

Kortlagning sprungna í nágrenni
Prestahnúks, með smáskjálftum.
Kortlagning jarðhita í gosbeltum
Íslands – annar áfangi

Sigurlaug Hjaltadóttir
Kristín S. Vogfjörð

Kortlagning sprungna í nágrenni Prestahnúks, með smáskjálftum. Kortlagning jarðhita í gosbeltum Íslands – annar áfangi

Sigurlaug Hjaltadóttir, Veðurstofu Íslands
Kristín S. Vogfjörð, Veðurstofu Íslands

Lykilsíða

Skýrsla nr.: VÍ 2009-011	Dags.: Desember 2009	ISSN: 1670-8261	Opin <input checked="" type="checkbox"/> Lokuð <input type="checkbox"/> Skilmálar:
Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill: Kortlagning sprungna í nágrenni Prestahnúks með smáskjálftum. Kortlagning jarðhita í gosbeltum Íslands – annar áfangi		Upplag: 25	
		Fjöldi síðna: 41	
Höfundar: Sigurlaug Hjaltadóttir og Kristín S. Vogfjörð		Framkvæmdastjóri sviðs: Jórunn Harðardóttir	
		Verkefnisstjóri: Kristín S. Vogfjörð	
Gerð skýrslu/verkstig: Rannsókn á jarðskjálftagögnum, kortlagning		Verknúmer: 2821-0-0001	
Unnið fyrir: Orkustofnun			
Samvinnuaðilar:			
Útdráttur: Svokölluð upptakagreining er notuð til þess að endurstaðsetja skjálfta sem mældust í SIL-netinu í nágrenni Prestahnúks frá árinu 1991 fram til loka maí 2008. Með aðferðinni má fá mun nákvæmari afstæðar staðsetningar og er skjálftadreifin svo notuð til þess að kortleggja sprungufleti í jarðskorpunni. Stærsta skjálftahrinan varð sumarið 1999 en aðrar allstórar hrinur urðu einnig árin 1992, 1994, 1998 og 2008. Skjálftarnir dreifast langflestir á línu sem nær suðvestur af Þórisjökli og norðaustur fyrir Geitlandsjökul. Kortlagðir eru 17 brotpletir og hafa þeir allir suðvestur-norðaustur-stefnu, líkt og yfirborðsmisgengi sem kortlögð hafa verið á svæðinu.			
Lykilorð: Smáskjálftar, jarðskjálftar, sprungur, kortlagning, Prestahnúkur, Geitlandsjökull, Þórisjökull, upptakagreining, skjálftahrina		Undirskrift framkvæmdastjóra sviðs: 	
		Undirskrift verkefnisstjóra: 	
		Yfirfarið af: SG	

Efnisyfirlit

Myndaskrá	5
Töfluskrá	5
Ágrip.....	7
1 Inngangur.....	7
2 Aðferðir: upptakagreining og brotlausnir.....	8
3 Gögn og úrvinnsla	8
4 Niðurstöður og túlkun	13
4.1 1991 til 13. júní 1997 (t1).....	13
4.2 14. júní 1997 til maí 2008 (t2).....	14
5 Umræður og lokaorð	19
6 English summary	23
Heimildir	23
Viðauki I. Dreifing skriðhorna fyrir allar kortlagðar sprungur	25
Viðauki II. Myndir af dreifingu skjálfta á sprungum	28
Viðauki III. Tillaga að öðrum áfanga kortlagningar í gosbeltunum, frá ágúst 2006.....	37

Myndaskrá

Mynd 1. Jarðskjálftar við suðvestanverðan Langjökul frá upphafi stafrænna mælinga SIL-kerfisins.....	9
Mynd 2. Skjálftar við suðvestanverðan Langjökul frá 1991 til maí 2008.....	11
Mynd 3. Endurstaðsettir skjálftar við suðvestanverðan Langjökul 1991 til maí 2008.....	12
Mynd 4. Endurstaðsettir skjálftar á tímabili t1.....	17
Mynd 5. Endurstaðsettir skjálftar á tímabili t2.....	18
Mynd 6. Kortlagðar sprungur/sprungubrot suðvestan Langjökuls frá 1997 til maí 2008.....	22
Mynd 7. Dreifing skriðhorna á kortlögðum sprungum/þyrpingum fyrir tímabil t1.....	25
Mynd 8. Dreifing skriðhorna á kortlögðum sprungum/þyrpingum fyrir tímabil t2.....	26

Töfluskrá

Tafla 1. Fjöldi skjálfta í hverri keyrslu.....	9
Tafla 2. Helstu stærðir fyrir þær sprungur sem hafa verið kortlagðar.....	19

Ágrip

Endurstaðsettir smáskjálftar, sem Veðurstofa Íslands hefur safnað frá upphafi sjálfvirkra mælinga SIL-kerfisins, eða frá 1991 fram í lok maí 2008, eru notaðir til að kortleggja brotflæti í nágrenni Prestahnjúks við suðvestanverðan Langjökul. Með því að nota svokallaða upptakagreiningu til að fá nákvæmari staðsetningar er hægt að greina og kortleggja sprungur eða brotflæti í jarðskorpunni þar sem skjálftarnir verða. Hreyfistefnur á kortlögðum brotflötum eru ákvarðaðar með samtúlkun skjálftadreifar og brotlausna. Um 1230 skjálftar urðu á fyrrgreindu tímabili. Stærsta hrinan varð sumarið 1999 en aðrar allstórar hrinur urðu einnig 1992, 1994, 1998 og 2008. Skjálftarnir dreifast langflestir á línu sem nær suðvestur af Þórisjökli, í gegnum jökulinn og norðaustur fyrir Geitlandsjökul. Í þessum áfanga eru 17 brotflæti kortlagðir og hafa þeir nær allir suðvestur-norðaustur-stefnu, líkt og misgengi sem kortlögð hafa verið á yfirborðinu í vestara gosbeltinu. Ef gengið er út frá því að hreyfing á þessum sprungum stafi af gliðnun ættu brotlausnir að sýna sambland af vinstri-sniðgengisfærslu og gliðnun. Niðurstaðan var sú að brotlausnir skjálfta á rúmlega helmingi brotflatanna sýna aðallega sig-, vinstri-sniðgengishreyfingu eða sambland af þessu tvennu.

1 Inngangur

Undanfarin 16 ár hefur Veðurstofa Íslands rekið net jarðskjálftamæla á Íslandi, svokallað **SIL**-kerfi. Fyrstu átta mælarnir voru settir niður í Suðurlandsbrotabeltinu árið 1989 en um mitt ár 2008 voru stöðvarnar orðnar 53 talsins og eru þær aðallega staðsettar umhverfis flekaskilin. Hægt er að nota svokallaða upptakagreiningu til þess að fá mun nákvæmari staðsetningar á upptökum skjálfta, oft með það mikilli nákvæmni að hægt er að kortleggja margar þær sprungur sem smáskjálftar verða á. Aðferðin hefur verið notuð til að kortleggja sprungur víða á Íslandi, t.d. í Tjörnesbrotabeltinu (Sigurður Th. Rögnvaldsson o.fl., 1998), á Hengilssvæðinu (Sigurður Th. Rögnaldsson o.fl., 1999; Kristín S. Vogfjörð, 2000; Kristín S. Vogfjörð o.fl., 2005b), stóru Suðurlandsskjálftasprungurnar frá því í júní 2000 og aðrar sprungur sem urðu virkar í kjölfar skjálftanna (Sigurlaug Hjaltadóttir og Kristín S. Vogfjörð, 2005; Kristín S. Vogfjörð o.fl., 2005a), og í Fagradalsfjalli á Reykjaneskaga (Sigurlaug Hjaltadóttir og Kristín S. Vogfjörð, 2006). Markmið núverandi rannsóknar er að nota **SIL**-gögn til að kortleggja sprungur í nágrenni Prestahnjúks við suðvestanverðan Langjökul og er það annar áfangi í kortlagningu sprungna í gosbeltunum en Veðurstofan lagði fram tillögu þess efnis í ágúst 2006 (sjá viðauka III). Fyrsti áfangi kortlagningar í gosbeltunum fól í sér kortlagningu í Fagradalsfjalli.

Tvær megineldstöðvar eru taldar liggja undir Langjökli og er sú syðri kennd við Prestahnúk (Páll Einarsson og Kristján Sæmundsson, 1987). Svæðið við suðvesturenda Langjökuls liggur nærri vesturjaðri vestara gosbeltisins. Af helstu fjöllum á svæðinu má nefna dyngjuna Ok, sem væntanlega er frá síðasta hlýskeyði ísaldar fyrir 110–130 þúsund árum, Prestahnúk, ísaldarmyndun sem er að mestu úr biksteini og svo Þórisjökul sem er móbergsstapi frá síðasta jökulskeyði (Ari Trausti Guðmundsson, 2001). Samkvæmt íssjarmælingum sem gerðar voru á jöklinum árið 1997 (Helgi Björnsson og Finnur Pálsson, samkvæmt samtali 2007) er fjölbreytt landslag undir jökulhettunni. Undir Geitlandsjökli liggur stapi en norðaustan hans liggur stór dyngja og áfastur við hana er annar allstór stapi. Ef Þórisjökull er talinn með rís því þarna röð fjögurra stórra fjalla í norðaustur-stefnu eftir gosbeltinu. Þær yfirborðssprungur sem kortlagðar hafa verið (Haukur Jóhannesson og Kristján Sæmundsson, 1998) hafa allar sömu stefnu (Mynd 2). Nýjustu niðurstöður GPS-mælinga sýna að landrek á sér aðallega stað yfir eystra gosbeltið (Halldór Geirsson o. fl.,

2006), en minna um vestara gosbeltið (Freysteinn Sigmundsson o.fl., 1995). Gliðnun þar minnkar jafnframt til suðurs, sem þykir benda til þess að landrek um suðurhluta landsins sé að færast yfir á eystra gosbeltið (LaFemina og fl., 2005). Svæðið er þó enn talið virkt, en síðast gaus á sögulegum tíma við vesturjaðar Langjökuls, norðaustan Eiríksjökuls, snemma á 10. öld er Hallmundarhraun rann (Haukur Jóhannesson, 1989).

2 Aðferðir: Upptakagreining og brotlausnir

Upptakagreining byggir á þeirri staðreynd að bylgjuform skjálfta, sem verða í hrinum á afmörkuðu svæði, eru oftast mjög lík, sér í lagi ef skjálftarnir verða á sömu sprungum. Ef fjarlægð milli einstakra skjálfta er lítil, miðað við fjarlægð skjálftadreifarinnar frá mælistöð, verða farbrautir bylgnanna nærri þær sömu og munurinn á ferðatíma bylgnanna stafar af þeirri hlutfallslega litlu fjarlægð sem er á milli skjálftanna. Þetta þýðir að hægt er að mæla afstæðan komutíma bæði P- og S-bylgna skjálftanna á hverri stöð með mikilli nákvæmni með víxlfylgni (*e. cross correlation*) og fá þar af leiðandi nákvæmari afstæðar staðsetningar (Slunga o.fl., 1995).

Brotlausn skjálfta ákvarðast af þremur hornum: striki (ϕ), halla (δ) og skriðhorni (λ). Notuð er svokölluð netleit (*e. grid search*) til þess að finna allar mögulegar samsetningar á ϕ , δ og λ í fjögurra gráða þrepum (Rögnvaldsson og Slunga, 1993 og 1994). Útgeislunarmynstrið er síðan reiknað fyrir sérhverja samsetningu og borið saman við mælt útslag svo og skautun P- og S-bylgnanna á þeim stöðvum sem hægt er að greina hana. Þær samsetningar, sem hafa frávík frá mældu útslagi innan ákveðins viðmiðunargildis og rétta skautun á sem flestum stöðvum, eru geymdar sem mögulegar lausnir. Strikstefna er skilgreind þannig að hallinn er til hægri ef horft er eftir striki brotflatarins. Halli flatarins er mældur frá lárétu og skriðhorn er mælt í fletinum, rangsælis frá láréttri stefnu (strikinu).

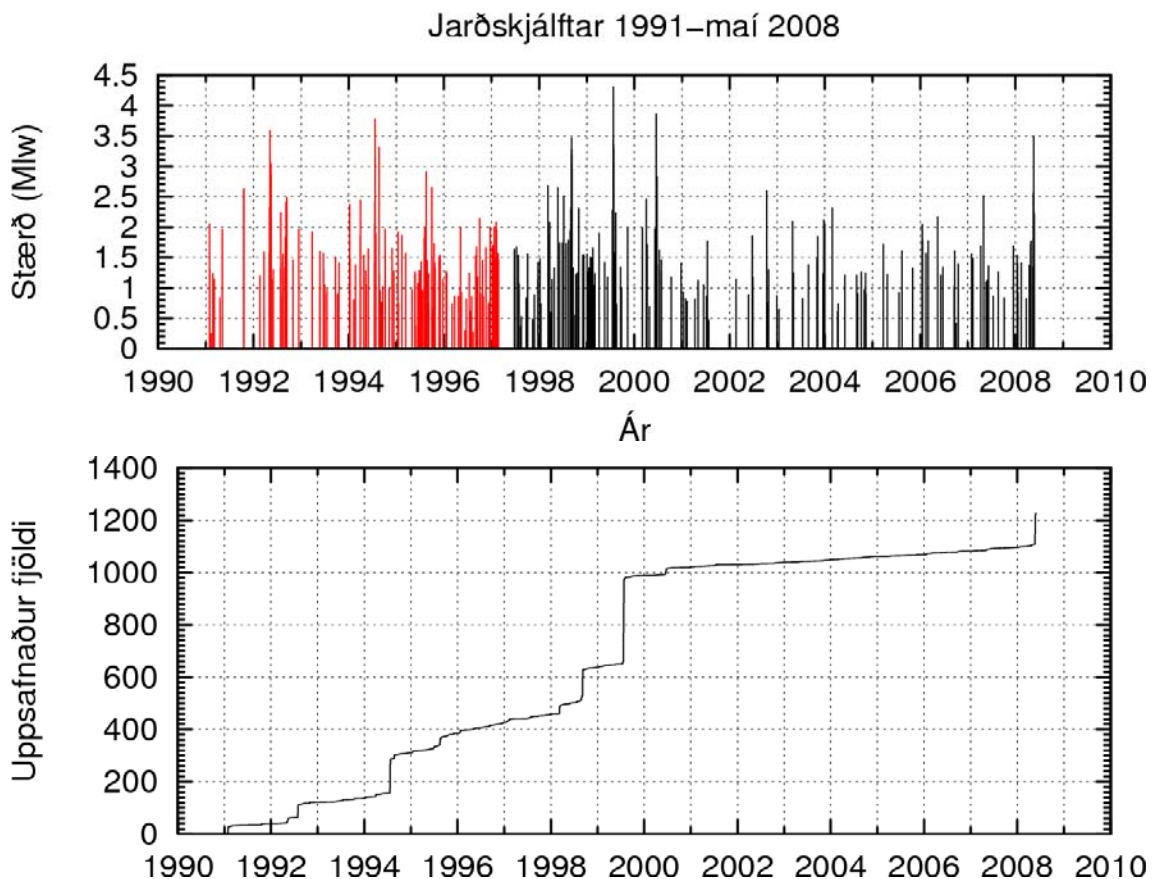
Samtúlkun skjálftadreifarinnar og brotlausnanna er notuð til þess að skilgreina sprungur og meta hreyfingu á þeim. Skjálftar sem virðast vera á sömu sprungu eru valdir og strik og halli flatar sem best fellur að dreifinni eru fundin. Fyrir sérhvern skjálfta á sprungunni er sú brotlausn valin sem best fellur að striki og halla sprungunnar og er innan ákveðinna skekkjumarka. Til að meta hreyfistefnu á sprungufletinum er tekið meðaltal af skriðhornum allra skjálftanna sem skilgreina hann, bæði venjulegt meðaltal og vegið meðaltal, þar sem vegið er með vægi skjálftanna. Skriðhorn er þó ekki hægt að meta ótvírætt nema skautun fyrstu bylgju sé valin á a.m.k. einni stöð.

3 Gögn og úrvinnsla

Upptakagreining var notuð til að fá betri afstæðar staðsetningar fyrir alla þá skjálfta sem staðsettir hafa verið með **SIL**-kerfinu við suðvestanverðan Langjökul frá upphafi, eða nánar til tekið frá janúar 1991 fram í maílok 2008 á svæði sem afmarkast af 64,45°N–64,70°N og -21,00°A– -20,40°A. Á þessu svæði hafa verið staðsettir 1230 atburðir á fyrrgreindu tímabili. Hugbúnaðurinn, sem notaður er til að endurstaðsetja skjálftana, tekur að hámarki 1800 skjálfta í hverri keyrslu, en þar sem upplýsingar um læstar klukkur voru ekki aðgengilegar í gagnaskrá á öllum stöðvum fyrr en eftir miðjan júní 1997 var gögnunum skipt upp í tvö tímabil, t1 og t2, eins og fram kemur í töflu 1. Því var aðeins hægt að vinsa úr gögn með ólæstar klukkur á tímabili 2 en öll gögn höfð með á tímabili 1.

Tafla 1. Fjöldi skjálfta í hverri keyrslu. Tímabilinu sem rannsóknin spannar var skipt upp í tvo hluta eftir því hvenær klukkuupplýsingar voru aðgengilegar í gagna-skrám allra skjálftastöðva. r er geisli (e. radius) þess svæðis sem sérhver hópur er innan og d er fjarlægð milli miðja tveggja svæða, eða skörun.

Keyrsla	Tímabil	Fjöldi skjálfta	r (km)	d (km)	Fjöldi hópa
t1	30.jan. 1991–13. júní 1997	441	3,0	1,7	89
t2	14. júní 1997–maí 2008	789	3,0	1,7	122



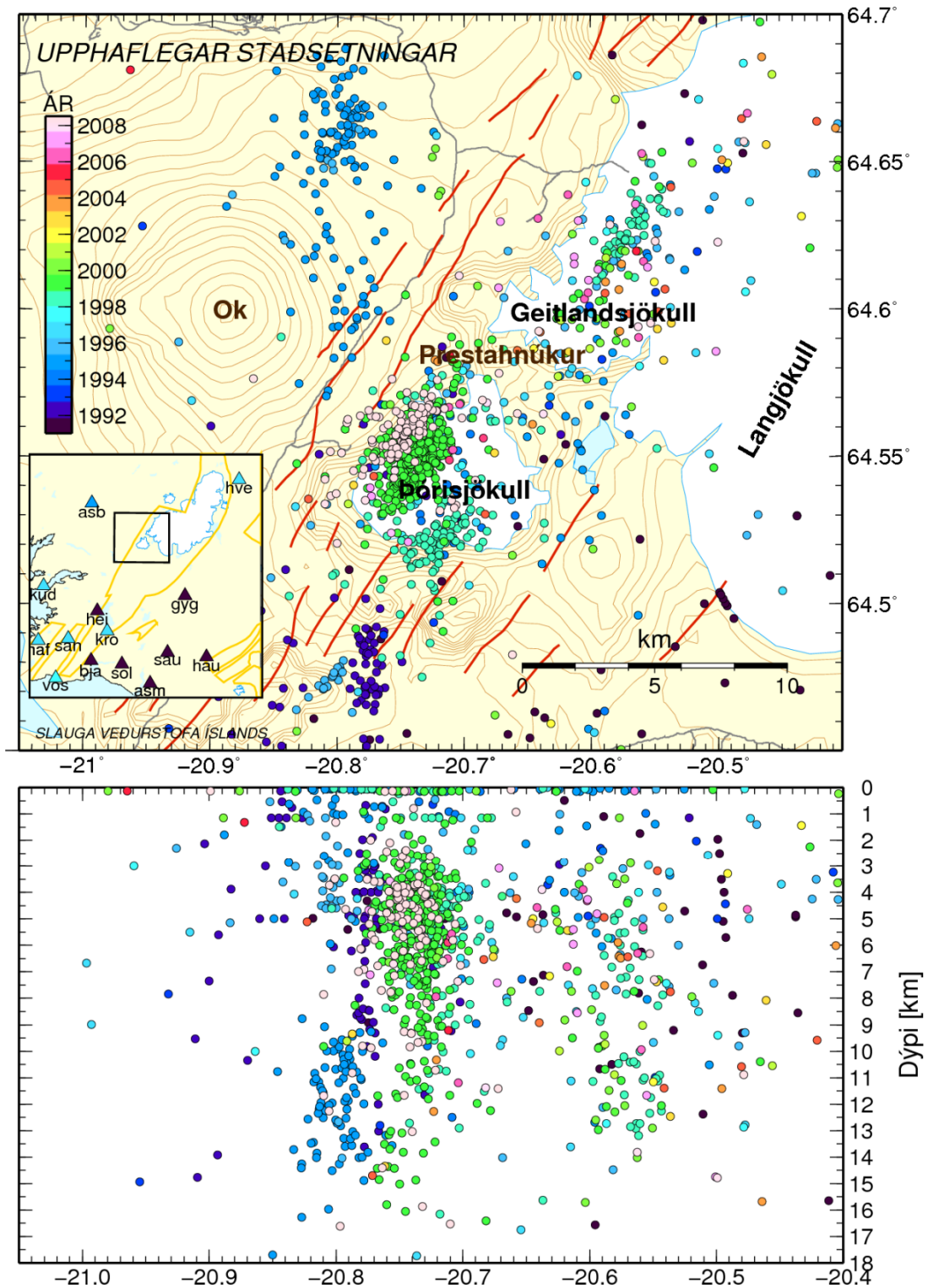
Mynd 1. Jarðskjálftar við suðvestanverðan Langjökul frá upphafi stafrænna mælinga SIL-kerfisins, þ.e. frá 1991 fram í maílok 2008. Efri myndin sýnir stærð skjálfta sem fall af tíma, rautt fyrir tímabil t1 og svart fyrir tímabil t2. Sú neðri sýnir uppsafnaðan fjölda skjálfta.

Fyrir endurstaðsetningu var skjálftunum á hverju tímabili skipt upp í hópa (e. groups) með ákveðnum lágmarks- og hámarksfjölda hver (6–45). Flestir hópar á tímabili t2 innihalda 45 skjálfta en aðeins um þriðjungur hópanna á tímabili t1 nær þessum hámarksfjölda. Einnig var valin stærð þess svæðis sem hver hópur gat spannað (r í töflu 1) svo og skörun milli hópa (d í töflu 1); r og d voru valin þannig að sem flestir skjálftar lentu í a.m.k. fjórum hópum en þá fást betri skorður á nýju staðsetningarnar. Skjálftar á tímabili t1 eru

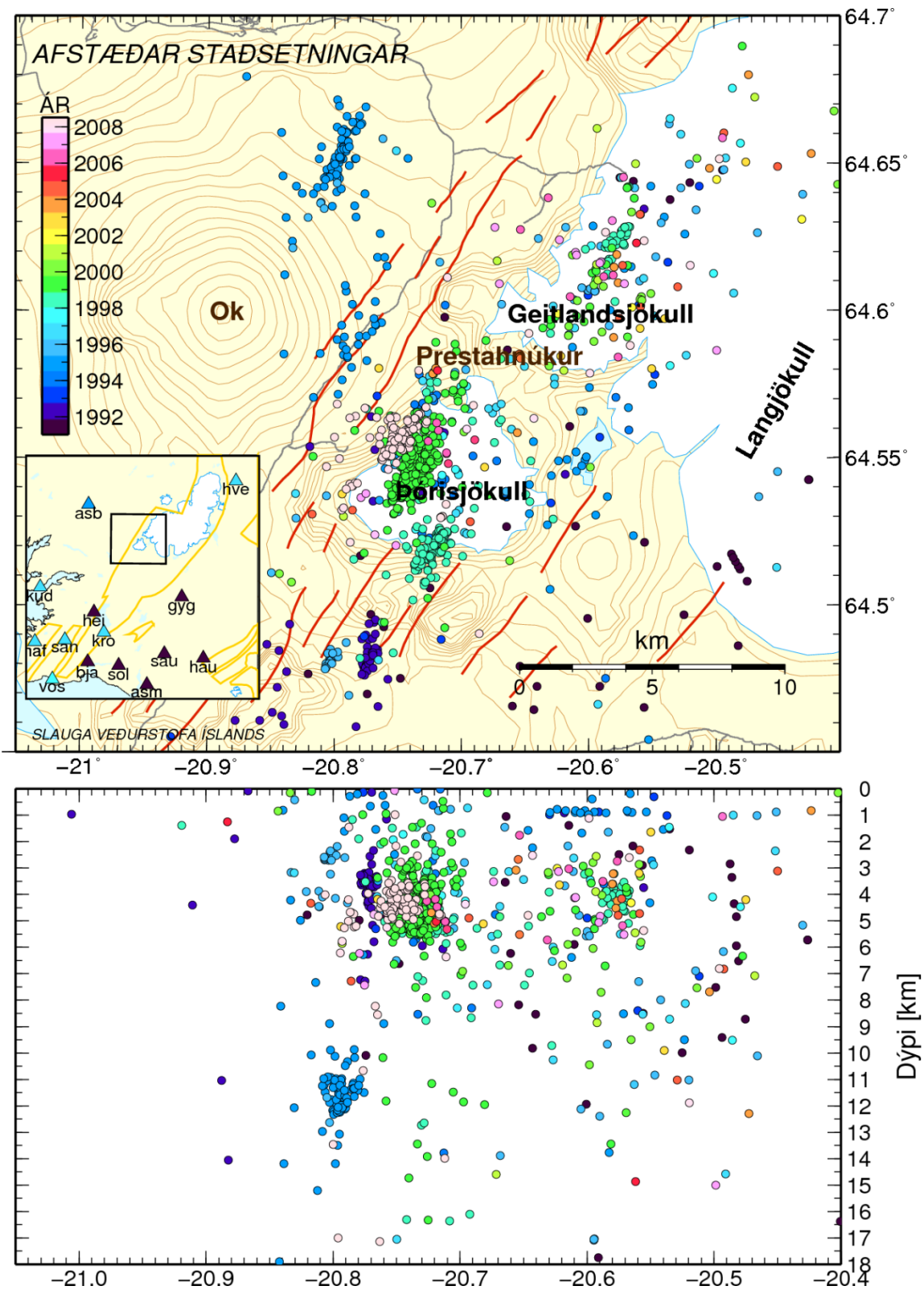
flestir í 3–8 hópum, sumir þó allt að 14, en á tímabili t2 eru flestir í 3–10 hópum en þó allt upp í 12.

Fyrstu átta mælum **SIL**-kerfisins var komið fyrir 1989 og í byrjun árs 1990 en kerfið tók þó ekki að starfa sjálfvirkt fyrr en í júlí 1991 (Steinunn S. Jakobsdóttir, 1998). Þessir mælar voru allir staðsettir á Suðurlandsundirlendi, að einum undanskildum sem staðsettur var við Mýrdalsjökul. Af þessum fyrstu stöðvum var Gýgjarhólskot (**gyg**) næst því svæði sem hér er kortlagt. Staðsetningu stöðvarinnar má sjá á innfelldu myndinni á Mynd 2 en hún er í um 35 km fjarlægð frá Þórisjökli. Í byrjun ágúst 1994 bættist stöðin Ásbjarnarstaðir við (**asb**) norðvestan svæðisins og loks Kúludalsá (**kud**) í suðvestri og Hveravellir (**hve**) í norðaustri í lok júní og ágúst 1996. Þessar stöðvar, ásamt stöðvum á Hengilssvæði, eru enn þann dag í dag næstu stöðvar sem nema virkni í vestara gosbeltinu. Eins og fram kemur í vinnutillögu frá ágúst síðastliðnum (Kristín S. Vogfjörð, sjá viðauka III) er næmni á svæðinu nú í kringum $M > 0,5$ en lagt var til að þremur stöðvum yrði bætt við á svæðið (mynd 3 í viðauka III). Með tilkomu þeirra myndi næmni svæðisins aukast í rétt undir $M=0$.

Eins og sjá má á Mynd 1 varð stærsta hrinan sem mælst hefur á svæðinu síðla sumars 1999 (um 330 skjálftar) en aðrar allstórar hrinur urðu einnig sumarið 1992 (um 45 skjálftar), síðla sumars 1994 (um 140 skjálftar), snemma hausts 1998 (um 120 skjálftar) og í maí 2008 (um 120 skjálftar). Þess má geta að síðustu hrinunni var h.u.b. að ljúka þegar Suðurlandskjálftinn reið yfir 29. maí 2008, um 66 km sunnar. Tiltölulega lítil virkni mældist á þessu svæði í kjölfar Suðurlandskjálftanna 2000. Hennar varð mun meira vart á Geysissvæðinu og við Sandvatn, suður af Langjökli. Virkni var þó allveruleg á þessum slóðum á árunum 1982–1985 (Páll Einarsson og Kristján Sæmundsson, 1987).



Mynd 2. Skjálftar við suðvestanverðan Langjökul frá 1991 til maí 2008, í lit eftir því hvenær tímabilsins þeir urðu. Þríhyrningarnir á innfelledu myndinni sýna staðsetningu **SIL**-stöðva í lit eftir því hvenær þær voru settar upp. Gular útlínur afmarka virk eldstöðvakerfi (Páll Einarsson og Kristján Sæmundsson, 1987). Rauðar línur tákna kortlagðar yfirborðssprungur (Haukur Jóhannesson og Kristján Sæmundsson, 1998). Gráar línur tákna vegi/vegslóða. Neðri myndin sýnir dýptarsnið, horft frá suðri.



Mynd 3. Allir endurstaðsettir skjálftar við suðvestanverðan Langjökul frá 1991 til maí 2008, í lit eftir því hvenær tímabilsins þeir urðu. Þríhyrningarnir á innfelldu myndinni sýna staðsetningu SIL-stöðva í lit eftir því hvenær þær voru settar upp. Neðri myndin sýnir dýptarsnið, horft frá suðri. Gráar línur tákna vegi/vegslóða. Rauðar línur tákna kortlagðar yfirborðssprungur (Haukur Jóhannesson og Kristján Sæmundsson, 1998).

4 Niðurstöður og túlkun

Alla skjálfta sem staðsettir hafa verið í nágrenni Prestahnúks frá 1991 fram til loka maí 2008 (tímabil t1 og t2) má sjá á Mynd 2 og endurstaðsetta skjálfta á Mynd 3, í mismunandi lit eftir því hvenær á tímabilinu þeir urðu. Þegar upphaflegar staðsetningar eru skoðaðar má sjá að virknin er aðallega bundin við fjóra staði: um 4 km sunnan Þórisjökuls, norðaustur af Oki, í Þórisjökli og norðaustur úr Geitlandsjökli. Virknin er þó nokkuð dreifð og erfitt að sjá skýrar sprungustefnur, nema þá helst í tveimur syðstu þyrpingunum sem virkar voru 1992 og 1995. Þar örlar fyrir norðlægi og norðaustlægi sprungustefnu. Þegar mynd 2 er svo borin saman við nýjar staðsetningar á mynd 3 má sjá að virknin þéttist mun betur í afmarkaðri þyrpingar, sér í lagi í dýpi. Þetta á einkum vel við nyrstu þyrpinguna, norðaustan Oks, en þar kemur greinilega í ljós NNA-læg sprunga. Þegar sprungurnar eru kortlagðar er tekið mið af dreifingu þeirra skjálfta sem hafa litla afstæða staðsetningarskekkju, einkum ef virknin er dreifð og erfitt að átta sig á því mynstri sem í ljós kemur. Stefna, halli og stærð sprunguflata eru samt sem áður ákvörðuð af öllum skjálftum sem liggja á eða við fletina, óháð staðsetningarnákvæmni. Dreifing skriðhorna (λ) er sýnd í viðauka I fyrir hverja sprungu/sprungubrot. Á myndunum eru einnig sýnd meðalskriðhorn (λ_{ave}) og vegið meðalskriðhorn (λ_{wav}) á hverri sprungu. Til að finna meðalskriðhorn eru lagðir saman allir skriðhornavigrar skjálfta á sprungunni og svo er fundinn sá þáttur heildarvigursins sem liggur í sameiginlega brotflatinum. Vegið meðalskriðhorn er fundið á svipaðan hátt nema vigtað er með vægi skjálftanna (M_0 , e. *moment*) þegar skriðvigrarnir eru lagðir saman og stórir skjáltar hafa því meira vægi þar. Dreifingu skjálfta á hverjum fleti má sjá á myndum í viðauka II. Virkninni á einstökum sprungum/þyrpingum sem kortlagðar voru verður nú lýst á hvoru tímabili fyrir sig.

4.1 1991 til 13. júní 1997 (t1)

Afstæðar staðsetningar á tímabili t1 má sjá á Mynd 4. Þeir skjálftar sem hafa afstæða skekkju innan við 100 m í lengd og breidd og 300 m í dýpi eru sýndir í lit, aðrir sem gráir hringir. Helstu hringur á þessu tímabili urðu í lok júlí 1992 þegar rúmlega 50 skjálftar urðu aðallega sunnan Þórisjökuls, í lok júlí 1994, þá urðu um 140 skjálftar í norðaustur- og austurhlíðum Oksins, og svo í seinni hluta ágústmánaðar 1995, aftur sunnan Þórisjökuls (um 30 skjálftar). Sprungurnar sem í ljós koma hafa allar norðnorðaustlæga eða norðaustlæga stefnu. Þyrping 05 hefur nær vestlægt strik, en það er þó ekki marktækt sökum þess hve þétt og lítil þyrpingin er. Dreifingu skriðhorna (λ) og meðalskriðhorn ($\lambda_{ave}, \lambda_{wav}$) á hverri sprungu má sjá í Töflu 2 og á Mynd 7 í viðauka I. Að neðan er stutt yfirlit yfir hverja sprungu/þyrpingu:

- **02** Rúmlega 3,1 km löng sprunga sem var virk í hrinu 21.–22. júlí 1994. Hún hefur strik 27° og halla 88° . Alls eru 76 skjálftar á sprungufletinum, þar af er hægt að meta skriðhorn fyrir 60 þeirra. Skjálftarnir eru langflestir á 10–12,5 km dýpi, en þó allt upp í 7 km og niður á 13 km dýpi. Dreifing skriðhorna er allmisleit, en bendir þó annaðhvort til sig- eða samgengis, ásamt minni sniðgengisþætti. Bæði meðal- og veginn meðalskriðvigur sýna siggengi ásamt vinstri-sniðgengisþætti.
- **03** Rúmlega 1,3 km löng sprunga með strik 213° og halla 67° . 17 skjálftar eru notaðir til þess að skilgreina sprunguflötinn, þar af er hægt að meta skriðhorn fyrir 15 þeirra. Skjálftarnir eru allir á dýptarbilinu 2–3 km og sprungan var virk 16.–19. ágúst 1995. Dreifing skriðhorna er fremur mikil og sýnir annaðhvort ríkjandi vinstri-sniðgengishreyfingu ásamt minni samgengisþætti eða hægri-sniðgengisfærslu.

- **04** Rúmlega 2 km löng sprunga með strik 201° og halla 82° . Langflestir þeirra 49 skjálfta sem skilgreina sprunguflötinn eru á 3–4,5 km dýpi, en þó fáeinir allt niður á 7 km. Hægt er að meta skriðhorn fyrir 44 skjálfta. Skjálftarnir urðu nær allir á tímabilinu 29. júlí –1. ágúst 1992. Nær eingöngu syðri hluti sprungunnar er skilgreindur af vel staðsettum skjálftum (þ.e. með innbyrðis óvissu í lengd og breidd minni en 100 m og minni en 300 m í dýpi). Það er vel hugsanlegt að hún sé í raun samsett af tveimur skástíga brotum. Þótt dreifing skriðhorna sé allbreytileg, sýnir þungamiðja þeirra ríkjandi vinstra- sniðgengi ásamt minni siggengisþætti.
- **05** Þyrping átta skjálfta sem flestir urðu 1995 (29.–30. júní, 27. ágúst og 5. okt.) en dreifast á breitt dýptarbil. Fjórir skjálftar (þar af einn vel staðsettur) eru á 5–6 km dýpi, einn á 12 km dýpi og þrír (allir vel staðsettir) á 17 km dýpi. Aðeins er hægt að ákvarða skriðhorn fyrir þrjá skjálfta. Besti flötur í gegnum skjálftadreifina er 520 m langur, hefur halla 90° og strik 98° . Þessi strikstefna getur hins vegar vart talist marktæk, þar eð óvissa er mikil fyrir svo afmarkaða þyrpingu. Þetta brot er að öllum líkindum hluti stærri sprungu sem ekki sýndi meiri virkni á tímabilinu sem skoðað er. Þær þrjár brotlausnir sem notaðar eru til að ákvarða skriðhorn sýna þó allar sambland af vinstri-sniðgengisfærslu og samgengi.
- **06** Sjö skjálftar (þar af fjórir vel staðsettir, afstæð skekkja í lengd og breidd < 400 m) sem dreifast á dýptarbilið 0,8–6 km. Þessir skjálftar skilgreina 770m langan flöt með striki 237° og halla 90° . Hægt er að ákvarða skriðhorn fyrir fimm skjálfta. Af þeim fimm brotlausnum sýna tvær vinstri-sniðgengisfærslu ásamt minni samgengisþætti, en hinar þrjár sýna hægri-sniðgengisfærslu. Þetta sprungubrot var virkt á fremur löngu tímabili, frá 1992–1997. Það er líklegast norðausturendi stærri sprungu sem var virk í hrinu 1998 (t2-08).
- **07** Um 860 m langt sprungubrot norður af t1-06 með strik 226° , halla 84° . Sjö skjálftar eru á þessu broti, sem var aðallega virkt haustið 1993 og í janúar 1994, og hægt er að ákvarða skriðhorn fyrir fimm þeirra. Helmingur skjálftanna sýnir nær hreina siggengisfærslu, hinn helmingurinn hefur álíka stóran hægri-sniðgengisþátt. Skjálftarnir raða sér á 3–6 km dýpi, fimm þeirra eru ágætlega staðsettir, þ.e.a.s. hafa afstæða skekkju í lengd og breidd < 410 m og < 530 m í dýpi.

4.2 14. júní 1997 til maí 2008 (t2)

Á Mynd 5 má sjá afstæðar staðsetningar frá miðjum júní fram til maíloka 2008. Þeir skjálftar sem hafa afstæða skekkju innan við 100 m í lengd og breidd og 300 m í dýpi eru sýndir í lit, aðrir sem gráir hringir. Árið 1998 urðu tvær litlar skjálftahrinur: í mars þegar rúmlega 30 skjálftar urðu í Geitlandsjökli, og í ágústlok þegar um 120 skjálftar urðu í suðurhlíðum Þórisjökuls. Stærsta hrinan á tímabilinu hófst seinni partinn í júlí 1999 og stóð fram í byrjun ágústmánaðar. Í þessari hrinu urðu um 330 skjálftar í Þórisjökli (grænir skjálftar á myndum 2, 3, 4 og 5) en hún er jafnframt sú stærsta sem mælst hefur á þessu svæði síðan mælingar hófust með **SIL**-netinu. Nýjasta hrinan varð á sömu slóðum, við norðvestur-jaðar Þórisjökuls í seinni hluta maí 2008 (ljósbleikir skjálftar á myndum 2, 3 og 5). Sprungurnar sem hægt er að kortleggja hafa allar mjög svipaða stefnu, norðaust-læga, sem er nærri stefnu vestara gosbeltisins. Dreifingu skriðhorna (λ) og meðalskriðhorn á hverri sprungu má sjá í Tafla 1 og á Mynd 8 í viðauka I. Að neðan er stutt yfirlit yfir hverja sprungu/þyrpingu:

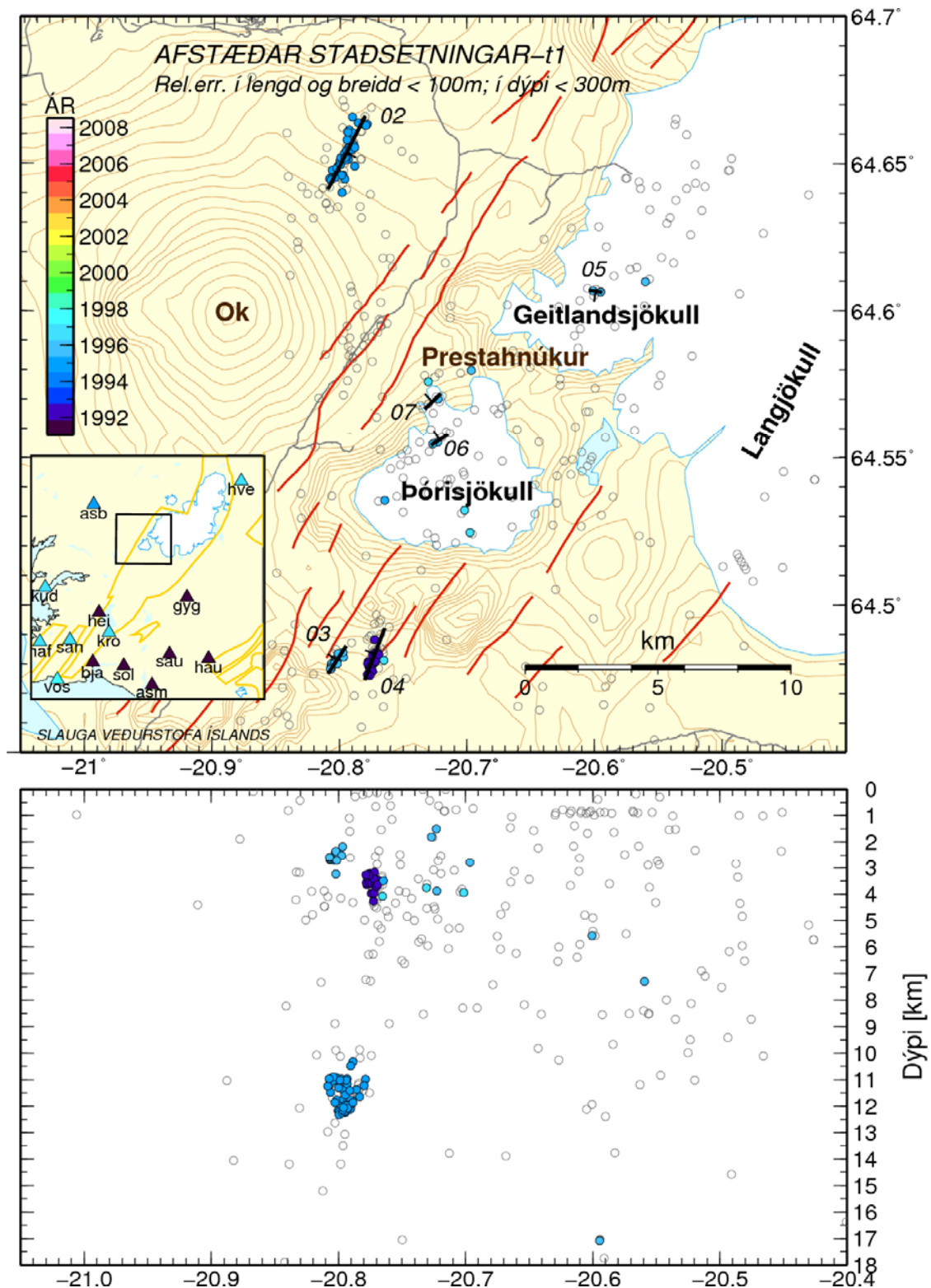
- **02** Tæplega 2,3 km löng sprunga sem var virk í suðurhlíðum Þórisjökuls um mánaðarmótin ágúst–september 1998. Hún hefur strik 35° og halla 77° . Af þeim

73 skjálftum sem skilgreina sprunguflötinn er hægt að meta skriðhorn fyrir 66. Dreifing skriðhorna bendir helst til siggengishreyfingar ásamt minni vinstri-sniðgengisfærslu. Nokkrir stærri skjálftanna virðast þó hafa stærri sniðgengisþátt þar sem nokkur munur er á λ_{wav} (þar sem stærri skjálftar vege meira) og λ_{ave} . Við frekari úrvinnslu var þessari sprungu skipt niður í tvær skástígar sprungur, t2-10 og 11 (sjá lýsingu síðar).

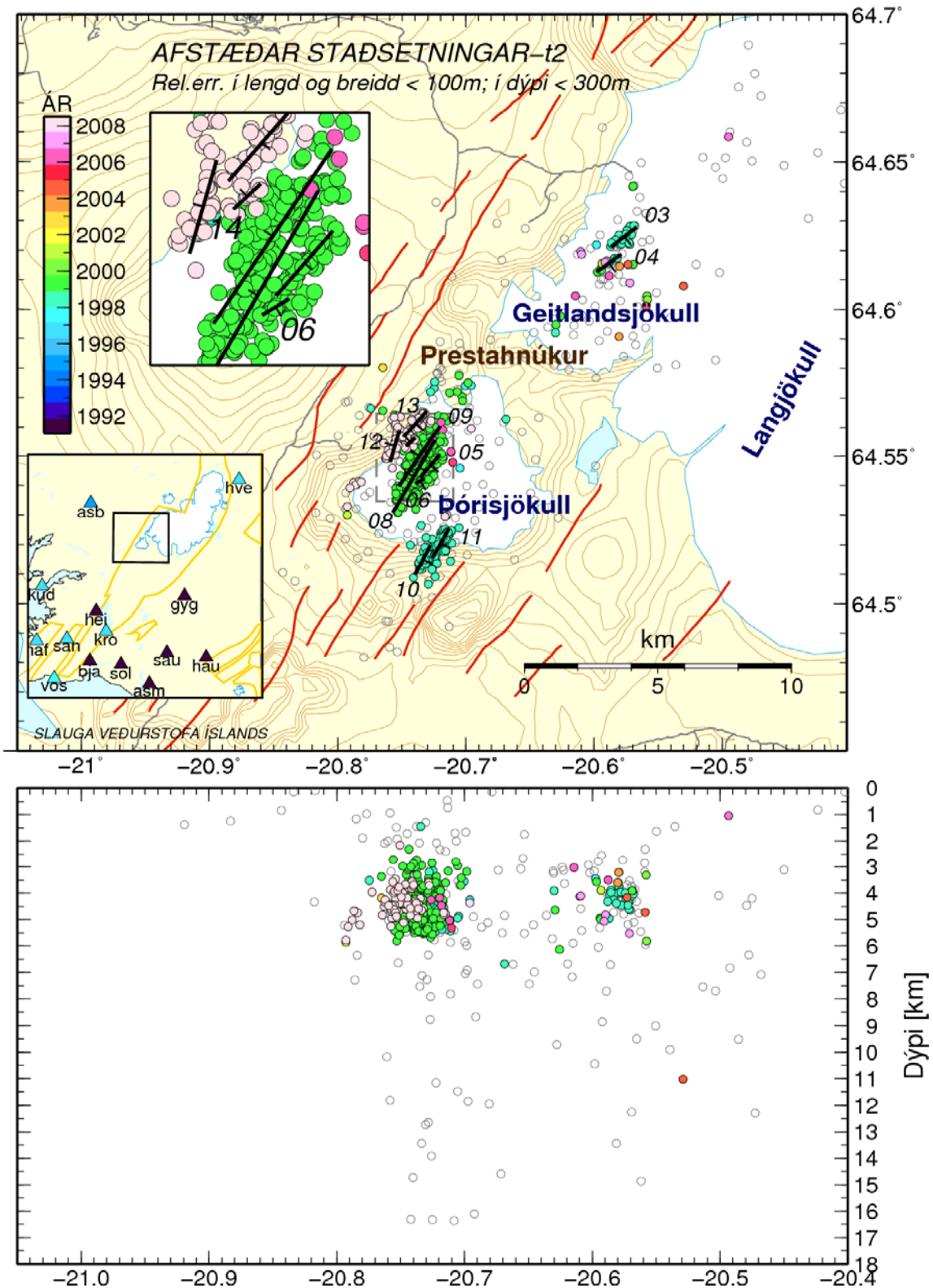
- **03** Rúmlega 1,2 km langt sprungubrot með strik 52° og halla 72°. Hægt er að ákvarða skriðhorn fyrir alla þá 34 skjálfta sem skilgreina brotflötinn en hann var virkur í mars 1998. Skjálftarnir eru allir á 3,5–4,7 km dýpi. Dreifing skriðhorna sýnir siggengishreyfingu fyrir langflesta skjálftana.
- **04** Rúmlega 1,1 km langt sprungubrot með strik 54° og halla 88°. Brotflöturinn er ákvarðaður út frá 12 skjálftum sem urðu flestir í ágúst/september 1998 og apríl/maí 1999 á 3,5–5 km dýpi. Hægt er að ákvarða skriðhorn fyrir þá alla; dreifing þeirra er frekar mikil og vart marktæk. Meiri hluti skjálftanna virðist þó sýna samgengishreyfingu, ýmist ásamt vinstri- eða hægri-sniðgengisþætti.
- **05** Rúmlega 1,1 km löng sprunga með strik 41° og halla 86°. Sprunguflöturinn er reiknaður út frá 42 skjálftum, sem flestir eru á 4–5,5 km dýpi, og hægt er að ákvarða skriðhorn fyrir alla nema einn. Skjálftarnir urðu allir í 1999-hrinunni. Dreifing skriðhorna er þó allveruleg og virðist ekki gefa ákveðna vísbendingu um hreyfistefnu á fletinum. Stór hluti skjálftanna virðist hafa ríkjandi samgengishreyfingu ásamt minni vinstri-sniðgengisþætti, þótt meðalskriðvigrar sýni nær eingöngu siggengi.
- **06** Um 400 m langt sprungubrot með strik 59° og halla 87°. Aðeins 12 skjálftar eru notaðir til að skilgreina brotflötinn, þar af er hægt að meta skriðhorn fyrir 11 þeirra. Skjálftarnir urðu allir í júlí–1999 hrinunni á 5–5,5 km dýpi. Líkt og fyrir sprungu t2-05 er dreifing skriðhorna mjög mikil og meðalskriðstefna því ekki marktæk. Brotlausnir sýna ýmist sam- eða siggengishreyfingu.
- **08** 3,2 km löng sprunga undir Þórisjökli með strik 210° og halla 68°. 70 skjálftar á dýptarbilinu 4–5,5 km skilgreina þennan brotflöt, þar af er hægt að meta skriðhorn fyrir 62 þeirra. Nær allir skjálftarnir urðu seinni part júlímánaðar 1999 og meginhluti þeirra sýnir ríkjandi vinstri-sniðgengishreyfingu á sprungunni ásamt (minni) siggengisþætti. Þó nokkur fjöldi skjálfta sýnir þó þveröfuga færslu, eða ríkjandi hægri-sniðgengishreyfingu.
- **09** Rétt tæplega 2,8 km löng sprunga alveg við sprungu 08 undir Þórisjökli. Brotflöturinn, sem ákvarðaður er af 82 skjálftum, hefur strik 214° og halla 58°. Hægt er að ákvarða skriðhorn fyrir 72 skjálfta. Þessi sprunga var virk í sömu hrinu og t2-08, í lok júlí 1999. Ríkjandi hreyfistefna er einnig sú sama fyrir stærstan hluta skjálftanna, eða vinstri-sniðgengisfærsla, með ýmist samgengisþætti eða siggengisþætti. Nokkur hluti skjálftanna virðist þó benda til hægri-sniðgengishreyfingar með álíka stórum samgengisþætti, eða ögn minni siggengisþætti. Þessi dreifing skriðhorna veldur því að meðalskriðvigrar sýna ríkjandi vinstri-sniðgengishreyfingu, á meðan meðalskriðvigrar á sprungu t2-08 sýna ríkjandi samgengisþátt. Skjálftarnir eru allir á um 3,5–4,6 km dýpi.
- **10** Um 1,3 km langt sprungubrot undir suðurhlíðum Þórisjökuls með strik 28° og halla 86°. Sprunguflöturinn, sem var virkur um mánaðarmótin ágúst-september 1998, ákvarðast af 23 skjálftum á 4–5,3 km dýpi. Þar af er hægt að meta skriðhorn fyrir 21 þeirra. Dreifing skriðhorna er allmikil en skiptist þó í þrjár þyrpingar sem

sýna: 1) vinstri-sniðgengisfærslu með minni samgengispætti, 2) vinstri-sniðgengisfærslu ásamt álíka stórum siggengispætti og 3) hægri-sniðgengisfærslu ásamt álíka stórum siggengispætti. Meðalskriðvigrar virðast heldur sýna vinstri-sniðgengisfærslu.

- **11** Um 1,3 km langt sprungubrot undir suðurhlíðum Þórisjökuls með strik 29° og halla 75° . Fimmtíu skjálftar, flestir á 4–5,5 km dýpi, eru notaðir til þess að skilgreina sprunguflötinn, þar af er hægt að meta skriðhorn fyrir 45 skjálfta. Flestar brotlausnir sýna sambland af siggengi og minni vinstri-sniðgengispætti, líkt og meðalskriðvigrar fyrir sprungu t2-02, sem samsett er úr skástígum brotum t2-10 og t2-11.
- **12** Brotflöturinn er skilgreindur af 34 skjálftum sem mynda 1,3 km langa, nær lóðréttu sprungu (halli= 88°) undir norðvesturjaðri Þórisjökuls með strik 196° . Skjálftarnir urðu flestir á 4–5 km dýpi í hrinu seinnipartinn í maí 2008 og hægt er að meta skriðhorn fyrir 33 þeirra. Meirihluti brotlausnanna og meðalskriðvigrar sýna hægri-sniðgengisfærslu ásamt annað hvort sigi eða samgengi.
- **13** Rúmlega 1,3 km löng sprunga sem liggur í framhaldi af t2-12 til norðurs undir norvesturjaðri Þórisjökuls og á sama dýpi (4–5 km). Norðurendi hennar nær jafnframt að þyrpingu t1-07. Skjálftarnir urðu í maíhrinunni 2008. Strikstefna er 41° og halli 87° . Hægt er að ákvarða skriðhorn fyrir 27 af þeim 37 skjálftum sem skilgreina brotflötinn. Brotlausnir benda annað hvort til hægri-sniðgengisfærslu ásamt sigi eða samgengishreyfingar.
- **14** Þetta litla brot eða þyrping liggur rétt austan og samsíða t2-13 og sést í þeirri sömu virkni í maí 2008. Brotflöturinn er 0,5 km langur, lóðréttur með strikstefnu 227° . Skjálftarnir eiga flestir upptök sín á 3,5–4,5 km dýpi. Skriðhorn eru ákvörðuð fyrir 11 af þeim 13 skjálftum sem eru á sprungubrotinu og sýna flest sambland af vinstri-sniðgengisfærslu og sig- eða samgengispætti.



Mynd 4. Endurstaðsettir skjálftar á tímabili t1. Skjálftar sem hafa litla afstæða skekkju (<100 m í lengd og breidd og <300 m í dýpi) eru sýndir í lit en aðrir eru sýndir sem gráir hringir. Svörtu strikin sýna lengd, strik og hallastefnu þeirra virku sprungna/þyrpinga sem kortlagðar voru á þessu tímabili; þær eru tölusettar 02–07. Rauðar línur tákna kortlagðar yfirborðssprungur (Haukur Jóhannesson og Kristján Sæmundsson, 1998).



Mynd 5. Endurstaðsettir skjálftar á tímabili t2. Skjálftar sem hafa litla afstöða skekkju (< 100 m í lengd og breidd og < 300 m í dýpi) eru sýndir í lit en aðrir eru sýndir sem gráir hringir. Svörtu strikin sýna lengd, strik og hallastefnu þeirra virku sprungna/pyrpinga sem kortlagðar voru á þessu tímabili; þær eru tölusettar 03–14, að 07 undanskilinni. Efri innfellda myndin sýnir staðsetningu sprungubrota t2-06 og t2-14.

Tafla 1. Helstu stærðir fyrir þær sprungur sem hafa verið kortlagðar: strik (ϕ), halli (δ), meðalskriðhorn (λ_{ave}), vegið meðalskriðhorn (λ_{wav}), lengd sprungu, x =meðalbreidd, y =meðallengd, fjöldi skjálfta á sprungunni sem hægt er að meta skriðhorn fyrir/heildarfjöldi skjálfta á sprungunni og rms-fjarlægð skjálfta frá sprungufletinum. Línur í sama lit tákna sömu sprungur eða hluta af sömu sprungum sem greindust á tveimur tímabilum.

Sprungu	ϕ (°)	δ (°)	λ_{ave} (°)	λ_{wav} (°)	lengd (km)	y-ave (°N)	x-ave (°A)	Fjöldi skjálfta	rms (m)
t1-02	27	88	-29,54	-24,32	3,127	64,6539	-20,7949	60/76	100,4
t1-03	213	67	-154,32	22,61	1,267	64,4816	-20,8020	15/17	24,7
t1-04	201	82	-41,07	-19,17	2,111	64,4837	-20,7722	44/49	93,8
t1-05	(98)	(90)	(37,18)	(31,34)	0,522	64,6069	-20,5984	3/8	47,7
t1-06	237	90	175,55	-166,40	0,771	64,5564	-20,7217	5/7	18,4
t1-07	226	84	-101,95	-87,49	0,860	64,5695	-20,7271	5/7	34,5
t2-02*	35	77	-33,74	14,04	2,272	64,5190	-20,7241	66/73	103,2
t2-03 **	52	72	-92,32	-77,36	1,220	64,6249	-20,5755	34/34	100,1
t2-04 **	54	88	-30,30	-167,76	1,160	64,6159	-20,5876	12/12	29,7
t2-05***	41	86	-83,06	-88,40	1,144	64,5471	-20,7277	41/42	44,8
t2-06***	59	87	-0,64	-34,14	0,418	64,5419	-20,7357	11/12	20,1
t2-08	210	68	-65,91	-43,19	3,207	64,5433	-20,7406	62/70	45,4
t2-09	214	58	-35,89	-13,51	2,791	64,5503	-20,7365	72/82	52,4
t2-10*	28	86	-56,07	20,58	1,289	64,5152	-20,7336	21/23	56,5
t2-11*	29	75	-59,09	-44,85	1,289	64,5208	-20,7196	45/50	87,3
t3-12	196	88	173,41	-171,04	1,292	64,5538	-20,7555	33/34	75,2
t2-13	41	87	168,47	127,14	1,345	64,5614	-20,7394	27/37	62,5
t2-14	227	90	5,67	9,26	0,497	64,5550	-20,7435	11/13	40,2

* Í úrvinnslunni var sprungu t2-02 skipt niður í tvær skástígar sprungur, t2-10 og t2-11.

** Líklega skástíg brot sem tilheyrja sömu sprungu.

*** Líklega skástíg brot sem tilheyrja sömu sprungu.

5 Umræður og lokaorð

Í þessum öðrum áfanga kortlagningar sprunguflata í gosbeltunum hafa komið í ljós á annan tug sprungna eða sprungubroti við suðvestanverðan Langjökul. Samantekt með helstu stærðum og stefnum má sjá í Töflu 1 og yfirlitskort ásamt dreifingu strikstefna á Mynd 6. Sprungurnar hafa allar nema ein suðvestur-norðaustur-stefnu, eða nánar til tekið strikstefnur á bilunum 27° – 59° og 196° – 237° (Tafla 2). Að meðaltali hafa þær mjög svipaða stefnu og vestara rekbeltið sjálft (36° – 40°) og þau yfirborðsmisgengi sem kortlögð hafa verið í nágrenni Þórisjökuls (Haukur Jóhannesson og Kristján Sæmundsson, 1998). Undantekningartilvikið er sprungubrot t1-05 sem var aðallega virkt síðla sumars 1995. Þetta brot er í raun lítil þyrping sem hefur ekki neina skýra afmarkaða stefnu (strikstefna í töflu 2 í raun vart marktæk) og dreifist einnig á breitt dýptarbil. Líklegast

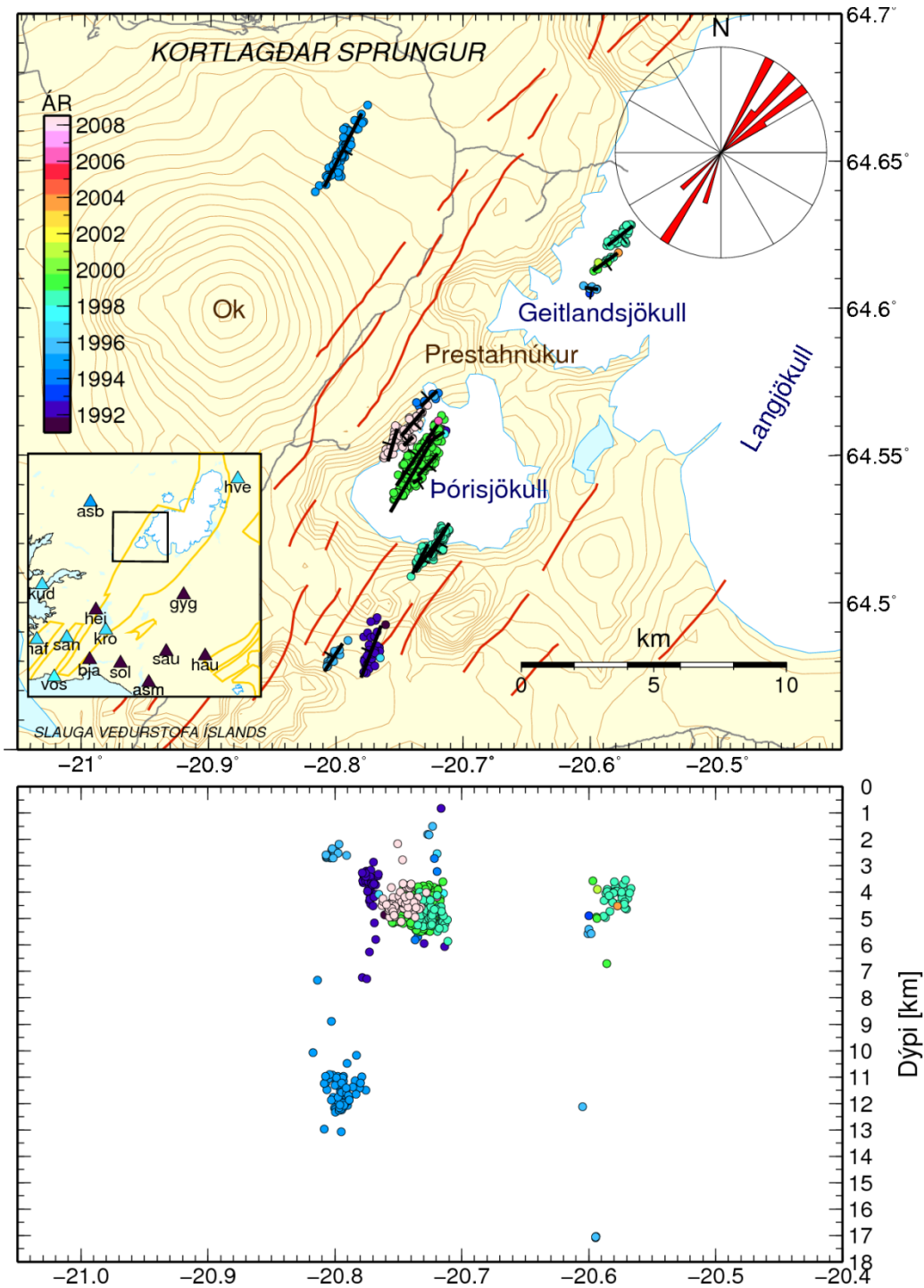
þykir að þessi þyrping sé vísbending um stærri sprungu sem ekki sýndi frekari virkni á árunum 1991–2008.

Langflestar sprungurnar liggja á línu sem liggur suðvestan Þórisjökuls, frá um 64,48°N og -20,8°A, til norðausturs í gegnum Þórisjökul, Prestahnúk og Geitlandsjökul (Mynd 6). Sú lína gengur norður fyrir dyngjuna stóru norðaustan Geitlandsjökuls og áfasta stapann sem í ljós komu undir Langjökli í fyrrgreindum íssjármælingum 1997 (Helgi Björnsson og Finnur Pálsson, samkvæmt samtali 2007). Einhver virkni mældist nyrst á þessari línu á tímabilinu en þó ekki það þétt að hægt væri að greina nokkrar sprungur norðan 64,63°N (mynd 2 og mynd 3 í viðauka III). Utan þessa svæðis mældist virkni einnig í austur og norðausturhlíðum Oksins. Aðeins ein sprunga var kortlögð þar, t1-02 sem var virk í júlí 1994. Hún hefur svipaða stefnu og fyrrnefndar kortlagðar sprungur til suðausturs.

Brotlausnir sem reiknaðar eru fyrir skjálftasafnið eru nálgáðar með tveimur hornréttum kraftapörum (*e. double couple*) og þær fela því ekki í sér neina rúmmálsbreytingu. Lóðréttar færslur á brotpletinum eru því eina vísbendingin um gliðunar- eða samgengisþátt. Ef halli flatarins er mög nærri því að vera lóðréttur og við gerum ráð fyrir að nokkurra gráða óvissa sé á hallanum, er hins vegar varla hægt að ákvarða með vissu hvort um samgengi eða siggengi er að ræða. Samkvæmt NUVEL-1A flekahreyfingarlíkaninu (DeMets o.fl., 1990,1994) er rekstefna á 64,5°N og -20,7°A nálægt N103,5°A. Ef miðað er við þá rekstefnu ættu hreyfingar á sprungunum á þessu svæði að sýna að mestu leyti sambland af vinstra-sniðgengi og gliðnun, að því gefnu að virknin stafi eingöngu af meðalrefkærslu. Sprungur t1-02, t1-04, t2-02, og t2-08 sýna allar þess konar færslu, þ.e. vinstri-sniðgengishreyfingu og sig. Ef t2-02 er hins vegar skipt upp í tvær skástígar sprungur, sýnir önnur þeirra (t2-11) mjög ráðandi vinstri-sniðgengishreyfingu og sig, en hin (t2-10) hefur heldur meiri breytileika í dreifingu skriðhorna þar sem þrjár þyrpingar eru áberandi (Mynd 8, viðauka I). Stærsti hluti skriðhorna bendir þó til ráðandi vinstri-sniðgengisfærslu. Sprunga t2-09 sýnir einnig ráðandi vinstri-færslu, en þó ekki einvörðungu, því nokkrir skjálftar í tveimur afmörkuðum þyrpingum sýna einnig hægri-færslu ásamt ýmist sam- eða siggengisþætti. Á sprungu t2-14 er að meðaltali vinstri-færsla en dreifingin sýnir bæði sam- og siggengisþátt ásamt vinstri-færslu. Tvær sprungur sýna ríkjandi siggengi: t1-07 og t2-03. Það má því segja að níu af þeim sautján sprungum/-sprungubrotum sem kortlögð eru hér sýni vinstri-sniðgengis- eða sig-færslur, eða sambland af þessu tvennu. Þótt strikstefna (98°) fyrir þyrpingu t1-05 sé vart marktæk, sýna allar brotlausnir sem best falla að þessum fleti vinstri-sniðgengishreyfingu ásamt minni eða jafnstórum samgengisþætti. Brotlausnir benda til hægri-sniðgengisfærslu ásamt sigi eða samgengi á t2-12 og t2-13. Fimm brotpletir, t1-03, t1-06, t2-04, t2-05 og t2-06 hafa allir það breytileg skriðhorn að vart er hægt að ákvarða nokkra hreyfistefnu á þeim flötum.

Á því tímabili sem kortlagningin nær yfir virðast langflestar sprungurnar helst vera virkar í einni afmarkaðri hrinu. Þó eru tvö dæmi um sprungu sem var virk á bæði t1 og t2: sprungubrot t1-06 undir norðanverðum Þórisjökli var virkt á óvenjulega löngu tímabili, eða frá 1992–1997. Það er að öllum líkindum nyrsti hluti stærri sprungu, t2-08, sem varð virk í hrinunni í júlí 1999. Þá er t1-07, sem var virk 1995 undir norðvesturjaðri Þórisjökuls, líklega framhald til norðurs af sprungu t2-13 sem kom í ljós 2008. Í öðrum tilvikum sést greinilegt skástígt sprungumynstur. Sem dæmi má nefna sprungur t2-03 og t2-04 í Geitlandsjökli og hugsanlega líka t1-05; t2-05 og t2-06 í Þórisjökli, t2-10 og t2-11 í suðurjaðri Þórisjökuls og t2-12 og t2-13 við norðurjaðarinn. Sprungurnar hafa nokkuð breytilegan halla, þeim hallar frá nær lóðréttu allt niður í 60°–70°. Meirihluti sprungnanna er virkur á milli 2 km og 6 km dýpis. Sprunguflötur t1-02 í hlíðum Oksins er áberandi dýpstur, en þar mælist virknin þéttust á 10,5–12,5 km dýpi (Mynd 6). Þegar sú hrina varð, í lok júlí 1994, var næsta stöð (**asb**) ekki komin í notkun, en hún fór fyrst að senda gögn

stuttu síðar, í ágúst. Hrinan mældist því einungis á stöðvum á Suður- og Suðvesturlandi og nokkrum stöðvum á Norðurlandi, auk **gyg** í um 45 km fjarlægð til suðausturs. Staðsetning skjálftanna er því ekki jafn vel ákvörðuð og í síðari hrinum, og teljum við að þeir skjálftar sem urðu í hrinunni og dreifast suðureftir í austurhlíðar Oksins eigi upptök á þessari sömu sprungu. Jafnframt er dýpi skjálftanna af þessum sömu ástæðum alls ekki vel ákvarðað og því óljóst hvort þeir eru á þessu dýpi eða grynri eins og flestallir skjálftar á svæðinu. Mælistöðvar sem staðsettar væru nærri eða í vestara gosbeltinu, eins og fjallað er um í viðauka III, myndu tryggja mun betri ákvörðun á dýpi skjálftavirkni á þessum slóðum.



Mynd 6. Kortlagðar sprungur/sprungubrot suðvestan Langjökuls frá 1991 til maí 2008. Þeir skjálftar sem skilgreina sprungufletina eru einnig sýndir í lit eftir því hvenær þeir urðu. Rósin í efra, hægra horni sýnir dreifingu strikstefna (ϕ). Gráar línur tákna vegi/slóða. Rauðar línur tákna kortlagðar yfirborðssprungur (Haukur Jóhannesson og Kristján Sæmundsson, 1998).

6 English summary

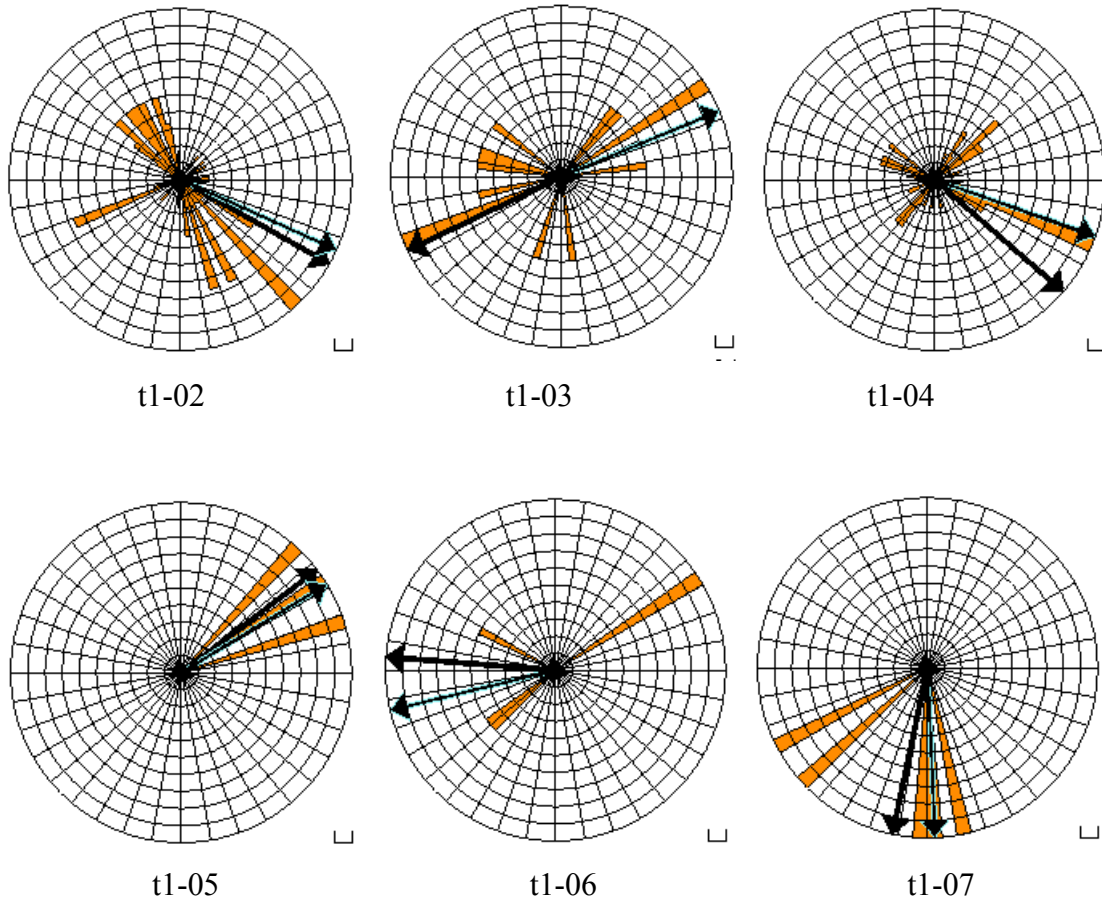
We use seismological data from the Icelandic SIL-network recorded between 1991 and May 2008 to map subsurface faults near Prestahnúkur, located in the Western Volcanic Zone, southwest of Langjökull glacier (figure 2). By applying a double-difference relative relocation algorithm to the data (Slunga et al., 1995) it is possible to reduce relative location uncertainties down to several tens of meters. The method can thus reveal subsurface fault planes which are illuminated by the microearthquake activity. Slip directions on the fault planes are estimated by joint interpretation of the relocated event distribution and focal mechanisms. Most of the 1230 earthquakes which have been located in this area during the observation period occur on a SW-NE striking lineament extending through Þórisjökull and Geitlandsjökull (figures 2 and 3). The largest swarm occurred late in the summer of 1999 with a total of about 330 earthquakes (figure 1). Other swarms which have been observed occurred in the summer of 1992 (~45 events), summer of 1994 (~140 events), in March 1998 (~30), early in the autumn of 1998 (~120 events) and in May 2008 (~120 events). After relocation the earthquakes form several clusters, mostly located between 2 and 5 km depth. One cluster deviates from this trend and is located at 11–12 km depth beneath the northeastern slopes of the Ok shield volcano (figure 3). This depth estimation is however rather uncertain, as the nearest station at the time (**gyg**) was situated at approximately 45 km distance. The data set was analyzed in two separate periods, depending on whether clock information were available in data files from all stations (t1 and t2, table 1). The faults and clusters identified in period t1 are displayed in Figure 4 and period t2 in Figure 5, and all mapped faults in Figure 6. Selected parameters for the fault planes are listed in Table 2. The faults have strikes in the range 27° – 59° or 196° – 237° which is near the direction of the rift zone and mapped surface fissures/faults in the area. Rake (slip) angle distribution and average slip vectors are displayed for each fault in Appendix I. According to the NUVEL-1A plate model the faults should show a combination of normal- and left-lateral motion. Mechanisms for earthquakes on roughly half of the seventeen subsurface faults which we have mapped show predominantly normal- or left-lateral motion or a mixture of both. Focal mechanisms on five faults are too scattered to determine slip directions but for the remaining three faults mechanisms indicate combined left-lateral and thrust motion or combined right-lateral and normal motion. The event distribution on each fault is shown in Appendix II.

Heimildir

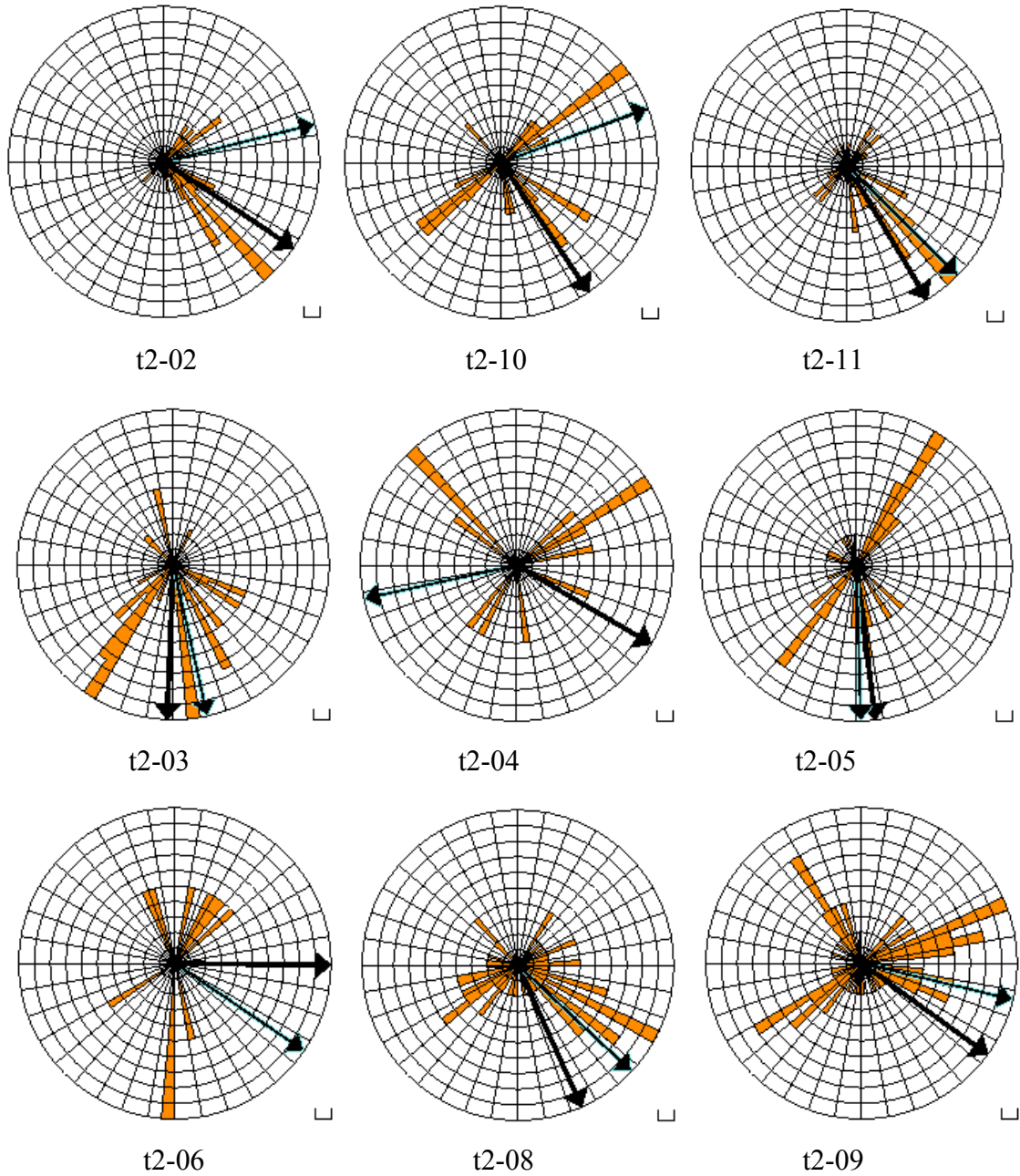
- Ari Trausti Guðmundsson (2001). *Íslenskar Eldstöðvar*, Vaka-Helgafell, Reykjavík, bls. 248–259.
- DeMets, C. G., R. G. Gordon, D. F. Argus og S. Stein (1990). Current plate motions, *Geophys. J. Int.*, 101, 425–478.
- DeMets, C., R. G. Gordon, D. F. Argus og S. Stein (1994). Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions, *Geophys. Res. Lett.*, 21, 2191–2194.
- Halldór Geirsson, Thora Árnadóttir, C. Völkssen, W. Jiang, E. Sturkell, T. Vellemin, Páll Einarsson, Freysteinn Sigmundsson and Ragnar Stefánsson (2006). Current plate movements across the Mid-Atlantic Ridge determined from 5 years of continuous GPS measurements in Iceland, *J. Geophys. Res.*, 111, B09407, doi:10.1029/2005JB003717.
- Haukur Jóhannesson (1989). Aldur Hallmundarhrauns í Borgarfirði, *Fjölrít Náttúrufræðistofnunar* nr. 9, Reykjavík.

- Haukur Jóhannesson og Kristján Sæmundsson (1998). Jarðfræðikort af Íslandi 1:500000 Höggun. *Náttúrufræðistofnun Íslands*, Reykjavík (1. útgáfa).
- Kristín S. Vogfjörð (2000). Kortlagning brotflata með smáskjálftum í nágrenni Grændals. *Orkustofnun, skýrsla OS-2000/031*.
- Kristín S. Vogfjörð, Sigurlaug Hjaltadóttir og R. Slunga (2005a). The $M \approx 5$ triggered events in the South Iceland Seismic Zone of June 17, 2000: Determination of fault plane, magnitude and mechanism. *Geophysical Research Abstracts*, 7, 10274.
- Kristín S. Vogfjörð, Sigurlaug Hjaltadóttir og R. Slunga (2005b). Volcano-tectonic Interaction in the Hengill Region, Iceland during 1993–1998. *Geophysical Research Abstracts*, 7, 09947.
- Kristján Sæmundsson og Sigmundur Einarsson (1980). *Jarðfræðikort af Íslandi, blað3, Suðvesturland*, önnur útgáfa. Náttúrufræðistofnun Íslands og Landmælingar Íslands, Reykjavík.
- LaFemina, P. C., T. H. Dixon, R. Malservisi, Thora Árnadóttir, E. Sturkell, Freysteinn Sigmundsson and Páll Einarsson (2005). Geodetic GPS measurements in South Iceland: Strain accumulation and partitioning in a propagating ridge system. *J. Geophys. Res.*, 110, B11405, doi:10.1029/2005JB003675.
- Páll Einarsson og Kristján Sæmundsson (1987). Upptök jarðskjálfta 1982–1985 og eldstöðva-kerfi á Íslandi (kort). Í bókinni Þ.I. Sigfússon (ritstjóri), *Í hlutarins eðli*, Menningar-sjóður, Reykjavík.
- Freysteinn Sigmundsson, Páll Einarsson, R. Bilham, E. Sturkell (1995). Rift-transform kinematics in South Iceland: Deformation from Global Positioning System measurements, 1986 to 1992. *J. Geophys. Res.*, 100, 6235–6248.
- Sigurður Th. Rögnvaldsson, R. Slunga (1993). Routine and fault plane solutions for local networks: A test with synthetic data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 83, 1232–1247.
- Sigurður Th. Rögnvaldsson, R. Slunga (1994). Single and joint fault plane solutions for microearthquakes in South Iceland, *Tectonophysics*, 237, 73–86.
- Sigurður Th. Rögnvaldsson, Ágúst Gudmundsson and Ragnar Slunga (1998). Seismotectonic analysis of the Tjörnes Fracture Zone, an active transform fault in North Iceland. *J. Geophys. Res.*, Vol. 103, No. B12, p. 30117–30129 (98JB02789).
- Sigurður Th. Rögnvaldsson, Kristín S. Vogfjörð og R. Slunga (1999). Kortlagning brotflata á Hengilssvæði með smáskjálftum. *Rit Veðurstofu Íslands*, VÍ-R99002-JA01.
- Sigurlaug Hjaltadóttir og Kristín S. Vogfjörð (2005). Subsurface fault mapping in Southwest Iceland by relative location of aftershocks of the June 2000 earthquakes. *Rit Veðurstofu Íslands*, 21, VÍ-ES-01.
- Sigurlaug Hjaltadóttir og Kristín S. Vogfjörð (2006). Kortlagning sprungna í Fagradalsfjalli á Reykjanesskaga með smáskjálftum. Kortlagning jarðhita í gosbeltum Íslands – fyrsti áfangi. *Veðurstofu Íslands, greinargerð nr. 06001*.
- Slunga, R., Sigurður Th. Rögnvaldsson og Reynir Böðvarsson (1995). Absolute and relative locations of similar events with application to microearthquakes in Southern Iceland. *Geophys. J. Int.*, 123, 409–419.
- Steinunn S. Jakobsdóttir (1998). Uppsetning SIL-kerfisins. *Veðurstofa Íslands, greinargerð VÍ-G98012-JA01*.

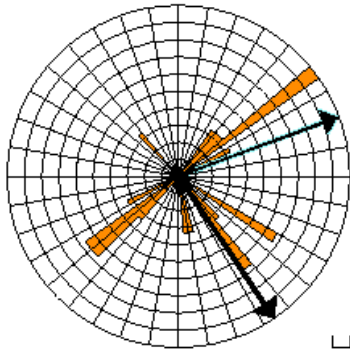
Viðauki I. Dreifing skriðhorna fyrir allar kortlagðar sprungur



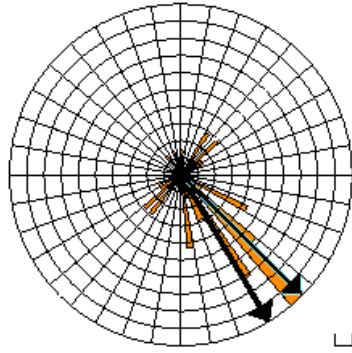
Mynd 7. Dreifing skriðhorna (λ) á kortlögðum sprungum/þyrpingum fyrir tímabil t1. Skriðhorn er mælt rangsælis frá láréttu. Svört, þykk ör sýnir þann þátt meðal-skriðvigurs (λ_{ave}) sem liggur í fletinum sem skjálftadreifin ákvarðar en svört ör með grænbláum útlínunum þátt vegins meðaltals (λ_{wav}), þar sem vigtað er með vægi skjálftanna, M_0 . Hornadreifinni er skipt niður í 5° bil fyrir allar sprungur.



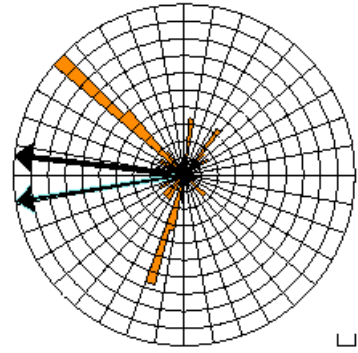
Mynd 8. Þessi og næsta síða: Dreifing skriðhorna (λ) á kortlögðum sprungum/þyrpingum fyrir tímabil t_2 . Skriðhorn er mælt rangsælis frá láréttu. Svört, þykk ör sýnir þann þátt meðal-skriðvigurs (λ_{ave}) sem liggur í fletinum sem skjálftadreifin ákvarðar en svört ör með grænbláum útlínu þátt vegins meðaltals (λ_{wav}), þar sem vigtað er með vægi skjálftanna, M_0 . Hornadreifinni er skipt niður í 5° bil fyrir allar sprungur.



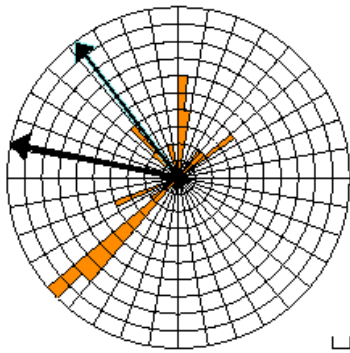
t2-13



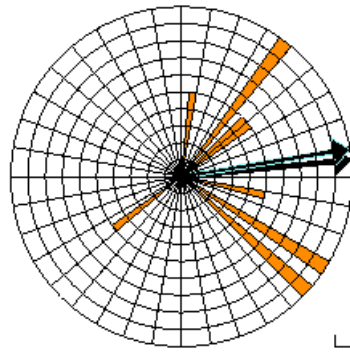
t2-14



t2-12



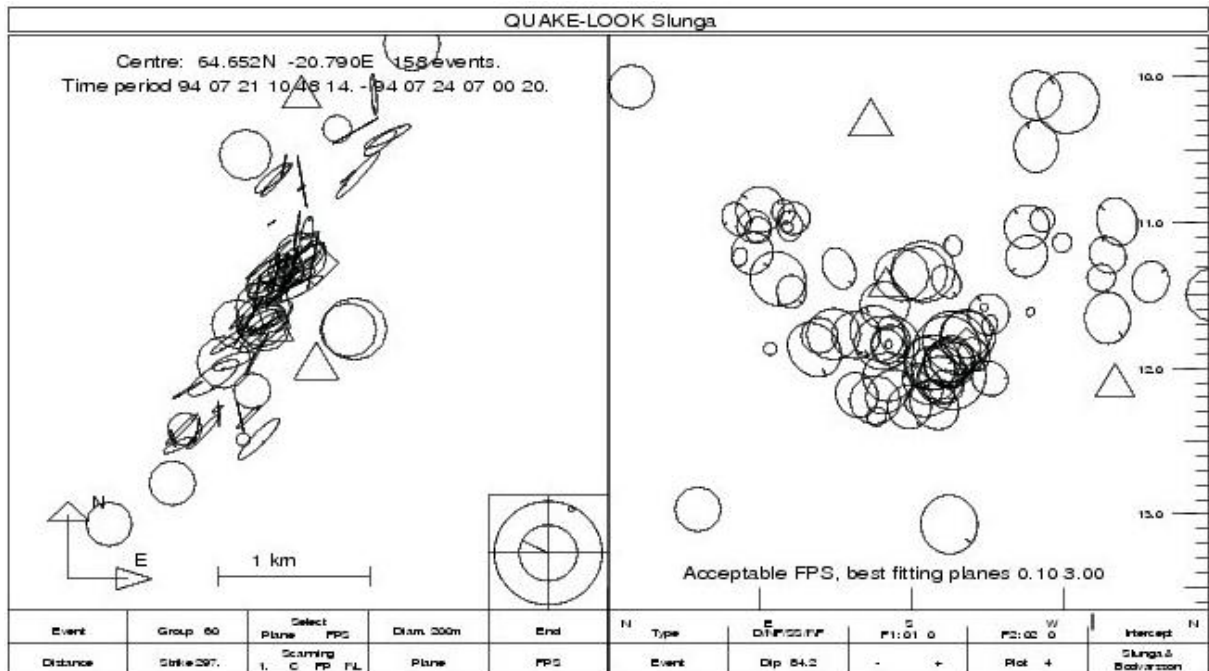
t2-13



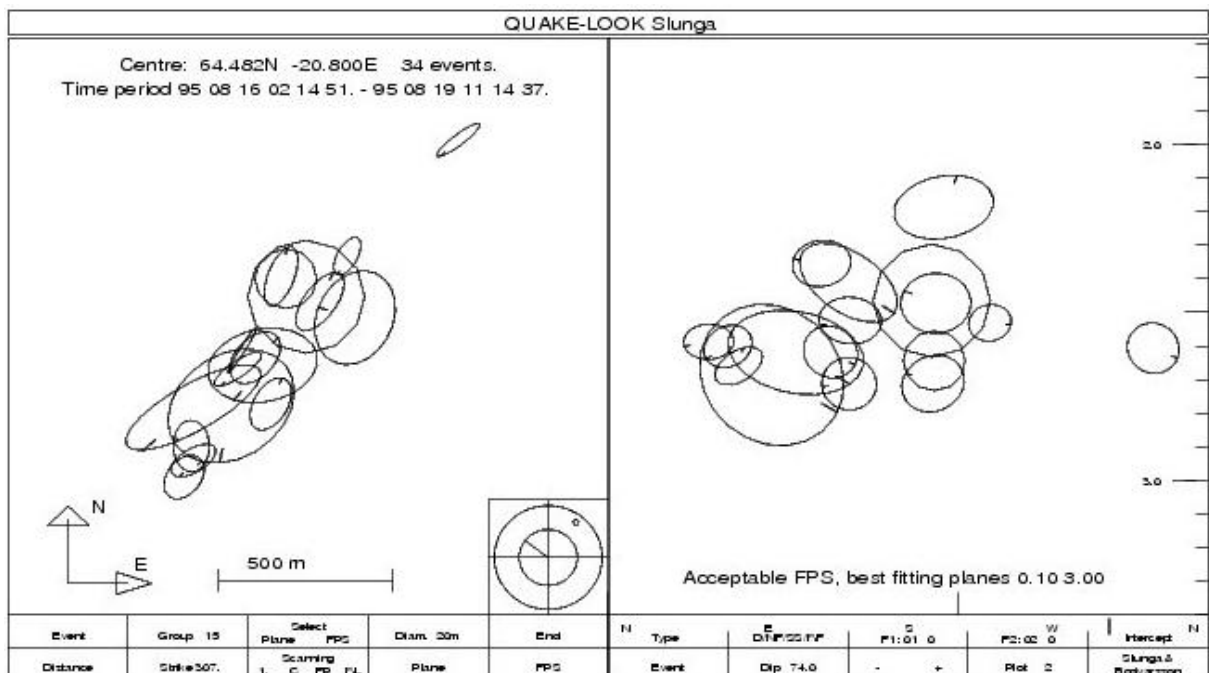
t2-14

Viðauki II. Myndir af dreifingu skjálfta á sprungum

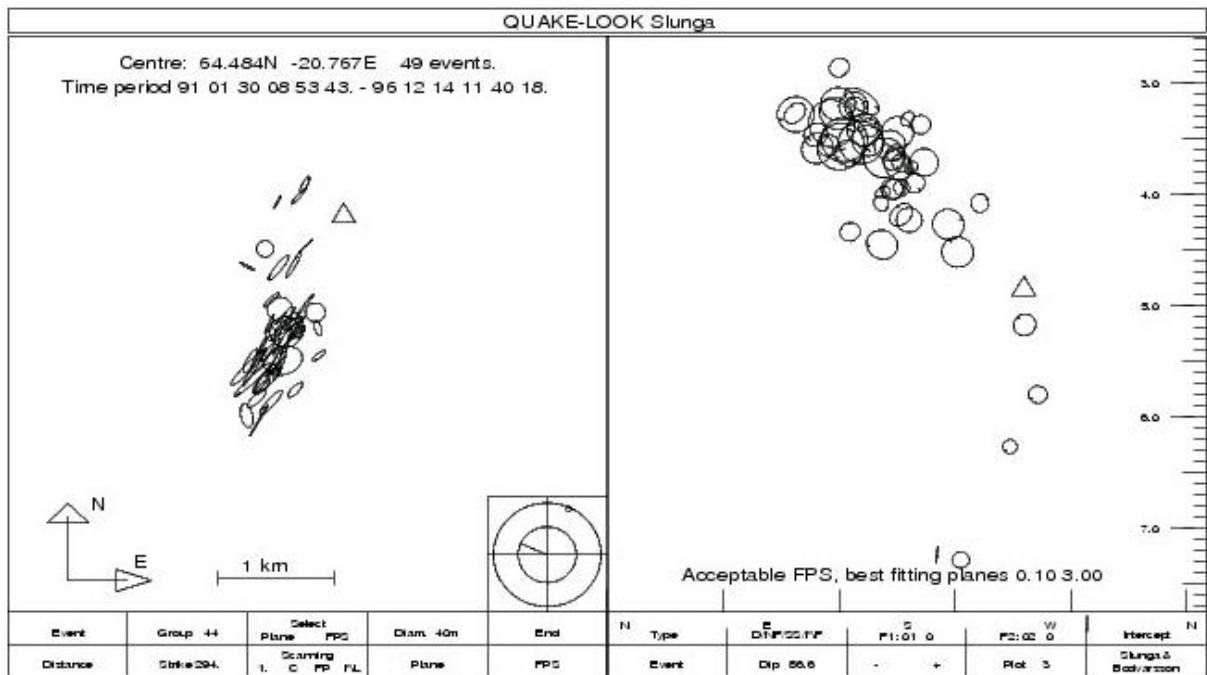
Myndirnar sýna bæði kort (t.v.) og þversnið (dýpi, t.h) af skjálftum á sprunguflötunum. Kvarði lengst til hægri sýnir dýpi í kílómetrum. Í öllum tilfellum eru dýptarsniðin þvert á sprunguflötinn nema í tilfellum t1-05 og t1-06 þar sem horft er í stríkstefnu flatarins. Stærð hringanna er kvörðuð með stærð skjálftanna. Hakið í hverjum hring sýnir færslustefnuna.



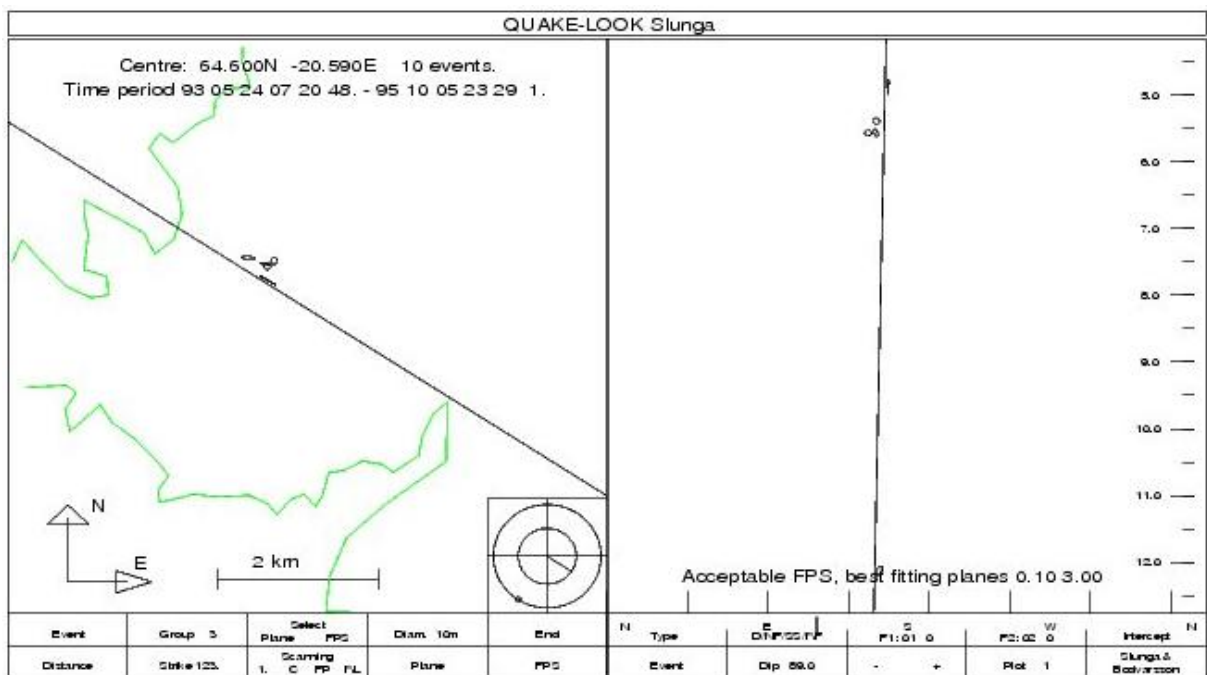
t1-02



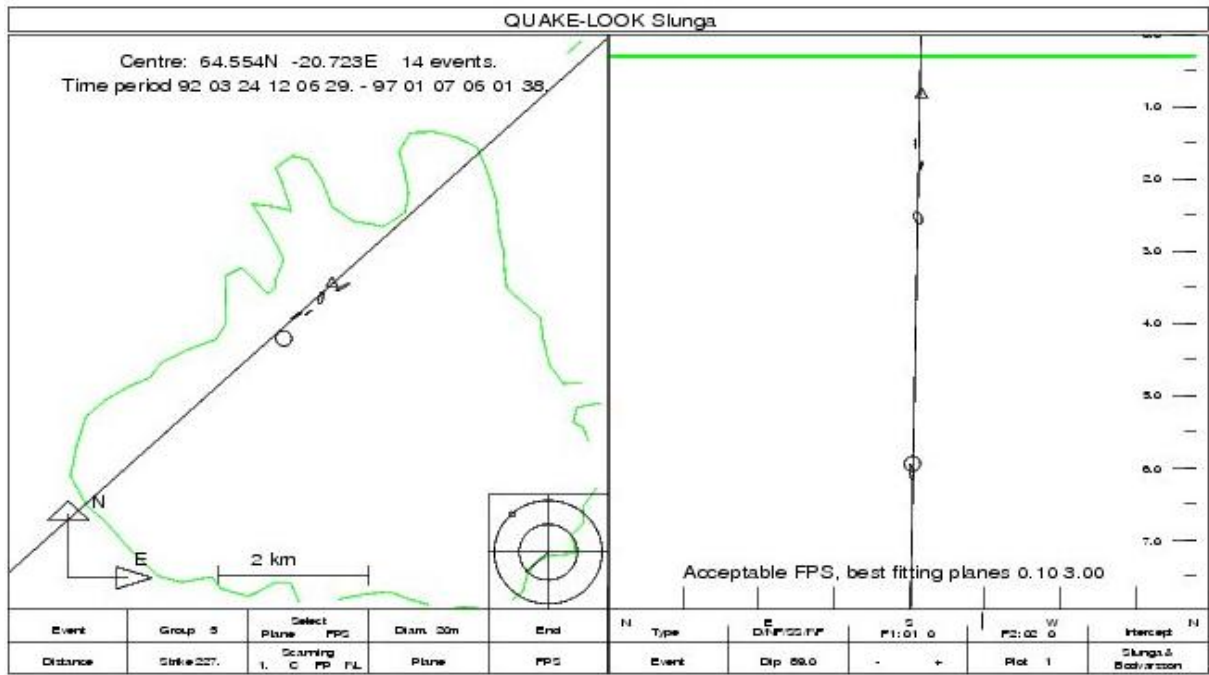
t1-03



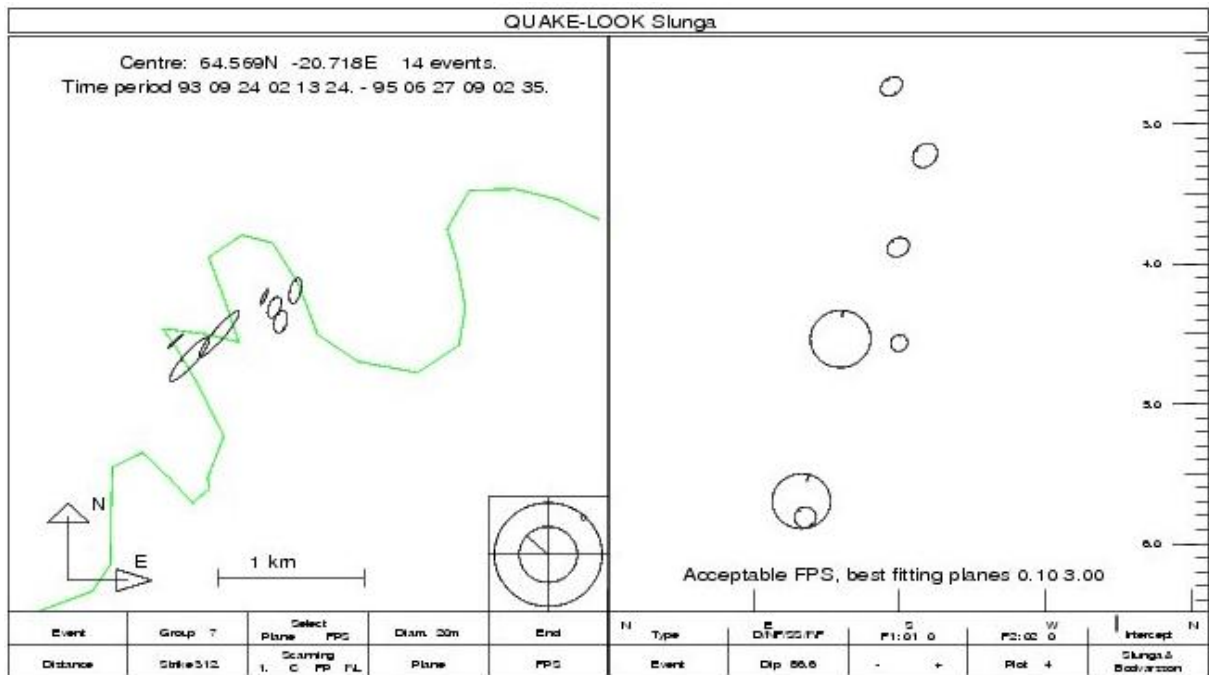
t1-04



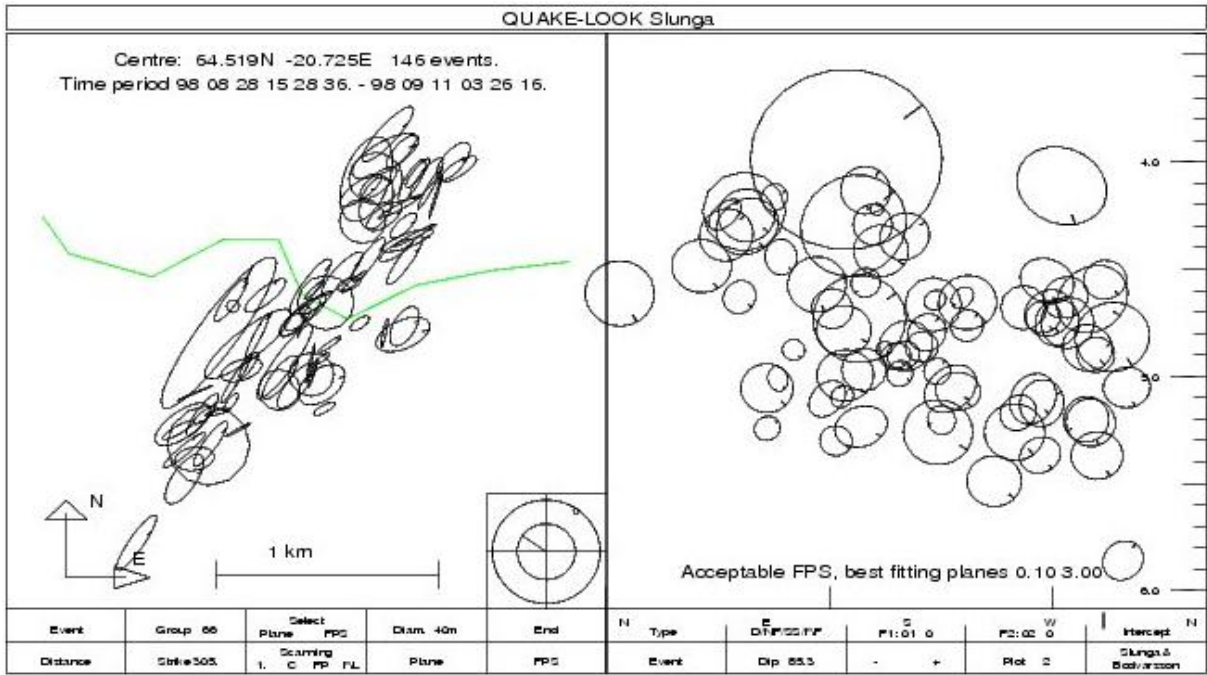
t1-05



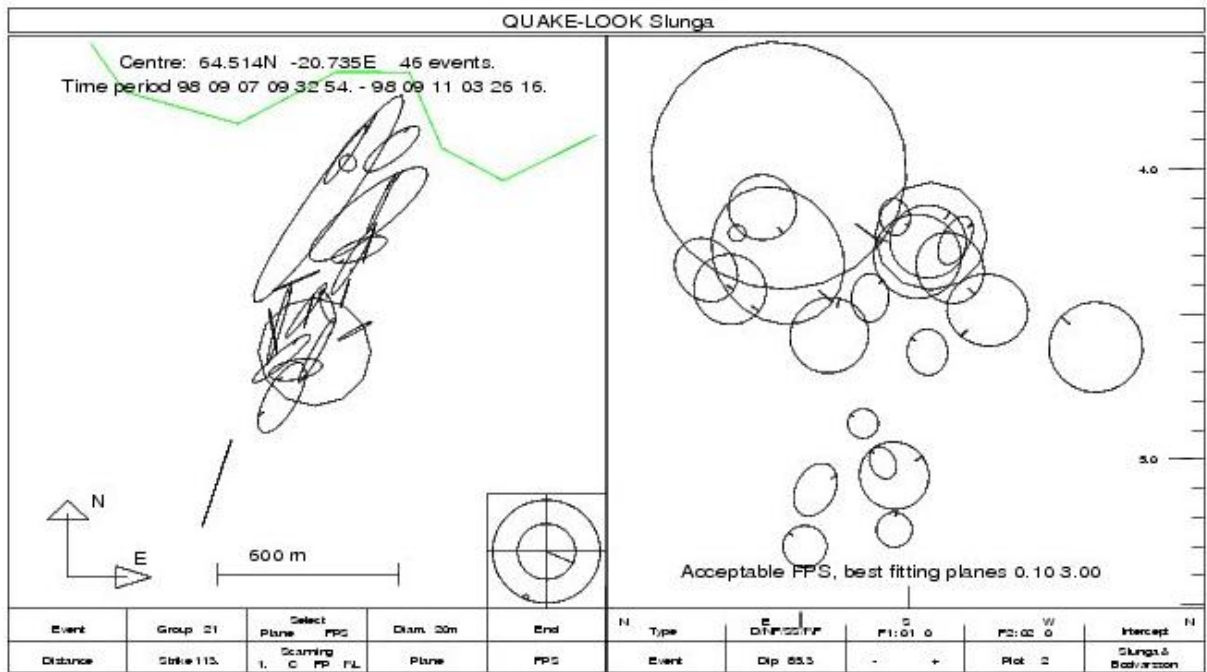
t1-06



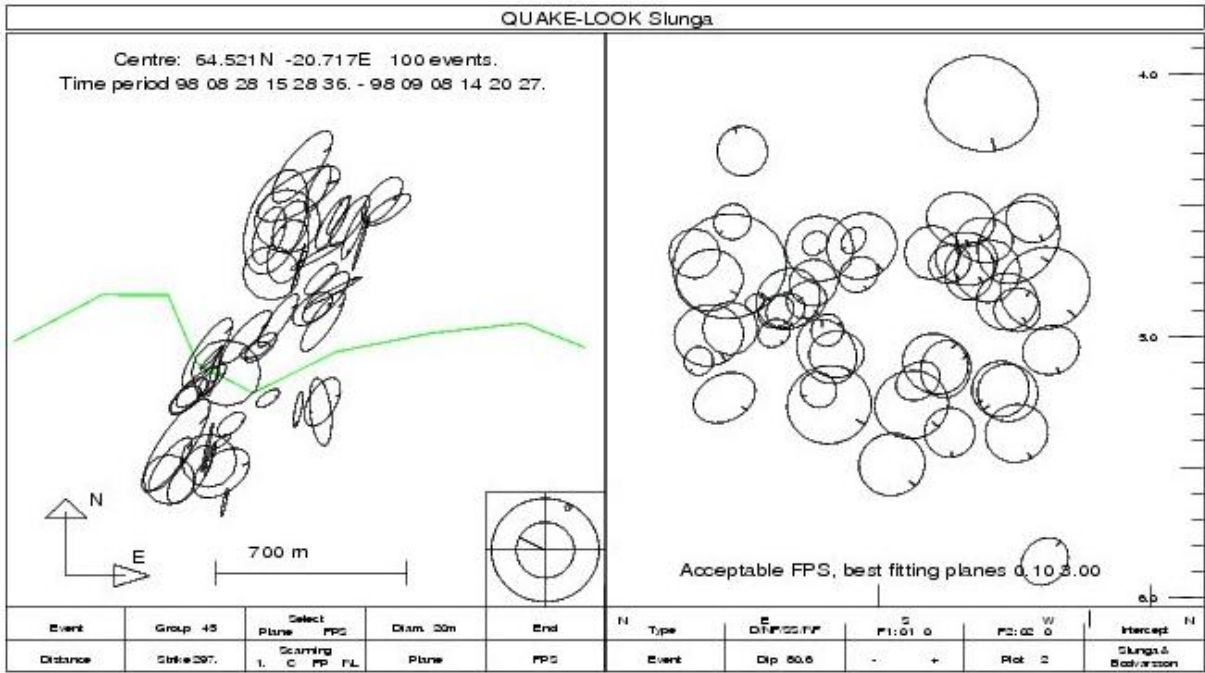
t1-07



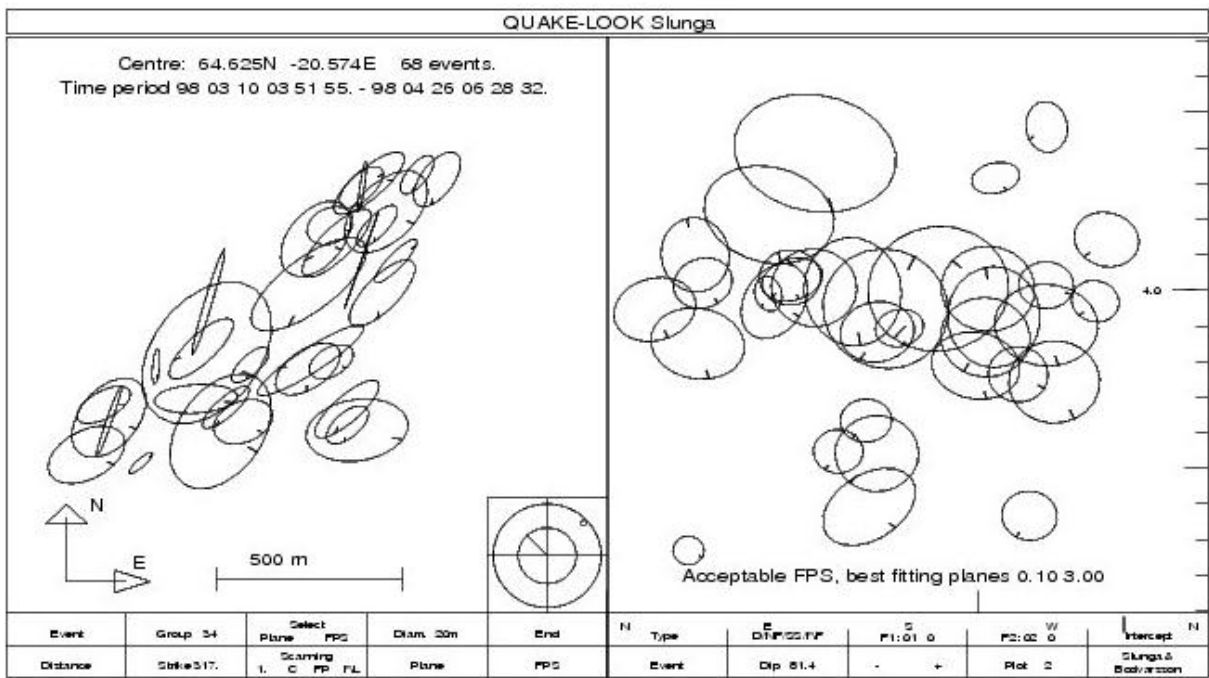
t2-02



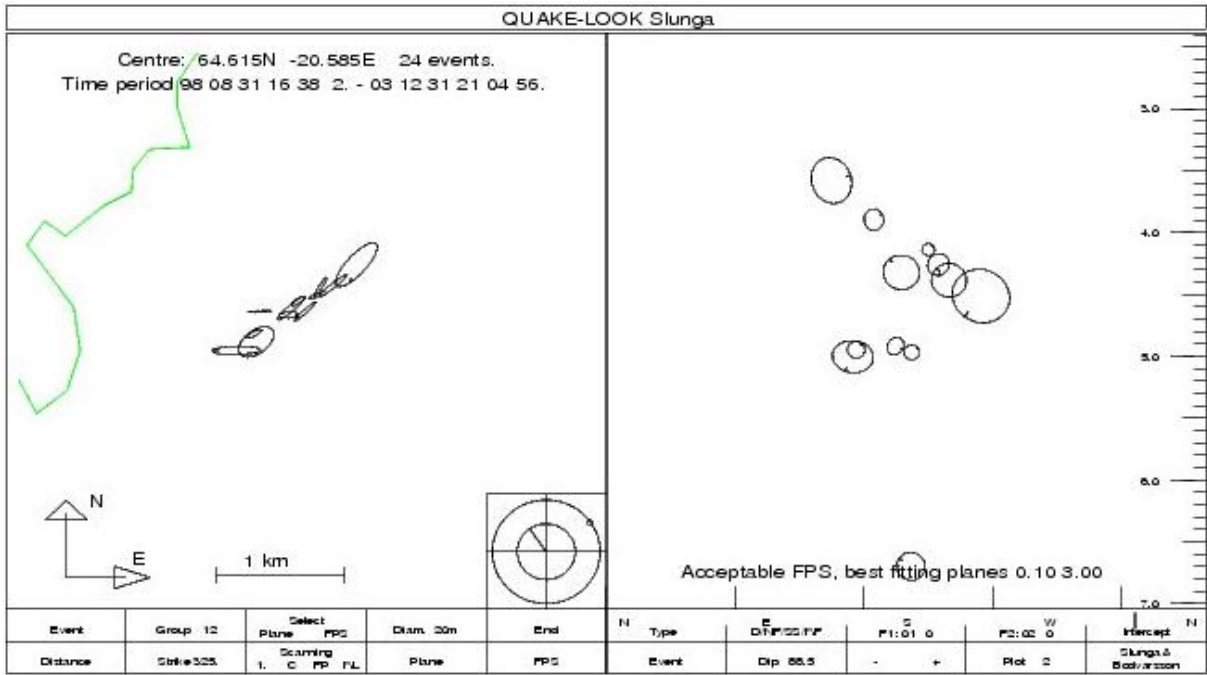
t2-10



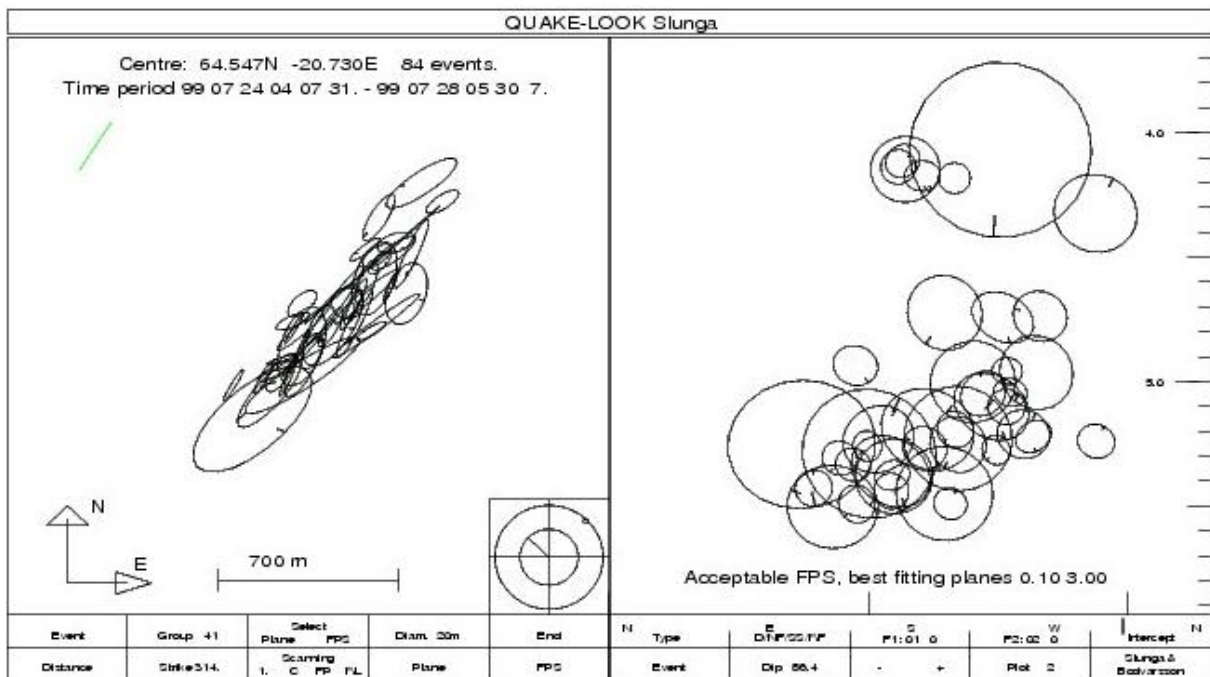
t2-11



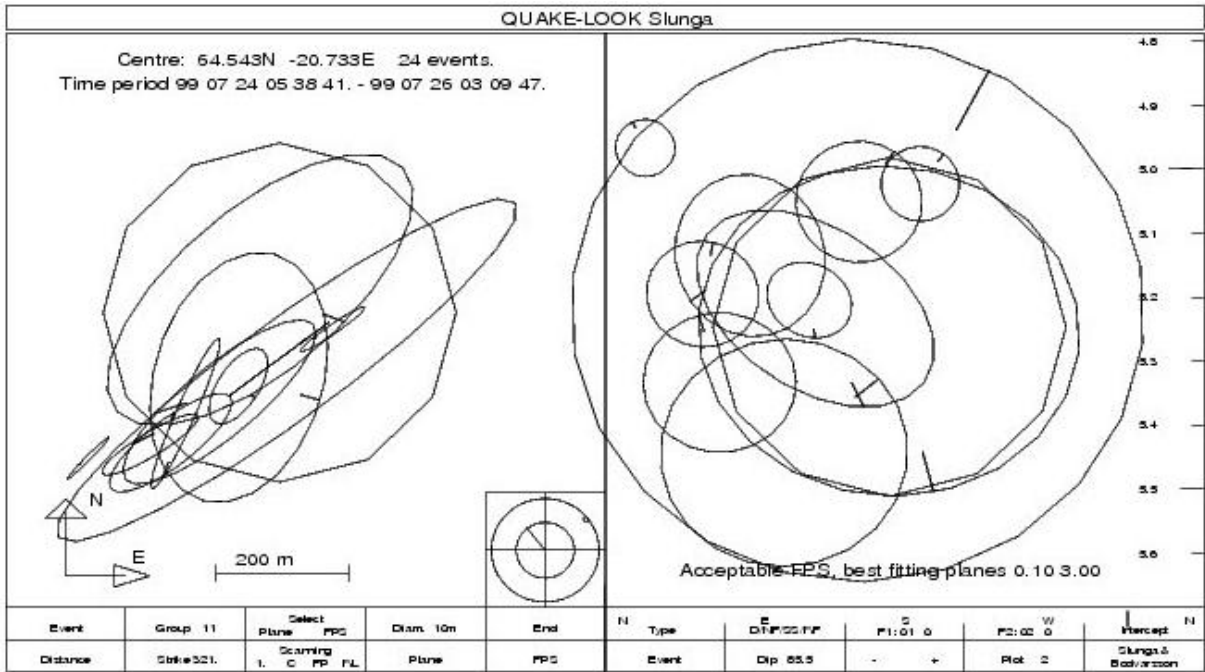
t2-03



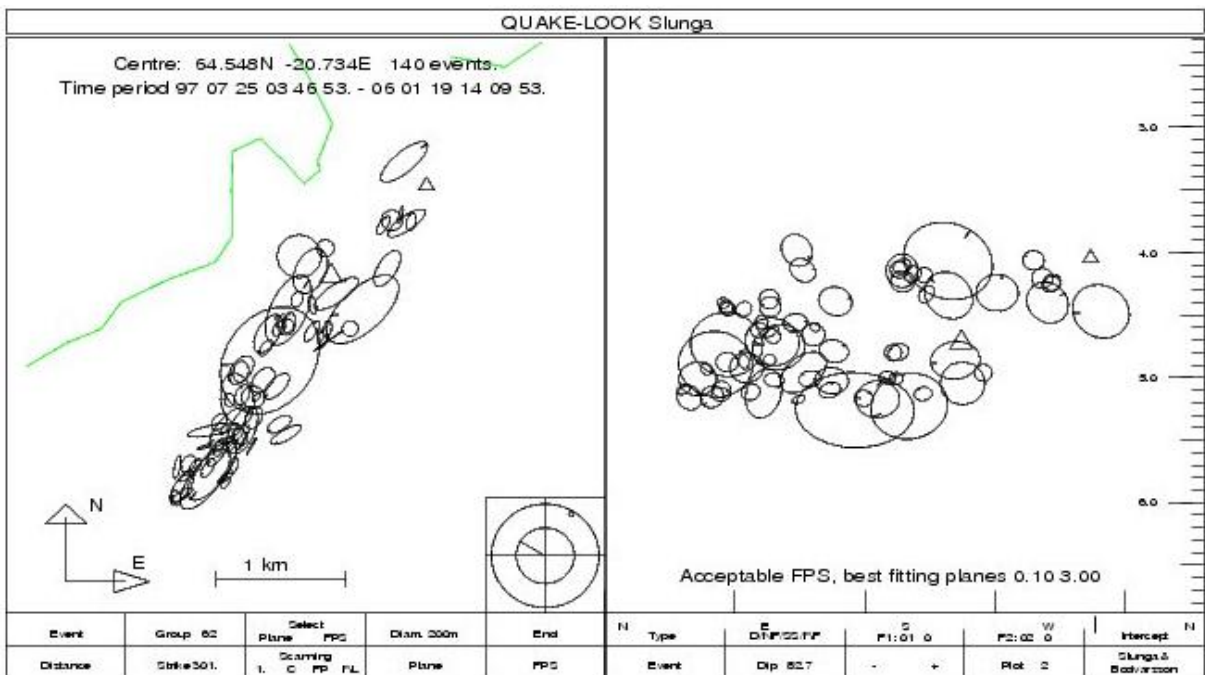
t2-04



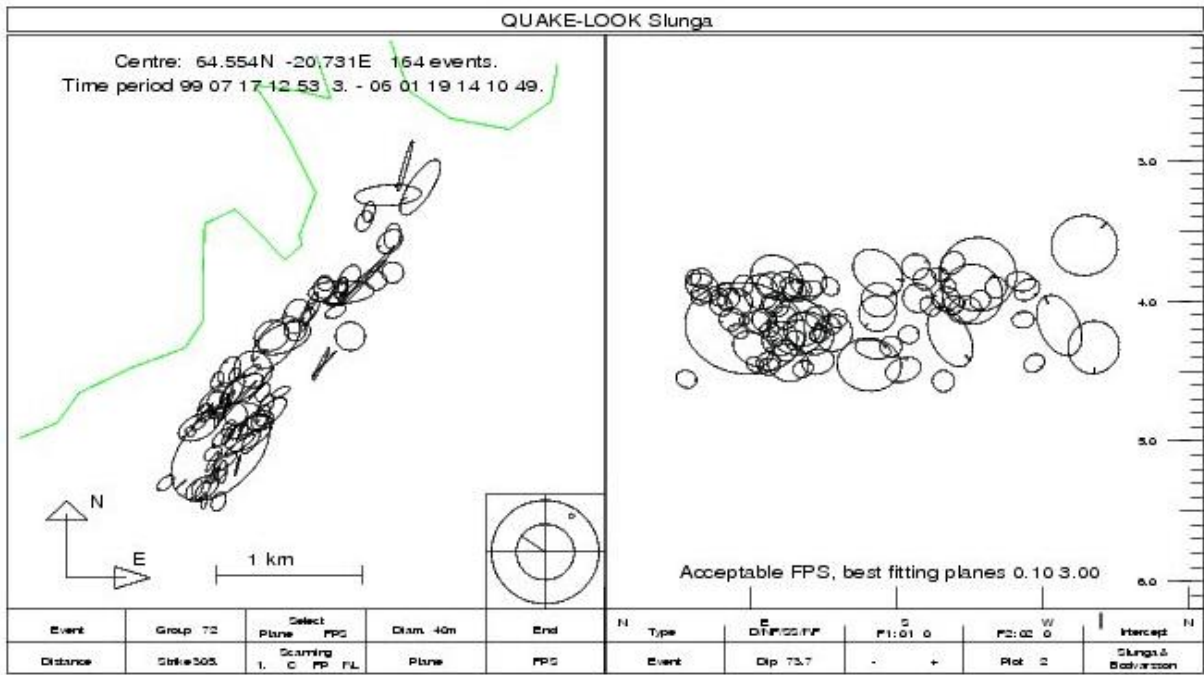
t2-05



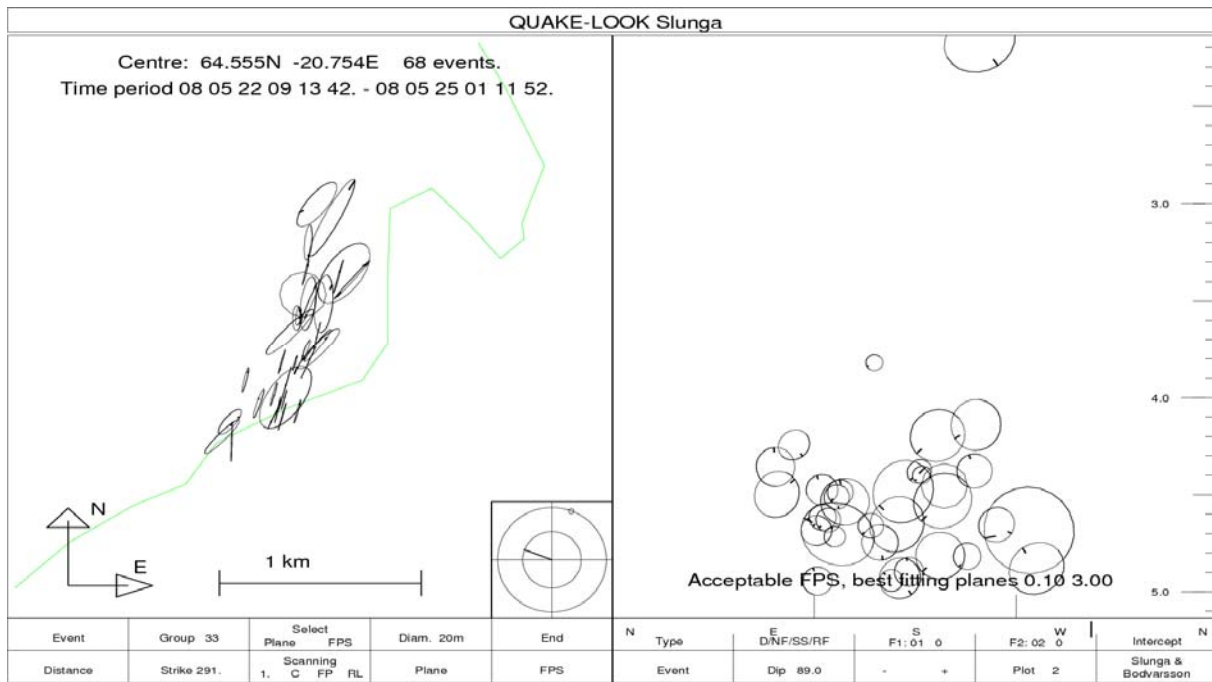
t2-06



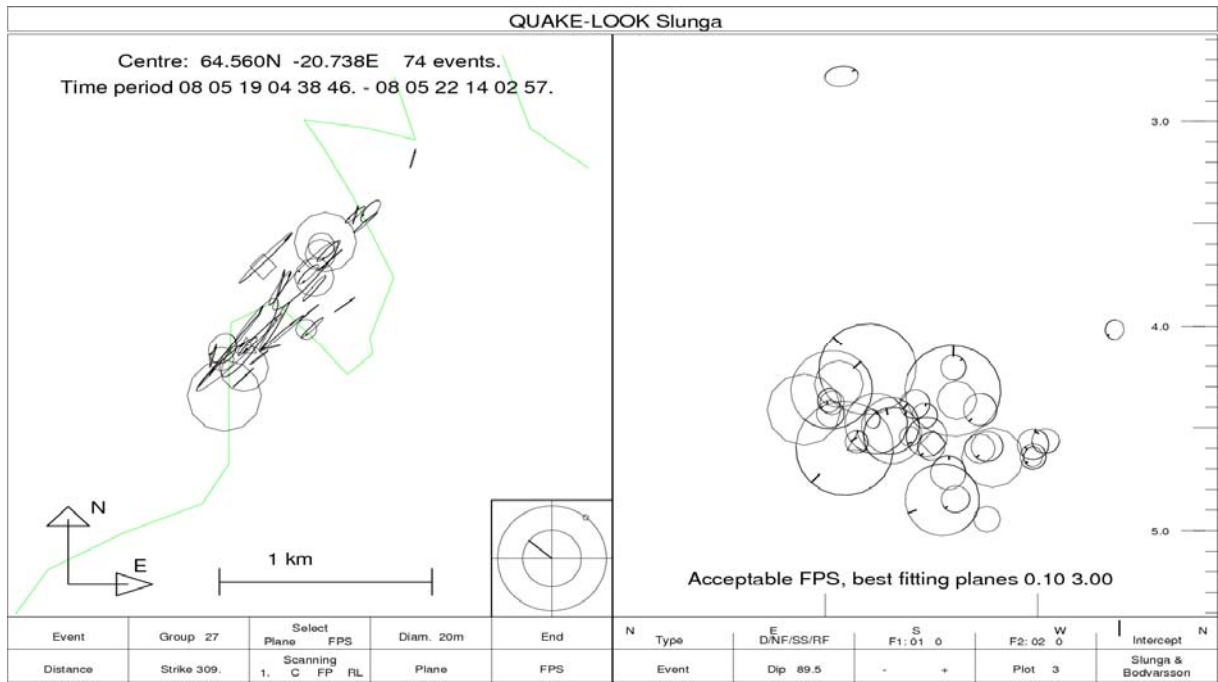
t2-08



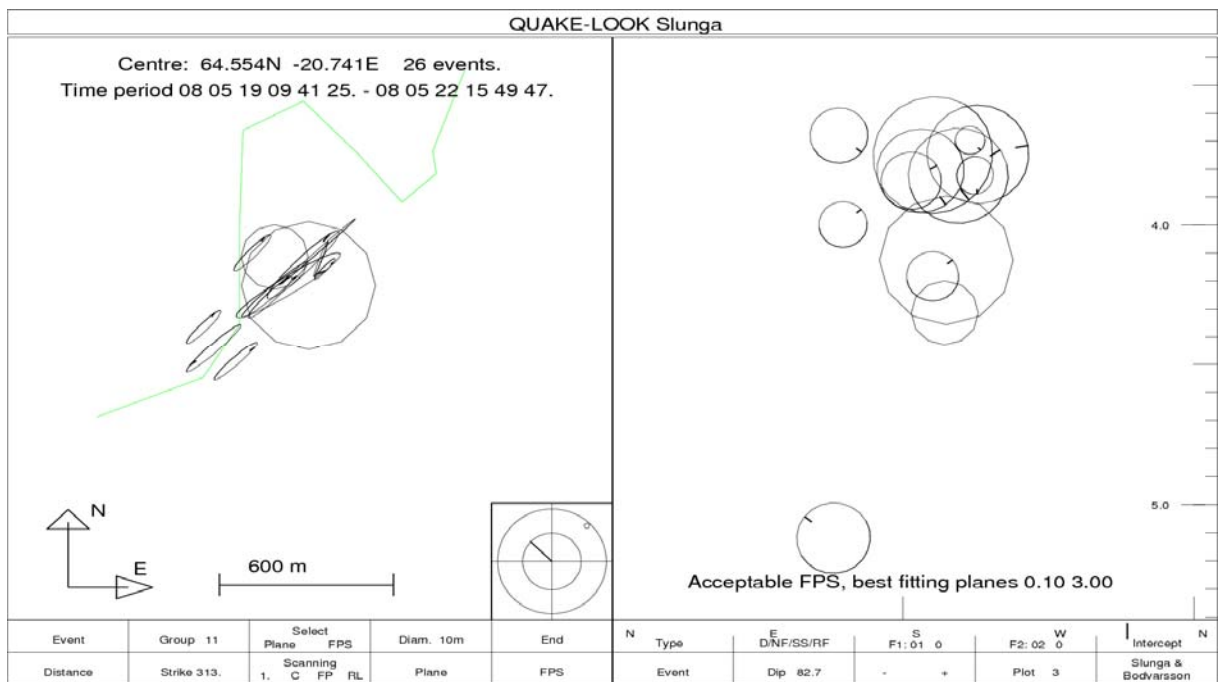
t2-09



t2-12



t2-13



t2-14

Viðauki III. Tillaga að öðrum áfanga kortlagningar í gosbeltunum, frá ágúst 2006

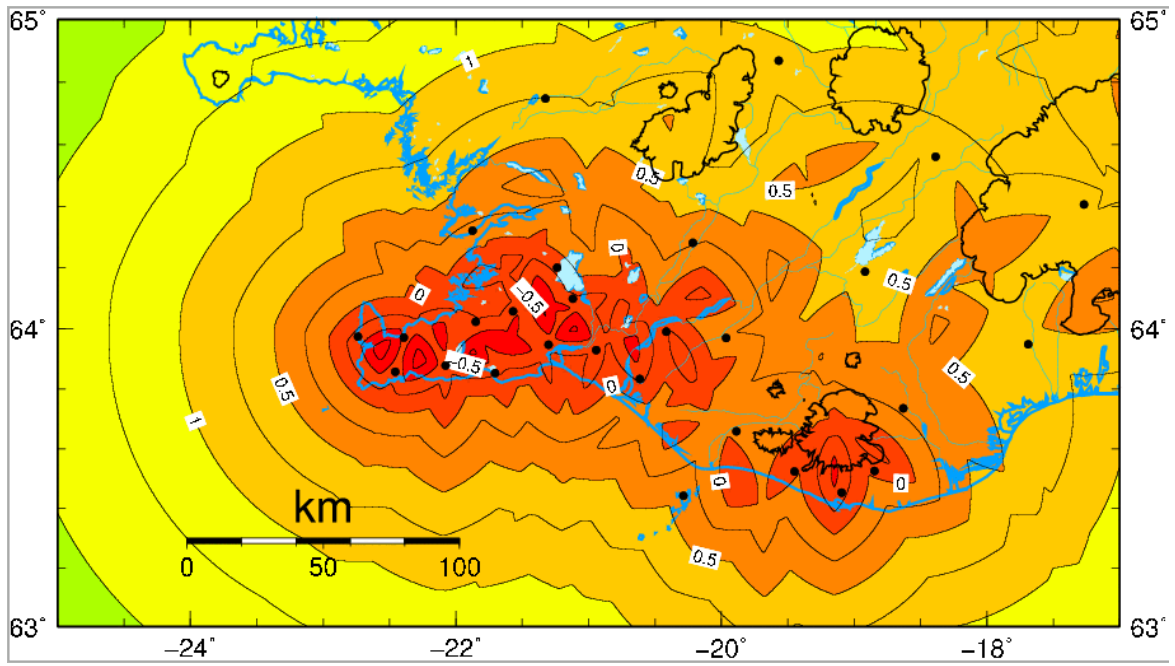
Kortlagning Jarðhita í gosbeltum Íslands Annar áfangi: Prestahnjúkur við Langjökul

Kristín S. Vogfjörð, Veðurstofu Íslands

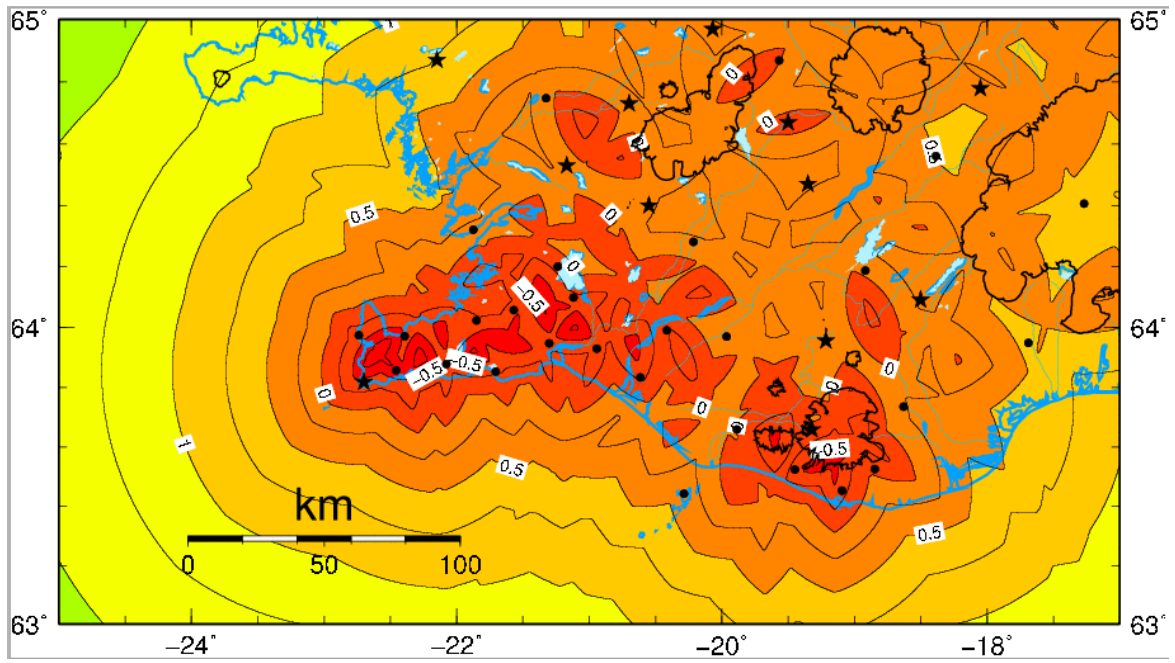
Ágúst, 2006

Inngangur

Í vinnutillögu fyrir fyrsta áfanga að kortlagningu jarðhita í gosbeltum Íslands var sett fram gróf hugmynd að framtíðarþéttingu jarðskjálftamælanets Veðurstofunnar (SIL) til að nema betur skjálftavirkni gosbeltanna (Sigurlaug Hjaltadóttir og Kristín S. Vogfjörð, 2006). Í framhaldi af því var næmni núverandi SIL nets og þessa ímyndaða nets metin samkvæmt nálgun á deyfingarsambandi, sem áður hafði verið fundið fyrir Suðvesturland (Kristján Ágústsson o.fl., 1998). Sambandið gerir ráð fyrir að skjálftar þurfi að skrást á þrem mælistöðvum til að vera numdir af kerfinu, en það er meðalreglan í sjálfvirka staðsetningarhugbúnaði SIL kerfisins. Næmni kerfisins er þá nálgueð með jöfnunni: $M=2,1*\log(R) - 3.02$. Þar sem M er stærð skjálfta og R er fjarlægð í þriðju nálægustu stöð, mæld í km. Niðurstöður úr þessari könnun hafa verið gefnar út í greinargerð (Kristján Ágústsson, 2006). Myndir 2 og 7 úr þeirri greinargerð, sem sýna næmni núverandi SIL kefis og netsins með viðbótarstöðvum skv. tillögu í fyrsta áfanga, eru endurteiknaðar hér á myndum 1 og 2. Núverandi SIL stöðvar eru þar merktar með svörtum hringjum, viðbótarstöðvarnar með svörtum stjörnum, og jafnstærðarlínur eru dregnar og merktar. Á myndunum sést að núverandi næmni er góð í vestra gosbeltinu, fyrir sunnan Þingvelli. Þ.e. skjálftar af stærð $M\leq 0$ eru numdir af kerfinu. Norðan Þingvalla er næmnin bundin við $M>0$ og allt upp í $M=1$ í gosbeltunum á miðhálandinu. Við þéttingu netsins, sem sýnd er á mynd 2, færast $M<0$ mörkin norður á miðjan Kjöl, næmni á nær öllu miðhálandinu verður um $M\geq 0.25$, og á þrem svæðum í kringum Langjökul færast næmnin rétt undir $M=0$. Eitt þeirra svæða er við Prestahnjúk, þar sem Orkustofnun hefur lýst yfir áhuga á að kanna skjálftavirkni. Til að öðlast þessa auknu næmni við Prestahnjúk þarf að bæta við núverandi SIL kerfi, þrem nýjum stöðvum vestan við Langjökul: Við bæinn Reyki í Lundareykjadal, en þar var rekin tímabundin stöð á vegum HOTSPOT verkefnisins á árunum 1996-1998, við Hlöðufell og við fjallið Strút. Ekki hefur farið fram könnun á undirlagi fyrir þessar nýju stöðvar, en tillagan að staðsetning þeirra var gerð með tilliti til aðgengis.



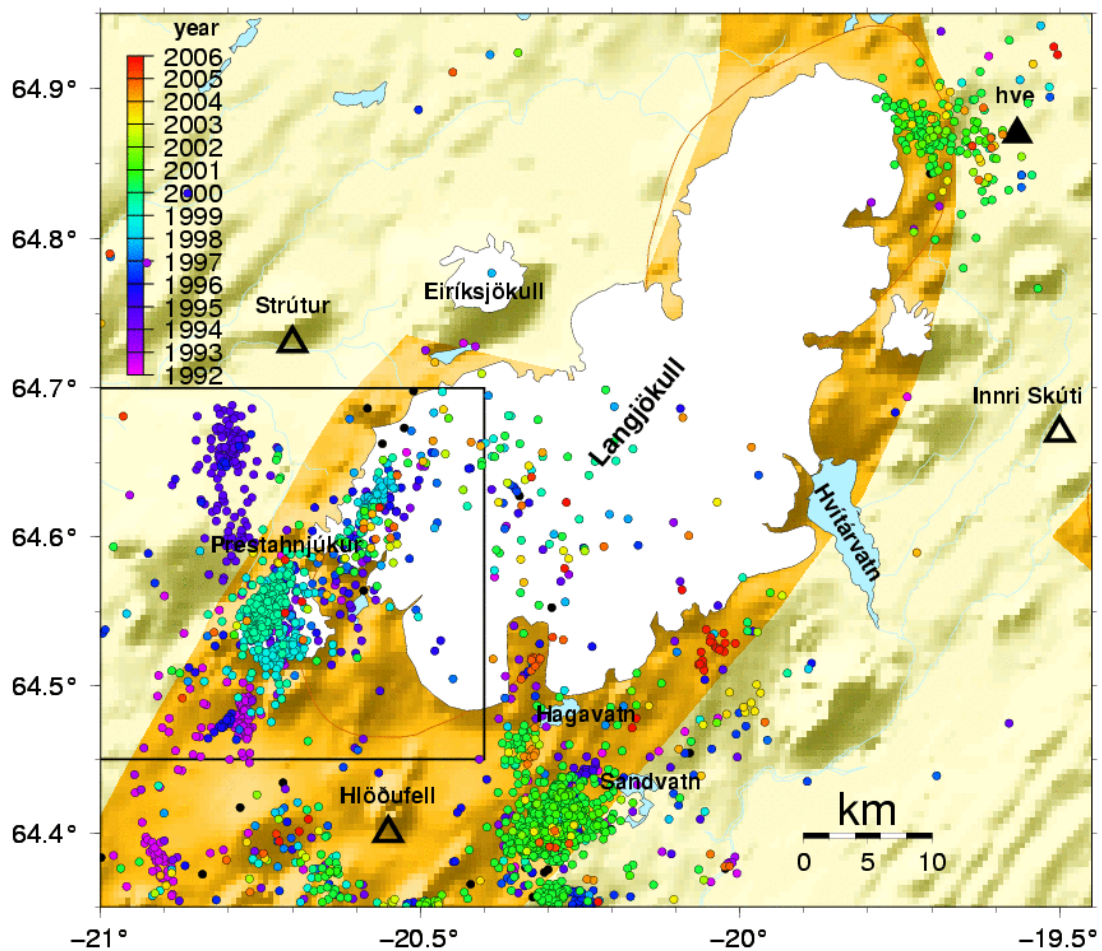
Mynd 1.



Mynd 2.

Skjálftavirkni svæðisins við Langjökul

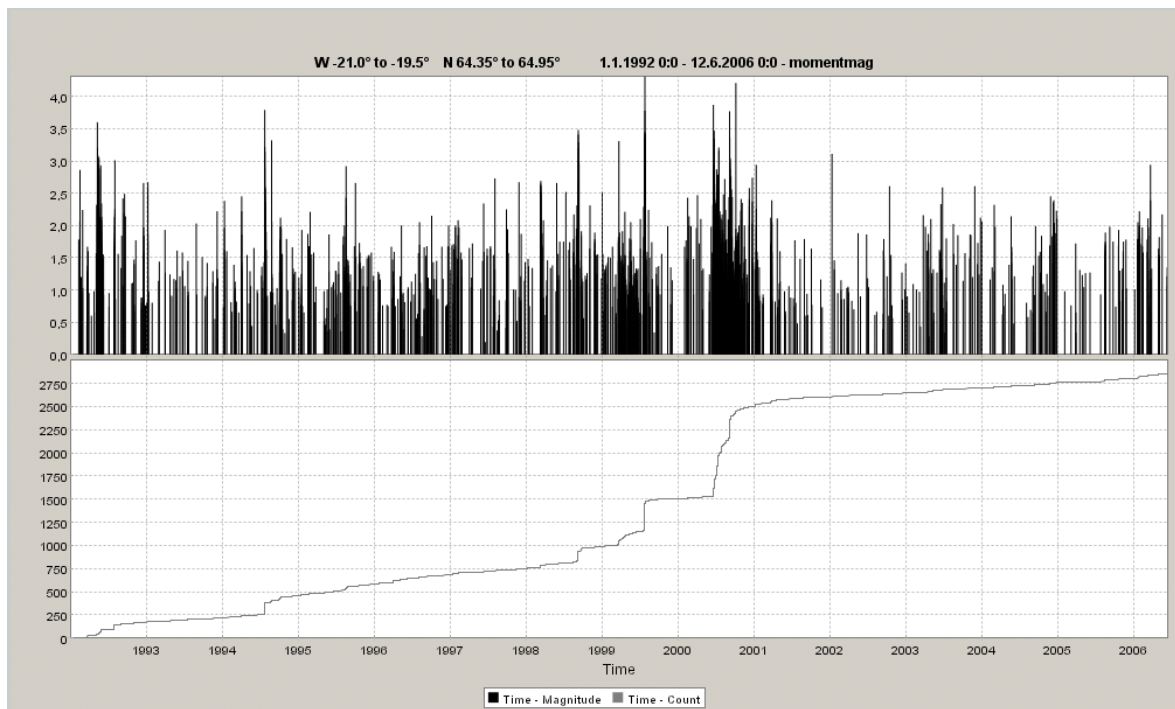
Öll skjálftavirkni sem skráð hefur verið í kringum Langjökul frá upphafi SIL kerfisins, eða frá 1992 til 2006 er sýnd á mynd 3, þar sem skjálftarnir eru litaðir eftir upphafstíma þeirra. Eina mælistöð SIL kerfisins á svæðinu, **hve** á Hveravöllum er merkt með svörtum fylltum þríhyrningi. Viðbótarstöðvarnar eru merktar með svörtum opnum þríhyrningum. Næmni á þessu svæði í dag er í kringum $M > 0.5$ eins og sést betur á mynd 4, sem sýnir stærðir skjálftanna sem fall af tíma. Uppsafnaður fjöldi skjálfta er einnig sýndur á myndinni og sést að heildarfjöldi skráðra skjálfta við Langjökul er rúmlega 2800. Af þeim eru einungis um 90 skjálftar af stærð $M \leq 0.5$. Virknin er aðallega á þrem svæðum: Vestan Hveravalla við norðaustanverðan Langjökul, og á tveim svæðum við suðvestanverðan jökulinn. Annað þeirra er suður af Hagavatni, hitt er við Þórisjökul, sunnan Prestahnjúks. Helstu skjálftahrinur voru á svæðinu norðan Þórisjökuls árið 1994, og síðan á öllum þrem svæðunum árin 1998, 1999 og 2000, en þá urðu ríflega tveir þriðju allrar virkninnar og tengdist hún stórum hrinum í Suðurlandsbrotabeltinu. Ríflega einn þriðji hluti virkninnar skráðist í kjölfar Suðurlandskjálftanna tveggja, 17. og 21. júní árið 2000. Síðan þá hefur aftur dregið úr virkninni.



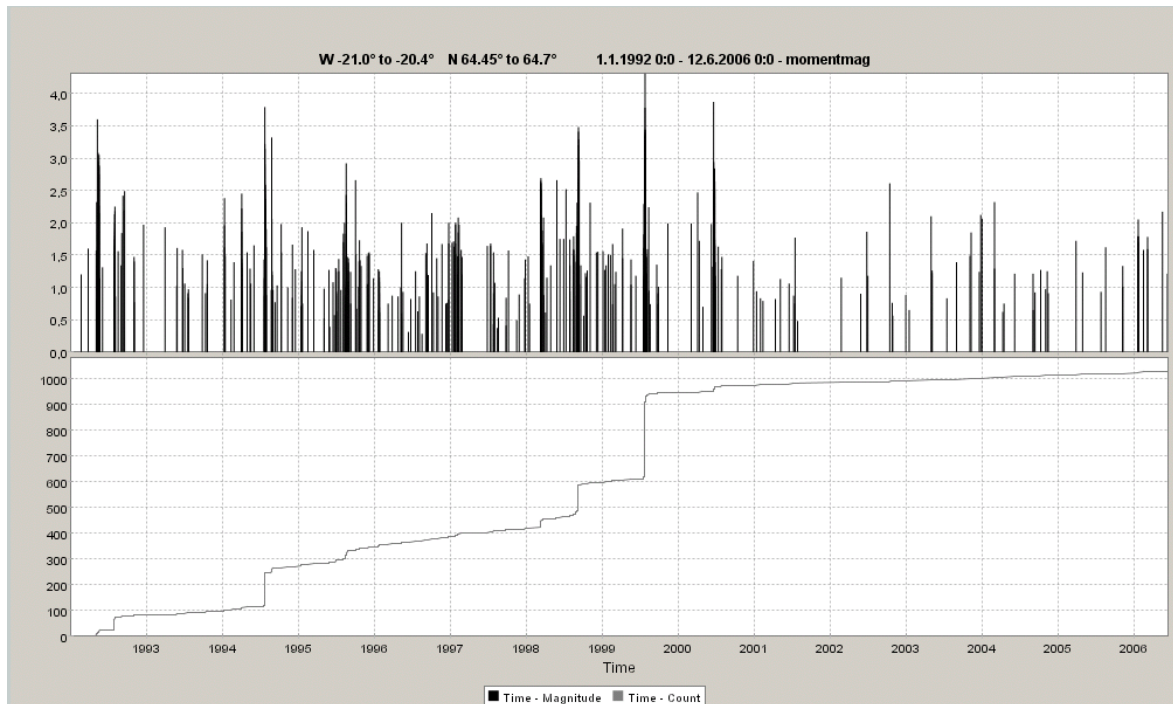
Mynd 3.

Tillaga að öðrum áfanga

Þegar eingöngu er skoðuð skjálftavirkni í kringum Prestahnjúk (sjá litla kassann á mynd 3) eins og sýnt er á mynd 5, sést að þar hafa skráðst rúmlega eitt þúsund skjálftar. Flestir þeirra eru á stærðarbilinu 0,5 - 2,0. Minnstu skjálftarnir eru af stærð $M=0.3$ og einungis 13 skjálftar eru af stærð $M \leq 0.5$. Helstu hrinur eru árin 1994 og 1999, en einungis lítill hluti eftirskjálftavirkinnar árið 2000 varð á svæðinu við Prestahnjúk. Ef beitt er afstæðum staðsetningaraðferðum, eða upptakagreiningu á þessa þúsund skjálfta eru góðar líkur á að hægt sé að fá fram brotalínur ef einhverjar eru. Lagt er til að það verkefni verði framkvæmt á Veðurstofunni á seinni hluta ársins, og að því ljúki með greinargerð þar sem gerð er grein fyrir niðurstöðum. Áætlað er að verkið taki 4 vikur.



Mynd 4.



Mynd 5.

Ef jarðskjálftamælanetið yrði þétt við Langjökul, eins og tillaga í fyrsta áfanga gerir ráð fyrir, mun næmni við Prestahnjúk færast úr $M \sim 0.5$ og niður fyrir $M=0$. Samkvæmt Gutenberg-Richter sambandinu, $\log N = a - b \cdot M$, þar sem N er fjöldi skjálfta og $b=0.8-1.2$, ætti fjöldi mældra skjálfta þá að aukast ríflega fimmfalt (u.þ.b. tífalt fyrir hverja stærðargráðu). Miðað við virkni seinustu sex ára þýðir það um 60 skráða skjálfta að jafnaði á ári við Prestahnjúk (~ 400 að jafnaði á ári á öllu svæðinu). Ef hins vegar skjálftavirkni eykst aftur, eða stórar hrinur verða á svæðinu, mun fjölgun skjálfta með tilkomu viðbótarstöðvanna verða í samræmi við þá aukningu.

Heimildir:

- Kristján Ágústsson, Sigurður Th. Rögnvaldsson, Bergur H. Bergsson og Ragnar Stefánsson, 1998. Jarðskjálftamælanet Veðurstofu Íslands og Hitaveitu Suðurnesja – lýsing á mælaneti og fyrstu niðurstöður, Rit Veðurstofu Íslands, VÍ-R98002-JA02.
- Kristján Ágústsson, 2006. Mat á næmni SIL jarðskjálftamælinetsins. Greinargerð Veðurstofu Íslands, nr. 06014.
- Sigurlaug Hjaltadóttir og Kristín S. Vogfjörð, 2005. Subsurface fault mapping in Southwest Iceland by relative location of aftershocks of the June 2000 earthquakes. Rit Veðurstofu Íslands, nr 21.
- Sigurlaug Hjaltadóttir og Kristín S. Vogfjörð, 2006. Kortlagning sprungna í Fagradalsfjalli á Reykjanesskaga með smáskjálftum; Kortlagning jarðhita í gosbeltum Íslands – fyrsti áfangi. Greinargerð Veðurstofu Íslands, nr. 06001.