



## *Rit Veðurstofu Íslands*

*Sigurður Th. Rögnvaldsson  
Kristín S. Vogfjörð  
Ragnar Slunga*

*Kortlagning brotflata á Hengilssvæði  
með smáskjálftum*

*VÍ-R99002-JA01  
Reykjavík  
Mars 1999*

ISSN 1025-0565  
ISBN 9979-878-15-0

Sigurður Th. Rögnvaldsson  
Kristín S. Vogfjörð  
Ragnar Slunga

# Kortlagning brotflata á Hengilssvæði með smáskjálftum

VÍ-R99002-JA01  
Reykjavík  
Mars 1999

# EFNISYFIRLIT

<b>1</b>	<b>INNGANGUR</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>AÐFERÐIR</b>	<b>5</b>
	2.1 Dæmi . . . . .	6
<b>3</b>	<b>GÖGN OG ÚRVINNSLA</b>	<b>8</b>
	3.1 Nesjavellir og nágrenni . . . . .	8
	3.2 Ölkelduháls og nágrenni . . . . .	11
<b>4</b>	<b>NÍÐURSTÖÐUR OG UMRÆÐA</b>	<b>13</b>
<b>5</b>	<b>ENGLISH SUMMARY</b>	<b>16</b>
<b>6</b>	<b>HEIMILDIR</b>	<b>18</b>



## 1 INNGANGUR

Í fyrri rannsóknum á Veðurstofu Íslands hefur verið sýnt fram á notagildi smáskjálftaþyrpinga til kortlagningar á virkum sprungum og sprunguflötum (Sigurður Th. Rögnvaldsson o.fl. 1998a,c). Á Hengilssvæðinu hefur fjöldi brotflata verið kortlagður og hafa þeir ekki alltaf fallið að sprungustefnum sem sjást á yfirborði (Sigurður Th. Rögnvaldsson o.fl. 1998c; Sigurður Th. Rögnvaldsson og Slunga 1999). Bent hefur verið á nauðsyn þess að athuga áreiðanleika þessara brotastefna með því að kanna kerfisbundið samræmi milli brotlausna einstakra skjálfta í skjálftaþyrpingum og sprungustefna sem metnar voru út frá innbyrðis staðsetningum skjálftanna (Knútur Árnason og Sigurður Th. Rögnvaldsson 1998). Einkum þykir áhugavert að kanna hvort aust-vestlægar sprungustefnur, sem upptakagreining smáskjálfta bendir til að sé að finna sums staðar á Hengilssvæði (Sigurður Th. Rögnvaldsson o.fl. 1998c, mynd 7), séu í samræmi við brotlausnir skjálftanna, en það hefur ekki verið gert áður.

Í mars 1998 var ákveðið að Veðurstofa Íslands og Orkustofnun tækju að sér fyrir Hitaveitu Reykjavíkur að vinna þannig úr nokkrum smáum skjálftahrinum á Hengilssvæði. Valdar skyldu 5–10 þyrpingar sem þegar hefðu verið endurstaðsettar með mikilli nákvæmni og brotlausnir skjálftanna reiknaðar að nýju, enda brotlausnir háðar staðsetningunni. Til að auðvelda þessa kerfisbundnu könnun þótti rétt að endurbæta gagnvirkan hugbúnað sem notaður er við upptakagreininguna, þannig að hann leitaði að og veldi brotflati. Í því skyni var höfundur hugbúnaðarins fenginn frá Uppsalaháskóla til að endurbæta eldri hugbúnað sinn, en starfsfólk Veðurstofu Íslands og Orkustofnunar sáu um upptakagreiningu, útreikning brotlausna og túlkun nokkurra skjálftaþyrpinga.

## 2 AÐFERÐIR

Undanfarin ár hefur verið fylgst með skjálftavirkni á Hengilssvæði með gögnum úr stafrænu landsneti Veðurstofunnar, SIL netinu (Ragnar Stefánsson o.fl. 1993; Reynir Böðvarsson o.fl. 1996). Síðla árs 1996 var bætt við netið fjórum stöðvum á Suðvesturlandi. Eftir þær viðbætur skráir kerfið og staðsetur nær alla skjálfta á Hengilssvæðinu stærri en 0.0 á Richterkvarða (Sigurður Th. Rögnvaldsson o.fl. 1998c). Brotlausnir eru reiknaðar fyrir alla skjálfta sem landsnetið skráir, en þær eru ákvarðaðar út frá útgeislunarmynstri skjálftanna. Til að skorða brotlausnirnar eru því notaðar fyrsta hreyfistefna P bylgna og sveifluvíddir (e. *amplitudes*) P og S bylgna. Allar lausnir sem falla þolanlega að mældum gildum eru geymdar sem mögulegar brotlausnir (Slunga 1981; Sigurður Th. Rögnvaldsson og Slunga 1993). Hver brotlausn hefur tvo hornréttu fleti, sem hvor um sig gæti verið misgengisflöturinn og ekki er hægt að gera upp á milli þeirra nema til komi önnur gögn, svo sem sjáanlegt brot, mælanleg færsla á yfirborði eða upptakadreifing skjálfta sem afmarkar brotflötinn.

Útlit skjálftalínurita ræðst einkum af brotlausn skjálftans og slóð bylgnanna frá upptökum að mælistað. 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 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 mælistöðum 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 minni en 10 m. Sú aðferð sem notuð er á Veðurstofunni notar hvoru tveggja algildan tíma og mælingar á tímamun og bætir því jafnframt algilda staðsetningu hrin-

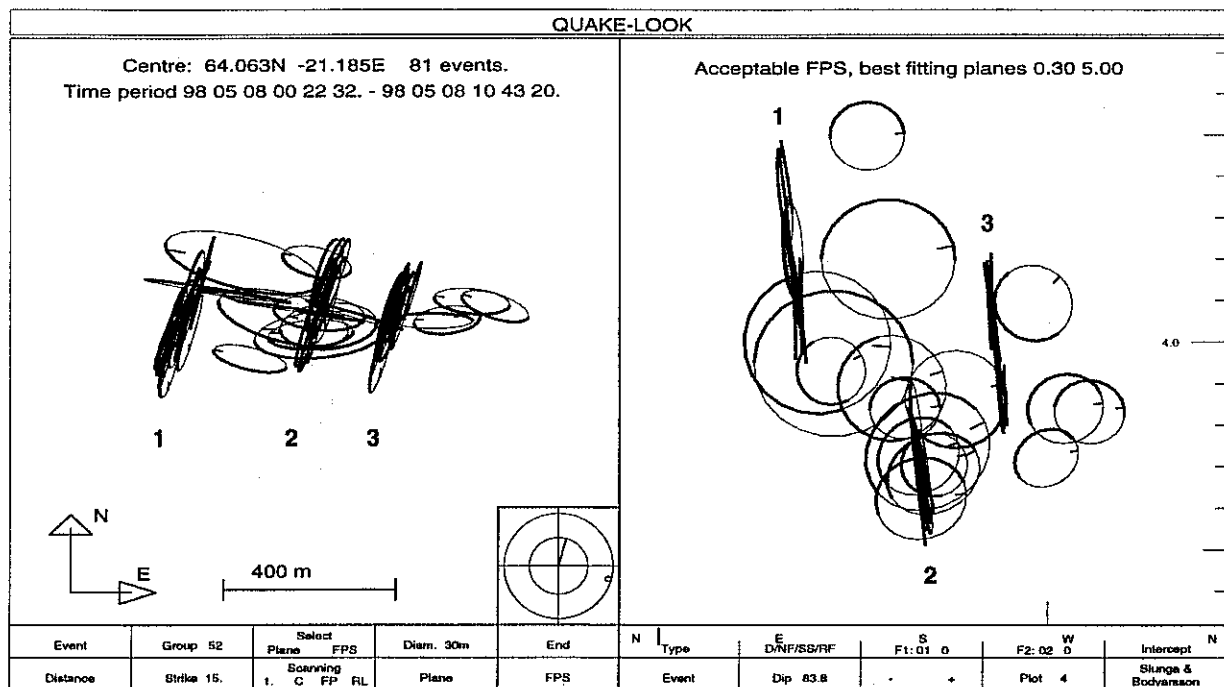
unnar (Slunga o.fl. 1995). Þessi aðferð verður hér eftir nefnd upptakagreining jarðskjálfta til styttingar. Jarðskjálftar sem staðsettir hafa verið á þennan hátt falla oft á plön í jarðskorpunni og þá er líklegt að þau séu virkir sprungufletir.

Eftir upptakagreiningu skjálftaþyrpingar eru brotlausnir skjálftanna reiknaðar að nýju, enda brotlausnirnar háðar staðsetningu. Staðsetningar skjálftanna eru síðan 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 skorða planið séu í samræmi við stefnu þess. Samtúlkun upptakadreifingar 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 jarðskjálftahneppa má kortleggja virkar sprungur í skorpunni. Til að einfalda vinnu við þennan þátt verkefnisins var ákveðið að breyta nokkuð hugbúnaði sem notaður er við gagnvirka (e. *interactive*) úrvinnslu skjálftaþyrpinga. Byggt var á hugmyndum sem fyrst voru prófaðar á lítilli skjálftaþyrpingu í Svíþjóð fyrir um 15 árum (Slunga o.fl. 1984) og gengið út frá því að þéttar þyrpingar skjálfta séu gjarna skjálftar á sama misgengi. Skrifað var forrit sem leitar kerfisbundið að fylkingum skjálfta sem liggja á sama plani, en jafnframt er þess krafist að planið falli saman við einhverja af viðunandi brotlausnum hvers skjálfta í fylkingunni. Hverju plani sem þannig finnst er gefin einkunn eða gæðastuðull. Einkunnin er háð fjölda skjálfta sem skorða planið, fjarlægð þeirra frá planinu og því hve vel brotlausnir þeirra falla að stefnu þess.

Hingað til hefur upptakagreiningu af þessu tagi mest verið beitt á einstakar hrinur sem yfirleitt hafa staðið í stuttan tíma, frá nokkrum klukkustundum upp í nokkra sólarhringa (Sigurður Th. Rögnvaldsson o.fl. 1998a). Helsti ókosturinn við að meðhöndla hverja hrinu sérstaklega er sá að erfitt er að tengja algildar staðsetningar skjálfta í mismunandi hrinum og þar með innbyrðis legu þeirra misgengja sem hrinurnar urðu á. Eins er líklegt að ef aðeins er leitað að afmörkuðum hrinum kunni að yfirsjást svæði þar sem virkni er minni og dreifð í tíma, en getur eigi að síður verið á vel skilgreindum sprungum. Þetta krefst einnig nokkurrar handavinnu þar eð finna þarf þær hrinur sem skoða á og ákvarða mörk þeirra í tíma og rúmi áður en úrvinnslan hefst. Ef upptakagreiningu er beitt á gögn frá stærra svæði og/eða lengra tímabili en fyrir venjulega smáhrinu (nokkrir km<sup>2</sup> og 1–3 sólarhringar) er líklegt að meira brottfall verði í gögnunum þar sem gagnasafnið getur innihaldið slæðing af skjálftum sem lítið eiga sameiginlegt. Reiknitími lengist verulega eftir því sem fleiri skjálftar eru staðsettir samtímis og gagnvirka úrvinnslan verður einnig því þyngri í vöfum sem skjálftarnir eru fleiri. Því þarf að finna einhvern meðalveg þar sem teknir eru með nógu margir skjálftar til að gefa vitrænar niðurstöður, en þó ekki svo margir að reikni- og úrvinnslutími verði óhóflægur.

## 2.1 Dæmi

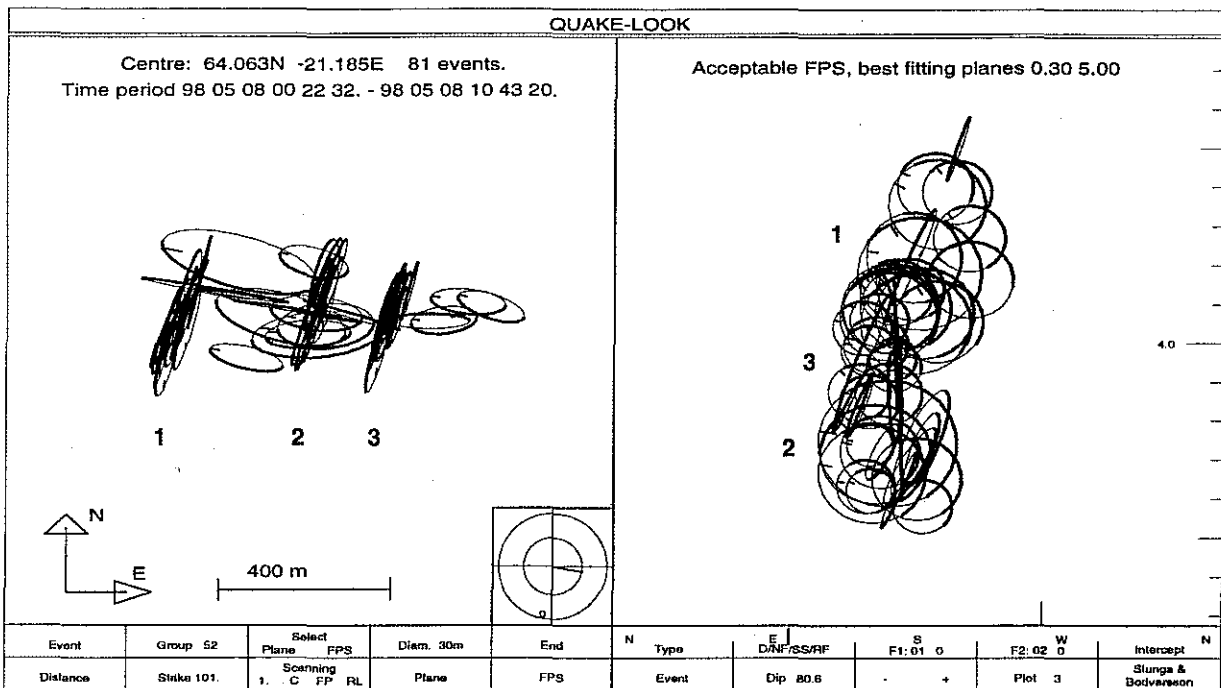
Í nýrri og endurbættri útgáfu hugbúnaðarins gera forritin sjálfvirkt upp á milli aukafata (e. *auxiliary plane*) og brotflata brotlausna hvers skjálfta, eftir því hver fellur best að sprungustefnunni sem upptakadreifing skjálftaþyrpingar ákvarðar. Til að sýna þetta nánar var valin skjálftahrina undir Ölkelduhálsi frá 8. maí 1998 og safnað úr henni öllum skjálftum stærri en -2.0, sem voru innan svæðisins 64.055°N til 64.070°N og -21.23°A til -21.16°A; alls 81 skjálfta. Eftir upptakagreiningu voru brotlausnir endurreiknaðar fyrir nýju staðsetningarnar og hugbúnaðurinn látinn kanna sjálfvirkt hvaða skjálftaþyrpingar gætu skilgreint sprungufleti. Þeir 54 skjálftar sem það gerðu eru sýndir á mynd 1. Brotlausnarplönin sem falla best að sprungustefnum eru teiknuð sem hringlaga fletir með þykkari röndina nær áhorfandanum. Stærð flatanna sýnir stærð brotflata skjálftanna. Hnikstefnan í þeim er mörkuð með striki í hringina sem sýnir í hvaða átt sá



Mynd 1. Innbyrðis staðsetningar skjálfta undir Ölkelduhálsi 8. maí 1998. Hver skjálfti er sýndur með hringlaga fleti, sem hefur strik, halla og hreyfingarstefnu í samræmi við það plan brotlausnar sem valið er. Þykkari rönd hringins snýr að áhorfandanum og hreyfistefnan er merkt með striki á hringinn. Stærð hringjanna sýnir stærð brotflatar hvers skjálfta. Vinstri hluti myndarinnar sýnir staðsetningu í láréttum fleti, norður er upp og austur til hægri. Plönin þrjú sem upptökin skilgreina eru númeruð á myndinni. Hægri hlutinn sýnir lóðrétt snið þvert á strikstefnuna, þannig að horft er eftir brotflötunum í stefnu  $N15^\circ A$ . Lóðrétti ásinn sýnir dýpi í km, sami kvarði er á lárétta ásnum. Plönin þrjú eru einnig merkt inn á hægri hluta myndarinnar.

helmingur sem nær auganu er hreyfðist. Á vinstri hluta myndarinnar er horft niður á yfirborð jarðar og greinilega má sjá að brotlausnir falla vel að þeim þrem sprunguflötum sem skjálftaþyrpingarnar ákvarða. Þeir hafa strik  $N9^\circ-15^\circ A$  og raða sér á A-V línu með u.þ.b. 200 m millibili. Hægri hluti myndarinnar er þversnið í gegnum jörðina, nánast hornrétt á strikstefnu brotflatanna, þannig að horft er eftir sprunguflötunum endilöngum í stefnu  $N15^\circ A$ . Þar sést enn betur samræmi brotlausna og sprunguflatanna þriggja sem hallar milli  $80^\circ$  og  $88^\circ$  til austurs. Miðgildi minnstu frávik brotlausna frá sprungustefnum er innan við  $4^\circ$  og hreyfingin í flestum skjálftunum er sambland af hægri handar sniðgengi og siggengi. Samanlagt skilgreina skjálftarnir sprungufleti með u.þ.b. 300 m lárétta lengd, þó hver og einn skjálfti hreyfi aðeins hluta sprungunnar. Dýpi sprungunnar er mismunandi, 3.5 km til 4.5 km, og er sú í miðið dýpst. Óvissa í algildu staðsetningunum er 100–300 m, en óvissa í innbyrðis staðsetningum oftast 2–15 m. Meðalfjarlægð skjálftanna frá besta plani sem skjálftadreifingin skorðar er 4–14 m eða svipuð óvissunni í innbyrðis staðsetningunum.

Á mynd 2 sést að fyrir 15 skjálfta hefur A-V brotflöturinn verið valinn sem líklegri nálgun á sprungustefnu og þegar horft er eftir stefnu  $N101^\circ A$  (mynd 2) sést á þversniði að nokkrir skjálftanna gætu skilgreint tvö u.þ.b.  $66^\circ$  hallandi plön. Þetta eru hins vegar of fáir skjálftar til að ákvarða sprunguflöt, einkum með tilliti til þess að upptökin falla nánast ofan í upptök á einhverjum af sprunguflötunum þremur, einkum fleti 2. Jafnframt samsvara aukafletir brot-



Mynd 2. Sama og mynd 1, nema hvað á hægri hluta myndarinnar er nú horft í stefnu N101°A, eða þvert á plönin þrjú sem merkt eru á myndinni. Hugsanlega má sjá vísbendingar um A-V sprungustefnur, en þó ekki afgerandi.

lausnanna á ~N15°A sprungunum þremur nokkurn veginn þessum stefnum, þ.e. ~N279°A með halla ~56° til norðurs. Skjálftarnir 15 gætu því eins hafa orðið á norðlægu sprungunum eða sprungum samsíða þeim.

Þessi dæmi sýna að forritið getur fundið sprungur með því að bera saman skjálftadreifingu og brotlausnir, en skjálftadreifingin getur þó verið þannig að ekki sé óbyggjandi hægt að greina á milli misgengis- og aukafleta brotlausnanna. Þetta á einkum við þegar fáir skjálftar skilgreina sprungu. Með markvissri stýringu úrvinnslunnar á afmörkuð svæði yfir löng tímabil ætti þó að vera unnt að skera úr um tilvist óljósra brotalína.

### 3 GÖGN OG ÚRVINNSLA

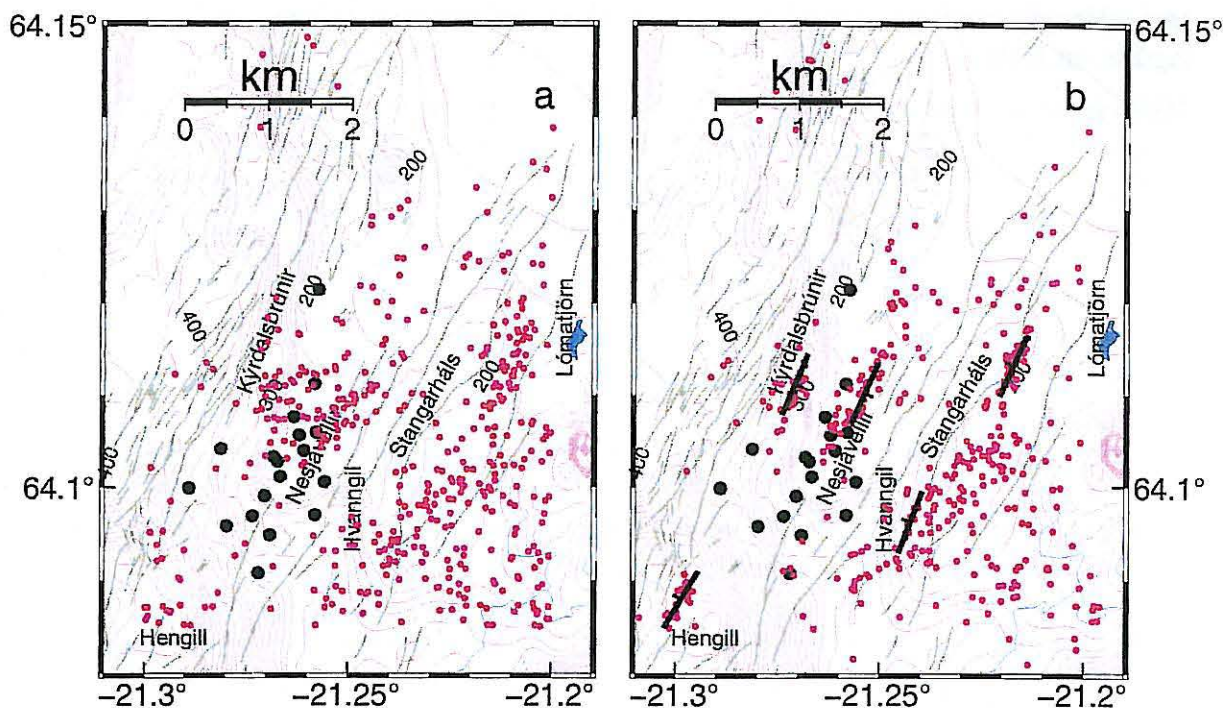
Valin voru tvö svæði til nánari athugunar, Nesjavellir og Ölkelduháls, og athugaðir skjálftar á hvoru svæði á tilteknu tímabili.

#### 3.1 Nesjavellir og nágrenni

Í nágrenni Nesjavalla voru valdir allir skjálftar stærri en 0.0 á Richter kvarða sem urðu á tímabilinu 1. janúar 1998 til 31. janúar 1999. Svæðið afmarkast af lengdarbaugunum -21.3°A og -21.2°A og breiddarbaugunum 64.085°N og 64.15°N. Grófluga má þó segja að skjálftarnir sem valdir voru séu á svæðinu frá Skeggja í suðvestri og að Lómatjörn í norðaustri, þar eð mjög lítið er um skjálfta norðan Nesjavalla. Alls uppfylltu 428 jarðskjálftar þessi skilyrði (mynd 3a). Í sjálfvirka staðsetningarferlinu var einum skjálftanna hafnað, þannig að lokagagnasafnið inniheldur 427 skjálfta.

Eftir endurstaðsetningu skjálfta á Nesjavallasvæðinu koma fram nokkuð greinilegar þrjár megin þyrpingar skjálfta og tvær minni (mynd 3b). Þyrpingarnar hafa allar NNA læga stefnu, svipað





Mynd 3. Staðsetning jarðskjálfta nærri Nesjavöllum 1.1.1998–31.1.1999 ákvörðuð með hefðbundum aðferðum (a) og eftir upptakagreiningu (b). Skjálftar eru merktir með fylltum rauðum hringjum, svartir hringir eru borholur Hitaveitu Reykjavíkur á Nesjavöllum. Grænar línur eru misgengi á yfirborði (Kristján Sæmundsson 1995) en bestu plön gegnum skjálftaþyrpingar eru merkt með 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. Besta plan gegnum hverja þyrpinganna fimm hefur strik nærri  $N25^\circ A$ , sem er svipað striki misgengja og gossprungna á yfirborði.

og stefna helstu yfirborðsmyndana á svæðinu.

Vestasta þyrpingin liggur undir Kýrdalsbrúnum á 4.2–4.9 km dýpi og dreifist á flöt sem er um 600 m að þvermáli. Flestir skjálftanna í þessari þyrpingu urðu í aprílmánuði 1998, en einnig eru teknir með skjálftar allt frá janúar til júní 1998. Besta plan gegnum 15 valda skjálfta í Kýrdalsbrúnaþyrpingunni hefur strik  $N23^\circ A$  og halla  $87^\circ$  til austurs. Áætluð óvissa í innbyrðis staðsetningum skjálftanna er oftast 2–30 m, en óvissa í algildum staðsetningum 200–500 m. Meðalfjarlægð skjálftanna frá besta plani er um 12 m eða innan óvissumarka. Sé áætluð lega og stefna misgengisins framlengd til yfirborðs sker það yfirborðið um 250 m vestan við merкта legu misgengisins á mynd 3b. Brotlausnir skjálftanna styðja þá túlkun að skjálftarnir hafi flestir orðið á sama misgenginu. Miðgildi minnsta fráviks brotlausna einstakra skjálfta frá besta plani gegnum þyrpinguna er um  $10^\circ$ . Færslustefnan í skjálftunum er nærri  $15^\circ$ , þ.e. vinstri handar sniðgengi með örlitlum samgengispætti. Þetta er nokkuð óvenjulegt þar eð ríkjandi spennusvið á svæðinu er þannig að fremur er von á hægri en vinstra sniðgengi (Freysteinn Sigmundsson o.fl. 1997; Sigurður Th. Rögnvaldsson o.fl. 1998b). Líklegustu skýringuna teljum við vera staðbundnar og tímabundnar breytingar á spennusviði á upptakasvæði skjálftanna, enda hefur mikið gengið á á Hengilssvæðinu undanfarin ár. Bent hefur verið á að viðlíka breytingar virðast hafa orðið í skjálftabelti Suðurlands (Bergerat o.fl. 1998). Eins benda ríkjandi stefnur í lands-

lagi á Hengilssvæði til að miklar breytingar hafi orðið í spennusviðinu á lengri tíma (Kristján Ágústsson 1998).

Miðþyrpingin á mynd 3b liggur eftir Nesjavöllum miðjum og hefur svipað strik og vellirir. Langflestir skjálftanna á Nesjavöllum urðu í þremur smáhrinum dagana 17. apríl 1998 (9 skjálftar), 6.–16. júní 1998 (9 skjálftar) og 9.–17. janúar 1999 (10 skjálftar). Strik og halli besta plans gegnum þyrpinguna er N24° A og 82° til austurs. Brotlausnir skjálftanna styðja þessa túlkun en miðgildi minnstu frávíka brotplana einstakra skjálfta í þyrpingunni frá stefnu besta plans er um 11°. Færslustefna á planinu er oftast nærri -170°, þ.e. hægra sniðgengi með smávægilegum siggengisþætti. Skjálftarnir 36 sem notaðir eru til að ákvarða planið urðu á 4.3–5.1 km dýpi en einnig eru nokkrir grynri skjálftar í þyrpingunni. Óvissa í algildu staðsetningunum er 200–500 m. Áætluð óvissa í innbyrðis staðsetningum skjálftanna er yfirleitt 5–15 m. Meðalfjarlægð skjálftanna frá besta plani er talsvert meiri eða um 36 m. Mögulegar ástæður fyrir þessu eru:

- Skjálftarnir eru á fleiri en einni sprungu. Hugsanlega er um að ræða tvær sprungur með nokkurra tuga metra bili en svipað strik og halla.
- Skjálftarnir eru nokkuð jafndreifðir um svæði sem er nærri 1.5 km langt. Þetta er töluvert meiri dreifing en í öðrum þyrpingum sem athugaðar voru. Enda þótt skjálftarnir hafi allir orðið á sama misgengi er ekki ósennilegt að strik misgengisins breytist lítillega á svo löngum kafla. Viðlíka breytingar má víða sjá í striki yfirborðssprungna á svæðinu (Kristján Sæmundsson 1995).
- Breytingar í bylgjuhraða með tíma, t.d. vegna breytts spennuástands.

Ef misgengið er framlengt til yfirborðs og gert ráð fyrir að halli breytist ekki með dýpi, sker það yfirborð á Kýrdalsbrúnum, nærri Kýrdalsbrúnamisgenginu á mynd 3b. Borholurnar næst vestan við Nesjavallamisgengið, NV-11 og NV-16, eru um 300 m vestan þess og 2200 m djúpar. Þær ná því ekki að skera misgengið. Miðað við þessa staðsetningu misgengisins þarf halli þess að vera á bilinu 84°–87° til að holurnar skeri það. Þetta er vel innan eðlilegrar óvissu í hallaákvörðuninni. Hugsanlegt er einnig að aðrar holur sunnar á svæðinu séu boraðar í gegnum Nesjavallamisgengið, því að öllum líkindum nær það lengra suður en skjálftarnir á mynd 3b gefa til kynna.

Þriðja megin þyrpingin og sú austasta liggur samsíða Stangarhálsi á 2.5–3.1 km dýpi og dreifast skjálftarnir um 1.0 km í lárétta stefnu. Skjálftarnir urðu allir dagana 4.–6. apríl 1998. Áætluð óvissa í staðsetningum skjálftanna er 50–500 m en óvissa í innbyrðis afstöðu þeirra er oftast 2–10 m. Nyrsti hluti þyrpingarinnar er nokkuð þéttur og fellur vel að einu plani, meðalfjarlægð 43 skjálfta frá besta plani er um 13 m. Strik þess er N204° A og halli 67° til vesturs. Brotlausnir skjálftanna sýna blöndu af siggengi og sniðgengisfærslu á fleti með strik og halla svipuð stefnu þess plans sem best fellur að innbyrðis staðsetningum skjálftanna. Miðgildi frávíka bestu brotflata einstakra skjálfta frá áætlaðri stefnu misgengisins er um 12°. Áætlaður misgengisflötur nær yfirborði skammt austan Lómatjarnar (mynd 3b). Á þeim slóðum sést á yfirborði um 1.5 km löng siggengissprungu með strik nærri 25° A og halla til vesturs (Kristján Sæmundsson 1995). Það er þó vafasamt að rétt sé að gera ráð fyrir að halli siggengissprungunnar sé óháður dýpi. Niðurstöður endurkastsmælinga benda til að siggengi séu oft nærri lóðrétt næst yfirborði en að hallinn minnki með dýpi (sjá t.d. Ólafur G. Flóvenz og Karl Gunnarsson 1991, mynd 8).

Skjálftarnir undir Stangarhálsi hafa áður verið staðsettir með nákvæmum fjölskjálftaaðferðum (sjá [www.vedur.is/ja/1998/apr/04/planeI002.01.html](http://www.vedur.is/ja/1998/apr/04/planeI002.01.html)). Þá var eingöngu unnið með skjálfta sem

urðu undir Stangarhálsi dagana 4.–6. apríl 1998. Alls voru 34 skjálftar notaðir til að ákvarða sameiginlegt brotaplán fyrir þyrpinguna. Reyndist strík þess vera N202°A og hallinn 64° til vesturs. Meðalfjarlægð skjálftanna frá planinu var um 14 m. Þetta eru nánast sömu niðurstöður og fengust nú þegar Stangarhálsþyrpingin er staðsett með yfir 300 öðrum atburðum. Innbyrðisstaðsetningar skjálftanna í hrinunni virðast því vel ákvarðaðar hvoru afbrigðinu sem beitt er við staðsetninguna. Hins vegar breytist staðarákvörðun hrinunnar sjálfrar nokkuð við að tengja hana öðrum skjálftum. Lokastaðsetning hrinunnar núna er um 600 m sunnar en áður og dýpið breytist frá 0.7–1.1 km í 2.5–3.1 km. Ónákvæmni í hraðalíkani hefur einkum áhrif á reiknaða staðsetningu hrinunnar en breytir litlu um útreikninga á innbyrðis afstöðu skjálftanna í hrinunni. Munur í komutíma bylgna frá einstökum skjálftum í þyrpingunni er einkum háður legu skjálftanna innbyrðis, en síður algildri staðsetningu þeirra. Tímamunurinn nýtist því vel við ákvörðun innbyrðis staðsetninga en ef aðeins er unnið með skjálfta af litlu svæði gefur hann litlar upplýsingar um algilda staðsetningu hrinunnar. Ef jafnframt eru notaðir skjálftar af stærra svæði hefur algild staðsetning skjálftanna meiri áhrif á tímamuninn og hann skorðar því staðsetningarnar betur.

Fjórða skjálftahneppið á mynd 3b átti upptök sín á 4.8–5.4 km dýpi undir Hvangngili á tímabilinu júní til október 1998, flestir þó þann 13. október. Notaðir voru 13 skjálftar til að ákvarða stefnu sameiginlegs misgengisflatar. Strík hans er N201°A og hallinn 85° til vesturs. Óvissa í staðsetningum skjálftanna er 150–500 m en óvissa í innbyrðis legu þeirra er oftast á bilinu 3–20 m. Meðalfjarlægð skjálftanna frá planinu er um 17 m. Brotlausnirnar sýna hægra sniðgengi á nær lóðréttum flötum. Miðgildi frávíka einstakra brotflata frá stefnu besta plans er um 4°.

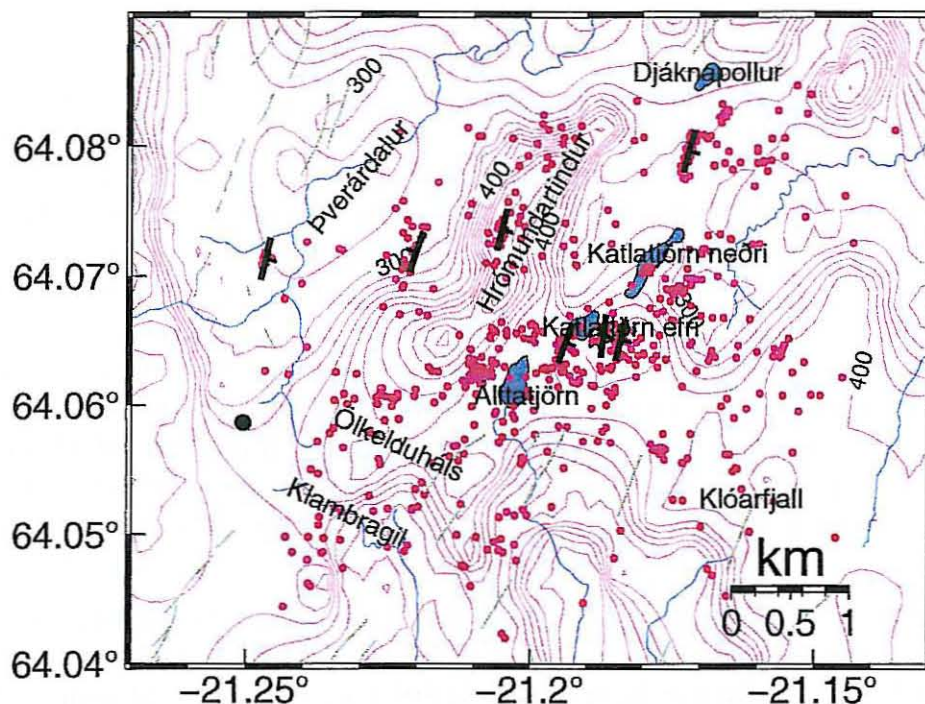
Fimmta þyrping skjálfta á mynd 3b er á 5.7–6.1 km dýpi undir norðurhlíðum Hengils. Skjálftarnir urðu í janúar, júní og ágúst 1998. Af 20 skjálftum í hneppinu voru 16 notaðir til að ákvarða stefnu hugsanlegs misgengisflatar. Strík besta plans gegnum þyrpinguna er N211°A og halli 57° til vesturs. Þar eð skjálftarnir 16 urðu á mjög þröngu dýptarbili nýtast þeir illa við ákvörðun á halla flatarins. Fletir með strík nærri N210°A og halla á bilinu 40°–80° til vesturs falla allir ámóta vel að innbyrðis staðsetningum skjálftanna. Óvissa í staðsetningum er 150–550 m, en 2–25 m í innbyrðis afstöðu þeirra. Meðalfjarlægð þeirra frá planinu er um 33 m sem er ívið meira en dæmigerð óvissa í innbyrðis afstöðunni. Miðgildi minnstu frávíka brotflata frá áætlaðri stefnu misgengisins er 22°. Því er ekki hægt að skera úr um hvort skjálftarnir urðu allir á sama misgenginu.

Auk þyrpinganna fimm er allnokkur dreif skjálfta suðaustur af Stangarhálsi og virðist sem vestari mörk hennar falli saman við misgengið austan í hálsinum og hugsanlegt framhald þess til suðurs. Þannig er mun minni virkni vestan Stangarháls en austan hans.

### 3.2 Ölkelduháls og nágrenni

Í nágrenni Ölkelduháls er mun meiri skjálftavirkni en á Nesjavallasvæðinu og til að takmarka fjölda skjálfta var stærð svæðisins og lengd tímabilsins u.þ.b. helminguð. Enn fremur voru valdir stærri skjálftar, eða stærri en 0.4. Tímabilið var frá 1. janúar til 20. maí 1998 og svæðið var innan lengdarbauga -21.25°A og -21.15°A og breiddarbauga 64.045°N og 64.085°N. Þetta svæði inniheldur safnið sem skoðað var í kafla 2.1, en þó ekki alla sömu skjálftana því stærðarþröskuldurinn er hærri. Skilyrðin uppfylltu 604 skjálftar, en í sjálfvirka staðsetningarferlinu var 99 skjálftum hafnað og eftir sitja 505 skjálftar.

Eftir endurstaðsetningu skjálftanna kemur fram fjöldi smárra skjálftaþyrpinga, sem flestar virðast hafa norðlæga stefnu. Fyrir utan hrinurnar þrjár við Katlatjörn efri, sem sýndar eru á mynd-



Mynd 4. Staðsetning jarðskjálfta austur af Ölkelduhálsi 1.1.–20.5.1998 eftir upptakagreiningu. Skjálftar eru merktir með fylltum rauðum hringjum, svarti hringurinn er borhola Hita-veitu Reykjavíkur á Ölkelduhálsi. Grænar línur eru misgengi á yfirborði (Kristján Sæmundsson 1995), en bestu plön gegnum skjálftaþyrpingar eru merkt með svörtum strikum. Þverstrikin sýna halla plananna.

um 1 og 2, voru valdar fjórar í viðbót og eru þær allar merktar inn á mynd 4. Augljóslega eru fleiri skjálftaþyrpingar, eins og t.d. vestan við Álftatjörn og sunnan við Katlatjörn neðri, en ekki vannst tími til að kanna þær nánar. Til að afmarka þær betur þyrfti sennilega að lækka stærðarþröskuldinn. Við núverandi mörk hefðu t.d. hrinurnar við Katlatjörn efri ekki náð að skorða brotplön vel. Skjálftarnir í Katlatjarnahrinunum hliðruðust um 230 m í NV og 300 m í dýpi þegar þeir voru staðsettir með öllu safninu af Ölkelduhálsi. Þetta er innan algildra óvissumarka í upphaflegu staðsetningunum.

Austasta hrinan, suður af Djáknapollu, er á 4.4–5.1 km dýpi og dreifir sér á um 400 m langa línu. Skjálftarnir eru 37 að tölu og áttu sér stað á tímabilinu 17.–26. apríl, en allir nema tveir urðu fyrstu tvo dagana. Besta plan í gegnum þá hefur strik N15°A og halla 86° til austurs. Innbyrðis óvissa í staðsetningum þeirra er oftast 2–10 m, en algild óvissa er 100–200 m. Meðalfjarlægð skjálfta frá besta plani er um 17 m eða heldur meiri en óvissumörkin. Flestar brotlausnanna falla vel að sprungufletinum sem skjálftadreifingin ákvarðar, með miðgildi minnsta fráviks brotlausna frá sprungufletinum um 4°. Hreyfingin í skjálftunum er hægri handar sniðgengi með nokkrum siggengispætti.

Næsta hrina fyrir vestan er undir Hrómundartindi og skilgreina hana 18 skjálftar frá 25. apríl. Skjálftarnir dreifa sér á 3.5–4.1 km dýptarbil og um 700 m langa lárétta línu og skilgreina plan með svipaða strikstefnu og fyrri hrinan, 14° og 83° halla til austurs. Meðalfjarlægð skjálftanna frá planinu er 10 m og innbyrðis óvissa í staðsetningum er 2–10 m, algild óvissa 150–200 m. Brotlausnirnar falla ágætlega að þessu plani með miðgildi minnstu brotlausnafrávika við 7°.

Færslan í þessum brotlausnum er blanda af hægri handar sniðgengi og siggengi.

Þriðja hrinan er í eystri hluta Þverárdals. Hún er skilgreind af 17 skjálftum frá 10. mars. Skjálftadreifingin er yfir dýptarbilið 4.1–4.7 km og eftir 600 m langri láréttri línu. Hún ákvarðar plan með strikstefnu  $199^\circ$  og halla  $88^\circ$  til vesturs. Meðalfjarlægð skjálfta frá besta plani er 10 m. Innbyrðis óvissa í staðsetningunum er 1–7 m og algild óvissa oftast 100–400 m. Miðgildi minnstu brotlausnafrávika er við  $5^\circ$ , þannig að brotlausnirnar eru í góðu samræmi við upptakagreininguna. Færslan í skjálftunum er hægri handar sniðgengi með siggengispætti.

Vegna lítillar dreifingar skjálftanna í fjórðu og vestustu hrinunni skorða þeir brotplan frekar illa. Hrinan er í miðjum Þverárdal og samanstendur af 16 skjálftum frá 19. mars. Dýptardreifingin er yfir bilið 3.3–3.5 km og lárétt dreifing er einungis 130 m. Planid hefur strikstefnu um  $13^\circ$  og halla  $76^\circ$  til austurs. Meðalfjarlægð skjálftanna frá planinu er 5 m. Innbyrðis óvissa í staðsetningum er oftast 1–17 m og algild óvissa er 100–500 m. Brotlausnirnar falla ekki vel að þessu plani og miðgildi minnstu brotlausnafrávika er við  $16^\circ$ . Færslan virðist vera hægri handar sniðgengi með óvissum lóðréttum þætti.

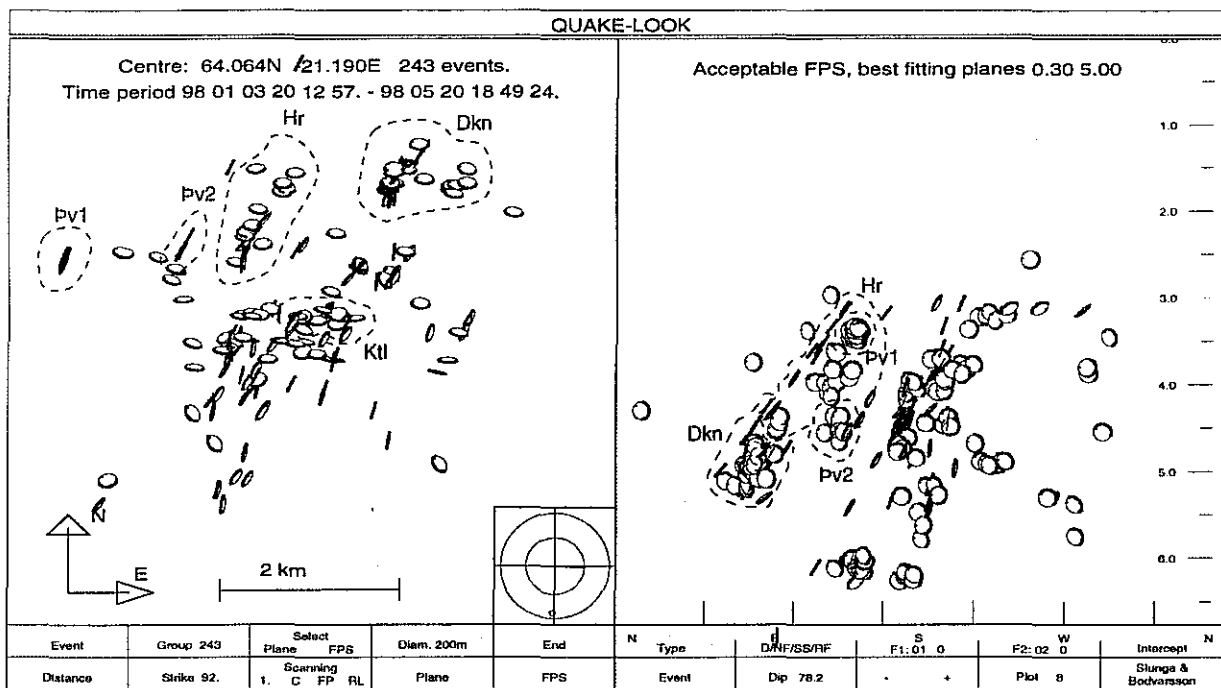
Skjálftaþyrpingarnar á Ölkelduhálsi urðu allar í eins til nokkurra daga hrinum, en þegar allt tímabilið er skoðað koma í ljós hugsanlegir brotpletir með aust-vestlæga stefnu. Þetta sést best á mynd 5, þar sem sýndur er afrakstur þess að láta forritið leita sjálfvirkt í gegnum allt skjálftasafnið. Valdir brotlausnaflatir 243 skjálfta úr safninu eru teiknaðir í láréttum fleti á vinstri hellingi myndarinnar og í lóðréttum fleti á þeim hægri. Eins og áður snýr þykkari rönd brotplans að auganu og hnikstefnan er sýnd með striki í hringinn. Hrinurnar sjö sjást allar, en misvel þó. Einungis fáir skjálftar úr Katlatjarnahrinunum voru nógu stórir fyrir þetta úrval og skjálftarnir í austustu hrinunni, sunnan við Djáknapoll, lenda undir og sjást ekki í gegnum aust-vestlægu brotpletina. Þegar horft er á þversnið í austur koma í ljós tvö aust-vestlæg plön með halla nálægt  $53^\circ$ . Það nyrðra samanstendur af tveim  $\sim 1$  km planbútum sem liggja ofan við Hrómundartinds- (Hr á mynd 5) og Djáknapollshrinurnar (Dkn) og virðast takmarka þær að ofan. Sumir skjálftanna á þessum flötum tengjast norðlægu hrinunum í tíma, en flestir þeirra urðu á öðrum tímum. Planbúturnir tveir gætu hugsanlega verið hlutar af sama misgengisfleti. Syðri flöturinn sem lendir ofan á Katlatjarnahrinunum er ekki eins vel ákvarðaður, en gæti þó eigi að síður verið vísbending um annan aust-vestlægan flöt. Þrátt fyrir vísbendingar af þessu tagi má ekki gleyma því að aukaflötur brotlausnanna í N-S hrinunum hefur nokkurn veginn sama strik og halla og aust-vestlægu fletirnir. Þeir gætu því tilheyrt norðlægum misgengjum. Þá er hins vegar ekki líklegt að mörk þeirra væru öll undir sama fletinum, eins og þau virðast vera á mynd 5. Könnun yfir lengri tíma og með fleiri skjálftum ætti að geta skorið úr um tilvist þessara plana.

Strikstefnur norðlægu plananna sem skjálftadreifingarnar ákvarða og merktar eru á mynd 4 eru nálægt  $N10^\circ$ – $20^\circ$  A. Kortlagðar sprungur í nálægum hlíðum eru hins vegar heldur austlægari, eða u.þ.b.  $N25^\circ$ – $30^\circ$  A. Skjálftahrinurnar virðast ekki tengjast neinum kortlögðum sprungum á yfirborði.

## 4 NIÐURSTÖÐUR OG UMRÆÐA

Leitað var virkra misgengja á Hengilssvæði með samtúlkun upptakagreiningar og brotlausna, með það að markmiði að þróa tækni og úrvinnsluferli til kortlagningar vatnsleiðandi sprungna undir yfirborði á áhugaverðum vinnslusvæðum jarðhita.

Nærri Nesjavöllum voru allir skjálftar á tímabilinu 1. janúar 1998 til 31. janúar 1999 skoðaðir. Á svæðinu austan Ölkelduháls, þar sem skjálftavirkni er mun meiri, var tímabilið styttra, frá 1.



Mynd 5. Innbyrðis staðsetningar skjálfta í nágrenni Ölkelduháls 1.1.–20.5.1998. Hver skjálfti er sýndur með hringlaga fleti, sem hefur strik, halla og hreyfingarstefnu skv. því pláni brotlausnar sem valið er. Þykkari rönd hringins snýr að áhorfandanum og hreyfingarstefnan er merkt með striki á hringinn. Vinstri helmingur myndar sýnir staðsetningu í láréttum fleti, með stefnur í N og A sýndar neðst í vinstra horni. Plönin sem áður voru upptakagreind eru auðgreind á myndinni. Hægri helmingur myndar sýnir lóðrétt snið þvert á strikstefnunum, þannig að horft er eftir brotflötunum, í stefnu  $N92^\circ A$ . Dýpi í km er á lóðrétta ásnum. Norðlægu hrinurnar við Hrómundartind (Hr), suður af Djáknapolli (Dkn) og við Katlatjarnir (Ktl) virðast allar liggja undir  $\sim 66^\circ$  hallandi aust-vestlægum flötum. Þv1 og Þv2 eru þyrpingarnar í Þverárdal á mynd 4.

janúar til 20. maí 1998 og eingöngu skoðaðir skjálftar stærri en 0.4 á Richter kvarða. Í töflu 1 eru teknar saman upplýsingar um þau plön sem kortlögð voru.

Helstu niðurstöður þessara athugana eru:

1. Nákvæmar innbyrðis staðsetningar 427 skjálfta nærri Nesjavöllum benda til þess að virk misgengi með stefnu nærri  $N25^\circ A$  séu undir Kýrdalsbrúnum, Nesjavöllum, Hvanngili og Stangarhálsi (mynd 3b), en þar dugar innbyrðis afstaða skjálftanna til að skorða stefnu plans gegnum skjálftahneppin. Brotlausnir skjálfta í hverju hneppi falla yfirleitt vel að því pláni sem skjálftadreifingin ákvarðar. Miðgildi minnstu frávika brotflata einstakra skjálfta frá besta pláni er oftast um  $10^\circ$ . Lengd þessara misgengja er 0.5–1.5 km og dreifing í dýpi 600–800 m. Kýrdalsbrúna-, Nesjavalla- og Hvanngilsmisgengin eru nær lóðrétt og á þeim urðu sniðgengishreyfingar. Stangarhálsmisgenginu hallar um  $67^\circ$  til vesturs og brotlausnir skjálftanna þar benda til siggengis með nokkrum sniðgengispætti. Staðsetning og stefna Nesjavallamisgengisins með tilliti til gjöfilla borhola bendir til að brotið tengist lekt svæðisins, þó svo borholurnar ná ekki niður að brotflötunum sjálfum.
2. Í nágrenni Ölkelduháls bendir samtálgun upptakadreifingar 505 skjálfta og brotlausna þeirra til að virk misgengi með stefnu nærri  $N15^\circ A$  séu undir Þverárdal, Hrómundartindi

Staður	Dýpi (km)	Strik	Halli	Meðal- fjarlægð (m)	Lárétt dreifing (m)	Fjöldi skjálfta
Kýrdalsbrúinir	4.2–4.9	23°	87°	12	600	15
Nesjavellir	4.3–5.1	24°	82°	36	1230	36
Stangarháls	2.5–3.1	204°	67°	13	1100	43
Hvanngil	4.8–5.4	201°	85°	17	600	13
Hengill*	5.7–6.6	211°	57°	33	550	16
Djáknapollur	4.2–5.2	15°	86°	17	400	37
Hrómundartindur	3.5–4.1	14°	83°	10	660	18
Þverárdalur A	4.1–4.7	199°	88°	10	600	17
Þverárdalur*	3.3–3.5	13°	76°	5	130	16
Katlatjörn efri V	3.6–4.1	20°	80°	14	400	20
Katlatjörn efri M	3.8–4.4	7°	89°	13	200	20
Katlatjörn efri A	3.9–4.2	14°	85°	4	150	15

Tafla 1. *Upplýsingar um brotflæti nærri Nesjavöllum og austur af Ölkelduhálsi út frá upptakagreiningu og brotlausnum smáskjálfta. Strikið er mælt til austurs frá norðri og hallinn frá láréttu þegar horft er í strikstefnu. Þverárdalur A er eystri þyrpingin í Þverárdalunum (mynd 4). Katlatjarnaþyrpingarnar eru auðkenndar V, M og A fyrir vestur-, mið- og austurþyrpingu. Þyrpingar merktar með \* skorða plönin illa, sérstaklega er mikil óvissa í hallaákvörðuninni.*

og suður af Djáknapólli, auk þriggja samsíða misgengja við Katlatjörn efri (myndir 1 og 4), þar sem skjálftadreifin er þéttust. Misgengin eru nærri lóðrétt (halli > 83°) og á þeim urðu sambland hægri sniðgengishreyfingar og siggengis. Miðgildi minnstu frávika einstakra brotlausna frá besta plani gegnum hverja þyrpingu er oftast innan við 6°.

3. Auk norðlægu misgengisflatanna á Ölkelduhálssvæðinu eru vísbendingar um austlægar sprungur með minni halla (~66°) við Katlatjörn efri og einnig við Hrómundartind og Djáknapoll. Þær tvær síðastnefndu gætu auk þess verið hluti af sama misgengisflæti, sem þá er a.m.k. 4 km langur (mynd 5). Tilvist þessara flata er þó alls ekki örugg og þarf frekari athuganir til að skera úr um hana.
4. Strik virkra misgengja nærri Nesjavöllum, sem öll eru innan Hengilssprunguþyrpingarinnar, eru N20°–25°A og samsvara ríkjandi sprungustefnu í vestra gosbeltinu. Lega syðra svæðisins, við Ölkelduháls, er í kverkinni þar sem mætast vestra gosbeltið og Suðurlandsbrotabeltið. Ríkjandi sprungustefna nærri Ölkelduhálsi er svipuð og á Nesjavallasvæðinu, en virknin undanfarið hefur einkum verið á sprungum með um 10° vestlægari stefnu eða N10°–20°A.

Norðlægu misgengin við Hvanngil og á Stangarhálsi virðast vera vestari mörk mjög dreifðrar skjálftavirkni (mynd 3b). Í nágrenni Ölkelduháls virðast hin hugsanlegu aust-vestlægu misgengi takmarka norðlæga dreifingu skjálfta (mynd 5). Austur-vestur flætinir myndu skera yfirborð einhvers staðar á svæðinu frá Katlatjörnum suður fyrir Álftatjörn. Í því samhengi er athyglisvert að jarðhitinn er mestur þar fyrir sunnan, en hann liggur á NV-SA lægu beltinu fyrir sunnan Álftatjörn og um Ölkelduháls. Vangaveltur af þessu tagi eru þó lítt studdar rökum enn sem

komið er.

Í þessari rannsókn var í fyrsta sinn prófuð aðferð til að leita sjálfvirkt að skjálftum sem liggja á plani og þess jafnframt krafist að stefna plansins félli að brotlausnum skjálftanna. Niðurstöðurnar lofa góðu, en þó er mikið verk óunnið áður en hægt er að fella forritið inn í hina (hálf)sjálfvirku upptakagreiningu smáskjálfta. Ef fara á kerfisbundið í gegnum allan þann fjölda skjálfta á Hengilssvæði sem fastanet Veðurstofunnar hefur skráð á undanförunum árum verður að minnka hinn gagnvirka þátt úrvinnslunnar eins og frekast er kostur. Þannig sparast tími (a.m.k. til lengri tíma litið) og matið á því hvort og hve vel tiltekið skjálftahneppi skilgreinir virkt misgengi verður algjörlega hlutlægt.

Þær aðferðir sem hér eru notaðar til kortlagningar misgengja með smáskjálftum eru enn í þróun. Á þetta einkum við um staðsetningaraðferðirnar og gagnvirkan þátt úrvinnslunnar, en einnig um aðferðir til að tengja brotlausnir við niðurstöður upptakagreiningar og að nokkru leyti um brotlausnareikningana sjálfa.

## 5 ENGLISH SUMMARY

For the past years seismicity near the Hengill central volcano, SW Iceland, has been monitored by the permanent SIL network (Stefánsson et al. 1993; Böðvarsson et al. 1996). The current detectability in the area is close to  $M=0.0$  with more than 50.000 earthquakes recorded there since 1991. Fault plane solutions are estimated for each located earthquake, giving a range of acceptable solutions as well as an optimal mechanism (Slunga 1981; Rögnvaldsson and Slunga 1993). Previously the algorithm described by Slunga et al. (1995) has been used to obtain highly accurate relative locations for tens of small earthquake clusters in the Hengill area (Rögnvaldsson et al. 1998a,c). The objective of this study was to systematically compare fault plane solutions of accurately relocated earthquakes with the fault orientations estimated from the spatial distribution of events.

In earlier use of these algorithms within the Swedish network (Slunga et al. 1984) a combined interpretation of fault plane solutions and location was tested. This interpretation algorithm has now been modified to fit the data format of the Icelandic network. The multievent interpreter makes a systematic search for groups of microearthquakes with hypocenters on a plane and having acceptable fault plane solutions close enough to this plane. The output of the algorithm is therefore a number of planes, each defined by a group of earthquakes. A quality measure is computed for all the groups. Its value is determined by the number of earthquakes, the degree of fit between the fault plane solutions and event distribution, and on the events' closeness to the plane. The basic idea behind this interpretation is that several densely spaced earthquakes often lie on a common fault plane and their locations can then be used to constrain the strike and dip of that plane. In addition, the events should also have similar fault plane solutions, which should be close to the best fitting plane through the group. We expect the chosen fault plane to represent the true fault, as we do not expect the spatial distribution to favour the auxiliary plane.

We selected data from two subareas, one near the Nesjavellir geothermal field north of Mt. Hengill (lower left corner at  $-21.3^{\circ}\text{E}$ ,  $64.085^{\circ}\text{N}$  and upper right corner at  $-21.2^{\circ}\text{E}$  and  $64.15^{\circ}\text{N}$ ), the other near Ölkelduháls (corners at  $-21.25^{\circ}\text{E}$ ,  $64.045^{\circ}\text{N}$  and  $-21.15^{\circ}\text{E}$ ,  $64.085^{\circ}\text{N}$ ). Within the Nesjavellir area, accurate relative locations were obtained for 427 earthquakes occurring from January 1, 1998 to January 31, 1999. After relocation, four clusters of earthquakes become apparent in the dataset, located beneath Kýrdalsbrúnir, Nesjavellir, Stangarháls and Hvanngil (Figure 3b). The strike of the best fitting plane through each of these groups is  $\sim 25^{\circ}\text{E}$ . All,



except the plane through the Stangarháls sequence, are nearly vertical and faulting is mostly strike-slip. The group beneath Stangarháls delineates a plane dipping  $65^\circ$  to the west and movement on the plane is normal faulting. In general, the fault plane solutions of individual earthquakes agree with the fault aspects estimated from the distribution of events with median deviation from the best fitting plane through each group around  $10^\circ$ .

For the Ölkelduháls area, accurate relocations were obtained for 505 earthquakes which occurred from January 1 to May 20, 1998. After relocation, planes were fit through each of the seven subgroups of the data (Figure 4). Their strike is  $10^\circ$ – $20^\circ$  and the dip is close to vertical. Average distance of earthquakes used to constrain each plane, from the best plane, is 5–20 m for all seven groups. Fault plane solutions show a combination of right-lateral strike-slip and normal faulting on northerly striking faults generally agreeing with the event distribution. The median of smallest deviation of fault plane solutions from the best plane through each group is usually less than  $6^\circ$ .

An automatic search for planes that fit both the locations of earthquakes and their fault plane solutions suggests the presence of possible E-W faults on top of the three N-S elongated groups near Katlatjörn efri (Ktl, Figure 5), as well as on top of the N-S groups under Hrómundartindur (Hr) and south of Djáknappollur (Dkn). Events on these faults are distributed in time and the lineaments only become apparent when long time periods (several months) are examined.

The methods used in this study to map faults with microearthquakes are still under development.

## 6 HEIMILDIR

- Bergerat, F., Ágúst Guðmundsson, J. Angelier og Sigurður Th. Rögnvaldsson 1998. Seismotectonics of the central part of the South Iceland seismic zone. *Tectonophysics* 298, 319–335.
- 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 og Sigurður Th. Rögnvaldsson 1998. Úrvinnsla á skjálftamælingum á Hengils-svæði. *Greinargerð Orkustofnunar KÁ/SR-98/4*. Orkustofnun, Reykjavík.
- Kristján Ágústsson 1998. Stefnur og strik í landslagi á Hellisheiði og í Hengli. *Greinargerð Veðurstofu Íslands VÍ-G98037-JA05*. Veðurstofa Íslands, Reykjavík.
- Kristján Sæmundsson 1995. Hengill, jarðfræðikort (berggrunnur) 1:50000. Orkustofnun, Hita-veita Reykjavíkur og Landmælingar Íslands, Reykjavík.
- Ólafur G. Flóvenz og Karl Gunnarsson 1991. Seismic crustal structure in Iceland and surrounding area. *Tectonophysics* 189, 1–17.
- 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. *Seism. 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 R. Slunga 1999. Kortlagning virkra misgengisflata. URL: <http://www.vedur.is/~sr/sprungur.html>, 4.10.1998.
- Sigurður Th. Rögnvaldsson, Ágúst Guðmundsson og R. Slunga 1998a. Seismotectonic analysis of the Tjörnes fracture zone, an active transform fault in North Iceland. *J. Geophys. Res.* 103, 30117–30129.
- 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, Kristján Ágústsson, Bergur H. Bergsson og Grímur Björnsson 1998c. Jarðskjálftamælanet í nágrenni Reykjavíkur — lýsing á mælaneti og fyrstu niðurstöður. *Rit Veðurstofu Íslands VÍ-R98001-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., P. Norrman og A.-C. Glans 1984. Baltic shield seismicity, the results of a regional network. *Geophys. Res. Lett.* 11, 1247–1250.
- 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.

20

ISSN 1025-0565  
ISBN 9979-878-15-0

Kápmmynd: Klósigar (vatnslær)  
Ljóm.: Guðmundur Hafsteinsson, veðurfræðingur