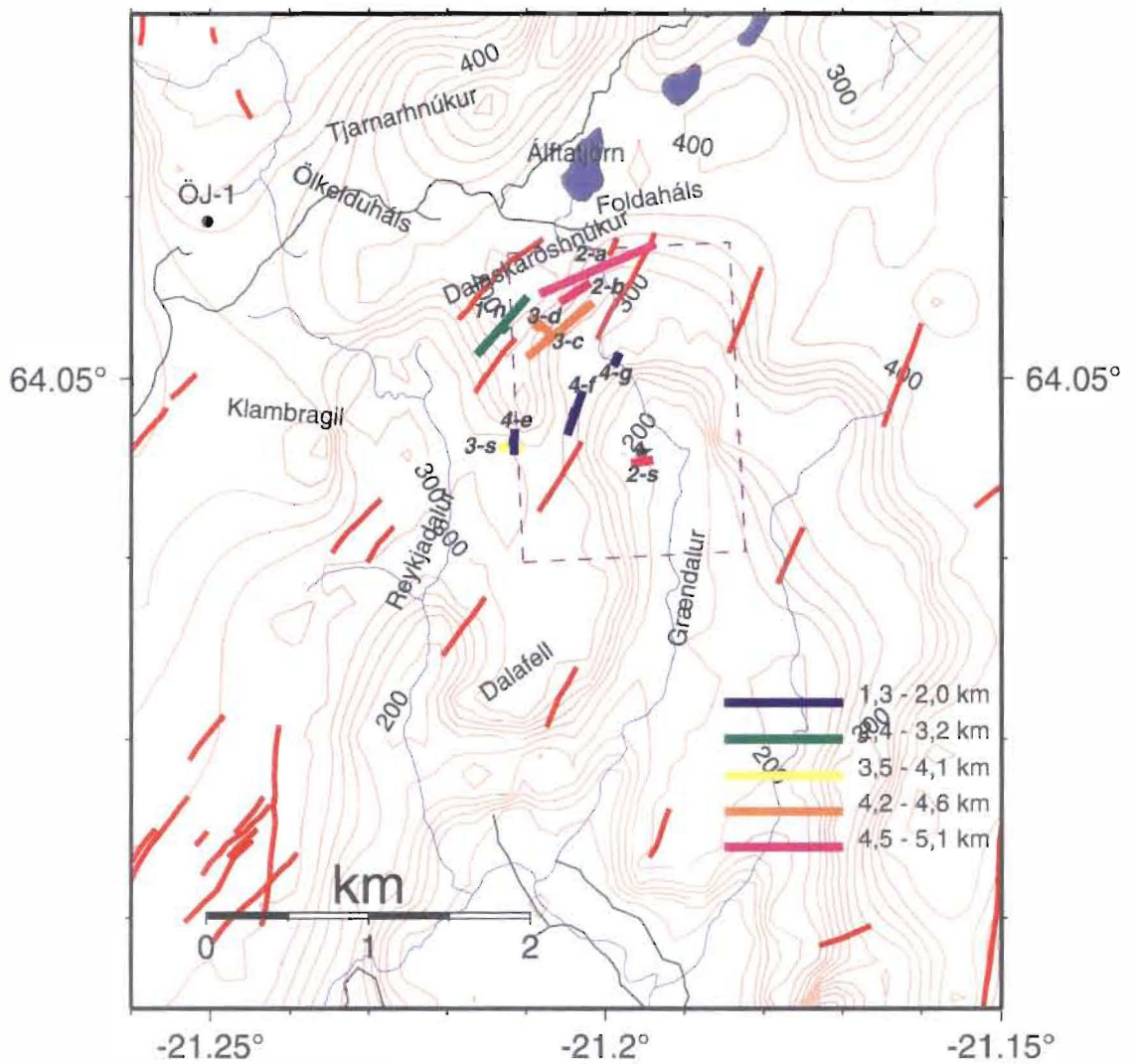
Með upptakagreiningu innan Grændalssvæðisins, á fjórum helstu skjálftahrinum ársins 1999, er hægt að afmarka 6 misgengisfleti af nokkru öryggi og mögulega aðra 5 til viðbót-ar. Upplýsingarnar um þessi kortlögðu plön eru teknar saman í töflu 1 og útlínur plananna, ásamt hallastefnunni á þeim, litakóðaðar eftir dýpi eru sýndar á mynd 8. Skjálftavirknin byrjar með hrinu 1 í norðvesturhorni svæðisins, og breiðist út eftir SV-NA plani, á 2,4–3,2 km dýpi (*1-n* á mynd 8), heldur svo áfram á sama svæði í hrinu 2, á 4,6–5,1 km dýpi, eftir flötum með dálítið austlægari stefnu (*2-a* og *2-b*). Hrina 3 er enn á sama svæði og með álíka stefnu, en á milli hinna fyrri í dýpi, frá 4,2 til 4,6 km (*3-c* og *3-d*). Samhliða þessum hreyfingum eru tvö A-V plön virk sunnar á svæðinu; á 3,6–4,1 km dýpi undir norðanverðu Dalafelli (*3-s*), og á 4,5–4,8 km dýpi undir Grændal (*2-s*). Lokahrinan er mun grynri en hinar fyrri, á 1,3–2,0 km dýpi nálægt miðju svæðisins og virðist hún vera á a.m.k þrem SSV-NNA-lægum plönunum (*4-e*, *-f*, *-g*). Samanlagt virðast misgengin á norðvesturluta svæðisins hafa náð að þekja dýptarbilið 2,5–5,0 km og losa þar út uppsafnaða spennu. Þó er hugsanlega eyða á 1-km dýptarbili, milli 3,2 og 4,2 km dýpis, en það gæti þó einnig hafa hreyfst í öðrum skjálftum ársins. Þyrpingar *1-s*, *3-s* og *4-e* á suðurhluta svæðisins, falla einnig hver ofan í aðra og þekja dýptarbilin 1,3–2 km og 3,5–4,1 km. Við þessa túlkun á afstöðu brotflatanna til hvers annars, ber að minnast þess að þó halli og strikstefna hvers og eins séu oftast vel skilgreind, eru fletirnir ekki staðsettir saman og því líklega einhver skekkja í innbyrðis afstöðu þeirra. Algild óvissa er oftast innan við 200 m og því ætti skekkjan að vera innan þeirra marka. Grunn staðsetning flatanna í hrinu 4 (*e,f,g*) gerir þá áhugaverða með tilliti til borana, þ.e.a.s. ef þeir eru vatnsleiðandi. Fjöldi skjálftanna í hrinunni er þó ekki nægur til að skilgreina misgengisfletina af öryggi, en til að stækka safnið mætti reyna lengra tímabil og viðbót skjálfta á stærðarbilinu $-0,4 \leq M_L \leq 0$.



Mynd 6. Staðsetningar skjálfta úr hrinu 4, frá 27. til 28. september 1999, fyrir (vinstri) og eftir (hægri) upptakagreiningu. Eftir upptakagreininguna virðist skjálftadreifin aðskiljast í þrjár þyrpingar, merktar e, f og g. Skjálftar hvernar þyrpingar eru of fáir til að skorða plönin vel, en þau virðast vera nær lóðréttu, með strikstefnu ~N24A.



Mynd 7. Brotfletir skjálftanna í þyrpingum e, f og g. Sjá mynd 3 fyrir útskýringu á uppsetningu myndar. Á hægri hluta myndarinnar er horft skáhalt á brotflatina, úr SSA. Frá þessu sjónarhorni eru þyrpingarnar vel aðgreinanlegar. Þær hafa strikstefnu ~N24A og halla ~80 til SA. Hökin á austurhliðum flatanna eru nær öll til vinstri, þ.a. ríkjandi færslustefna er hægri handar sniðgengishreyfing.



Mynd 8. Misgengi kortlögð með upptakgreiningu á hrinunum fjórum frá árinu 1999. Miðju skjálftadreifarinnar sem skilgreinir hverja hrinu er varpað upp á yfirborðið. Hallastefnan á misgengjunum er sýnd með haki og þau eru litakóðuð eftir dýpi. Kortlögð misgengi á yfirborði eru rauð. Fyrirhuguð staðsetning fyrstu borholu í Grændal er sýnd með stjörnu.

Þyrping Hnit	Dýpi (km)	Strik	Halli	Meðal- fjarlægð (m)	Lárétt dreifing (m)	Fjöldi skjálfta	Frávik brotlausna
Hrina 1-nyrðri 64.0513°N 21.2163°V 64.0545°N 21.2099°V	2,4–3,2	40°	65°	14	770	14	12°
Hrina 1-syðri*	3,5–4,0				300	11	
Hrina 2-nyrðri <i>a</i> 64.0574°N 21.1937°V 64.0546°N 21.2083°V	4,6–5,1	67°	89°	18	810	40	14°
Hrina 2-nyrðri <i>b</i> 64.0541°N 21.2058°V 64.0552°N 21.2020°V	4,5–5,0	55°	89°	17	260	36	9°
Hrina 2-syðri 64.0453°N 21.1968°V 64.0455°N 21.1940°V	4,5–4,8	266°	79°	14	190	13	11°
Hrina 3-nyrðri <i>c</i> 64.0511°N 21.2100°V 64.0541°N 21.2017°V	4,2–4,6	52°	85°	18	530	23	9°
Hrina 3-nyrðri <i>d</i> * 64.0525°N 21.2072°V 64.0534°N 21.2097°V	4,4–4,6	123°	~77°	20	210	10	8°
Hrina 3-syðri 64.0462°N 21.2137°V 64.0461°N 21.2106°V	3,6–4,1	97°	87°	17	155	8	15°
Hrina 4* <i>e,f,g</i> 64.0472°N 21.2115°V 64.0458°N 21.2117°V 64.0493°N 21.2030°V 64.0469°N 21.2050°V 64.0507°N 21.1990°V 64.0514°N 21.1983°V	1,3–2,0	~24°	~82°			19	4°

Tafla 1. *Upplýsingar um brotflati á Grændalssvæðinu, metnar út frá upptakagreiningu og brotlausnum smáskjálfta. Hnitin sýna vörpun miðju flatanna á yfirborðið. Mikilvægt er að hafa í huga að fletirnir eru ekki staðsettir saman og innbyrðis óvissa þeirra er u.þ.b. 200 m. Strikið er mælt til austurs frá norðri og hallinn frá láréttu þegar horft er í strikstefnu. Dálkur 5 sýnir meðalfjarlægð skjálftanna frá besta plani í gegnum þyrpinguna. Dálkur 8 sýnir miðgildi minnstu fráviks brotlausna frá besta plani. Þyrpingar merktar með * skorda plönnin illa, sérstaklega er mikil óvissa í hallaákvörðuninni.*

Ríkjandi spennusvið á austanverðu Hengilssvæðinu hefur verið metið út frá brotlausnum ríflega 10000 skjálfta frá árunum 1993–1996, og fékkst þá stefna mestu láréttu spennu nálægt 53° . Algengustu færslu- og sprungustefnur í því safni eru sniðgengi á nær lóðréttum N–S og A–V-lægum plönunum, þó siggengi séu einnig algeng (Sigurður Th. Rögnvaldsson et al. 1996). Meðalfærslan á A–V plönunum, sem hér eru kortlögð í hrinum 2-*s* og 3-*s* á suðurhluta svæðisins, lýsir vinstri handar sniðgengi, og færslustefnan sem virðist vera algengust á NNA–SSV-lægu plönunum í hrinu 4 er hægri handar sniðgengi. Þessar færslustefnur eru báðar í samræmi við 53° stefnu mestu láréttu spennu. Hægri handar sniðgengi, í bland við siggengi á SV–NA-lægu plönunum (52° – 67°) í hrinum 2 og 3 á norðurhluta svæðisins, eru hins vegar ekki í samræmi við spennustefnuna og gæti bent til að svæðisbundin stefna mestu láréttu spennu væri austlægari, eða $\geq 70^\circ$; hefði e.t.v. snúist síðan 1996. Hrina 1 á norðurhluta svæðisins er heldur ekki í samræmi við að stefna mestu láréttu spennu sé $>40^\circ$, því í henni virðast ríkja vinstri handar sniðgengis- og samgengishreyfingar á SV–NA-lægu plani. Það virðist því vera ósamræmi í færslustefnum virkra misgengja á norðvesturhluta svæðisins, en með tilliti til ~ 1 km færslu skjálftanna nær yfirborði við upptakagreiningu hrinu 1, er hins vegar líklegt að brotlausnir myndu breytast eitthvað ef þær væru endurreiknaðar fyrir þetta grynna dýpi, og gæti það hugsanlega breytt túlkun brotflatarins. Slíkt gæti þó einnig gerst við endurreikning brotlausna í hrinu 4, sem grynntist enn meira (~ 1 – 2 km) við upptakagreiningu. Úr þessu verður ekki skorið nema með endurreikningi brotlausna fyrir nýju staðsetningarnar.

Fyrri kortlagningar virkra misgengja með upptakagreiningu smáskjálfta á Hengilssvæðinu (Sigurður Th. Rögnvaldsson et al. 1998b,a, 1999) hafa sýnt sniðgengishreyfingar á NNA–SSV-lægum og A–V-lægum plönunum. Tvær upptakagreindar A–V-lægar sprungur eru einmitt staðsettar við norðausturjaðar Grændalssvæðisins og halla báðar til suðurs (sjá mynd 7 í (Sigurður Th. Rögnvaldsson et al. 1998b)). Þær tvær A–V-lægu sprungur sem hér eru kortlagðar í hrinum 2 og 3 á suðurhluta svæðisins, hafa fremur litla lárétta dreifingu (<200 m), sem gefur til kynna að stríkstefnan sé ekki vel skilgreind, og því meiri óvissa á stefnu þeirra, en hinna sem listaðar eru í töflu 1; auk þess sem innbyrðis óvissa skjálftanna í hrinu 2-*s* var mikil. Þess vegna skyldi ekki of mikið vægi lagt á A–V sprungustefnur á Grændalssvæðinu að svo stöddu, og hugsanlega er ástæða til að kanna áreiðanleik þessara sprungustefna nánar.

Sprungustefnurnar sem skjálftavirknin skilgreinir á Grændalssvæðinu, sem og annars staðar á austanverðu Hengilssvæði (Sigurður Th. Rögnvaldsson et al. 1998b,a, 1999), eru ekki í samræmi við kortlögð misgengi á yfirborði (Kristján Sæmundsson 1995a), en þau hafa flest stefnu nálægt 33° og algengt að færslustefnur á þeim sýni siggengishreyfingar.

Á austanverðu Hengilssvæðinu fylgir sýnilegur jarðhiti á yfirborði ~ 3 km breiðu bandi, sem liggur í suðaustur frá Hengli og um Ölkelduháls. Staðsetning holu ÖJ-1 á Ölkelduhálsi er einmitt utan í þessu bandi. Suðaustur af Dalaskarðshnúki, við botn Grændals breytist stefna þess, verður suðlæg og liggur suður eftir endilöngum Grændal (Kristján Sæmundsson 1995b), en ríkjandi stríkstefna í jarðhita í Grændal er N–S-læg (Kristján Sæmundsson, pers. upplýs., 2000). Þó ekki komi fram N–S-læg plön í upptakagreiningunni, og ekki sé hægt að sjá að virku misgengin tengist augljóslega jarðhita á yfirborði, falla staðsetning mestu skjálftavirkinnar og virku sprungurnar á norðurhluta svæðisins nokkurn veginn saman við breytinguna á stríkstefnu yfirborðsjarðhita, og er hugsanlegt að misgengin tengist þessari stefnubreytingu á einhvern hátt. Enn fremur liggur flötur 2-*a* undir öflugu N–S-lægu

jarðhitasvæði, sem nær nokkurn veginn frá Foldahálsi og suður að fleti 4-g, sem einnig hefur norðlæga stefnu (Kristján Sæmundsson, pers. upplýs., 2000), þannig að misgengin gætu verið vatnsleiðandi.

Í þessari skýrslu hefur verið gefin gróf mynd af brotflötum á Grændalssvæðinu. Til að fá skýrari mynd og ítarlegri þarf meiri yfirlegu yfir gögnunum, en hér gafst tími til. Leiðréttu þarf nýju staðsetningarforritin og prófa, og ganga þarf úr skugga um hvort tímaskekkjur hafi slæðst inn í SIL kerfið með tilkomu nýju stafsetjaranna og tímahliðrunar kerfisins vegna þeirra, og leiðréttu þær ef með þarf. Þá þarf einnig að keyra allt gagnasafnið saman til að minnka algilda óvissu milli mismunandi brotflata, því þá er hægt að tengja nálæga brotflötu saman með meiri nákvæmni. Brotlausnir voru ekki endurreiknaðar eftir upptakgreininguna og það getur hafa truflað túlkun niðurstaðna eitthvað, einkum í hrinum 1 og 4. Niðurstaðan virðist þó vera sú, og þetta má reyndar sjá af skjálftavirkni þriggja síðustu ára á mynd 1, að mesta virknin er á norðurjaðri Grændalssvæðisins, þar eru stefnur virkra misgengja undir yfirborði frá 40° til 67°, og halli á þeim oftast nálægt lóðréttu, enn fremur að staðsetning misgengjanna er nokkurn veginn á sama stað og yfirborðsjarðhitinn fer frá því að vera NV-SA-lægur, yfir í að vera N-S-lægur eftir endilöngum Grændal. Sunnar á svæðinu eru virk misgengi með norðlægari stefnu, en ekki var hægt að ákvarða strikstefnu þeirra ótvírætt.

Landrisið á Hengilssvæðinu á árunum 1994–1998, sem virðist eiga rætur sínar á 8 km dýpi undir vestanverðu Grændalssvæðinu, er líklegur orsakavaldur hinnar auknu jarðskjálftavirkni alls Hengilssvæðisins. Afrakstur þess er mikið safn brotahreyfinga sem getur lýst upp fjölda misgengja undir yfirborði og ætti því að gefa góða möguleika á að kortlagningu aðfærsluæða jarðhita á Grændalssvæðinu, sem og öllu Hengilssvæðinu. Kerfisbundin úrvinnsla á virkni síðustu ára er því líkleg til að skila góðum árangri.

5 ÞAKKIR

Hugbúnaður sem notaður er við afstæðar staðsetningar er saminn af Ragnari Slunga og er notaður með hans leyfi.

6 HEIMILDIR

- Freysteinn Sigmundsson, Páll Einarsson, Sigurður Th. Rögnvaldsson, G. Foulger, K. Hodgkinson 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.
- Kristján Ágústsson 1999. Jarðskjálftahrina á Hellisheiði og í Hengli í maí-júlí 1998. Greinargerð VÍ-G98040-JA06, Veðurstofa Íslands.
- Kristján Sæmundsson 1995a. Hengill, jarðfræðikort (berggrunnur) 1:50000. Kort, Orkustofnun, Hitaveita Reykjavíkur og Landmælingar Íslands, Reykjavík.
- Kristján Sæmundsson 1995b. Hengill, jarðhiti ummyndun og grunnvatn 1:25000. Kort, Orkustofnun, Hitaveita Reykjavíkur og Landmælingar Íslands, Reykjavík.
- 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. *Seism. Res. Lett.* 70, 269. Abstract.
- Ragnar Slunga, 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, 409–4197.
- Ragnar Stefánsson, Françoise Bergerat, Maurizio Bonafede, Reynir Böðvarsson, Stuart Crampin, Kurt Feigl, Frank Roth, Freysteinn Sigmundsson og Ragnar Slunga 1999. Prenlab-two – first annual report. Report VÍ-G99016-JA05, Veðurstofa Íslands.
- 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, Ragnar Slunga og Ragnar Stefánsson 1996. The SIL data acquisition and monitoring system. *Seism. Res. Lett.* 67, 35–46.
- Sigrún Hreinsdóttir 1999. GPS geodetic measurements on the Reykjanes Peninsula SW Iceland: Crustal deformation from 1993 to 1998. M.Sc. Ritgerð, Háskóli Íslands.
- Sigurður Th. Rögnvaldsson 2000. Kortlagning virkra misgengja með smáskjálftamælingum – yfirlit. Skýrsla VÍ-R00001-JA01, Veðurstofa Íslands.
- Sigurður Th. Rögnvaldsson, Gunnar B. Guðmundsson, Kristján Ágústsson, Steinunn S. Jakobsdóttir, Ragnar Slunga og Ragnar Stefánsson 1998a. Overview of the 1993–1996 seismicity near Hengill. Skýrsla VÍ-R98006-JA05, Veðurstofa Íslands.
- Sigurður Th. Rögnvaldsson, Gunnar Guðmundsson, Kristján Ágústsson, Ragnar Stefánsson og Steinunn S. Jakobsdóttir 1996. Recent seismicity near the Hengill triple-junction, SW-Iceland. *Seismology in Europe XXV* Proceedings of the General Assembly of the Eur. Seismol. Comm., ritstjóri Barði Þorkelsson, 461–466.
- Sigurður Th. Rögnvaldsson, Kristján Ágústsson, Bergur H. Bergsson og Grímur Björnsson 1998b. Jarðskjálftamælanet í nágrenni Reykjavíkur - lýsing á mælaneti og fyrstu niðurstöður. Skýrsla VÍ-R98001-JA01, Veðurstofa Íslands.

Sigurður Th. Rögnvaldsson, Kristín S. Vogfjörð og Ragnar Slunga 1999. Kortlagning brotflata á Hengilssvæði með smáskjálftum. Skýrsla VÍ-R99002-JA01, Veðurstofa Íslands.

Sigurður Th. Rögnvaldsson og Ragnar Slunga 1993. Routine fault plane solutions for local networks: a test with synthetic data. *Bull. Seism. Soc. Am.* 83, 1232–1247.