

Kristín S. Vogfjörð
Sigurlaug Hjaltadóttir

**Kortlagning skjálftavirkni við Hverahlíð á Helligheiði í
febrúar 2006**
Unnið fyrir Orkuveitu Reykjavíkur

INNGANGUR

Við lok borunar holu HE-21 við Hverahlíð á Hellisheiði, þegar holan hafði náð tæplega 2,2 km dýpi, hófst niðurdæling vatns undir þrýstingi í hana. Á fyrsta niðurdælingartímabilinu, dagana 4.-7. febrúar 2006 kom fram smáskjálftavirkni í námunda við holuna, og virtist hún tengjast ádælingunni. Alls mældust þá 16 smáskjálftar á SIL jarðskjálftamælikerfi Veðurstofunnar, sá fyrsti upp úr kl. 19 þann 4. og sá seinasti í lok ádælingartímabilsins, aðfararnótt 7. febrúar. Daginn eftir bættust svo við 2 skjálftar í um 4 km fjarlægð frá holunni. Stærðir skjálftanna voru á bilinu $0 < M < 2$ og tæplega helmingur þeirra voru numdir og staðsettir sjálfvirkt af SIL-kerfinu, hinir voru handvastaðir. Í ljósi þessarar virkni og vegna fyrirhugaðra áframhaldandi dæluprófanana á holunni var ákveðið að setja niður tvo viðbótarmæla nær borholunni. Þetta var gert til að auka næmni á svæðinu, en til að SIL-kerfið staðsetji skjálfta sjálfvirkt þurfa þeir að vera numdir af að minnsta kost þrem mælistöðvum. Dælt var á holuna í þrem lotum; dagana 4.-7. febrúar, 14.-16. febrúar og 20.-22. febrúar, en viðbótarskjálftamælarnir voru starfræktir á tímabilinu 9.-28. febrúar. Alls var hægt að staðsetja 72 skjálfta á öllu tímabilinu, þann fyrsta 4. febrúar og þann seinasta 22. febrúar. Sjá nánar í töflu 1.

Niðurdæling hefst	Niðurdælingu lýkur	Fjöldi skjálfta sem SIL-kerfi nam sjálfvirkt	Heildarfjöldi numinna skjálfta
4. febrúar kl. 06	7. febrúar kl. 12	8	18*
14. febrúar kl. 12	16. febrúar kl. 09	0	4**
20. febrúar kl. 05	22. febrúar kl. 13	10	50

Tafla 1. Tímabil niðurdælingar í borholu HE-21 í Hverahlíð og tengd skjálftavirkni í innan við 4 km fjarlægð frá holunni.

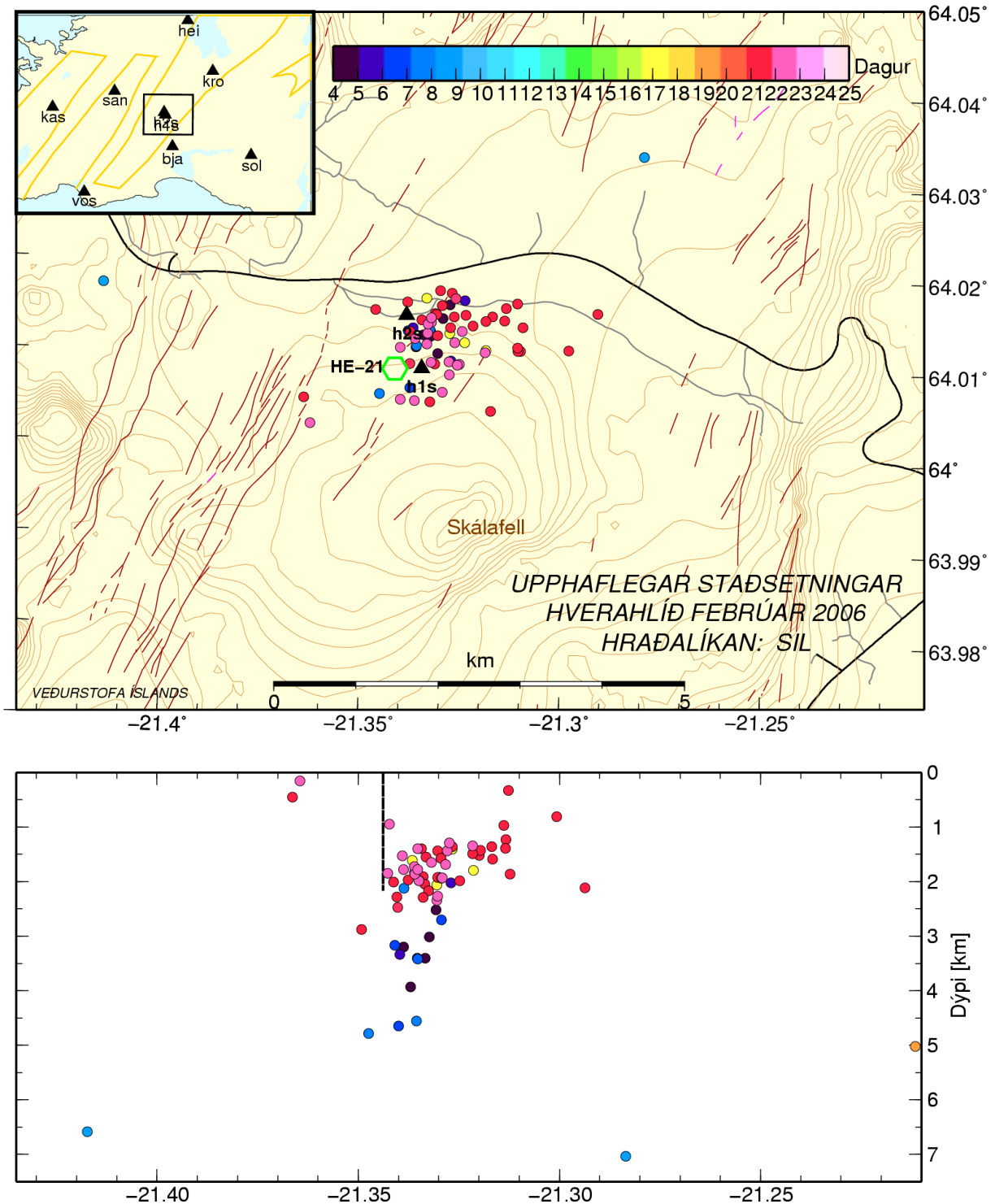
*Ekki var búið að koma viðbótarmælunum fyrir á þessu tímabili.

**Fjórir greinilegir skjálftar mældust 17. febrúar, eftir að niðurdælingu lauk.

Við jarðskjálftamælingarnar voru notuð REF TEK 130-01 skráningartæki úr nýstofnuðum jarðskjálftamælabanka Veðurstofunnar, Íslenskra Orkurannsókna og Jarðvísindastofnunar Háskólans. Jarðskjálftanemar voru ekki komnir í bankann og voru því notaðir Lennartz 5s stuttbylgjumælar Veðurstofunnar. Mælabankinn hefur ekki ennþá eignast tæknibúnað til rauntímasamskipta við færanlegar mælistöðvar og Veðurstofan var ekki aflögufær með slíkan búnað. Gögnum var því safnað á minniskort í skráningartækjunum og síðan allir viðbótarskjálftar á skráningartímabilinu fundnir og vistaðir handvirkt eftir að færanlegu mælarnir voru teknir niður. Mælarnir skráðu í 19 daga og þurfti einu sinni á tímabilinu að skipta um rafgeyma. Mynd 1 sýnir staðsetningu viðbótarmælanna (**h1s** og **h2s**), borholu **HE-21** og nálægustu SIL-stöðva ásamt allri skjálftavirkni sem hægt var að staðsetja á svæðinu á tímabilinu 4.-25. febrúar 2006 og eru skjálftarnir litaðir eftir því hvenær tímabilsins þeir urðu.

Tilgangur mælinganna, eins og áður sagði, var að fylgjast með hugsanlegri skjálftavirkni sem niðurdælingin framkallaði og kanna hvort hún fylgdi afmörkuðum sprungum. Þess konar kortlagning sprungna er möguleg ef tímanákvæmni mælinga er góð og er þá beitt afstæðri staðsetningar aðferð, eða upptakagreiningu. Aðferðin getur bætt venjubundna staðsetningar-

nákvæmni til muna, þ.a. við bestu aðstæður getur náðst nákvæmni upp á nokkra tugi metra, en það gerir kleift að kortleggja virkar sprungur og sprungukerfi.



Mynd 1. Skjálftar í Hverahlíð á Hellisheiði frá 4. til 22. febrúar 2006, staðsettir í SIL-hraðalíkani og litadir eftir því hvenær tímabilsins þeir urðu (sjá litakvarða efst, hægra megin). Svörtu þríhyrningarnir á innfelddu myndinni sýna staðsetningar SIL-stöðva og viðbótarstöðvanna h1s og h2s. Græni sexhyrningurinn sýnir staðsetningu borholu HE-21. Vegir eru sýndir sem svartar línur og slóðar sem gráar. Neðri myndin sýnir dýptarsnið frá vestri til austurs, horft úr suðri. Borholan er þar sýnd með brotinni línu.

ÚRVINNSLA GAGNA

Í þá 19 daga sem gögnum var safnað á viðbótarstöðvarnar tvær voru þau vistuð í einnar klst. löngum skráum á REF TEK 130-sniði. Hugbúnaður frá framleiðendum tækjanna reyndist gallaður og gagnaðist ekki við að koma gögnunum úr þessum skráum yfir á bc-snið, en það snið er notað við úrvinnslu og vistun gagna í SIL-kerfinu. Þar sem skráningartækin voru ný og höfðu ekki áður verið notuð á Íslandi, þurfti að finna leið til þess að koma gögnunum af REF TEK-sniði yfir á bc-snið. Prófaðar voru ýmsar leiðir, m.a. sóttur hugbúnaður frá PASSCAL mælabankanum í Bandaríkjunum (PASSCAL, 2006) og einnig notaður SAC hugbúnaðurinn (Goldstein og Minner, 1996; Goldstein o.fl., 2002) til að lagfæra skrár. Með ýmsum krókaleiðum, sem lýst er í töflu 2, var unnt að koma gögnunum á nothæft snið. Vegna tímaskorts vannst ekki tími til að lagfæra forrit sem kemur gögnum beint af segy-sniði yfir á sil-snið, en það mun einfalda og stytta ferlið talsvert.

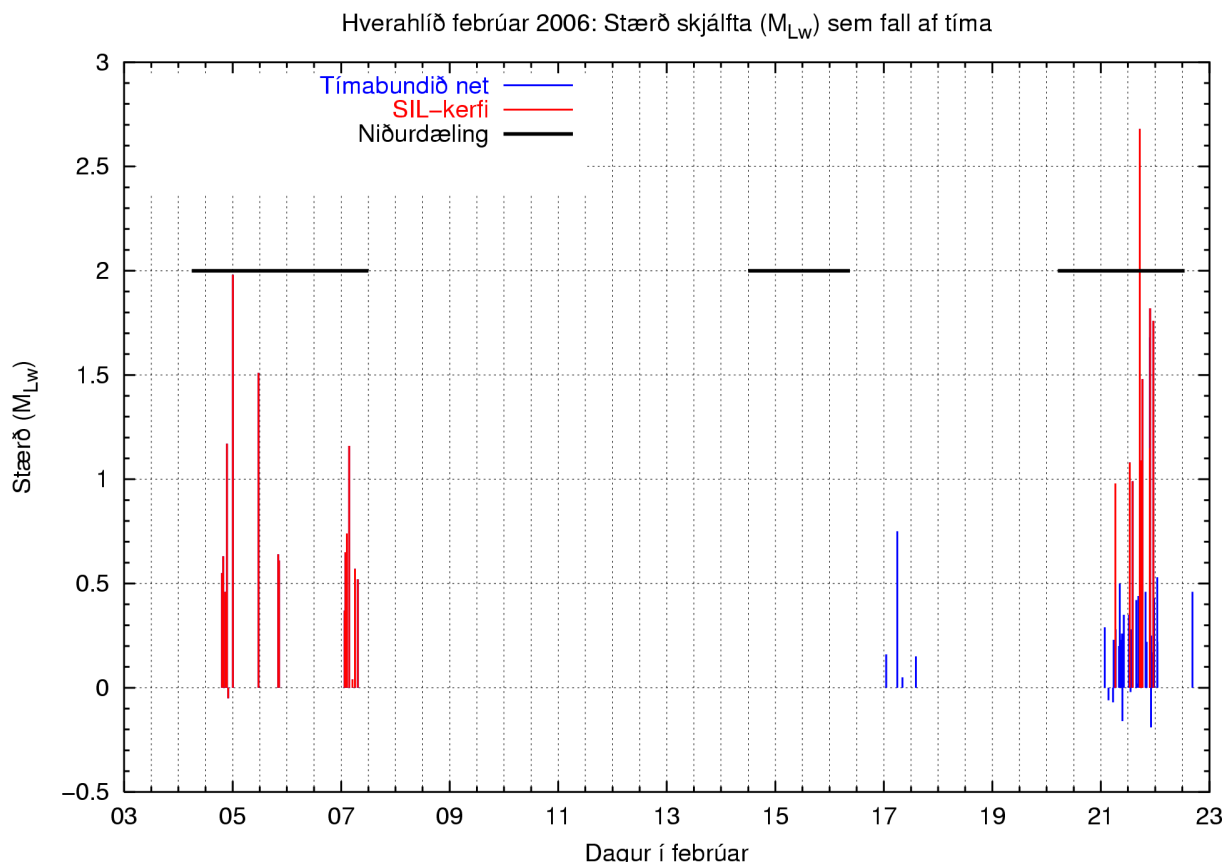
Farið var yfir bylgjugögn frá stöð **h2s** til að leita atburða sem tengst gætu niðurdælingunni og samsvarandi tímabil síðan vistuð á nálægum SIL-stöðvum: **bja, san, kro, hei, sol, kas, vos**. Þá var myndað 28 mæla undirnet með nýju stöðvunum tveim og þeim 26 SIL-stöðvum sem stærstu skjálftarnir greindust á.

RNC_Client	REF TEK-hugbúnaður fyrir Linux	Notaður til að skoða 1 klst. langar RT-130-skrár og finna mögulega skjálfta.
ref2seg	PASSCAL-forrit fyrir Linux	Býr til 1 klst. langar segyskrár beint úr 1 klst. RT-130.
segycut	PASSCAL-forrit fyrir Linux	Klippir segy-skrár niður í 90s skrár fyrir alla þætti (Z,N,E).
seg2sac	PASSCAL-forrit fyrir Linux	Breytir úr segy-sniði í sac-snið, little-endian.
sacswap	SAC-forrit fyrir Linux	Breytir little-endian sac-sniði í big-endian. Hér þarf svo að setja rétt stöðvarnöfn inn í haus skráanna.
rftsac2sil	Veðurstofan, forrit fyrir Sparc-Solaris	Breytir big-endian sac-sniði í sil-snið.
bctool	Veðurstofan, forrit fyrir Solaris og Linux	Breytir sil-sniði í bc-snið.

Tafla 2. Hugbúnaður sem notaður var við að koma mæligögnum úr RT-130 sniði yfir á bc-snið.

Þeir skjálftar, sem hægt var að staðsetja voru endurstaðsettir á venjubundin hátt í SIL-hraðalíkani, með viðbótarupplýsingum (komutíma P- og S-bylgna, auk skautunar P-bylgna þar sem þess var kostur) frá tímabundnu stöðvunum tveim, **h1s** og **h2s**. Við þessa endurstaðsetningu minnkaði almennt dýpi skjálftanna, um allt að 3,5 km. Engir skjálftar bættust við á fyrstu tveim niðurdælingartímabilunum, umfram þá 18 sem þegar höfðu skráðst í SIL-kerfið. Viðbótarstöðvarnar voru að vísu ekki starfræktar á fyrsta tímabilinu og bættust því engir skjálftar við það tímabil. Á öðru tímabili voru nýju stöðvarnar virkar, en ekki varð þó vart við neina skjálftavirkni fyrr en daginn eftir að dælingu lauk, þann 17. febrúar. Þá

bættust við 4 skjálftar í námunda við holuna. Um miðja þriðju dælingu, þann 21. febrúar, mældust 10 skjálftar sjálfvirkt í SIL-kerfinu. Að auki var hægt að greina 37 minni skjálfta þann dag, og þrjá til viðbótar 22. febrúar. Margir þessara viðbótarskjálfta eru mjög litlir og greinast ekki nema á viðbótarstöðvunum, **h1s** og **h2s**, og oft ógreinilega á einni eða tveimur SIL-stöðvum til viðbótar. Upphaflegar staðsetningar skjálftanna má sjá á mynd 1 og stærðardreifingu þeirra á mynd 2. Viðbótarskjálftarnir eru flestir á stærðarbilinu 0 til 0,5.

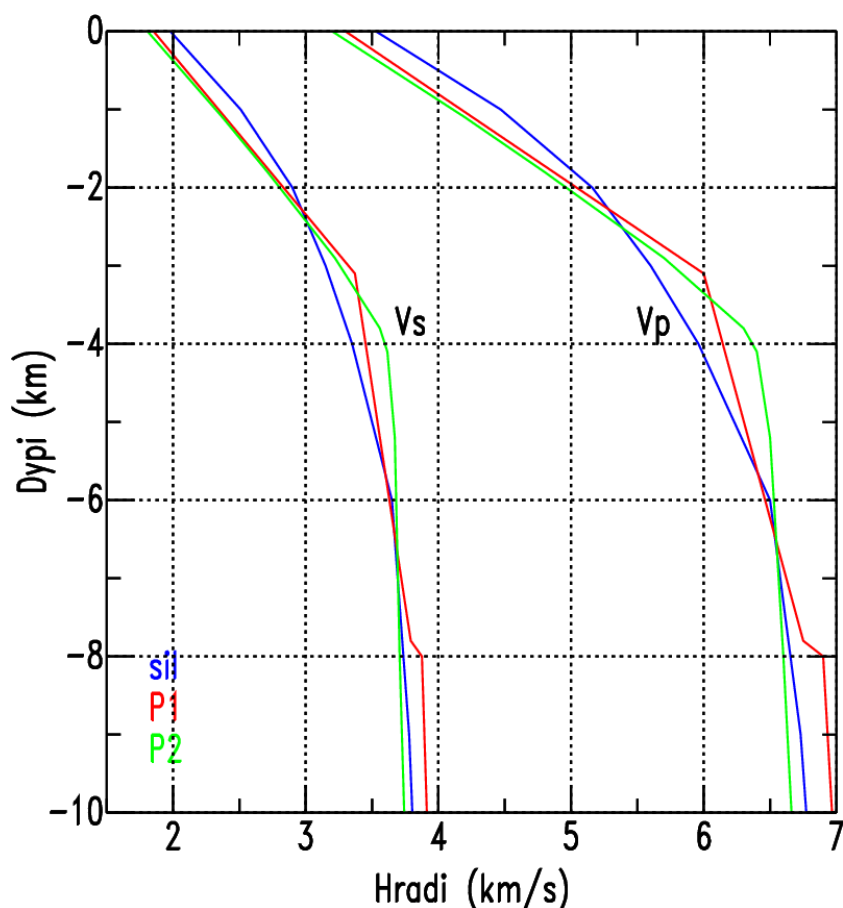


Mynd 2. Stærðar- og tímadreifing skjálfta við Hverahlíð (local-moment stærð). Stærð þeirra skjálfta sem þegar voru skráðir í SIL-kerfið eru í rauðum lit, annarra sem bætt var við í bláum lit. Niðurdælingartímabilin eru afmörkuð með svörtum línunum.

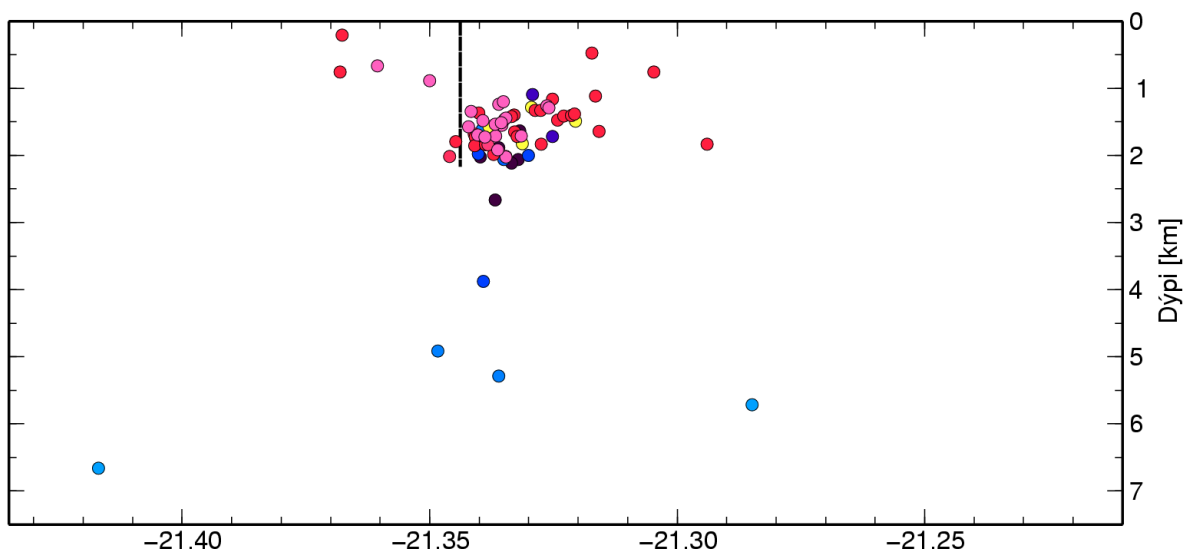
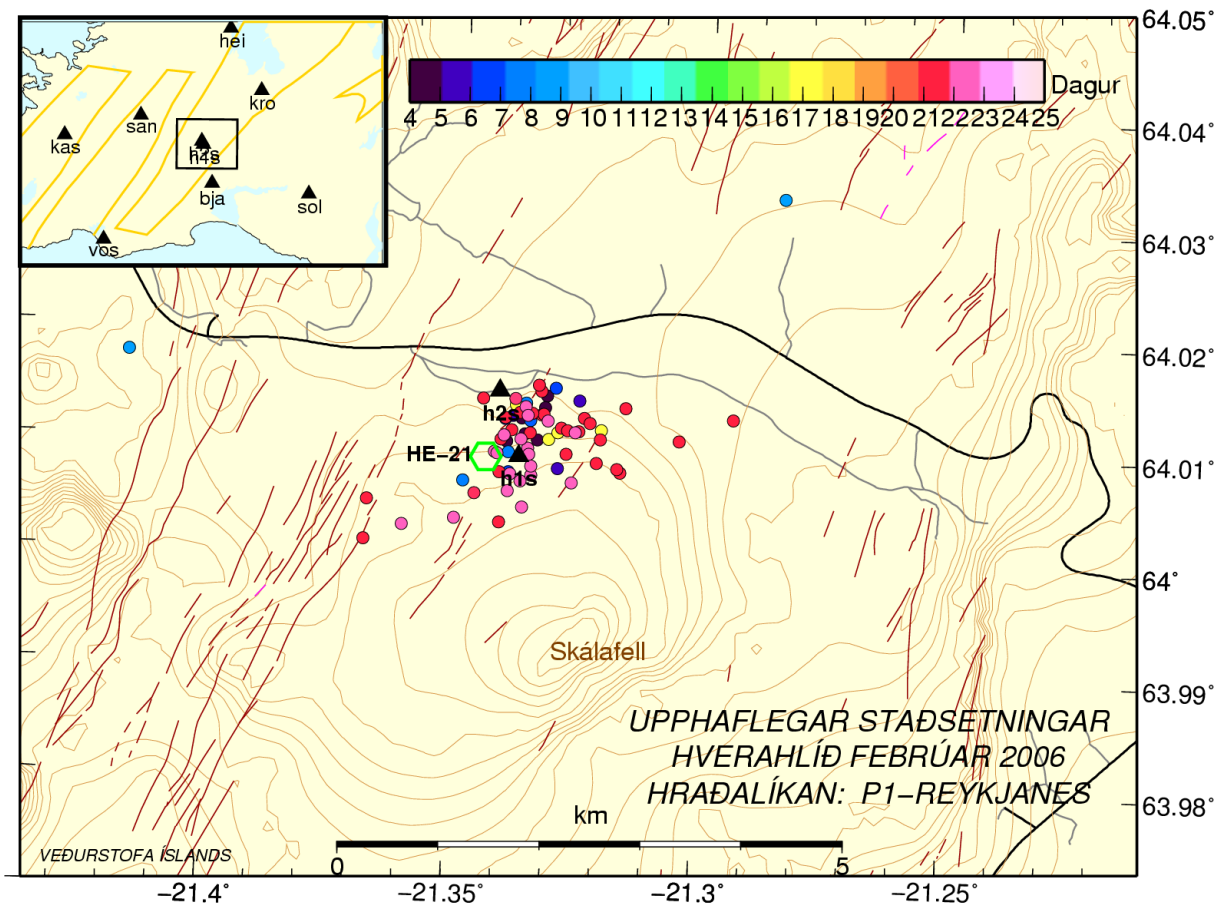
NIÐURSTÖÐUR

Mynd 1 sýnir skjálftastaðsetningar í SIL-hraðalíkani, sem notað er við allar venjubundnar staðsetningar á Veðurstofunni. Þar sést að skjálftarnir mynda þyrpingu NA af borholunni, milli viðbótarstöðvanna tveggja og að virknin er þéttust á dýptarbilinu 1,2-2,3 km, eða við neðri hluta holunnar. Ennfremur sést að skjálftar í byrjun tímabilsins, áður en viðbótarstöðvarnar voru settar upp, eru mun dýpri en undir lok tímabilsins og flestir skjálftar á fyrsta tímabilinu eru meira en 1 km fyrir neðan holubotninn, á meðan virknin eftir að viðbótarmælarnir taka til starfa er nær öll ofan við holubotn. Þetta þótti grunsamlegt og voru því skjálftarnir allir endurstaðsettir á venjubundinn hátt í tveim öðrum hraðalíkönunum. Þessi líkön eru skorðuð af kortlagningu sýndarhraða og komutíma P- og S-bylgna frá afstætt

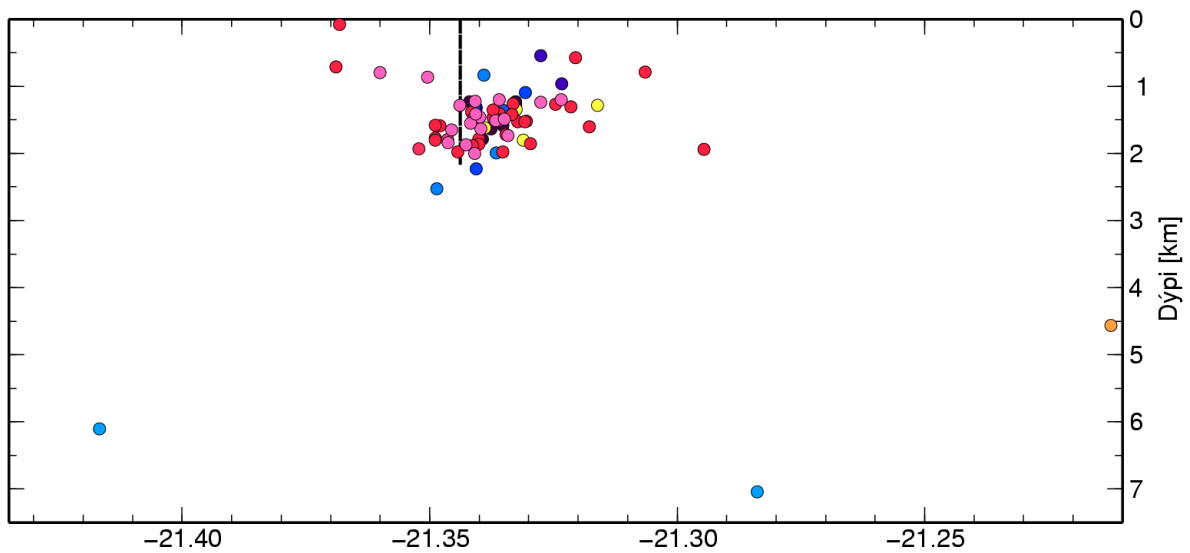
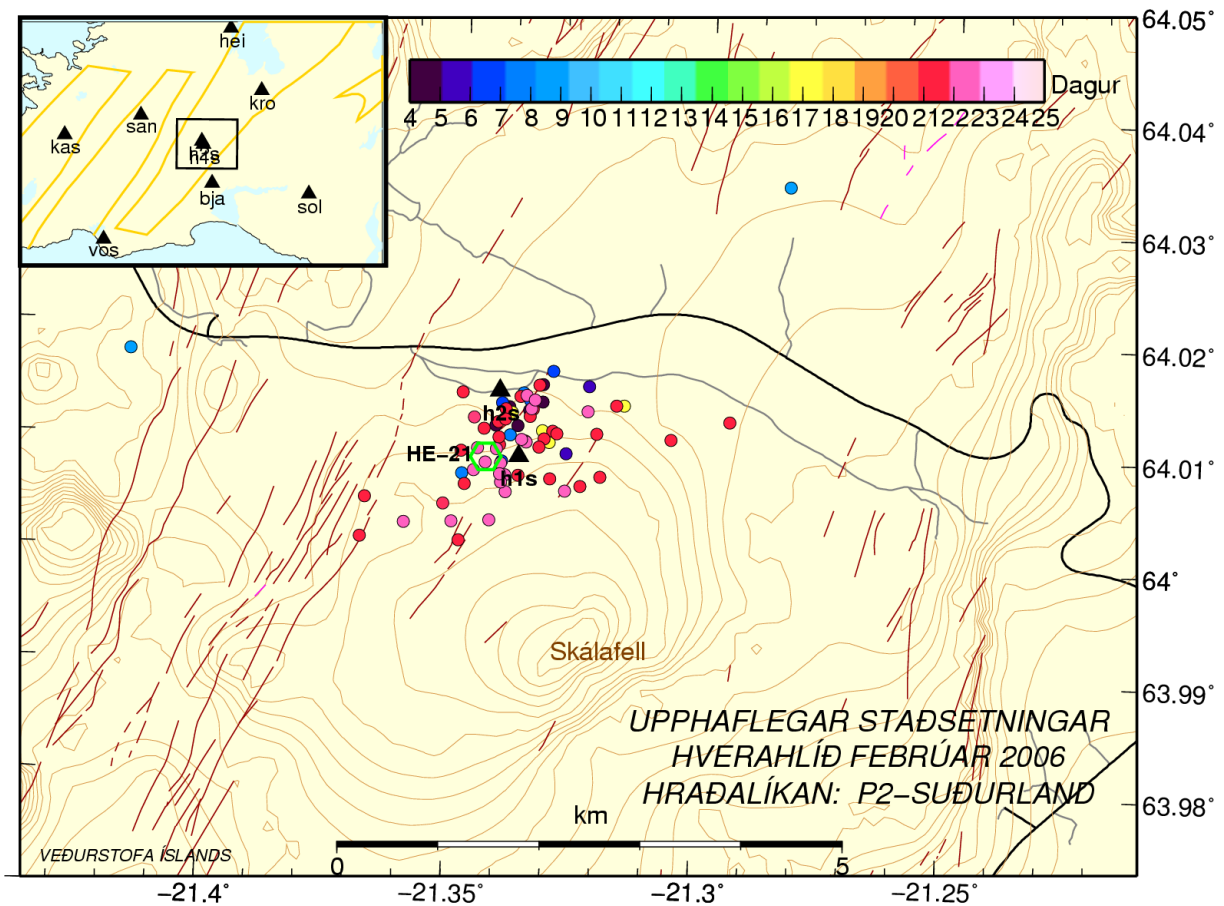
staðsettum skjálftum úr skjálftahrinu í Hengli 3.-5. júní 1998 á SIL- og HOTSPOT-mælistöðvum (Kristín Vogfjörð o.fl., 2002). Mjög mismunandi hraðalíkon fengust þá fyrir Suðurland (P2), annars vegar og Reykjaneskaga (P1) hins vegar og bæði líkön eru nokkuð frábrugðin SIL-hraðalíkaninu. Hraðalíkonin þrjú eru sýnd á mynd 3. Þar sést að SIL-líkanið er hægara en bæði hin á 2-6 km dýpi, en þar fyrir neðan er það hraðara en Suðurlandslíkanið. Reykjaneslíkanið er svo enn hraðara en SIL-líkanið fyrir neðan u.þ.b. 6 km dýpi. Lagmót sem líklega eru mörk skorpu og möttuls (Móhó) eru á um 16 km dýpi í Reykjaneslíkaninu. SIL-líkanið hefur engin Móhómörk, en Suðurlandslíkanið hefur Móhó á 22 km dýpi í norðanverðri Fljótshlíð. Niðurstöður venjubundinna endurstaðsetninga í Suðurlands- og Reykjanes-hraðalíkönum eru sýndar á myndum 4 og 5. Þar sést að gott samræmi er í dýpi skjálfta í Suðurlandslíkaninu á öllu tímabilinu og nær allir skjálftar eru í námunda við neðri hluta holunnar á 1-2 km dýpi. Í Reykjaneslíkaninu er mestur hluti skjálftaþyrpingarinnar einnig á 1-2 km dýpi, en heldur meiri dreifing er á skjálftum fyrsta tímabils, allt niður á rúmlega 5 km dýpi. Mun minni munur er á láréttri en lóðréttri dreifingu skjálftanna í hraðalíkonunum þrem, en lárétt dreifing skjálftaþyrpingarinnar er þéttust í Reykjaneslíkaninu og dreifðust í SIL-líkaninu. Besta samræmið milli tímabila virðist fást í Suðurlandslíkaninu.



Mynd 3. P- og S-hraðalíkon sem notuð eru við staðsetningu skjálfta.



Mynd 4. Skjálftarnir staðsettir í Reykjaneshraðalíkaninu (P1), litadír eftir því hvenær tímabilsins þeir urðu (sjá litakvarða efst, hægra megin).



Mynd 5. Skjálftarnir staðsettir í Suðurlandshraðalíkaninu (P2), litaðir eftir því hvenær tímabilsins þeir urðu (sjá litakvarða efst, hægra megin).

Allir skjálftarnir voru að lokum endurstaðsettir með því að nota upptakagreiningu (Slunga o.fl., 1995). Eins og áður sagði getur aðferðin gefið mun nákvæmari staðsetningar á upptökum skjálfta og oft með svo góðri nákvæmni að hægt er að greina margar þær sprungur sem smáskjálftar verða á. Upptakagreining hefur verið notuð til að kortleggja stórar og smáar sprungur víða á Íslandi á undanförunum árum, t.d. í Tjörnesbrotabeltinu (Sigurður Th. Rögnvaldsson o.fl., 1998), á Hengilssvæðinu (Sigurður Th. Rögnvaldsson o.fl., 1999; Kristín S. Vogfjörð, 2000; Kristín S. Vogfjörð o.fl., 2005a) og víðar í vestra gosbeltinu, í Suðurlandsbrotabeltinu og á Reykjanesskaga (Sigurlaug Hjaltadóttir og Kristín S. Vogfjörð, 2005; Kristín S. Vogfjörð o.fl., 2005b; Sigurlaug Hjaltadóttir og Kristín S. Vogfjörð, 2006). Allar þessar fyrri kortlagningar byggja á SIL-hraðalíkani, því almennt hefur verið talið að áhrif hraðalíkans á niðurstöður afstæðra staðsetninga séu fremur lítil, svo fremi að líkanið sé sæmileg nálgun við raunverulegan strúktúr, en vegna þess hve venjubundnu staðsetningarnar voru breytilegar eftir því hvaða líkan var notað við staðsetningu skjálftanna við Hverahlíð, voru afstæðar staðsetningar reiknaðar í öllum þrem líkönum.

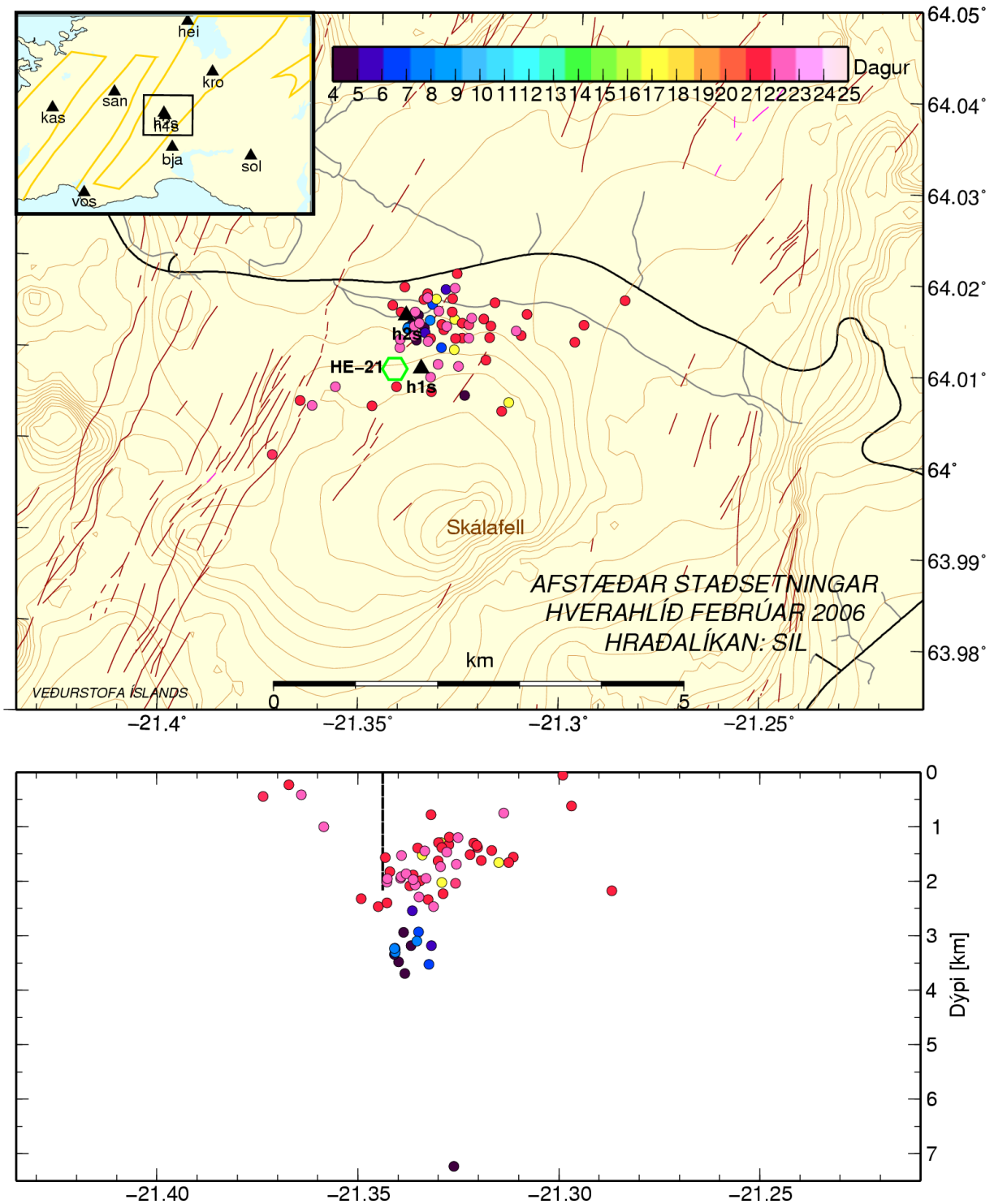
Niðurstöður upptakagreiningar allra skjálfta í innan við 4 km fjarlægð frá borholunni í SIL hraðalíkani eru sýndar á mynd 6. Þegar þessar endurstaðsetningar eru bornar saman við staðsetningar á mynd 1, sést að lítil færsla verður á skjálftunum við upptakagreininguna. Skjálftarnir haldast að mestu austan við **h2s**, en færast aðeins norðar og fjær **h1s**. Mjög fáir skjálftar eru við borholuna sjálfa. Lárétt dreifing virkninnar er áfram nokkuð mikil og engar greinilegar sprungustefnur eru sýnilegar. Dýptardreifing skjálfta á fyrsta tímabilinu minnkar heldur og skjálftarnir færast allir nema einn upp fyrir 3,8 km dýpi. Þeir eru samt áfram að mestu aðskildir frá virkni seinni tímabilanna tveggja.

Við upptakagreiningu í Reykjaneslíkaninu dreifist virknin yfir meira dýpi en áður, eins og sést við samanburð á mynd 4 og mynd 7. Staðsetningar eru ekki ósvipaðar þeim í SIL-líkaninu: virkni fyrsta tímabils dregst saman í þyrpingu í kringum 3 km dýpi, fyrir neðan holuna og aðal skjálftaþyrpinguna, sem er þéttust á 1,3-2,5 km dýpi og um 200 m suðaustan við **h2s**. Skjálftadreifin virðist hafa norðaustlæga stefnu og fáir skjálftar eru við holuna.

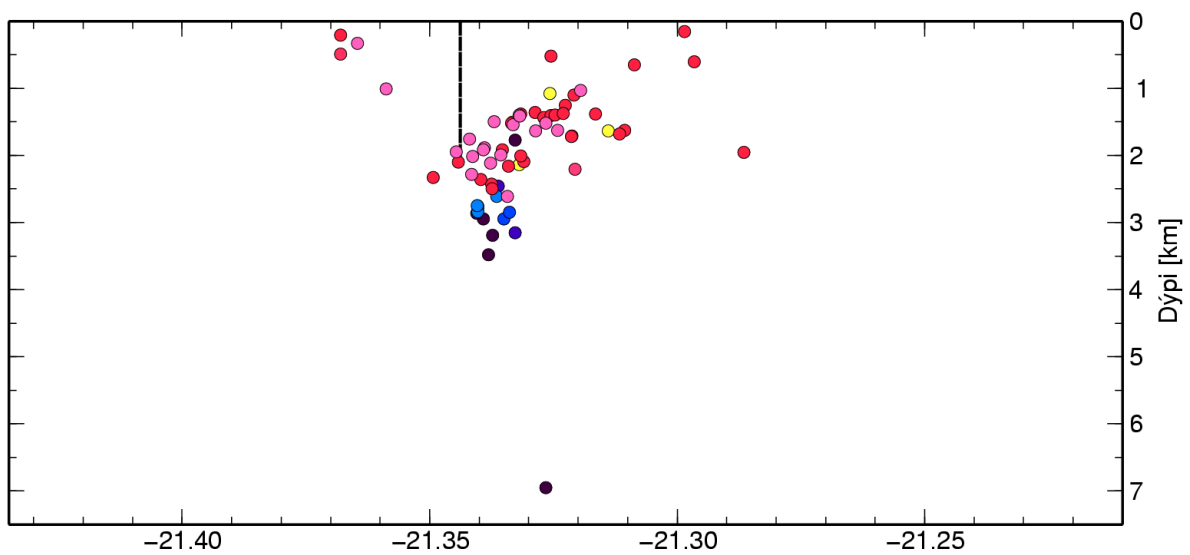
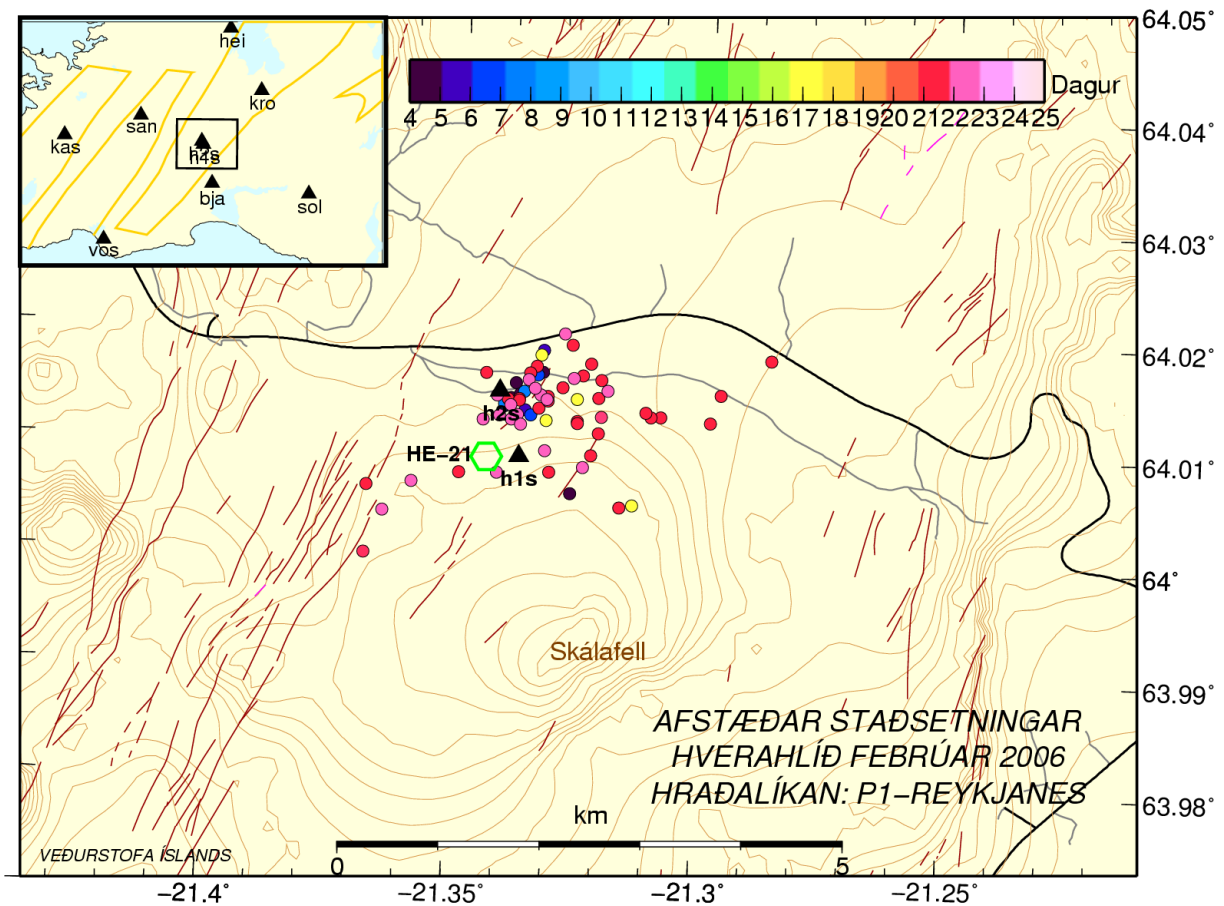
Upptakagreiningin í Suðurlandslíkaninu gefur bestu niðurstöðurnar, en þær eru sýndar á mynd 8. Allir skjálftar færast upp fyrir holubotn, sem er við 2,2 km dýpi og skjálftadreifin er þéttust á 1,2-1,7 km dýpi. Virkni mismunandi tímabila er ekki aðskilin. Lárétt dreifing skjálftanna er líka heldur minni, skjálftadreifin nær alveg að holunni og teygir sig þaðan til norðausturs. Ekki er hægt að sjá afgerandi sprungustefnu, en þó virðist meginvirknin norður af holunni mynda ílanga norðaustlæga þyrpingu. Þéttust er virknin á milli viðbótarstöðvanna tveggja, um 400 m norður af **h1s** og 250 m suðsuðaustan við **h2s**. Þegar valdir eru skjálftar með afstæða óvissu <100 m í lengd, breidd og dýpi þá sitja eftir 35 skjálftar (af 70), nær allir á 1,2-1,8 km dýpi eins og sést á mynd 9. Þar kemur strikstefnan einnig nokkuð greinilega í ljós. Hún er um 31° og ef horft er suður eftir strikstefnunni á lóðrétt þversnið, eins og sýnt er á hægri hluta myndar 10, þá sést að 24 skjálftar á 1,2-1,8 km dýpi falla ágætlega að plani með um 83° halla til suðausturs. Rms-gildi staðsetningarfrávika skjálftanna frá planinu er 37 m.

Fyrir hvern skjálfta eru geymdar allar mögulegar brotlausnir sem hafa útgeislunarmynstur og stærð innan fyrirfram skilgreindra skekkjumarka. Úr þessu safni eru sóttar þær brotlausnir sem falla best að planinu og þær teiknaðar á mynd 11. Vinstri hluti myndarinnar sýnir að frávik striks og halla brotlausnanna frá sameiginlegu plani skjálftanna (31°, 83°) er lítið. Þegar horft er í lóðréttu þversniði í suðaustur (hægri hluti myndar 11), þvert á sameiginlegan brotflöt skjálftanna, sést hins vegar að nokkuð mikill breytileiki er í skriðhornum þeirra (sýnt með hakinu á hringjunum), en allir eru þó með verulegan lóðréttan skriðþátt. Skriðhornarósinn á innfelldu myndinni sýnir dreifingu skriðhorna. Þar sést að meirihluti strikstefna lýsir

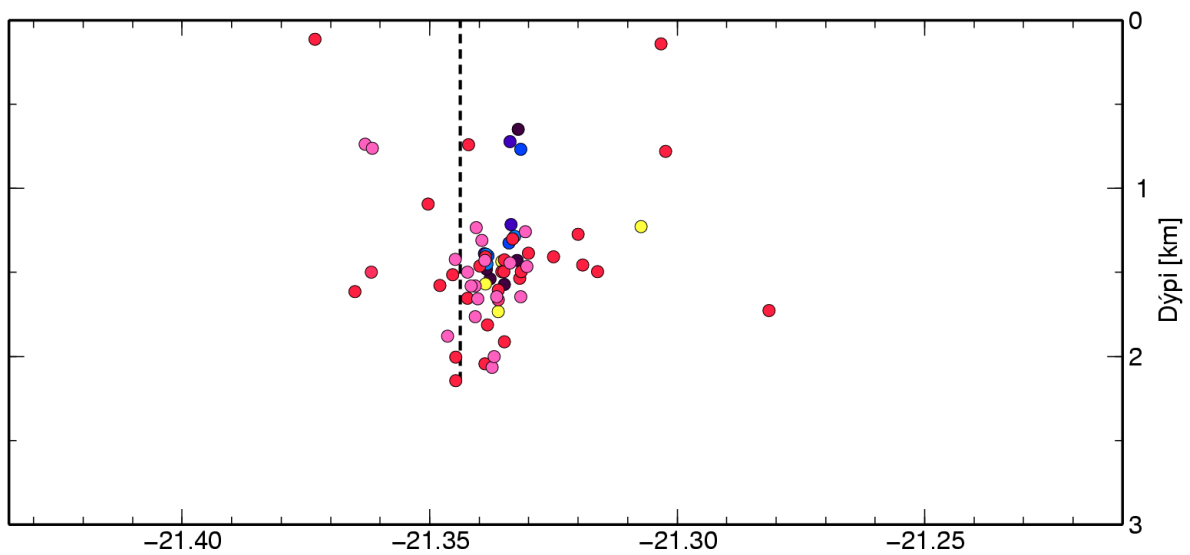
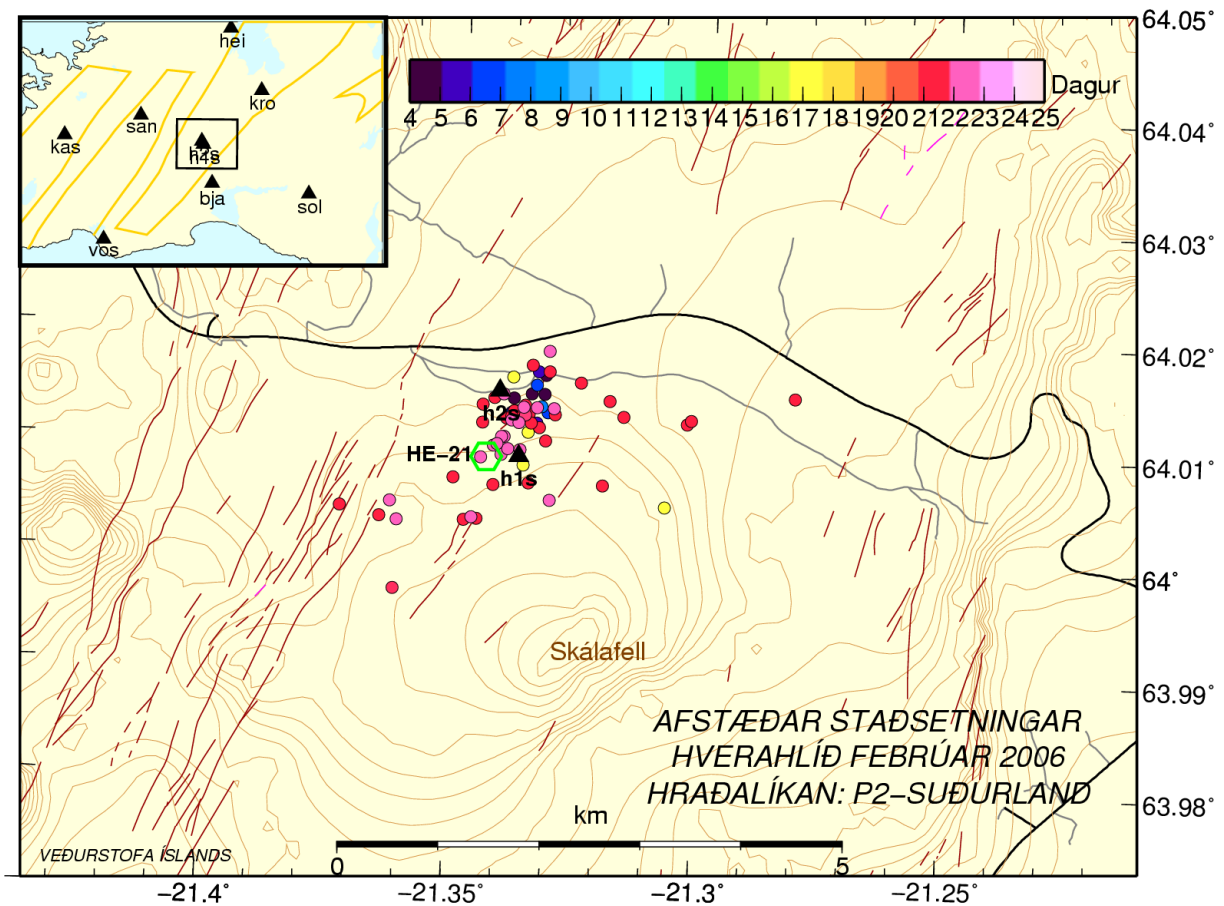
normalhreyfingum ($-180^\circ < \text{skriðhorn} < 0^\circ$) og að þriðjungur skjálftanna hefur nær hreina normalhreyfingu (skriðhorn nálægt -90°). Meðalskriðhorn á sameiginlegum brotflati skjálftanna er -118° og vegið (með skjálftavægi) meðalskriðhorn er -115° .



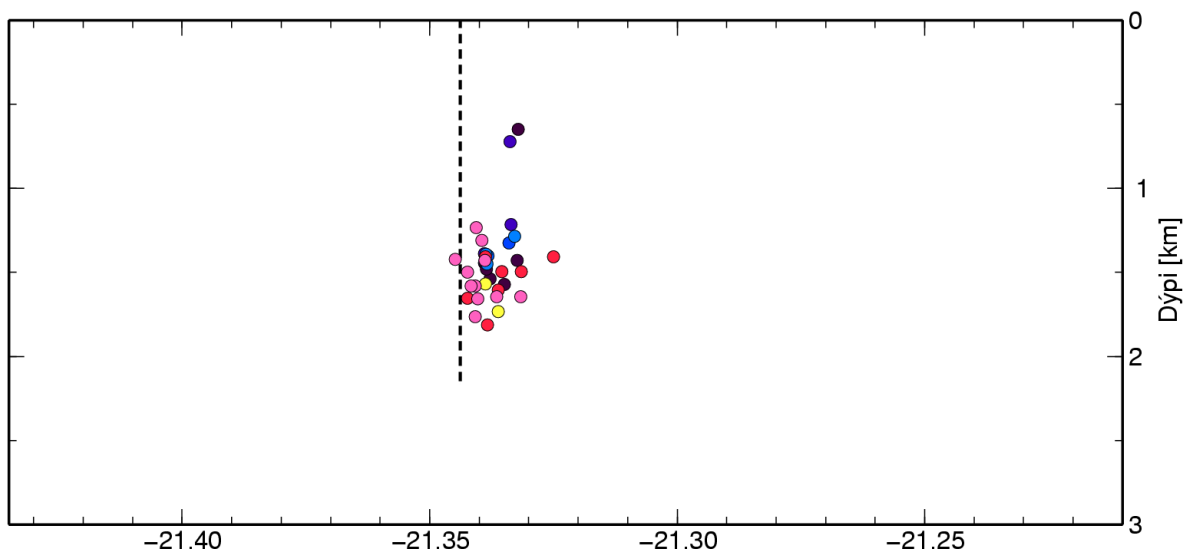
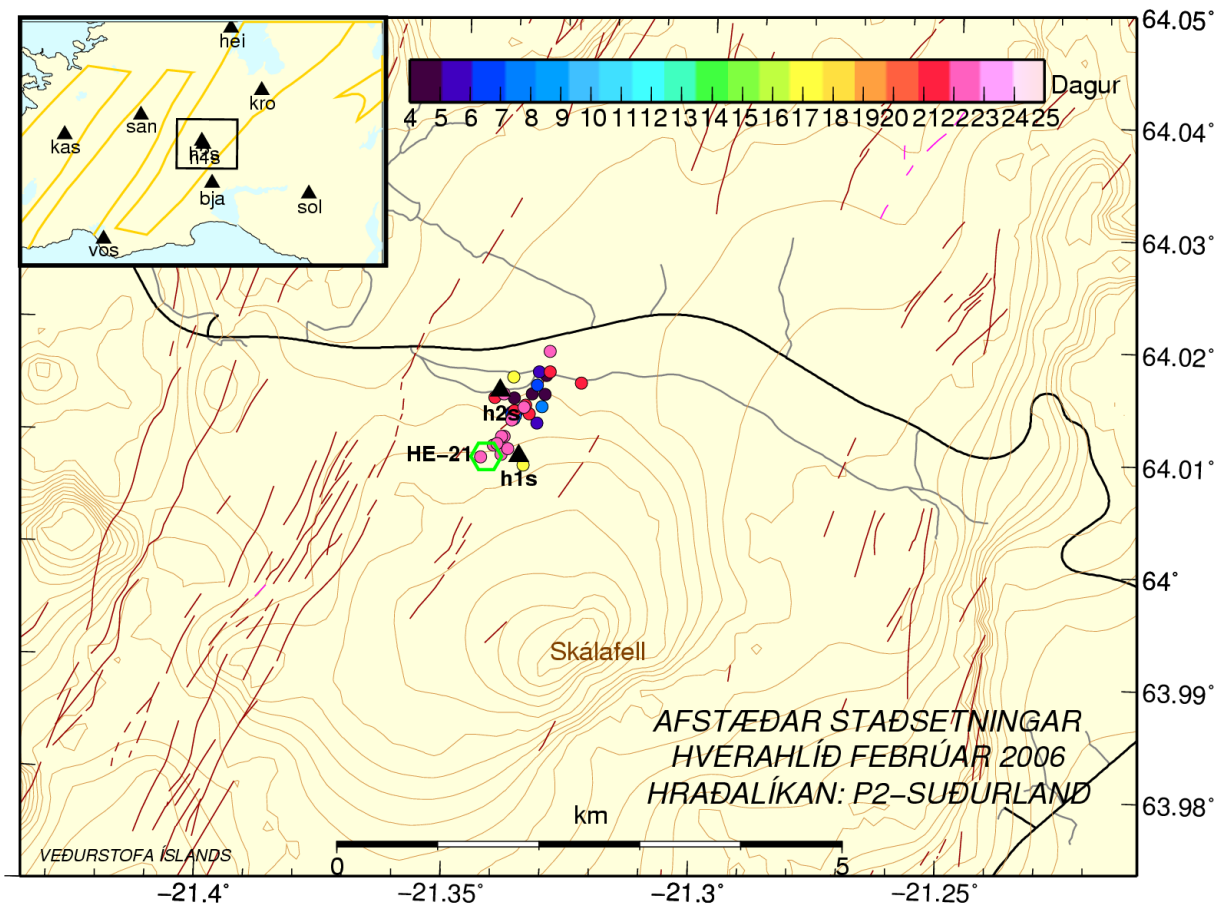
Mynd 6. Allir afstætt staðsettir skjálftar við Hverahlíð á tímabilinu 4. til 22. febrúar, litaðir eftir aldri (sjá litakvarða efst, hægra megin). Skjálftarnir eru staðsettir í SIL-hraðalíkaninu. Neðri myndin sýnir dýptarsnið, horft frá suðri.



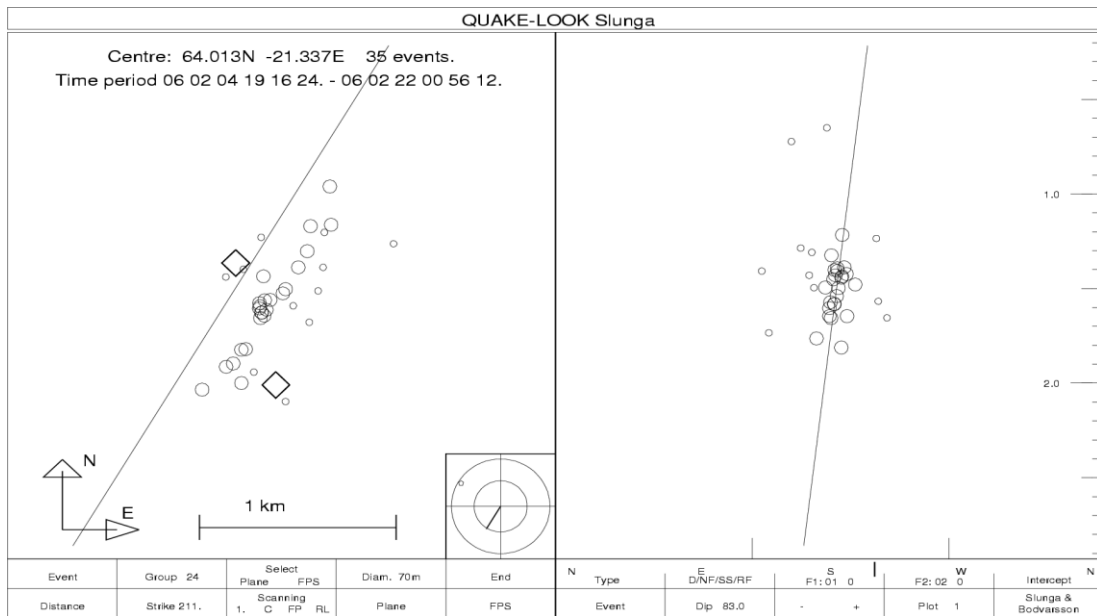
Mynd 7. Afstætt staðsettir skjálftar frá 4. til 22. febrúar, litaðir eftir aldri. Skjálftarnir eru staðsettir í Reykjaneshraðalíkaninu (P1). Neðri myndin sýnir dýptarsnið, horft frá suðri.



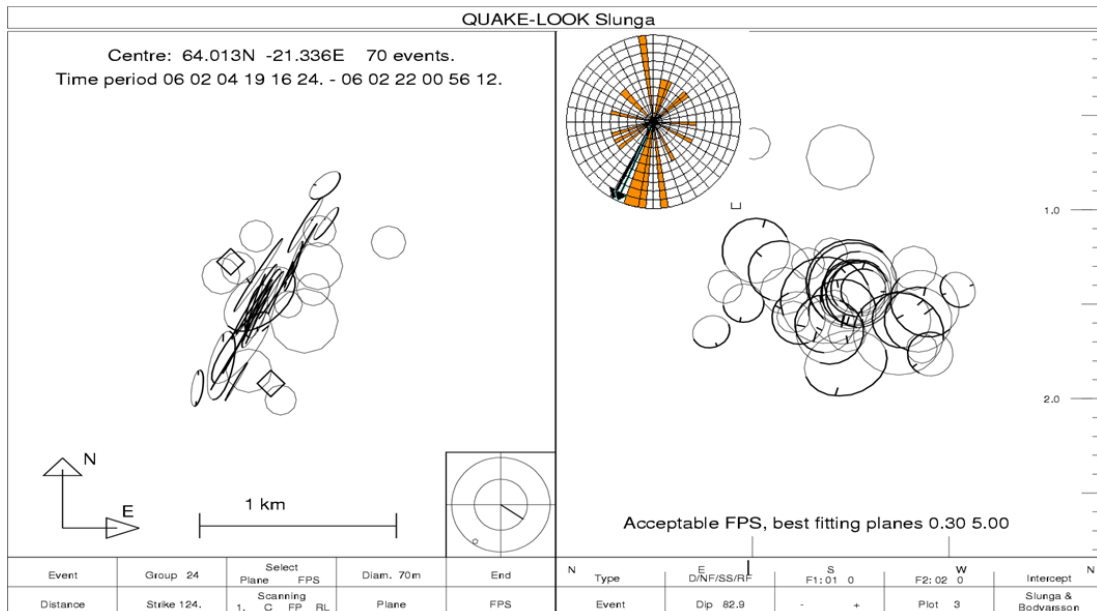
Mynd 8. Afstætt staðsettir skjálftar frá 4. til 22. febrúar, litaðir eftir því hvenær tímabilsins þeir urðu. Skjálftarnir eru staðsettir í Suðurlandshraðalíkaninu (P2). Neðri myndin sýnir dýptarsnið, horft frá suðri. Athugið að dýptarkvarðinn er ekki sá sami og á fyrri myndum.



Mynd 9. Afstætt staðsettir skjálftar í Suðurlandshraðalíkaninu (P2) frá 4. til 22. febrúar, með afstæða óvissu í lengd, breidd og dýpi innan við 100 m, litadír eftir því hvenær tímabilsins þeir urðu. Þessir 35 best staðsettu skjálftar úr safninu mynda rúmlega 1 km langa línu frá holunni til norðausturs.



Mynd 10. Samtúlkun skjálftadreifar og brotlausna. Vinstri helmingur: Kort sem sýnir skjálftana á mynd 10 og reiknað plan í gegnum þá 24 skjálfta (stærri hringir) sem falla best að plani. Viðbótarstöðvarnar, **h1s** og **h2s**, eru sýndar með tíglum. Planið sker yfirborð rétt austan við **h2s**, hefur strikstefnu 211° (31°) og hallar 83° til suðausturs. Lengdararkvarðinn er sýndur neðst. Hægri helmingur: Lóðrétt þversnið í gegnum skjálftaþyrpinguna, þar sem horft er suðvestur eftir strikstefnunni. Lóðrétti lengdarkvarðinn er sami og sá lárétti.



Mynd 11. Sams konar kort og á mynd 10, þar sem stærð tákanna er kvörðuð í hlutfalli við stærð skjálftanna. Vinstri helmingur: Bestu brotlausnir skjálftanna sem skilgreina planið á mynd 10 eru teiknaðar sem hringlaga fletir. Hægri helmingur: Lóðréttur þverskurður, þar sem horft er úr norðvestri, þvert á strikstefnuna. Hakið í hringjunum sýnir færslustefnu vestari hliða brotflatanna. Allar færslustefnur (skriðhorn) sýna verulegan lóðréttan þátt. Innfellda myndin sýnir dreifingu skriðhorna. Þriðjungur skjálftanna hefur nær hreina normal hreyfingu. Meðalskriðhorn (þykk ör) er -118° og vegið meðalskriðhorn -115° (þunn ör).

Ástæðan fyrir breytileikanum í skjálftastaðsetningum eftir því hvaða líkan er notað er hraðamismunurinn í efstu 6 km. SIL-líkanið er hraðara en bæði hin líkönin í efstu 2,5 km og hægara en hin á 2,5 til 6 km dýpi. Reykjaneslíkanið er örlítið hraðara en Suðurlandslíkanið niður á um 3 km dýpi, en þar hægir á hraðaukningunni og á 3,5-6,5 km dýpi verður Reykjaneslíkanið talsvert hægara en Suðurlandslíkanið. Bylgjur sem skrást á **bja**, í 7 km fjarlægð fara dýpst niður á rúmlega 3 km dýpi. Bylgjur sem mælast á **san** og **kro** í 12-14 km fjarlægð hafa farið niður á u.þ.b. 3,5 km dýpi og á **sol** og **hei** í 21 km fjarlægð skrást bylgjur sem hafa komist niður á um 4 km dýpi. Bylgjuferlarnir eru því lengst af á 3-4 km dýpi, þar sem hraðamismunur líkananna er mestur. Á fyrsta tímabilinu, þegar engar stöðvar eru staðsettar yfir skjálftasvæðinu, veldur hinn lági hraði á 2,5-6 km dýpi í SIL-líkaninu því að bylgjur sem skrást á fjarlægari SIL-stöðvar koma of seint. Til að mæta því færast upptök skjálftanna dýpra, niður í hraðari lög. Á seinni tímabilunum þegar viðbótarstöðvarnar tvær eru með, þarf ferðatíminn í þær einnig að samsvara hraðanum í efstu kílómetrunum og takmarka þær því dýptarhlíðrun skjálftanna og öll skjálftaþyrpingin verður grynri. Í Reykjaneslíkaninu er ekki mikið ósamræmi milli tímabila í upphaflegu skjálftastaðsetningunum, en við afstæða staðsetningu þjappast virknin upp að viðbótarstöðin **h2s**, dreifist í dýpi og skjálftar fyrsta tímabils færast neðar. Þetta stafar líklega af of lágum hraða fyrir neðan 3,5 km. Samræmi í upptakadýpi á öllum tímabilum í Suðurlandslíkaninu, í upphaflegu og afstæðu staðsetningunum gefur til kynna að hraðastrúktúrin fyrir ofan og neðan virknina sé viðeigandi og passi vel fyrir þau gögn sem notuð eru til að staðsetja skjálftana. Önnur ástæða þess að Suðurlandslíkanið gefur betri niðurstöður, og betri en Reykjaneslíkanið, er sú að gæði gagna frá Suðurlandi eru almennt meiri en af Reykjaneskaga og þess vegna fleiri stöðvar þaðan sem skila vel ákvörðuðum afstæðum komutímum inn í staðsetningarforritin; bakgrunnssuð, m.a. frá námuvinnslu við Sandskeið, er talsvert á stöðvunum, **san** og **kas** og jafnvel á **bja** og **kro**. Að einhverju leyti getur útgeislunarmynstur skjálftanna einnig haft áhrif, en það getur legið betur við afstöðu stöðva á Suðurlandi, þ.a. þar skráist stærri fasar.

LOKAORÐ

Upptakagreining skjálfta sem skráðust við niðurdælingu í borholu HE-21 við Hverahlíð á Hellisheiði í febrúar 2006 gefur mismunandi niðurstöður eftir því hvaða hraðalíkan er notað, en bestu niðurstöðurnar fást með því að nota hraðalíkan sem lýsir skorpustrúktúr á Suðurlandi. Þá fæst mest samræmi í staðsetningar og vísbendingar sjást um nær lóðrétta (83°) sprungu, sem teygir sig u.þ.b. 1 km norðaustur frá borholunni í stríkstefnu 31° (sjá mynd 9). Virknin á sprungunni er á u.þ.b. 1-2 km dýpi, sem svarar til neðri hluta borholunnar, en botn hennar er við 2,2 km dýpi. Hreyfingar á brotinu eru að mestu leyti normalfærslur (sjá mynd 11).

Með uppsetningu viðbótarstöðvanna í námunda við borholuna á meðan á niðurdælingunni stóð, jókst næmni kerfisins til að skrá smáskjálfta til muna þannig að við bættust 44 skjálftar á stærðarbilinu -0,2 til 0,7. Þar með jókst upplýsingamagnið sem hægt var að nota til að kortleggja virk brot. Gögnin frá minnstu skjálftunum voru þó mikið trufluð af nálægum umhverfishávaða, eins og t.d. frá umferð á borholuplaninu og skiluðu takmörkuðum upplýsingum. Vegna bakgrunnshávaða sáust minnstu skjálftarnir ekki í meiri fjarlægð en um 20 km.

Afstaða viðbótarstöðvanna til virkninnar var ekki sú ákjósanlegasta. Líklega hefði gengið betur að skorða staðsetningar skjálftanna ef a.m.k. önnur stöðin hefði verið a.m.k. 2 km fjær virkninni. Þá hefði hávaði frá borholuplaninu minnkað, og útfallshorn og bylgjubrautir til viðbótarstöðvanna frá öllum skjálftunum verið næstum þau sömu. Svipað útfallshorn eykur víxlfylgni milli bylgna frá mismunandi skjálftum og eykur þar með nákvæmni afstæðra ferðatímamælinga. Svipaðar bylgjubrautir tryggja að mismunur í ferðatímum stafar eingöngu af fjarlægðarmismun, en ekki af mismunandi hraðastrúktúr. Bæði þessi atriði eru grundvallaratriði fyrir því að upptakagreining virki.

Af þessari tilraunauppsetningu má draga þann lærdóm að hægt er að auka næmni SIL-kerfisins tímabundið í námunda við áhugaverða skjálftavirkni með því að setja upp nokkrar færanlegar mælistöðvar og kortleggja þar virkar sprungur með upptakagreiningu. En til að ná enn betri árangri er vænlegra að nota fleiri viðbótarstöðvar (3-5) og koma nálægustu stöðvum fyrir í heldur meiri fjarlægð (>2 km) frá virkninni. Til að minnka áhrif viðvarandi umhverfishávaða á Helligheiðarsvæðinu mætti líka kanna möguleika á uppsetningu varanlegrar SIL-stöðvar í borholu á Helligheiðar-/Hengilssvæðinu.

HEIMILDIR

- Goldstein, P., og L. Minner, 1996. SAC2000: Seismic Signal Processing and Analysis Tools For the 21st Century, *Seis. Res. Lett.*, 67, 39.
- Goldstein, P., D. Dodge og M. Firpo, 2002. SAC2000: Signal processing and analysis tools for seismologists and engineers, UCRL-JC-135963, Invited contribution to the *IASPEI International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*.
- Kristín S. Vogfjörð, 2000. Kortlagning brotflata með smáskjálftum í nágrenni Grændals. *Orkustofnun, skýrsla OS-2000/031*.
- Kristín S. Vogfjörð, G. Nolet, W. J. Morgan, R. J. Allen, R. Slunga, B. H. Bergsson, P. Erlendsson, G. Foulger, S. Jakobsóttir, B. Julian, M. Pritchard, S. Ragnarsson og R. Stefánsson, 2002. Crustal Profiling in Iceland using earthquake source arrays, *AGU Fall Meeting*, Abstract S61C-1161, San Francisco, CA, 6-10 December, 2002.
- Kristín S. Vogfjörð, Sigurlaug Hjaltadóttir og R. Slunga, 2005a. Volcano-tectonic Interaction in the Hengill Region, Iceland during 1993-1998. *Geophysical Research Abstracts*, 7, 09947.
- Kristín S. Vogfjörð, Sigurlaug Hjaltadóttir og R. Slunga, 2005b. The M~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.
- PASSCAL Instrument Center, software, linux rmps, 2006.
<ftp://ftp.passcal.nmt.edu/passcal/software/linux/>
- Sigurður Th. Rögnvaldsson, Ágúst Gudmundsson og 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 Ragnar 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, *Greinargerð Veðurstofu Íslands*, 06001, VÍ-ES-01.
- 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.

VIDAUKI

Upphafstími, staðsetningar og stærðir afstætt staðsettra skjálfta á Hellisheiði 4.-22. febrúar 2007.

dd=mánaðardagur

lengd og breidd er í gráðum; dýpi í km

del_la/lo/h=algild ósvissa í km í lengd/breidd/dýpi

rld_la/lo/h=afstæð óvissa í km í lengd/breidd/dýpi

fj_gr=fjöldi hópa sem skjálftinn er í

M_{lw}=lókal vægisstærð skjálfta

dd	tími	lengd	breidd	dýpi	del_la	del_lo	del_h	rld_la	rld-lo	rld-h	fj_gr	M _{lw}
4	19:16:24.1826	64.0130808	-21.3377750	1.53907	0.0259	0.0216	0.0309	0.0143	0.0088	0.0197	2	0.44
4	19:45:43.5881	64.0126776	-21.3389033	1.44233	0.0210	0.0207	0.0237	0.0081	0.0044	0.0121	2	0.61
4	20:44:19.2167	64.0146262	-21.3348604	1.57249	0.0311	0.0246	0.0408	0.0138	0.0076	0.0166	2	0.48
4	21:30:46.3806	64.0141993	-21.3384816	1.47902	0.0222	0.0222	0.0303	0.0045	0.0029	0.0078	2	1.10
4	21:58:54.9593	64.0162803	-21.3321544	0.65011	0.0258	0.0228	0.0259	0.0146	0.0117	0.0205	2	-0.38
5	00:04:06.1392	64.0146232	-21.3322905	1.42969	0.0230	0.0221	0.0296	0.0174	0.0103	0.0200	2	1.84
5	11:28:05.6236	64.0129273	-21.3388978	1.38746	0.0200	0.0204	0.0204	0.0055	0.0029	0.0077	2	1.35
5	20:08:24.4938	64.0120241	-21.3337300	0.72261	0.0266	0.0291	0.0413	0.0149	0.0191	0.0303	2	0.45
5	20:32:51.2330	64.0165812	-21.3335942	1.21678	0.0335	0.0251	0.0418	0.0217	0.0112	0.0234	2	0.52
7	01:33:35.1803	64.0127798	-21.3388322	1.43556	0.0223	0.0210	0.0242	0.0105	0.0055	0.0119	2	0.27
7	01:53:04.8800	64.0129981	-21.3315620	0.76680	0.1009	0.0972	0.1360	0.1031	0.0995	0.1360	2	0.37
7	02:30:28.4383	64.0153885	-21.3339316	1.32448	0.0308	0.0325	0.0526	0.0313	0.0312	0.0478	2	0.69
7	03:33:22.8564	64.0126178	-21.3381635	1.40185	0.0449	0.0444	0.0426	0.0216	0.0109	0.0261	3	0.99
7	05:01:37.0890	64.0135082	-21.3328026	1.28586	0.0552	0.0594	0.0758	0.0302	0.0485	0.0605	3	-0.16
7	06:04:36.5748	64.0123373	-21.3383989	1.45085	0.0457	0.0447	0.0514	0.0166	0.0087	0.0299	3	0.56
7	07:18:05.7681	64.0124838	-21.3386612	1.39271	0.0457	0.0447	0.0463	0.0166	0.0086	0.0245	3	0.47
17	01:02:33.1090	64.0160454	-21.3387181	1.56724	0.0486	0.0847	0.0565	0.0203	0.0155	0.0204	3	0.18
17	05:55:46.6483	64.0082640	-21.3361875	1.73391	0.0404	0.0239	0.0339	0.0337	0.0656	0.0314	2	0.46
17	08:14:59.4864	64.0048730	-21.3072968	1.22686	0.2398	0.1606	0.1475	0.2398	0.1834	0.1606	2	-0.04
17	14:11:50.1939	64.0111684	-21.3353978	1.43375	0.1882	0.1346	0.1002	0.1947	0.1337	0.1010	4	0.32
21	01:42:04.9253	64.0104798	-21.3317971	1.53583	0.2558	0.5924	0.1992	0.2546	0.5964	0.2000	2	0.31
21	03:20:16.5478	64.0041755	-21.3731169	0.11148	0.5015	0.5960	0.5767	0.5037	0.5977	0.5776	3	0.15
21	05:19:30.3713	64.0066489	-21.3200137	1.27349	0.8743	1.0035	0.5592	0.8756	1.0049	0.5612	3	-0.13
21	05:40:27.8293	64.0033617	-21.3453395	1.51255	0.8191	0.9304	0.1966	0.8204	0.9313	0.1993	5	0.22
21	06:26:31.4703	64.0124846	-21.3386874	1.40631	0.0450	0.0479	0.0374	0.0188	0.0191	0.0232	5	0.98
21	06:29:05.0898	64.0128056	-21.3353908	1.49548	0.0629	0.0518	0.0415	0.0477	0.0280	0.0590	5	0.19
21	07:58:05.6429	64.0123507	-21.3032260	0.14168	0.2522	0.2764	0.5118	0.2719	0.3730	0.3751	2	-0.31
21	08:10:44.1380	64.0149036	-21.2814872	1.72605	0.4359	0.6815	0.5654	0.4722	0.7041	0.5795	1	0.05
21	08:20:39.7061	64.0069845	-21.3503534	1.09250	0.2895	0.8062	0.1956	0.2919	0.8080	0.1961	5	-0.16
21	08:20:41.8323	64.0033435	-21.3650550	1.61285	0.5564	0.6790	0.1615	0.4312	0.6988	0.1618	5	0.41
21	08:44:25.1342	64.0064239	-21.3421612	0.74151	0.2191	0.7835	0.2033	0.2242	0.7943	0.2197	4	0.07
21	08:52:01.3141	64.0066733	-21.3350098	1.49572	0.1848	0.4509	0.1951	0.1903	0.4079	0.1861	6	0.11
21	09:17:42.7568	64.0126740	-21.3023546	0.78102	0.5607	0.7604	0.6667	0.5616	0.7630	0.6682	4	0.23
21	09:32:11.5354	64.0127982	-21.3161010	1.49443	0.3054	0.7848	0.6260	0.2821	0.7927	0.6360	4	-0.03
21	10:07:08.2140	64.0032323	-21.3479187	1.57784	0.6973	0.9328	0.4192	0.6941	0.9340	0.4203	5	0.11
21	12:24:13.2764	64.0171490	-21.3348777	1.42491	0.1783	0.1937	0.1388	0.1840	0.1943	0.1430	5	0.19
21	12:45:45.1642	64.0135522	-21.3447574	2.14411	0.1068	0.1510	0.1022	0.1179	0.1632	0.0926	4	1.11
21	13:05:35.6830	64.0123717	-21.3398877	1.46136	0.1684	0.4708	0.1831	0.1650	0.4764	0.1745	6	-0.02
21	13:11:19.8398	64.0141880	-21.3190349	1.45667	0.4974	0.7378	0.5123	0.4974	0.7395	0.5199	4	0.23
21	13:42:22.7587	64.0128109	-21.3299953	1.38533	0.2035	0.2457	0.1278	0.1509	0.2985	0.1219	5	0.08
21	14:01:48.8723	64.0141667	-21.3423744	1.65525	0.0612	0.0671	0.0644	0.0508	0.0481	0.0666	5	0.96
21	15:39:52.6446	64.0116428	-21.3332056	1.29988	0.1151	0.0724	0.0727	0.1119	0.0630	0.0774	5	0.30
21	16:32:24.1787	64.0157425	-21.3249754	1.40775	0.0511	0.0876	0.0567	0.0200	0.0553	0.0384	5	0.32
21	16:32:38.4411	64.0166472	-21.3314600	1.49430	0.0516	0.0858	0.0676	0.0234	0.0668	0.0409	5	0.31
21	16:33:42.2793	64.0119272	-21.3447162	2.00517	0.2209	0.3328	0.1314	0.2257	0.3359	0.1353	5	0.61
21	17:10:17.2836	64.0130645	-21.3383588	1.81206	0.0528	0.0479	0.0514	0.0439	0.0231	0.0506	5	2.56

21	17:28:13.2792	64.0120262	-21.3349089	1.91126	0.0553	0.2422	0.0865	0.0387	0.2471	0.0924	4	0.53
21	17:37:01.7655	64.0125676	-21.3388416	2.04433	0.1062	0.1174	0.0679	0.1043	0.1126	0.0738	4	1.18
21	18:22:07.4622	64.0135913	-21.3361821	1.60368	0.0243	0.0231	0.0251	0.0087	0.0046	0.0081	2	1.31
21	19:45:30.2758	63.9969192	-21.3618253	1.49764	0.8368	0.7917	0.7380	0.8380	0.7924	0.7391	4	0.20
21	20:17:53.8487	64.0127203	-21.3361070	1.66350	0.2580	0.5581	0.0896	0.2438	0.5589	0.0766	4	0.29
21	21:40:29.1605	64.0052193	-21.3306536	1.25871	0.1201	0.1629	0.0999	0.1132	0.1629	0.1092	3	0.23
21	21:40:37.2189	64.0091404	-21.3407646	1.76397	0.0515	0.0533	0.0495	0.0367	0.0376	0.0468	4	0.36
21	21:40:45.2858	64.0088290	-21.3448443	1.42326	0.0740	0.0928	0.0655	0.0670	0.0919	0.0728	4	1.04
21	21:40:54.0440	64.0107525	-21.3403140	1.65634	0.0487	0.0457	0.0567	0.0335	0.0273	0.0558	4	1.63
21	21:42:11.3978	64.0099112	-21.3423552	1.49732	0.0429	0.0434	0.0308	0.0298	0.0206	0.0168	4	1.67
21	21:43:15.9236	64.0096608	-21.3394772	1.30845	0.0825	0.0921	0.0457	0.0787	0.0871	0.0408	4	0.66
21	21:43:17.8976	64.0145327	-21.3405682	1.23501	0.0876	0.0602	0.0468	0.0749	0.0485	0.0402	4	1.04
21	21:43:49.3386	64.0107164	-21.3407733	1.58174	0.0460	0.0461	0.0305	0.0336	0.0228	0.0223	4	1.10
21	21:43:55.2819	64.0100649	-21.3416293	1.58155	0.0729	0.0536	0.0408	0.0705	0.0351	0.0323	4	0.97
21	22:09:07.7846	64.0047173	-21.3630384	0.73774	0.4906	0.8844	0.5015	0.4920	0.8852	0.5014	4	-0.17
21	22:14:50.2656	64.0030489	-21.3615429	0.76036	0.7226	1.2887	1.3866	0.7182	1.2895	1.3823	3	-0.06
21	22:41:35.1893	64.0134159	-21.3337355	1.44426	0.3937	1.0054	0.4439	0.3904	1.0064	0.4668	3	-0.40
21	22:52:21.2677	64.0122220	-21.3387887	1.42982	0.0515	0.0580	0.0431	0.0404	0.0442	0.0421	3	0.18
21	23:12:57.5869	64.0133898	-21.3364650	1.64529	0.0588	0.0496	0.0545	0.0628	0.0246	0.0564	3	1.69
21	23:32:40.7306	64.0120094	-21.3374074	2.06618	0.2198	0.1131	0.0873	0.2246	0.1095	0.0900	3	0.46
21	23:33:39.8244	64.0034991	-21.3463850	1.87928	0.2286	0.1114	0.0966	0.2347	0.1056	0.0989	3	0.47
22	00:56:12.3044	64.0184549	-21.3315890	1.64580	0.0446	0.0266	0.0353	0.0359	0.0157	0.0342	2	0.35
22	00:59:35.3262	64.0133674	-21.3303267	1.46555	0.0504	0.2449	0.1668	0.0378	0.2524	0.1786	2	-0.02
22	16:26:42.1012	64.0096056	-21.3369400	2.00205	0.0571	0.1553	0.0814	0.0540	0.1574	0.0831	2	0.63