



Sprungukortlagning við Þeistareyki  
og Bjarnarflag með  
háupplausnarstaðsetningum  
smáskjálfta

## Lykilsíða



Skýrsla LV nr: LV-2011-116

Dags: Desember 2011

Fjöldi síðna: 44

Upplag: 8

Dreifing:

- Birt á vef LV  
 Opin  
 Takmörkuð til

Titill: Sprungukortlagning við Þeistareyki og Bjarnarflag með háupplausnarstaðsetningum smáskjálfta

Höfundar/fyrirtæki: Sigurlaug Hjaltadóttir og Kristín S. Vogfjörð, Veðurstofu Íslands

Verkefnisstjóri: Ásgrímur Guðmundsson Kristín S. Vogfjörð f.h. Veðurstofu Íslands

Unnið fyrir: Landsvirkjun

Samvinnuaðilar: \_\_\_\_\_

Útdráttur: Afstæðar staðsetningar smáskjálfta sem mældust í SIL-skjálftanetinu frá árinu 1993 til fyrri hluta ársins 2011 í nágrenni Þeistareykja og Bjarnarflags eru notaðar til þess að kortleggja virkar sprungur á svæðunum. Smáskjálftavirkni á þessum svæðum verður ekki í hrinum eins og annars staðar í gosbeltinu heldur verður tiltölulega jafnt og þétt og flestar sprungurnar eru virkar meirihluta tímabilsins sem kortlagningin nær yfir. Alls eru á annan tug sprungna og minni þyrpinga kortlagðar. Ein löng sprunga er virk við Bjarnarflag á meðan virknin á Þeistareykjasvæði hópast í margar litlar þyrpingar eða brot sem raðast að mestu leyti á á N-S línu vestan í Bæjarfjalli. Einnig má greina venslaða sprungu til austurs frá þessari N-S-sprungustefnu, norðan í Bæjarfjalli. Þessar skjálftaþyrpingar fylgja að mestu leyti ummerkjum um jarðhita á yfirborði

## Lykilorð:

Þeistareykir, Bjarnarflag, Námaskarð, smáskjálftar, skjálftavirkni, jarðhiti, brotpletir, upptakagreining

ISBN nr:

Samþykki verkefnisstjóra  
Landsvirkjunar



# Sprungukortlagning við Þeistareyki og Bjarnarflag með háupplausnarstaðsetningum smáskjálfta

Höfundar:  
Sigurlaug Hjaltadóttir  
Kristín S. Vogfjörð



Skýrsla VÍ 2011/016

ISSN 1670-8261

Desember 2011



## Efnisyfirlit

1	Inngangur.....	7
2	Gögn .....	9
	2.1 Skjálftavirkni á Þeistareykjasvæðinu .....	9
	2.1 Skjálftavirkni á Bjarnarflagssvæðinu .....	10
3	Aðferðir .....	11
	3.1 Afstæðar jarðskjálftastaðsetningar .....	11
	3.2 Samtúlkun skjálftaþyrpinga og brotlausna .....	11
	3.3 Hraðalíkön .....	12
4	Úrvinnsla og túlkun .....	13
	4.1 Þeistareykjasvæði .....	14
	4.2 Bjarnarflag .....	20
5	Samantekt .....	25
6	English summary .....	30
	Heimildir .....	31
	Viðauki A. Dreifing skriðhorna fyrir kortlagðar sprungur .....	34
	Viðauki B. Kort af endurstaðsettum skjálftum í mismunandi hraðalíkönum.....	37

## Myndaskrá

Mynd 1. Skjálftar á Bjarnarflags-Kröflu-Þeistareykjasvæðinu, sem staðsettir eru með SIL-kerfinu og í SIL-hraðalíkani á árunum 1993–2011.....	8
Mynd 2. Uppsafnaður fjöldi skjálfta á Þeistareykjasvæðinu sem fall af tíma.....	9
Mynd 3. Uppsafnaður fjöldi skjálfta á Bjarnarflagssvæðinu sem fall af tíma. ....	10
Mynd 4. Einvíð hraðalíkön fyrir P-bylgju ( $V_p$ ).....	13
Mynd 5. Upphaflegar staðsetningar skjálfta á Þeistareykjasvæði (SIL-líkan).....	15
Mynd 6. Endurstaðsettir skjálftar á Þeistareykjasvæði í hraðalíkönunum þremur sem prófuð voru á þessu svæði.....	16
Mynd 7. Sprungur/þyrpingar sem greindar voru á Þeistareykjasvæði. ....	17
Mynd 8. Þyrpingar 03–14 sem greindar voru við Þeistareyki.....	19
Mynd 9. Upphaflegar staðsetningar við Bjarnarflag og í Búrfellshrauni.....	21
Mynd 10. Endurstaðsettir skjálftar í hraðalíkönunum fjórum sem prófuð voru á þessu svæði.....	22
Mynd 11. Sprungur sem greindar voru við Bjarnarflag.....	23
Mynd 12. Tveir skástígir hlutar sprungu 03 við Bjarnarflag, 05-syðri hluti og 06-nyrðri hluti.....	24
Mynd 13. Endurstaðsettir skjálftar við Bæjarfjall-Þeistareyki.....	26

Mynd 14. Endurstaðsettir skjálftar við Bjarnarflag.....	27
---	----

## **Töfluskra**

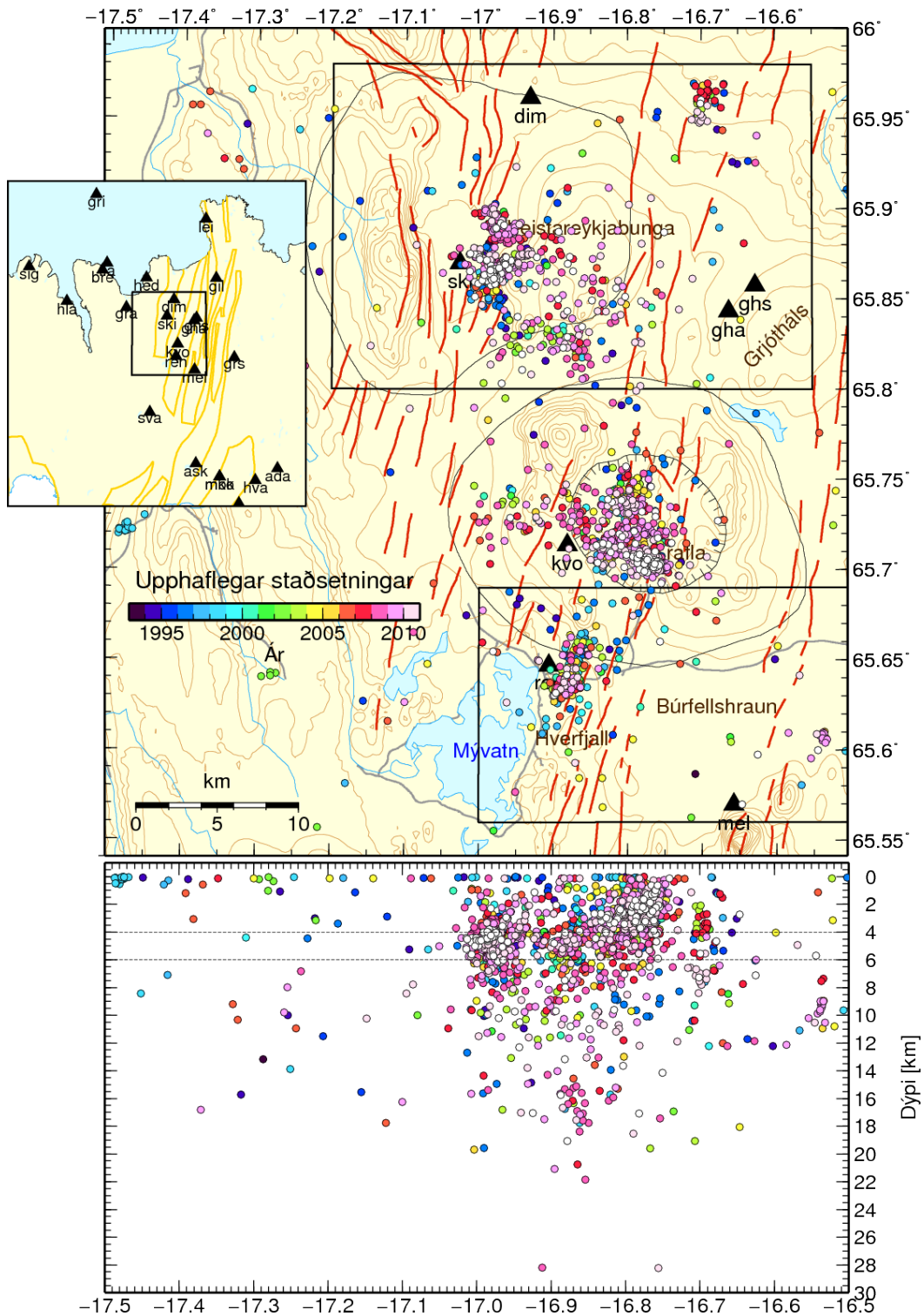
Tafla 1. Helstu upplýsingar um þær breytur sem voru valdar fyrir endurstaðsetningu.....	14
Tafla 2. Greining á þyrpingum/sprungum á Þeistareykjasvæði og helstu stærðir.....	20
Tafla 3. Greining á þyrpingunum Bjarnarflagssvæði.....	25

# 1 Inngangur

Fyrstu stafrænu jarðskjálftastöðvarnar á Norðurlandi voru settar upp árið 1993 (**gil, gra, gri, lei, sig**). Árið 1994 var einni stöð bætt við (**hla**) og 1996 bættust aðrar þrjár við (**grs, hrn, ren**), og var þá fyrsta stöðin, Reynihlíð (**ren**) komin á Bjarnarflags-Kröflu-Þeistareykja-svæðið. Reyndar hafði Reynihlíðarstöðin verið sett upp snemma árs í Kröflu, en ekki tókst vel til með staðsetningu og var stöðin því færð í Reynihlíð í lok ársins. Árið 1998 bættist við ein stöð (**sva**) og þrjár á árinu 2000 (**hed, bre, fla**). Loks, sumarið 2003, kom önnur stöð inn á Kröflusvæðið. Hún var staðsett við Krókóttuvötn (**kvo**) en hún var jafnframt fyrsta stöðin í Bjarnarflags-Kröflu-Þeistareykjanetinu (Kristín S. Vogfjörð, 2000). Eftir það varð hlé á stöðvauppbyggingu en haustið 2007 fór uppbygging aftur af stað að ósk Landsvirkjunar. Þá var ný stöð sett upp á Grjóthálsi (**ghs**) og haustið 2009 þrjár til viðbótar: í Búrfellshrauni (**mel**), á Dimmadalsási (**dim**) og í Skildingahrauni (**ski**), auk þess sem stöðin á Grjóthálsi var færð eilítið sunnar (**ghs** flutt í **gha**). Tilgangur stöðvauppbyggingar á svæðinu var að auka næmni *SIL* kerfisins og fjölga þar með mældum smáskjálftum með það fyrir augum að kortleggja virkar sprungur á öllum þremur svæðum með afstæðum háupplausnarstaðsetningum jarðskjálfta (Slunga o.fl., 1995), en sú aðferð hefur gefist vel við kortlagningu sprungna á jarðhitasvæðum (Sigurður Th. Rögnvaldsson o.fl., 1999; Kristín S. Vogfjörð o.fl., 2005; Kristín S. Vogfjörð & Sigurlaug Hjaltadóttir, 2007; Sigurlaug Hjaltadóttir & Kristín S. Vogfjörð, 2006, 2009a, 2009b; Sigurlaug Hjaltadóttir, 2010).

Í þessari skýrslu er unnið úr smáskjálftum sem skráðir hafa verið á Þeistareykjum fram til mars 2011 og í Bjarnarflagi fram til maí 2011 og sprungur kortlagðar á báðum jarðhitasvæðum. Skjálftar þessa tímabils eru sýndir á korti á mynd 1.



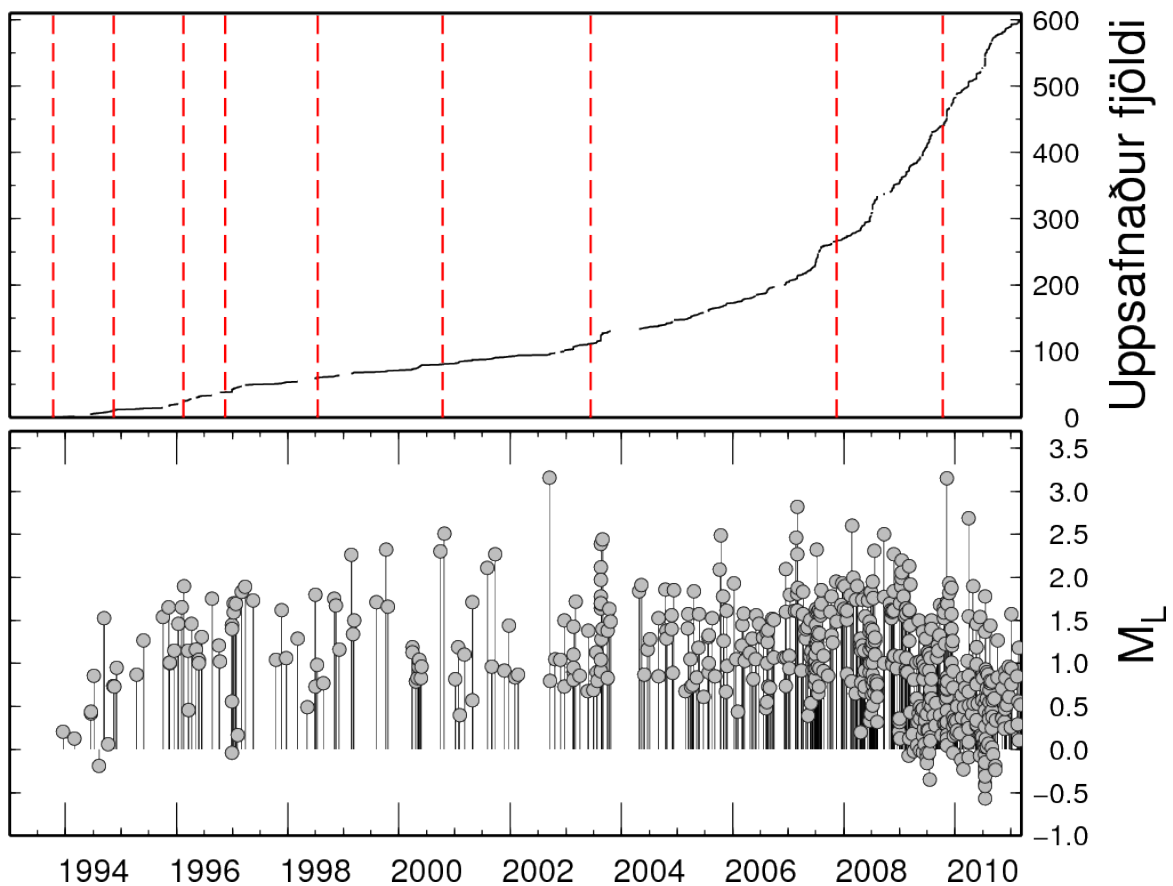


Mynd 1. Efri mynd sýnir skjálfta á Bjarnarflags-Kröflu-Peistareykjasvæðinu, sem staðsettir eru með SIL-kerfinu og í SIL-hraðalíkani (Ragnar Stefánsson o.fl., 1993) á árunum 1993–2011. Skjálftarnir eru litadír eftir því hvenær á tímabilinu þeir urðu og er litaskalinn sýndur vinstra megin á myndinni. Boxin á kortinu afmarka Peistareykjasvæðið og Bjarnarflagssvæðið sem unnið er með í þessari skýrslu. Rauðar línur tákna kortlagðar yfirborðssprungur (Haukur Jóhannesson & Kristján Sæmundsson, 1998). Neðra þversniðið sýnir dreifingu skjálftanna í dýptarsniði séð úr suðri. Viðmiðunarlínur eru á 4 og 6 km dýpi.

## 2 Gögn

### 2.1 Skjálftavirkni á Þeistareykjasvæðinu

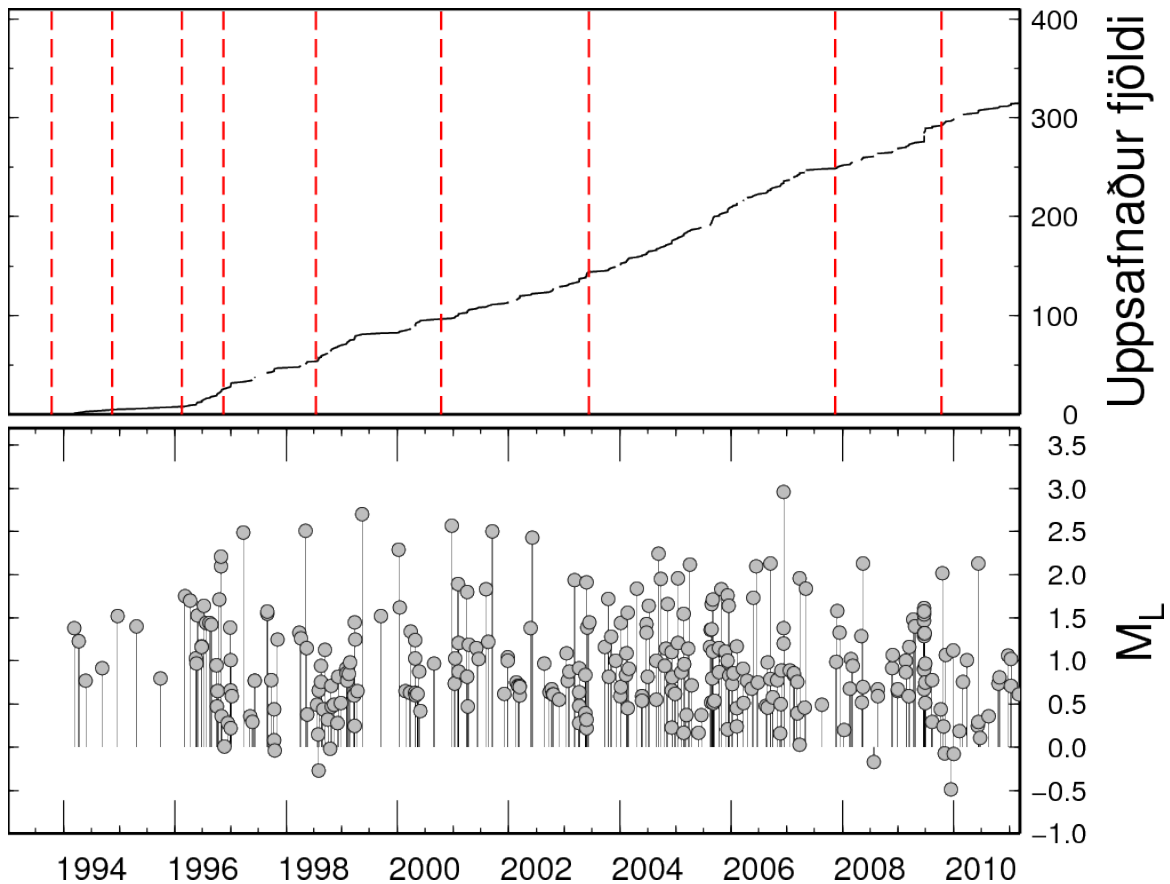
Frá árinu 1993 og fram í júní 2003, þegar stöðin við Krókóttuvötn var sett upp, höfðu einungis um 100 skjálftar verið staðsettir með *SIL*-kerfinu á Þeistareykjasvæðinu, þ.e. á svæðinu sem nær frá Lambafjöllum í vestri og austur að Grjóthálsi og frá Dimmadalsási í norðri og suður að Gæsafjöllum. Fram að þeim tíma var Reynihlíð nálægasta stöðin, í 24 km fjarlægð frá Þeistareykjum. Með tilkomu Krókóttuvatna-stöðvarinnar minnkaði fjarlægð í nálægustu stöð í 15 km (mynd 1) og jók það næmni kerfisins og fjölda staðsettra skjálfta á Þeistareykjum. Stöðin á Grjóthálsi, í 16 km fjarlægð, var sett upp haustið 2007 en aukningar í mældri virkni fór þó að gæta fyrr, eða á fyrri hluta árs 2007. Með tilkomu stöðvanna tveggja í Skildingahrauni og á Dimmadalsási haustið 2009 var nálægasta stöð við Þeistareyki komin í aðeins 3 km fjarlægð og jókst þá næmnin til muna, eins og sjá má á mynd 2, en þá fjölgar allverulega skjálftum undir M1 að stærð. Einnig má sjá að u.þ.b. frá upphafi árs 2010 dregur úr fjölda skjálfta yfir M1. Svo virðist því sem aukin virkni hafi verið á Þeistareykjum á tímabilinu frá því snemma árs 2007 fram til 2010. Heildarfjöldi staðsettra skjálfta, sem mældust á Þeistareykjasvæðinu frá 1993 fram í mars 2011, er 600 á stærðarbilinu  $-0,6 \leq M \leq 3,2$ .



Mynd 2. Efri mynd: Uppsafnaður fjöldi skjálfta á Þeistareykjasvæðinu sem fall af tíma. Rauðu brotalínurnar sýna hvenær stöðvum var bætt við kerfið 1993: gra; 1994: hla; 1996: kra->ren, grs; 1998: sva; 2000: bre, fla, hed; 2003: kvo; 2007: ghs; 2009: dim, mel, ski. Neðri mynd: Stærðir skjálftanna sem fall af tíma.

## 2.1 Skjálftavirkni á Bjarnarflagssvæðinu

Með tilkomu jarðskjálftamælistöðvarinnar í Kröflu snemma árs 1996, í 9 km fjarlægð frá Bjarnarflagi, varð merkjanleg aukning í fjölda staðsettra skjálfta á jarðhitasvæðinu eins og sjá má á uppsafnuðum fjölda skjálfta með tíma sem sýndur er á mynd 3. Enn frekari aukning varð svo seinna á árinu, þegar stöðin var flutt í Reynihlíð í einungis 2 km fjarlægð frá Bjarnarflagi. Aftur varð merkjanleg aukning í fjölda staðsettra skjálfta með tilkomu stöðvarinnar í Krókóttuvötnum í 9 km fjarlægð. Svo virðist sem dregið hafi úr skjálftavirkni í Bjarnarflagi frá miðju ári 2007 en Grjóthálsstöðin var sett upp seinna það ár og stöðin við Melhnausa í Búrfellshrauni enn seinna, eða árið 2009. Fjöldi staðsettra skjálfta í Bjarnarflagi frá 1993 til maí 2011 er 326, á stærðarbilinu  $-0,5 \leq M \leq 3,0$ .



Mynd 3. Efri mynd: Uppsafnaður fjöldi skjálfta á Bjarnarflagssvæðinu sem fall af tíma. Rauðu strikin sýna hvenær stöðvum var bætt við kerfið (sjá frekari skýringar með mynd 2). Neðri mynd: Stærðir skjálftanna sem fall af tíma. Greinileg aukning í fjölda mældra skjálfta verður með tilkomu Kröflustöðvarinnar sem seinna varð Reynihlíðarstöð. Við uppsetningu skjálftastöðvar við Melhnausa í Búrfellshrauni verður einnig breyting á mældri virkni en þá fara að mælast fleiri skjálftar undir  $M_0$ .

## 3 Aðferðir

### 3.1 Afstæðar jarðskjálftastaðsetningar

Bylgjuform frá smáskjálftum mótast af nálægum jarðlagastrúktúr, útgeislunarmynstri skjálftanna og jarðlögunum sem þær fara um á leið sinni frá skjálfta í mælistöð. Ef smáskjálftar eru staðsettir nálægt hver öðrum og nógu langt er í mælistöðina til að farbrautir bylgna sem þeir orsaka, frá upptökunum í mælistöðina, séu sem næst þær sömu, þá má gera ráð fyrir að ferðatímamismunur bylgna frá mismunandi skjálftum stjórnist aðallega af innbyrðis fjarlægðarmismun skjálftanna frá mælistöðinni. Nálæg skjálftabrot í rúmi og tíma stjórnast af sama spennusviði og ef þau verða á sömu sprungunni verður útgeislunarmynstur þeirra og þar með bylgjuformin mjög svipað. Með víxlfylgnireikningum á bæði P- og S-bylgjum frá mismunandi skjálftum á hverri mælistöð er þá hægt að mæla mismunferðatíma bylgna mjög nákvæmlega og þar með einnig reikna út mismunastaðsetningu þeirra mjög nákvæmlega, með allt að tuga metra nákvæmni þegar best lætur. Þannig má kortleggja sprungufletina sem skjálftarnir verða á með góðri upplausn. Gæði niðurstaðna eru þó algerlega háð nákvæmni í tímamælingum, eða klukkunákvæmni í mælistöðinni. Afstæðum staðsetningaradferðum hefur verið beitt víða á síðastliðnum tveimur áratugum og meðal annars við sprungukortlagningu á Íslandi (Got o.fl., 1994; Slunga o.fl., 1995; Waldhauser & Ellsworth, 2000; Sigurlaug Hjaltadóttir, 2010).

Ef farbrautir bylgna frá smáskjálftum í mælistöð eru nógu svipaðar, hefur breytilegur hraðastrúktúr jarðarinnar nógu lítil áhrif til að hægt sé að notast við einvíð hraðalíkön, þar sem hraði breytist einungis með dýpi. Þó hefur komið í ljós að algildar staðsetningar skjálfta geta verið nokkuð breytilegar ef einvíða hraðalíkanið er ekki nógu góð nálgun við raunverulegan hraðastrúktúr, þ.e.a.s. skjálftaþyrpingin öll getur hliðrast til þó að innbyrðis staðsetningar breytist lítið. Þetta kom berlega í ljós við staðsetningu mjög grunnra skjálfta sem voru framkallaðir við niðurdæling í borholu við Hverahlíð á Hellisheiði árið 2006 (Kristín S. Vogfjörð & Sigurlaug Hjaltadóttir, 2007), en hraðalíkan sem ekki átti vel við strúktúrinn nálægt yfirborði olli því þar að skjálftar urðu allt að 2 km of djúpir og breytilegir eftir því hvaða stöðvar voru notaðar við mælingarnar. Þess vegna er nauðsynlegt, ef hraðalíkanið er ekki vel þekkt, að kanna stöðugleika staðsetninganna með tilliti til mismunandi hraðalíkana og mismunandi stöðva.

### 3.2 Samtúlkun skjálftaþyrpinga og brotlausna

Brotlausn skjálfta lýsir þeim tveimur hornréttu skriðflötum (*e. double couple*) sem passa við útgeislunarmynstur hans og ákvarðast hvor flötur af þremur hornum: striki ( $\phi$ ), halla ( $\delta$ ) og skriðhorni ( $\lambda$ ). Skjálftagögnin ein og sér geta ekki greint á milli hvor flatanna tveggja er hinn raunverulegi skriðflötur. Strikstefnan 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).

Til að ákvarða brotlausn skjálfta er notuð svokölluð netleit (*e. grid search*) til þess að finna allar mögulegar samsetningar á  $\phi$ ,  $\delta$  og  $\lambda$  í fjögurra gráða þrepum (Sigurður Th. Rögnvaldsson & Slunga, 1993 & 1994). Útgeislunarmynstrið er síðan reiknað fyrir sérhverja samsetningu og borið saman við mælt útslag svo og skautun P- og S-bylgna á þeim stöðvum sem hægt er að greina hana. Þær samsetningar, sem hafa frávik frá mældu útslagi innan ákveðins viðmiðunargildis og rétta skautun á sem flestum stöðvum, eru geymdar sem mögulegar lausnir. Brotlausnin sem reiknuð er í *SIL* kerfinu inniheldur einungis „double

*couple*“ lausnir, sem þýðir að hún gerir ráð fyrir skriði á sléttum fleti og inniheldur m.a. ekki rúmmálsþátt, eins og t.d. gliðnun á sprungufletinum.

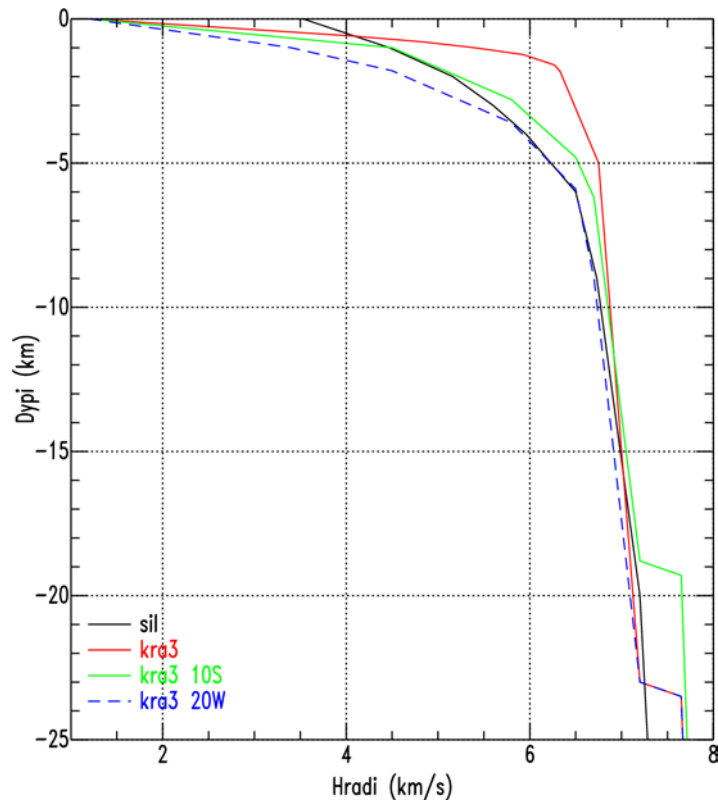
Með samtúlkun dreifingar margra smáskjálfta (skjálftadreifarinnar) og brotlausna skjálftanna er hægt að ákvarða hvor brotlausnaflöturinn samsvarar hinum raunverulega brotflati og jafnframt að skilgreina sprungur og meta hreyfingu á þeim. Skjálftar sem virðast vera á sömu sprungu eru valdir og strik og 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 sem 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 (*e. seismic moment*). Skriðhorn er þó ekki hægt að meta ótvírætt nema skautun fyrstu bylgju sé valin á a.m.k. einni stöð. Samtúlkun skjálftadreifar og brotlausna hefur verið nefnd upptakagreining.

### 3.3 Hraðalíkon

Allar venjubundnar staðsetningar skjálfta á Íslandi með *SIL* kerfinu eru framkvæmdar í *SIL* hraðalíkani (Ragnar Stefánsson o.fl., 1993) (mynd 4). Þetta líkan nálgar vel hraðastrúktúr á Vesturlandi, en á síður við á öðrum landsvæðum. Hraðastrúktúr á Kröflusvæðinu hefur verið kannaður m.a. með bylgjubrotsmælingum, þar sem aðalþversniðið liggur frá norð-vestri til suðausturs í gegnum Kröfluöskjuna (Bryndís Brandsdóttir o.fl., 1997). Túlkun niðurstaðna sýnir um 30 km breiðan háhraðastromp undir Kröfluöskjunni, sem nær upp undir yfirborð (sjá skematíska mynd 13 í Bryndís Brandsdóttir o.fl. (1997)) og þynnri skorpu undir öskjunni en í umhverfinu í kring. Breytingar á ferðatíma inni í öskjunni voru einnig túlkaðar með tveimur lághraðalögum í efstu tveimur kílómetrunum og leiða höfundar einnig líkum að því að þessi lághraðalög tengist svæðum innan öskjunnar með hátt poruhlutfall og hátt vatns- og gufuinnihald.

Einvið nálgun á hraðastrúktúr Bryndísar Brandsdóttur o.fl. (1997), með og án lághraðalaganna (*kra3* á mynd 4), hefur áður verið notuð til að staðsetja smáskjálfta í Kröflu árið 1997 (Kristín S. Vogfjörð, 1999) og á Þeistareykjum árið 1999 (Kristín S. Vogfjörð, 2000). Þar sem hér er unnið með skjálfta utan Kröfluöskjunnar, annars vegar á Þeistareykjum, í 18 km fjarlægð NA við öskjuna, og hins vegar í Bjarnarflagi, um 10 km sunnan við öskjuna, eru staðsetningar prófaðar í mismunandi lóðréttum þversniðum í gegnum skematíska háhraðastrompinn: Í honum miðjum (þó án lághraðalaganna) (*kra3*), í 10 km fjarlægð frá miðju hans (*kra3-10S*) og í 20 km fjarlægð frá miðju hans (*kra3-20W*). Líkönin eru teiknuð á mynd 4 og þar sést að þau eru mjög svipuð neðan við 12 km dýpi og helsti mismunur á þeim er hversu hratt hraðinn upp að ~6,5 km/s vex með dýpi. Tilgangurinn með þessum prófunum er að kanna hversu háðar hraðalíkani skjálftastaðsetningarnar eru.

S-bylgjuhraði undir mælistöðinni í Reynihlíð (í 2 km fjarlægð frá Bjarnarflagi) hefur einnig verið kannaður með umbreyttum P->S (*pS*) fösum (*e. receiver function inversion*) frá fjarlægum (*e. teleseismic*) skjálftum (Darbyshire o.fl., 2000). Hraðinn í yfirborðslögum í þessu líkani er nokkurn veginn á milli líkananna tveggja *kra3-10S* og *kra3-20W* og því ekki í ósamræmi við þau líkön sem hér eru prófuð. Neðar í skorpunni víkur þetta líkan að vísu verulega frá þeim líkönum sem hér eru prófuð, en ekki er útilokað að það gæti stafað af því að villur færast á milli breyta í umhverfingunni (*e. „trade off between parameters in the inversion“*). Hraði við yfirborð í *SIL* líkaninu er hærri en í öllum hinum en þegar neðar dregur er hraðinn í því á milli *kra3-10S* og *kra3-20W* líkananna.



Mynd 4. Einvíð hraðalíkön fyrir P-bylgju ( $V_p$ ). Allar upphaflegar skjálftastaðsetningar eru framkvæmdar í SIL líkani (svart). Önnur líkön eru byggð á niðurstöðum bylgjubrotsmælinga á Kröflusvæðinu: kra3 (rautt) nálgar hraðastrúktúr inni í Kröfluöskjunni; kra3-20W nálgar hraðann 20 km vestan við Kröfluöskjuna; kra3-10S nálgar hraðann 10 km sunnan við miðju Kröfluöskjunnar. S-bylgju hraðinn í SIL-líkaninu er ákvarðaður út frá hlutfallinu:  $V_p/V_s=1,78$  en í hinum líkönunum þremur út frá  $V_p/V_s=1,76$ .

## 4 Úrvinnsla og túlkun

Upptakagreining var notuð til þess að endurstaðsetja skjálfta og kortleggja sprungur við Þeistareyki og Bjarnarflag. Skjálftar á báðum svæðum voru fyrst endurstaðsettir í SIL-líkaninu þar sem upphaflegu staðsetningarnar voru fengnar í því líkani. Auk þess voru skjálftarnir staðsettir í 2–3 af þeim einvíðu hraðalíkönunum sem rædd eru í kafla 3.3, eftir því sem við átti. Fyrir endurstaðsetningu var skjálftunum á hvoru svæði skipt upp í hópa með ákveðnum lágmarks- og hámarksfjölda hver, fyrst 6–45 skjálfta í hópi, en lágmarksfjöldi var svo lækkaður í 3 til þess að hægt væri að endurstaðsetja minnstu þyrpingarnar. Einnig var valin stærð þess svæðis sem hver hópur gat spannað ( $r$  í töflu 1) svo og skörun milli hópa ( $d$  í töflu 1). Við val á stærð svæðis er tekið tillit til stærðar þyrpinganna og í hversu mörgum hópum hver skjálfti verður staðsettur. Ákjósanlegt er að lokastaðsetning hvers skjálfta sé fengin með meðaltalsstaðsetningu úr að minnsta kosti 4–6 hópum. Leyfileg hámarksfjarlægð skjálfta í stöð var valin 100 km; þetta var gert til þess að koma í veg fyrir að endurköst af mótum skorpu og möttuls hefðu áhrif á gæði víxlflýgnireikninganna, en endurköst fara að birtast fast á eftir beinu P-bylgjunni á mælistöðvum þegar fjarlægðin fer að nálgast 100 km. Af sömu ástæðum voru gögn frá stöðinni **gri** (Grímsey) vigtuð niður.

Tafla 1. Helstu upplýsingar um þær breytur sem voru valdar fyrir endurstaðsetningu.

Svæði/keysra	Fjöldi skjálfta í hóp	r (km)	d (km)	Hámarks fjarlægð í stöð (km)
Þei/SIL (sil)	6-45	2	1,7	100
Þei/SIL (sil-2)	3-45	3	2	100
Þei/kra3	3-45	3	2	100
Þei/kra3-20W	3-45	3	2	100
Bja/SIL	3-45	3	2	100
Bja/SIL, án ren	3-45	3	2	100
Bja/kra3	3-45	3	2	100
Bja/kra3-20W	3-45	3	2	100
Bja/kra3-10S	3-45	3	2	100

Brotlausnir voru endurkeyrðar miðað við nýjar staðsetningar. Eins og lýst var í kafla 3.2 voru þær brotlausnir valdar fyrir hvern skjálfta sem best falla að sameiginlegum brotflati. Dreifing líklegustu skriðhorna á hverri sprungu var svo teiknuð og má finna á myndum í viðauka A. Á myndunum eru einnig sýnd meðalskriðhorn og vegið meðalskriðhorn á hverri sprungu. Til þess 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. seismic moment*) þegar skriðvigrarnir eru lagðir saman og stórir skjálftar hafa því meira vægi þar. Niðurstöðum verður nú lýst nánar á hvoru svæði fyrir sig.

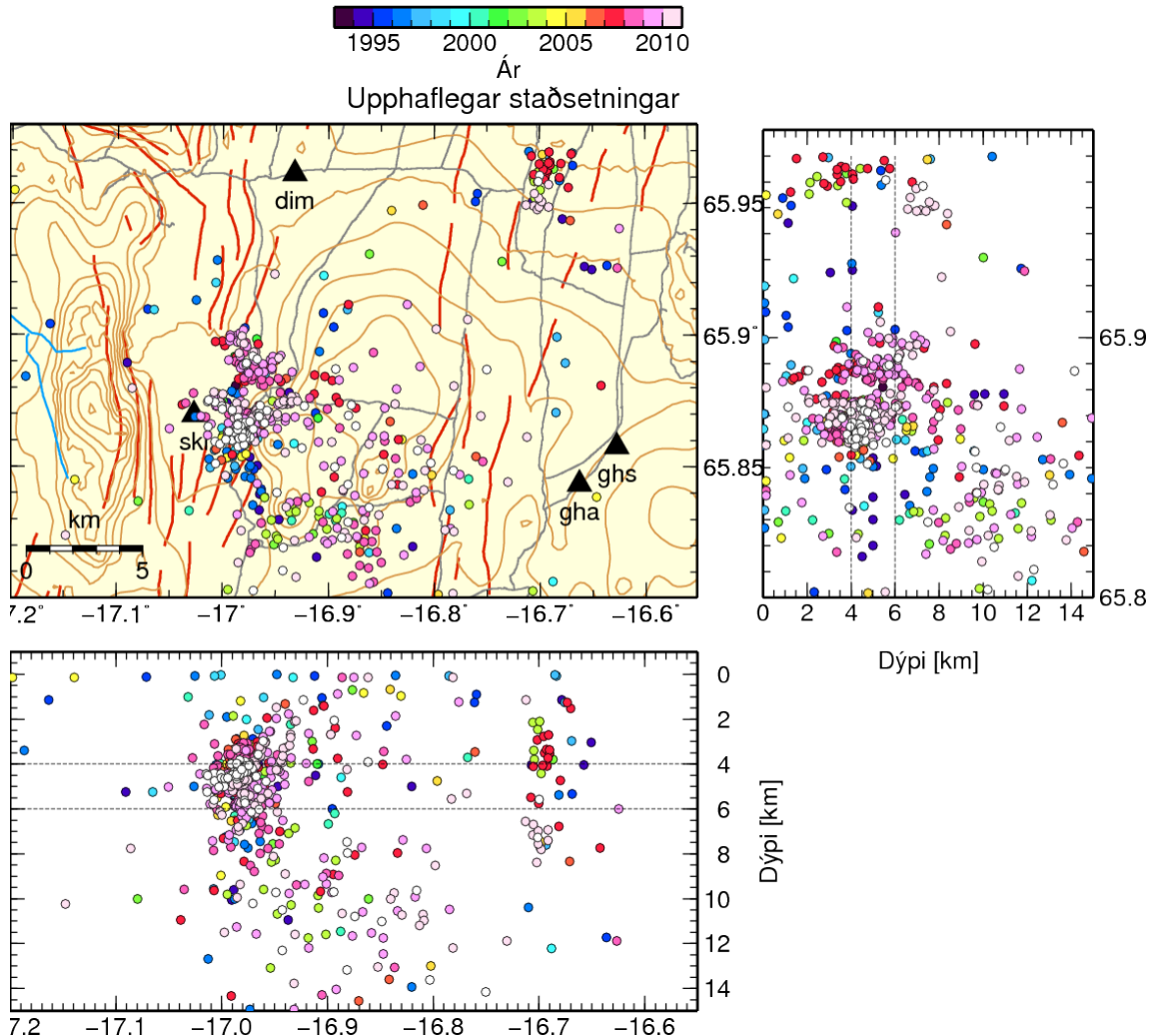
#### 4.1 Þeistareykjasvæði

Upphaflegar staðsetningar skjálfta á Þeistareykjasvæði má sjá á mynd 5. Mestur hluti virkninnar er staðsettur á 2–8 km dýpi vestan og norðan í Bæjarfjalli, önnur þyrping er litlu norðar, en mun dreifðari og nokkru dýpri virkni er staðsett sunnan Þeistareykjabungu. Þriðju þyrpinguna má greina enn norðar, h.u.b. á  $-16,7^\circ\text{A}$  og á milli  $65,95^\circ\text{og } 65,97^\circ\text{N}$ , SSA af Keldunesheiði eða rétt austan Stórhóls.

Til samanburðar má sjá niðurstöður afstæðrar endurstaðsetningar í hraðalíkönunum *SIL* (grænt), *kra3* (blátt) og *kra3-20W* (rautt) á mynd 6. Niðurstöður fyrir hverja keysra eru einnig sýndar sér á myndum B1–B3 í viðauka B. Ef mynd 6 er borin saman við upphaflegu staðsetningarnar á mynd 5 má sjá að skjálftarnir mynda þéttari þyrpingar, bæði lárétt og í dýpi. Virknin liggur aðallega á norðlægru línu vestan í Bæjarfjalli og heldur áfram 1,5–2 km norðar. Grein virkninnar sveigir einnig austur með norðurhlíðum Bæjarfjalls og fylgir þar misgengi áfram til ANA. Þriðja og vestasta þyrpingin liggur vestan við Bæjarfjallið, nærri skjálftastöðinni *ski* (Skildingahrauni).

Lítill munur, að mestu leyti innan við 1 km, er á dýpi skjálftanna í hraðalíkönunum *SIL* og *kra3-20W* og eru flestir skjálftanna á 4–7 km dýpi. Í líkani *kra3* færast skjálftarnir mun ofar og eru flestir þeirra ofan við 3 km dýpi, auk þess sem margir festast við yfirborð og dreifast út frá þyrpingunum. Því er ljóst að líkan *kra3*, sem miðað er við miðju Kröfluöskjunnar, er ekki hentugt til að túlka raunverulegan hraðastrúktúr á þessu svæði. Hraðinn í efstu 5–7 kílómetrunum er of hár og leita skjálftarnir því ofar í lægri hraða auk þess sem þeir færast fjær nálægustu stöðvum. Í fyrri kortlagningu skjálftavirkni á Þeistareykjum, sem mæld var

á lítið tímabundið net skjálftamæla á svæðinu í september 1999, var virknin (25 skjálftar) staðsett í *kra3* hraðalíkani og voru allir skjálftar þá á dýptarbilinu 0,5–2 km (Kristín S. Vogfjörð, 2000). Í ljósi núverandi kortlagningar er það líklega of grunnt. Enginn þessara skjálfta mældist á þáverandi net Veðurstofunnar, enda voru þeir allir litlir, á stærðarbilinu -1,5 til 0,5.

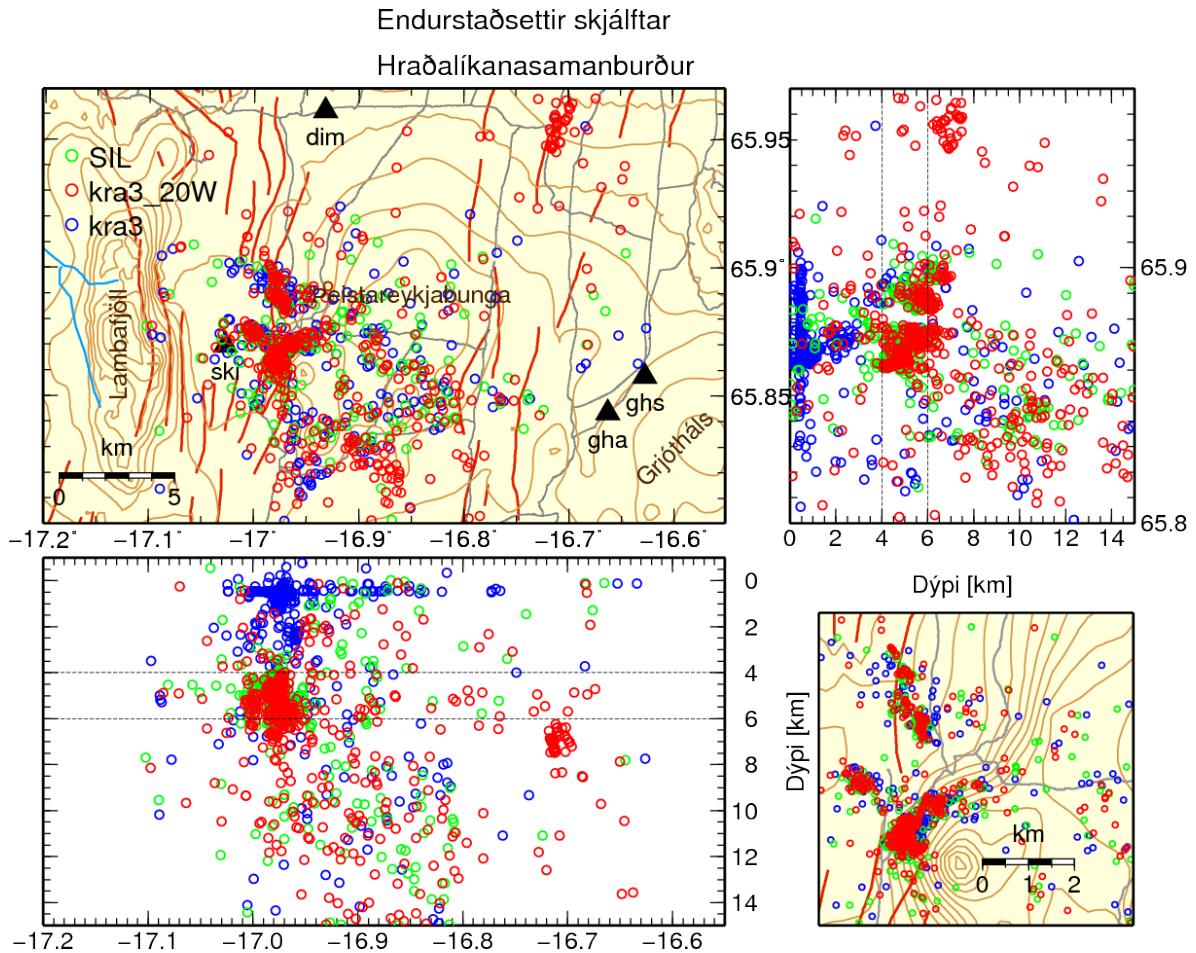


Mynd 5. Upphaflegar staðsetningar skjálfta á Peistareykjasvæði (SIL-líkan). Neðan við kortið er þversnið séð frá suðri en hægra megin er þversnið þar sem horft er á dýpi skjálftanna frá austri. Skjálftarnir eru litaðir eftir aldri. Gráar línur tákna vegslóða, rauðar kortlagðar yfirborðssprungur (Haukur Jóhannesson & Kristján Sæmundsson, 1998). Viðmiðunarlínur eru á 4 og 6 km dýpi.

Til að skoða hversu vel skorðaðar staðsetningarnar voru í SIL-líkaninu var prófað að breyta gildum á fjölda, stærð og skörun hópanna sem skjálftarnir eru staðsettir saman í (sjá töflu 1, línur 1 og 2). Samanburður á þessum tveimur keyrslum leiddi í ljós að staðsetningarnar breyttust lítið og virtust vel skorðaðar. Einnig var prófað að minnka vægi gagna á næstu stöð, *ski*, í líkani *kra3-20W* en áhrif þess voru ekki veruleg, t.a.m. hélt meginvirknin áfram á 4–7 km dýpi, en það bendir til þess að nálgun líkansins að hraðastrúktúr við yfirborð sé ekki fjarri lagi. Líkan *kra3-20W*, sem byggir á bylguferlum á Kröflu-Þeistareykjasvæðinu og nálgar hraðastrúktúr í um 20 km fjarlægð frá Kröflu gefur því einnig vel skorðaðar niðurstöður og staðsetningar í því voru valdar til lokatúlkunar fremur en SIL, sem byggt er á bylguferlum á Vestur- og Suðvesturlandi.



Upphaflega voru skjálftar norður að 65,95°N endurstaðsettir en skjálftum norður að 65,98°N var bætt við í keyrslum í lokalíkaninu sem notað var til frekari túlkunar (*kra3-20W*). Þyrpingin á 69,96°N er tvískipt í upphaflegri staðsetningu og má þar glögg sjá áhrif fjölgunar nálægra stöðva. Skjálftar sem urðu árið 2003 og fyrri hluta 2007 – fyrir uppsetningu **dim**, **ski** og **gha/ghs** stöðvanna – voru staðsettir á 2–4 km dýpi og ögn norðar en skjálftar sem urðu 2010 og 2011 og staðsettir voru á 7–8 km dýpi. Við endurstaðsetningu raðast flestir þessara skjálfta í eina línulega þyrpingu á 6–7,5 km dýpi.



Mynd 6. Endurstaðsettir skjálftar á Þeistareykjavæði í hraðalíkonunum þremur sem prófuð voru á þessu svæði. Svartir þríhyrningar sýna staðsetningu skjálftastöðva. Nyrsta þyrpingin var eingöngu staðsett í líkani *kra3-20W*. Gráar línur tákna vegslóða, rauðar kortlagðar yfirborðssprungur (Haukur Jóhannesson & Kristján Sæmundsson, 1998). Viðmiðunarlínur eru á 4 og 6 km dýpi.

Þær sprungur og þyrpingar sem kortlagðar voru eru sýndar á mynd 7. Vestan Bæjarfjalls raðast virknin í N-S-læga stefnu og í norðurhlíðum fjallsins er þyrping með stefnu ANA. N-S-stefnan heldur áfram nokkru norðan við Þeistareyki við Tjarnarás (í þyrpingum 03-04, skv. skilgreiningu í töflu 2). Stærsta N-S sprungan virðast þó vera samsett úr nokkrum þyrpingum (6 sem inniheldur 7 og 8; 9, 10 og 12), eins og sjá má á mynd 8 þar sem þær eru sýndar í mismunandi litum til frekari aðgreiningar. ANA skjálftadreifin er hugsanlega einnig samsett úr mörgum stuttum, samsíða N-S brotum (mynd 7 og þyrpingar 14 og 15 á mynd 8). Sú túlkun er einnig studd af skjálftakortlagningunni frá 1999, en þá voru 20 skjálftar staðsettir á um 1 km löngu N-S misgengi um 300 m austan við þyrpingu 14 (Kristín S. Vogfjörð, 2000). Í þeirri kortlagningu mældust einnig fjórir skjálftar syðst á

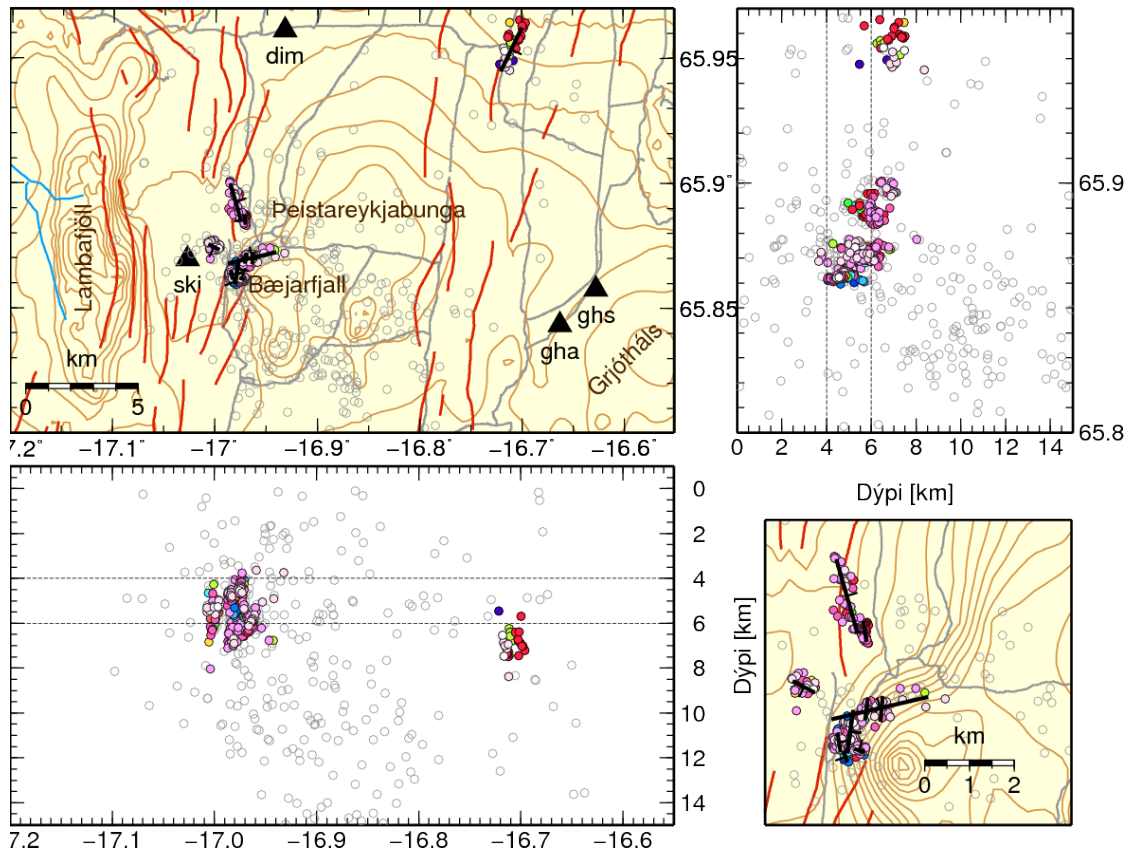
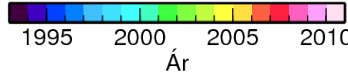
sprungu 03. Helstu stærðir og stefnur fyrir þessar sprungur/þyrpingar er að finna í töflu 2 þar sem stuðst er við sama litakóða. Að neðan er stutt samantekt fyrir hverja sprungu/þyrpingu:

Líkan: kra3–20W

d=2,0, r=3,0

Grátt: aðrir skjálftar

Kortlagðar sprungur/þyrpingar



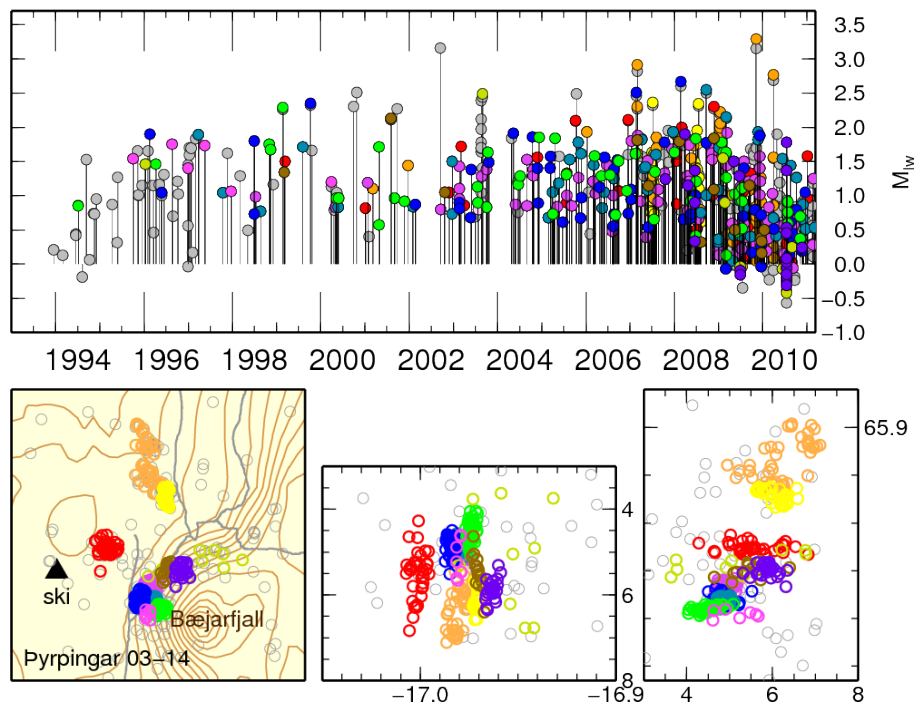
Mynd 7. Sprungur/þyrpingar sem greindar voru á Peistareykjasvæði. Skjálftar sem skilgreina sprungufleti/þéttar þyrpingar eru litaðir eftir aldri, aðrir skjálftar sem mældust á svæðinu eru sýndir sem hringir í gráum lit. Gráar línur tákna vegi og vegslóða, rauðar línur tákna kortlagðar yfirborðssprungur (Haukur Jóhannesson & Kristján Sæmundsson, 1998).

- **03** Um 480 m löng sprunga sem er jafnframt sú línulegasta sem fannst á svæðinu. Flestir skjálftarnir á sprungunni urðu í júní–júlí 2007 (jafnframt þeir fyrstu), júní–ágúst 2008 og í nóvember 2009. Hún hefur strik  $171^\circ$  og  $84^\circ$  halla. 33 skjálftar eru valdir á þennan brotflöt og hægt er að ákvarða brotlausn fyrir 32 þeirra. Skjálftarnir eru allir á 5,5–6,5 km dýpi. Dreifing skriðhorna er mikil og vart hægt að ákvarða eina ákveðna hreyfistefnu af þeim.
- **04** Tæplega 1700 m löng sprunga NNV af sprungu 03, samansett úr tveimur þyrpingum, með sameiginlegt strik  $344^\circ$  og halla  $86^\circ$ . Saman mynda 03 og 04 skástígt mynstur, sem dýpkar til norðurs. Skjálftarnir eru á 5 til rúmlega 7 km dýpi og dýpka til norðurs. 45 skjálftar eru á fletinum og hægt er að ákvarða skriðhorn fyrir þá alla. Aðeins fjórir skjálftanna urðu fyrir 2007, flestir urðu í júlí 2007, 2008,

2009 og í mars-apríl 2010. Allmikil dreifing er á stefnu skriðhorna, þrjár stefnur eru þó ríkjandi, samgengi ásamt vinstri-sniðgengisþætti, hægri-sniðgengisfærsla með minni siggengisþætti eða að mestu samgengishreyfing.

- **05** 500–550 m breið þyrping 36 skjálfta sem urðu á tímabilinu 1998–2011, þó flestir 2008 og 2010. Skjálftarnir liggja flestir á 4–6 km dýpi og líkist þyrpingin því frekar lóðréttum strompi. Besti flötur í gegnum þyrpinguna hefur strik  $117^\circ$  og  $82^\circ$  sem þó eru vart marktækar stærðir vegna lögunar þyrpingarinnar. Hægt er að ákvarða skriðhorn fyrir 32 skjálfta en dreifing skriðhorna var ekki skoðuð fyrir þessa þyrpingu.
- **06** Stærsta N-S-sprungan, liggur vestan í Bæjarfjalli í framhaldi suður af 03 og 04. Brotflöturinn er með strik  $7^\circ$  og halla  $76^\circ$  og er skilgreindur af 146 skjálftum, þar af er hægt að ákvarða skriðhorn fyrir 138. Skjálftarnir eru á 4,5–5,3 km dýpi og innan þessarar sprungu má greina tvær þyrpingar, 07 norðar og 08 sunnar. Skjálftarnir virðast tynast inn jafn og þétt frá 1997 til 2011. Dreifing skriðhorna er fremur lítil og bendir til hægri-sniðgengishreyfingar ásamt álíka stórum eða ögn minni samgengisþætti.
- **07** Þyrping 87 skjálfta á nyrðri hluta sprungu 06.
- **08** Þyrping 58 skjálfta á syðri hluta sprungu 07.
- **09** 440 m langt brot skilgreint af 61 skjálfta og liggur vestan í sprungu 06, með strik  $351^\circ$  og halla  $89^\circ$ . Skjálftarnir urðu jafn og þétt frá 1996–2010. Þeir eru nær allir á 4,5–5,2 km dýpi. Skriðhorn er hægt að ákvarða fyrir 54 þeirra. Dreifing skriðhorna er frekar einsleit og sýnir svipað og sprungu 06 hægri-sniðgengishreyfingu ásamt álíka stórum eða stærri samgengisþætti.
- **10** 250 m langt brot skilgreint af 54 skjálftum og liggur rétt austan í syðri hluta sprungu 06. Strik  $287^\circ$  og halli  $82^\circ$ . Skjálftarnir urðu jafn og þétt frá 1994–2011 og eru nær allir á 4–5 km dýpi. Þetta er því grynasta þyrpingin vestan í Bæjarfjalli. Skriðhorn er hægt að ákvarða fyrir 57 skjálftanna. Dreifing skriðhorna sýnir ýmist hægri-sniðgengisfærslu með samgengisþætti eða vinstri-færslu ásamt sigi.
- **11** Ríflega 2,2 km línuleg þyrping/sprungu 50 skjálfta með ANA-stefnu norðan í Bæjarfjalli. Strik  $257^\circ$  og halli er  $85^\circ$ . Nokkrir skjálftanna urðu milli 1996 og 2007 en flestir 2008–2011, þar af margir í júlí 2010. Þeir eru á fremur breiðu dýptarbili, eða á milli rúmlega 3,5 km og tæplega 7 km dýpis. Mun færri skjálftar eru á austari hluta sprungunnar. Á vestari hluta hennar eru tvær þéttar þyrpingar með N-S-stefnu, þyrpingar 13 og 14, sem sýna að hugsanlega eru hún gerð úr fleiri litlum norðlægum brotum. Hægt er að ákvarða skriðhorn fyrir 47 skjálfta. Meirihluti brotlausna sýnir sambland af samgengi og hægri-sniðgengisfærslu.
- **12** Sjö skjálftar suður af sprungu 06 á um 4,5–5,7 km dýpi. Lengd þyrpingarinnar er 270 m, strikið er  $160^\circ$ , halli  $88^\circ$ . Skjálftarnir urðu frá 1995–2000 og mynda syðsta hluta N-S-sprungunnar vestan í Bæjarfjalli. Hægt er að ákvarða skriðhorn fyrir fjóra skjálftanna. Brotlausnir eru mjög breytilegar.
- **13** 16 skjálfta þyrping, um 500 m löng með strik  $7^\circ$  og halla  $82^\circ$ . Vestasti hluti sprungu 11. Skjálftarnir eru aðallega á 5–5,8 km dýpi og urðu á milli 1999 og 2010, flestir þó 2007 og síðar. Skriðhorn er hægt að ákvarða fyrir þá alla. Dreifing skriðhorna sýnir aðallega hægri-sniðgengisfærslu ásamt risi (samgengisþætti).

- **14** 580 m löng þyrping 25 skjálfta með strik  $185^\circ$  og halla  $76^\circ$ . Liggur á sprungu 11 rétt austan við 13, nokkurn veginn hornrétt heildarstefnu sprungu 11. Skjálftarnir urðu á milli 2004 og 2010, flestir 2008 og síðar og nær helmingurinn í júlí 2010. Dýpi skjálftanna er 5,3–6,5 km og hægt er að ákvarða skriðhorn fyrir 24 þeirra. Brotlausnir benda helst til álíka stórra þátta siggengis- og vinstri-sniðgengis-hreyfingar.
- **15** er samsett úr 06 og 12, í heildina 154 skjálftar sem urðu milli 1995 og 2011. Þessir 7 viðbótarskjálftar lengja N-S-sprunguna sem 06 skilgreinir í 980 km langt brot vestan í Bæjarfjalli með strik  $8^\circ$  og halla  $82^\circ$ . Hægt er að ákvarða skriðhorn fyrir 142 skjálfta. Meiri hluti skriðhorna benda til samblands af samgengi (risi) og hægri-sniðgengisfærslu.
- **16** Tæplega 2200 m löng N-S sprunga NNA Þeistareykjabungu (eða um 4 km SSA af Keldunesheiði, rétt austan Stórhóls) á 6–7,5 km dýpi. Hún er skilgreind af 35 skjálftum og hefur strik  $26^\circ$  og halla  $75^\circ$ . Skjálftarnir urðu á tímabilinu 1994–2011, flestir þeirra í lok mars/þyrjun apríl 2007 og 16. mars 2010. Aðeins er hægt að ákvarða skriðhorn fyrir um helming skjálftanna, eða 18 þeirra. Brotlausnir eru afar breytilegar.



Mynd 8. Þyrpingar 03–14 sem greindar voru við Þeistareyki í mismunandi litum, sbr. töflu 2. Aðrir skjálftar á svæðinu eru sýndir sem gráir hringir. (efri) Stærð skjálfta sem fall af tíma. (neðri) Frá hægri: kort, A-V-þversnið, horft frá suðri, N-S þversnið (á hlið) séð frá austri.

Tafla 2. Greining á þyrpingum/sprungum á Þeistareykjasvæði (mynd 7 og 8) og helstu stærðir. Í dálkinum undir fjölda skjálfta má finna þann heildarfjölda sem skilgreinir sprunguna ásamt fjölda þeirra skjálfta sem hægt er að meta skriðhorn fyrir.  $\lambda_{ave}$  er meðalskriðvigur og  $\lambda_{wav}$  er veginn meðalskriðvigur. Miðja hverrar sprungu (X-ave, Y-ave) er meðaltals lengd og breidd skjálftanna sem skilgreina flötinn.

Þyrping nr.	Litur	Fjöldi skjálfta	Strik	Halli	$\lambda_{ave}$	$\lambda_{wav}$	Lengd (km)	X-ave (°A)	Y-ave (°N)
03	gul	33/32	171	84	-17,53	-6,05	0,480	-16,9712	65,8857
04	appelsínugul	45/45	344	86	19,55	-0,94	1,692	-16,9803	65,8929
05	rauð	36/32	117	82	155,52	34,13	0,563	-17,0011	65,8746
06*	bleik	146/138	7	76	153,65	175,53	0,645	-16,9784	65,8658
07*	lillableik	87/79	3	73	151,61	166,71	0,329	-16,9780	65,8671
08*	blágræn	58/	(N)	(89)	152,63	167,77	0,294	-16,9789	65,8638
09	blá	61/54	351	89	132,46	147,69	0,441	-16,9839	65,8636
10	græn	54/47	287	82	115,51	89,47	0,252	-16,9741	65,8620
11**	gulgræn	50/48	257	85	128,33	167,94	2,224	-16,9640	65,8704
12	dökkbleik	7/4	160	88	-51,97	-50,50	0,270	-16,9807	65,8607
13**	brún	16/16	7	82	146,10	145,69	0,503	-16,9705	65,8702
14**	fjólublá	25/24	185	76	-54,21	-60,44	0,580	-16,9631	65,8702
15***	-	154/142	8	82	133,23	159,25	0,982	-16,9785	65,8657
16	-	35/18	26	75	101,42	174,23	2,180	-16,7098	65,9537

\* Í úrvinnslunni mátti greina a.m.k. tvær þyrpingar innan sprungu 06, 07 (nyrðri) og 08 (syðri).

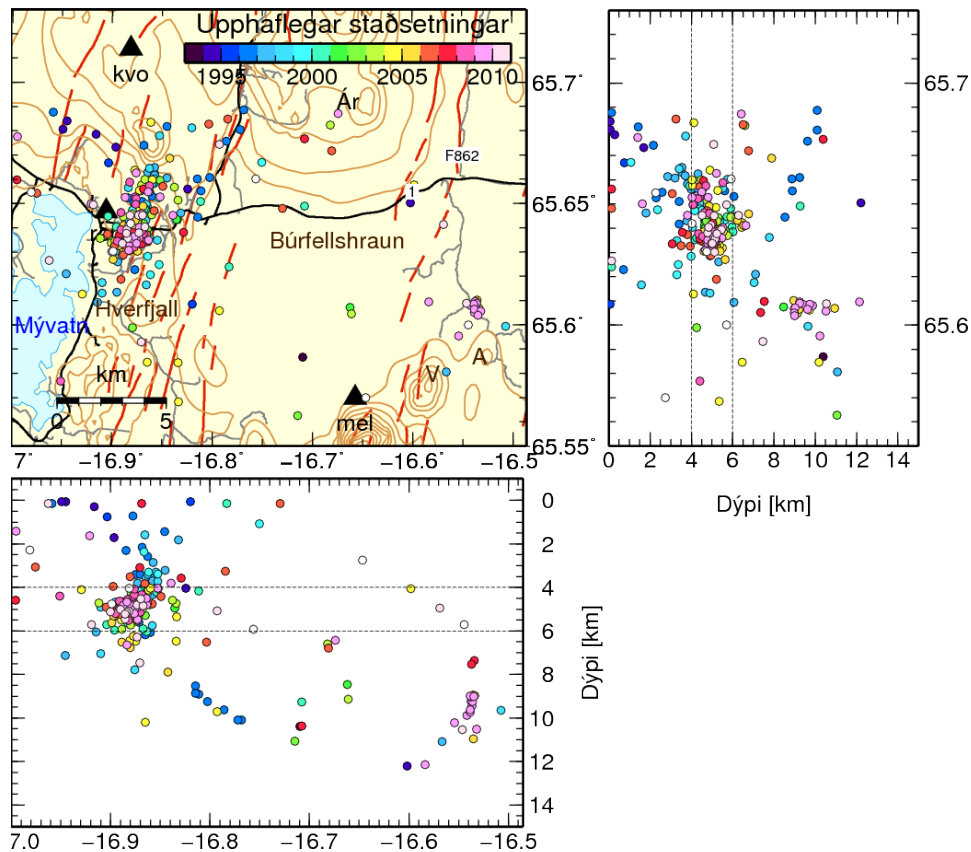
\*\* Sprunga 11, með VSV-ANA stefnu, er hugsanlega sett saman úr minni, samsíða norðlægari brotum, þar með talin nr. 13 og 14 sem eru vestast og mynda þéttasta hluta sprungunnar.

\*\*\* 15 er samansett úr 06 og 12 (nokkrir skjálftar sunnan 06).

## 4.2 Bjarnarflag

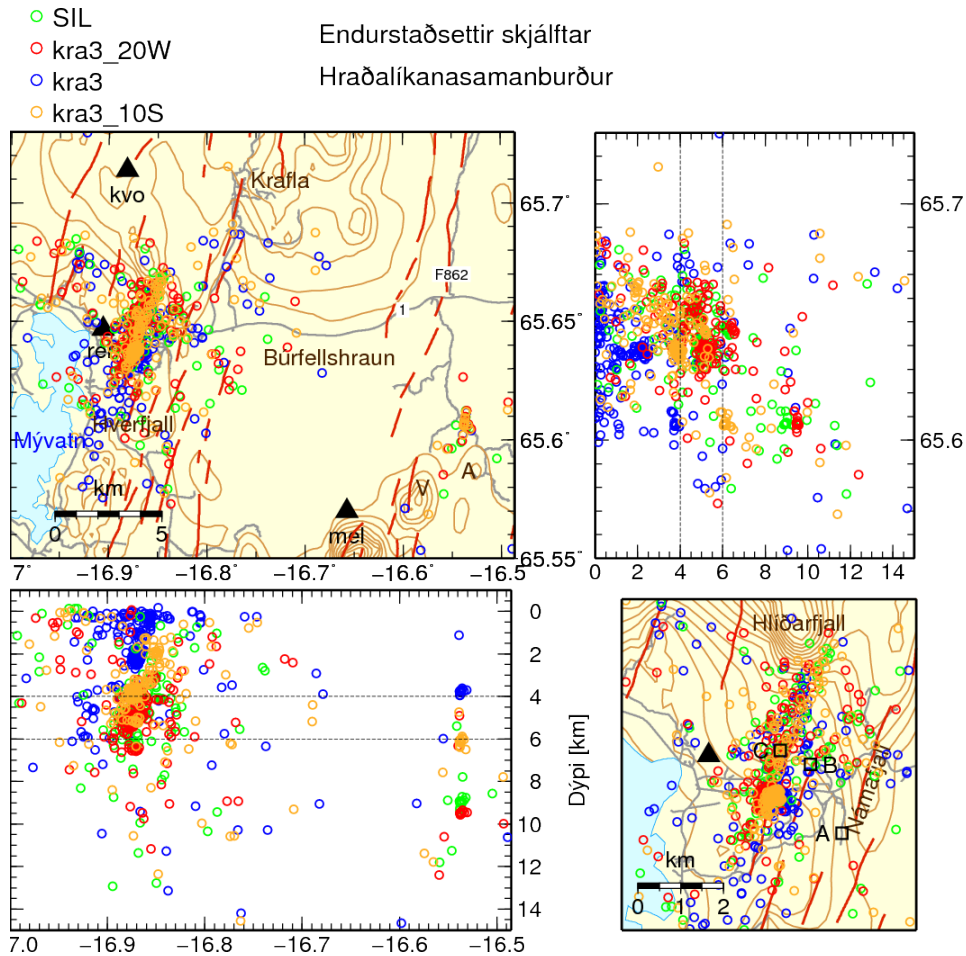
Upphaflegar staðsetningar skjálfta við Bjarnarflag og austur í Búrfellshraun má sjá á mynd 9. Langstærsti hluti virkninnar er staðsettur á NNA-SSV-lægri, línulegri þyrpingu á 3–7 km dýpi norðan Hverfjalls og sunnan Hlíðarfjalls. Önnur þyrping og mun minni er á 9–10 km dýpi austur í Búrfellshrauni, um 1 km norður af Austari-Skógarmannafjöllum.

Til samanburðar má sjá niðurstöður afstæðra endurstaðsetningar í hraðalíkönunum *SIL* (grænt), *kra3* (blátt) *kra3-20W* (rautt) og *kra3-10S* (appelsínugult) á mynd 10. Niðurstöður fyrir hverja keyrslu eru einnig sýndar sér á myndum B4–B7 í viðauka B. Ef staðsetningarnar á mynd 10 eru bornar saman við upphaflegu staðsetningarnar á mynd 9 má sjá að afstætt staðsettu skjálftarnir í öllum líkönunum mynda þéttari þyrpingar, bæði lárétt og í dýpi. Meginþyrpingin, í Bjarnarflagi (sunna Hlíðarfjalls), hefur aðallega NNA-læga stefnu, en sú við Skógarmannafjöll N-S-stefnu.



Mynd 9. Upphaflegar staðsetningar við Bjarnarflag og í Búrfellshrauni. Neðan við kortið er þversnið séð frá suðri en hægra megin er þversnið þar sem horft er á dýpi skjálftanna frá austri. Svartir þríhyrningar sýna staðsetningu skjálftastöðva, rauðar línur tákna kortlagðar yfirborðssprungur (Haukur Jóhannesson & Kristján Sæmundsson, 1998). Svartar línur tákna vegi og gráar fjallvegi og slóða. V tákna Vestari-Skógarmanna fjöll en A Austari-Skógarmanna fjöll.

Enn minni mismunur er á dýpi skjálftanna í hraðalíkönum *SIL* og *kra3-20W* en við Þeistareyki. Hér er munurinn að mestu innan við 0,5 km og eru flestir skjálftanna á 4–6,5 km dýpi, en allnokkrir á 3–4 km dýpi. Í líkani *kra3*, færast skjálftarnir hins vegar mun ofar og eru flestir þeirra ofan við 2,5 km dýpi. Líkt og við Þeistareyki festast margir þeirra við yfirborð auk þess sem þeir dreifast til suðurs frá Bjarnarflagssprungunni. Því er ljóst að líkan *kra3*, sem líkir eftir hraða í miðju Kröfluöskjunnar, er heldur ekki hentugt til að túlka raunverulegan hraðastrúktúr við Bjarnarflag, sem er í um 10 km fjarlægð frá Kröflu. Vegna minni fjarlægðar Bjarnarflags frá Kröflu (heldur en Þeistareykir eru) var einnig staðsett í fjórða líkaninu, *kra3-10S* og lenda þær skjálftastaðsetningar grynna en í *SIL* og *kra3-20W* líkönun, eða að mestu á 3–5,5 km dýpi, og allmargir á 1–3 km dýpi. Dreifingin er því talsvert meiri í lóðréttu sniði en í líkönun *SIL* og *kra3-20W*.



Mynd 10. Endurstaðsettir skjálftar í hraðalíkönunum fjórum sem prófuð voru á þessu svæði. Svartir þríhyrningar sýna staðsetningu skjálftastöðva, rauðar línur tákna kortlagðar yfirborðssprungur (Haukur Jóhannesson & Kristján Sæmundsson, 1998). Gráar línur tákna vegi og slóða, V: Vestari-Skógarmanna fjöll, A: Austari – Skógarmanna fjöll.

Til að skoða hversu vel skorðaðar staðsetningarnar voru í *SIL* og *kra3-20W* líkönunum var prófað að minnka vægi gagna á næstu stöð (**ren**) líkt og gert var á Þeistareykjasvæðinu. Áhrif þessa voru meiri en við Þeistareyki; skjálftar á Bjarnarflagssprungu dreifðust heldur meira í dýpi, allt niður á um 9 km, og var skjálftadreifin því ekki jafn vel afmörkuð í lóðréttum fleti. Þótt líkan *kra3-20W* hafi, líkt og á Þeistareykjasvæði, gefið fremur vel skorðaðar niðurstöður var líkan *kra3-10S* – vegna meiri nálægðar við Kröflu – talið jafnálítlegt til þess að lýsa hraða við Bjarnarflag. Sprungur voru því kortlagðar í báðum líkönunum en nánari túlkun og endurmat á brotlausnum voru miðuð við *kra3-10S*.

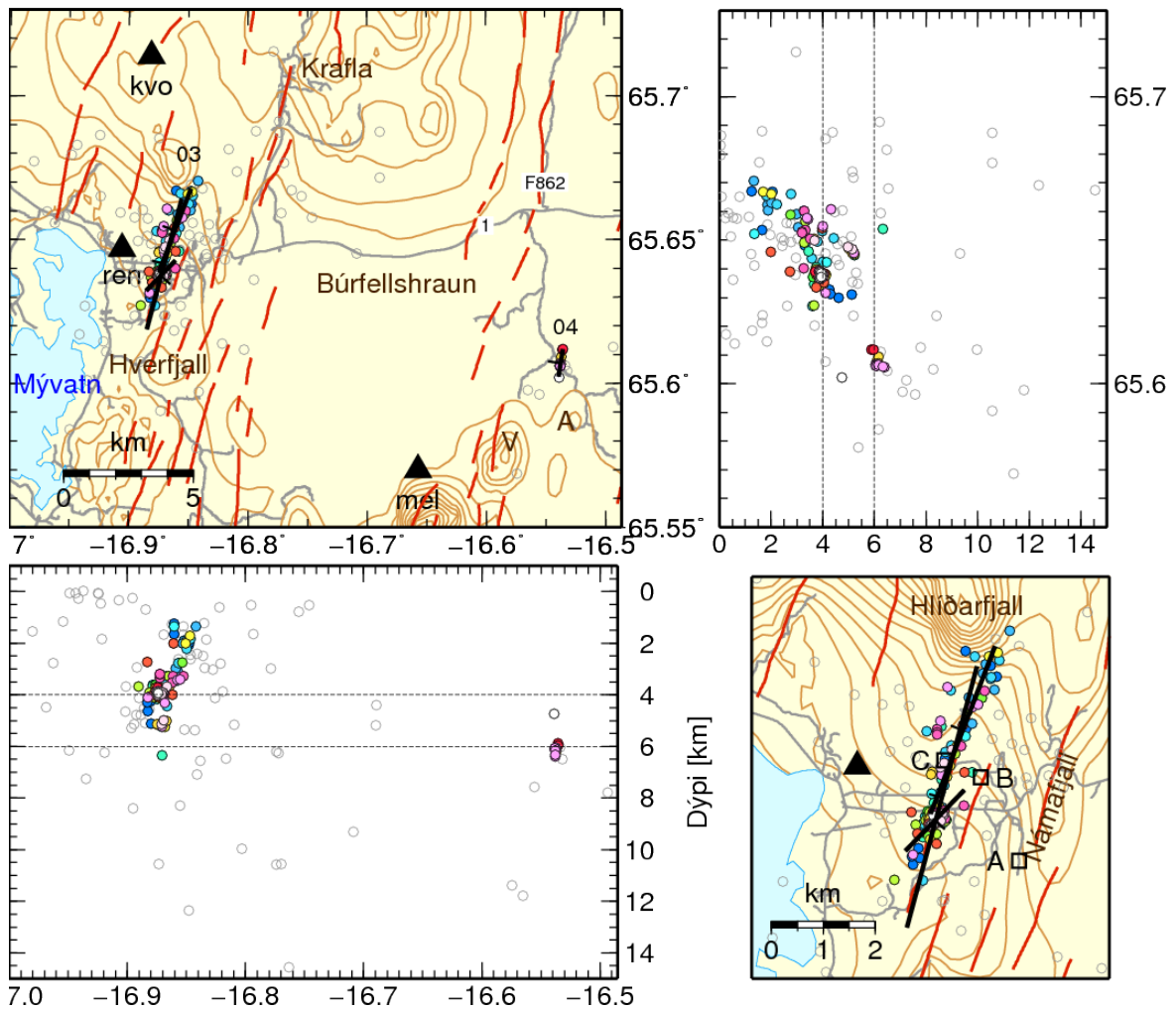
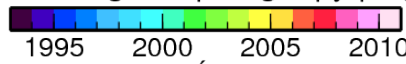
Þær sprungur og þyrpingar sem kortlagðar voru á Bjarnarflagssvæði í líkani *kra3-10S* eru sýndar á mynd 11 og einnig á mynd B8 í viðauka B í líkani *kra3-20W* þar sem heldur minni dreifing er í dýpi skjálftanna. Eins og fyrr segir raðast virknin við Bjarnarflag á NNA-læga sprungu sem gerð er úr tveimur skástígum brotum eins og sést best í líkani *kra3-10S*; einnig sýnt nánar á mynd 12. Ekki er hægt að greina aðrar þyrpingar, utan litla brotið suður af þjóðvegi 1, undir slóða sem liggur suður að Skógarmanna fjöllum. Helstu stærðir og stefnur fyrir sprungurnar er að finna í töflu 3 og að neðan er einnig stutt samantekt um þær.

Líkan: kra3–10S

$d=2,0$ ,  $r=3,0$

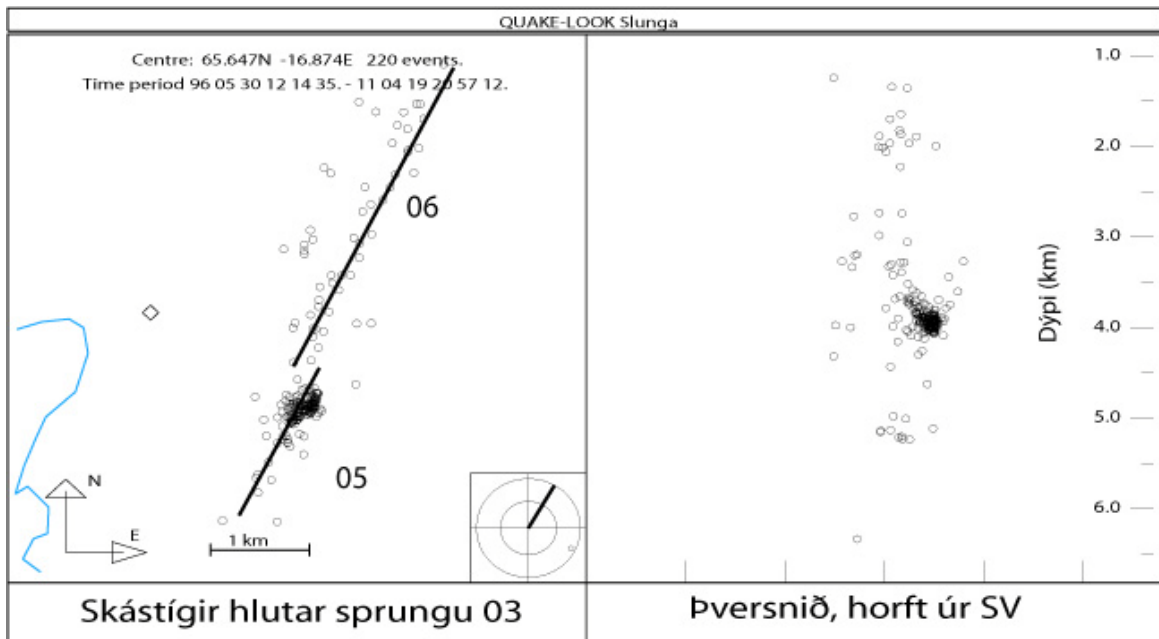
Grátt: aðrir skjálftar

Kortlagðar sprungur/þyrpingar



Mynd 11. Sprungur sem greindar voru við Bjarnarflag. Skjálftar sem skilgreina sprungufleti eru litadír eftir aldri, aðrir skjálftar sem mældust á svæðinu eru sýndir sem hringir í gráum lit. Gráar línur tákna vegi og vegslóða, rauðar línur tákna kortlagðar yfirborðssprungur (Haukur Jóhannesson & Kristján Sæmundsson, 1998). Svartir opnir ferningar sýna þrjár mögulegar staðsetningar nýs stöðvarhúss, A–C (Haukur Einarsson, 2003).





Mynd 12. Tveir skástígir hlutar sprungu 03 við Bjarnarflag, 05-syðri hluti og 06-nyrðri hluti. Þar sem sprungan hliðrast til vesturs er virknin mest, nyrst á hluta 05.

- **03** Tæplega 5400 m löng sprunga skilgreind af 222 skjálftum sem aðallega eru á 3–5 km dýpi í líkani *kra3-10S* en 4–6 km á *kra3-20W*. Skjálftarnir urðu jafnt og þétt yfir tímabilið 1996–2011. Sprungan hefur strik  $18^\circ$ , halla  $85^\circ$  og grynkar til norðurs. Hægt er að ákvarða brotlausn fyrir alla skjálftana. Dreifing skriðhorna er frekar mikil en meirihluti skjálftanna svo og meðal skriðvigur sýnir siggengi með minni vinstri-sniðgengisþætti. Ef brotlausnir eru skoðaðar fyrir 2006 og svo eftir 2006 má sjá heldur minni dreifingu í stefnu skriðhorna á milli 1996 og 2005 (ráðandi sig ásamt vinstri-sniðgengisþætti) en á árunum 2006–2007 og 2008–2011 þar sem breytileiki í stefnu skriðhorna er mjög mikill.
- **04** Ríflega 660 m löng sprunga (eða sprungubrot) með strik  $11^\circ$  og halla  $85^\circ$ . Skjálftarnir eru nær allir staðsettir á 6–6,5 km dýpi (9,5 km í *kra3-20W*), mun grynri en í *SIL* og *kra3-20W* líkönum (9,5 km í *kra3-20W*). Skjálftarnir 16 sem skilgreina brotflötinn urðu nær allir í ágúst 2005, maí 2007 og júní 2009. Hægt er að ákvarða skriðhorn fyrir þá alla. Skriðhorn sýna ýmist vinstri-sniðgengishreyfingu ásamt minni eða jafnstórum lóðréttum þætti (9 skjálftar) eða hægri-sniðgengishreyfingu með minni eða jafnstórum lóðréttum þætti (7 skjálftar).
- **05** Rúmlega 1600 m langt brot sem er syðri hluti sprungu 03. Flestir þeirra 164 skjálfta sem skilgreina brotið mynda þetta þyrpingu nyrst þar sem sprungan hliðrast til vesturs í brot 06. Þessi þetta þyrping hefur verið virk samfellt frá 1996 til 2011. Flestir skjálftanna eru á 3,5–4,3 km dýpi (4,5–5,5 í *kra3-20W*). Þegar aðferð minnstu kvaðratsummu er notuð til þess að finna besta flötinn í gegnum dreifina hefur þetta þyrpingin nyrst þau áhrif að besti flötur hefur strikstefnu nokkuð frábrugðna heildarsprungustefnunni, eða  $37^\circ$  og halla  $75^\circ$ . Hér gerum við þó ráð fyrir að skástígu brotin tvö (05 og 06) hafi svipaða strikstefnu, um  $201^\circ$  (flötur 06) eða  $21^\circ$ . Dreifing skriðhorna er heldur meiri en fyrir sprunguna í heild, stærstu tveir hóparnir sýna vinstri-sniðgengishreyfingu með álíka stórum samgengis- eða siggengisþætti.

- **06** Um 3500 m langur brotflötur sem skilgreindur er af 40 skjálftum, þar af er hægt að ákvarða skriðhorn fyrir 35 þeirra. Skjálftarnir eru á dreifðu dýptarbili, frá 1,3 km niður á um 5,5 km dýpi (3,2–6,6 í *kra3-20W*). Strikstefna er 201° og halli er 87°. Meirihluti brotlausna sýnir stóran siggengispátt ásamt sniðgengishreyfingu. Siggengi ásamt hægri-sniðgengisfærslu er þó heldur stærri (ráðandi hjá stærri skjálftum).

*Tafla 3. Greining á þyrpingunum á Bjarnarflagssvæði. Í dálkinum undir fjölda skjálfta má finna þann heildarfjölda sem skilgreinir sprunguna ásamt fjölda þeirra skjálfta sem hægt er að meta skriðhorn fyrir.  $\lambda_{ave}$  er meðalskriðvigur og  $\lambda_{wav}$  er veginn meðalskriðvigur. Miðja hveirrar sprungu (X-ave, Y-ave) er meðaltalslengd og -breidd skjálftanna sem skilgreina flötinn.*

Þyrping nr.	Fjöldi skjálfta	Strik	Halli	$\lambda_{ave}$	$\lambda_{wav}$	Lengd (km)	X-ave (°A)	Y-ave (°N)
03	220/198	195	84	-30,86	-18,69	5,248	-16,8704	65.6416
04	16/16	11	85	-53,20	-103,22	0.666	-16,5375	65.6071
05*	164/149	37	75	-9,80	-30,14	1,655	-16,8731	65.6376
06*	40/35	201	87	-91,17	-120,80	3,490	-16,8615	65.6533

\* 05 og 06 eru tveir skástígir hlutar sprungu 03.

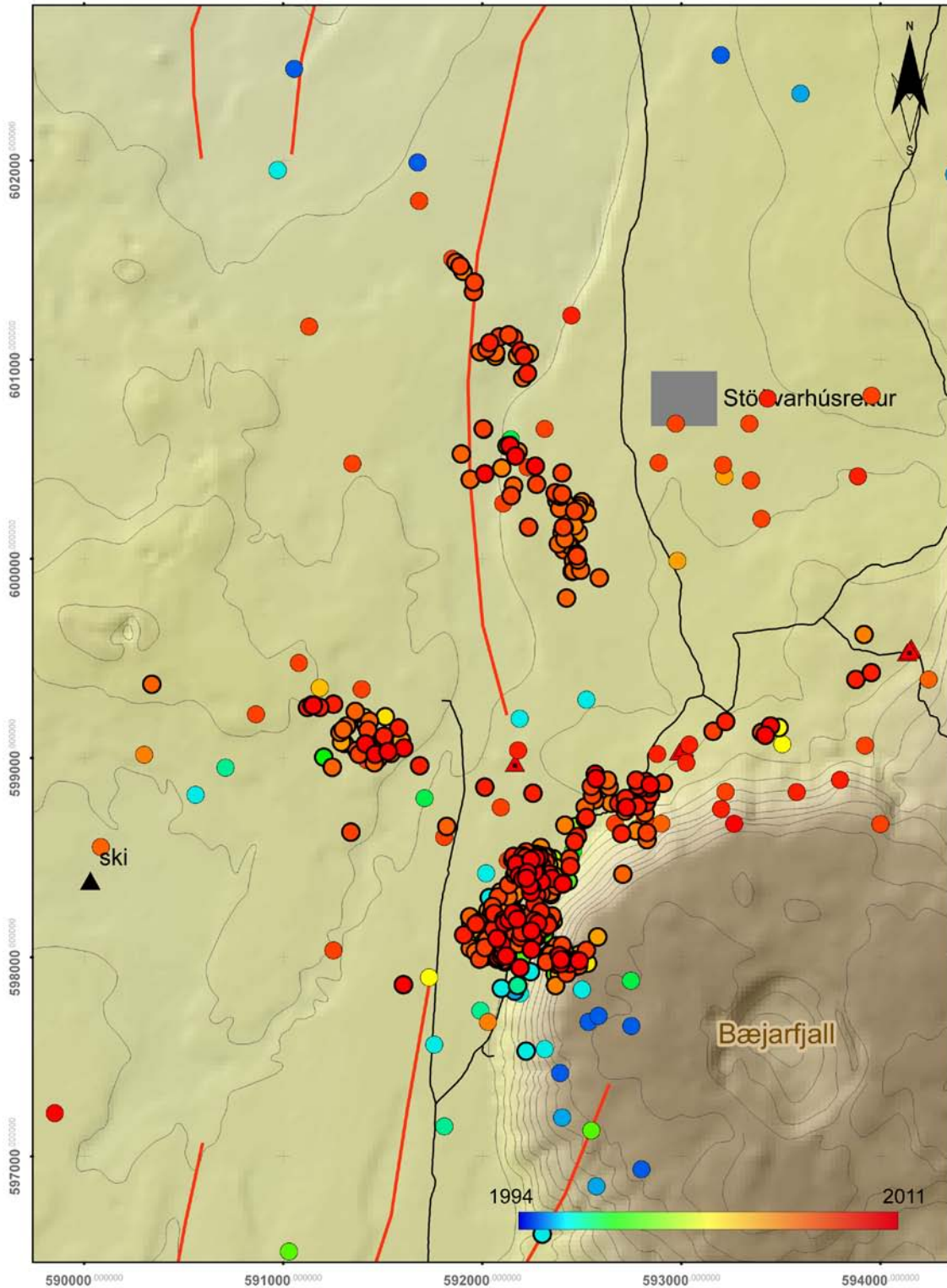
## 5 Samantekt

Í þessum fyrsta áfanga kortlagningar sprungna við Þeistareyki og Bjarnarflag með upptakagreiningu smáskjálfta hafa verið staðsettar á annan tug sprungna eða þyrpinga. Samantekt yfir helstu stærðir svo sem lengd, staðsetningu og stefnu þeirra má sjá í töflum 2 og 3 og á myndum 7, 8, 11 og 12. Kort af virkasta hluta hvors svæðis er jafnframt að finna á myndum 13 og 14 (í landshnitum).

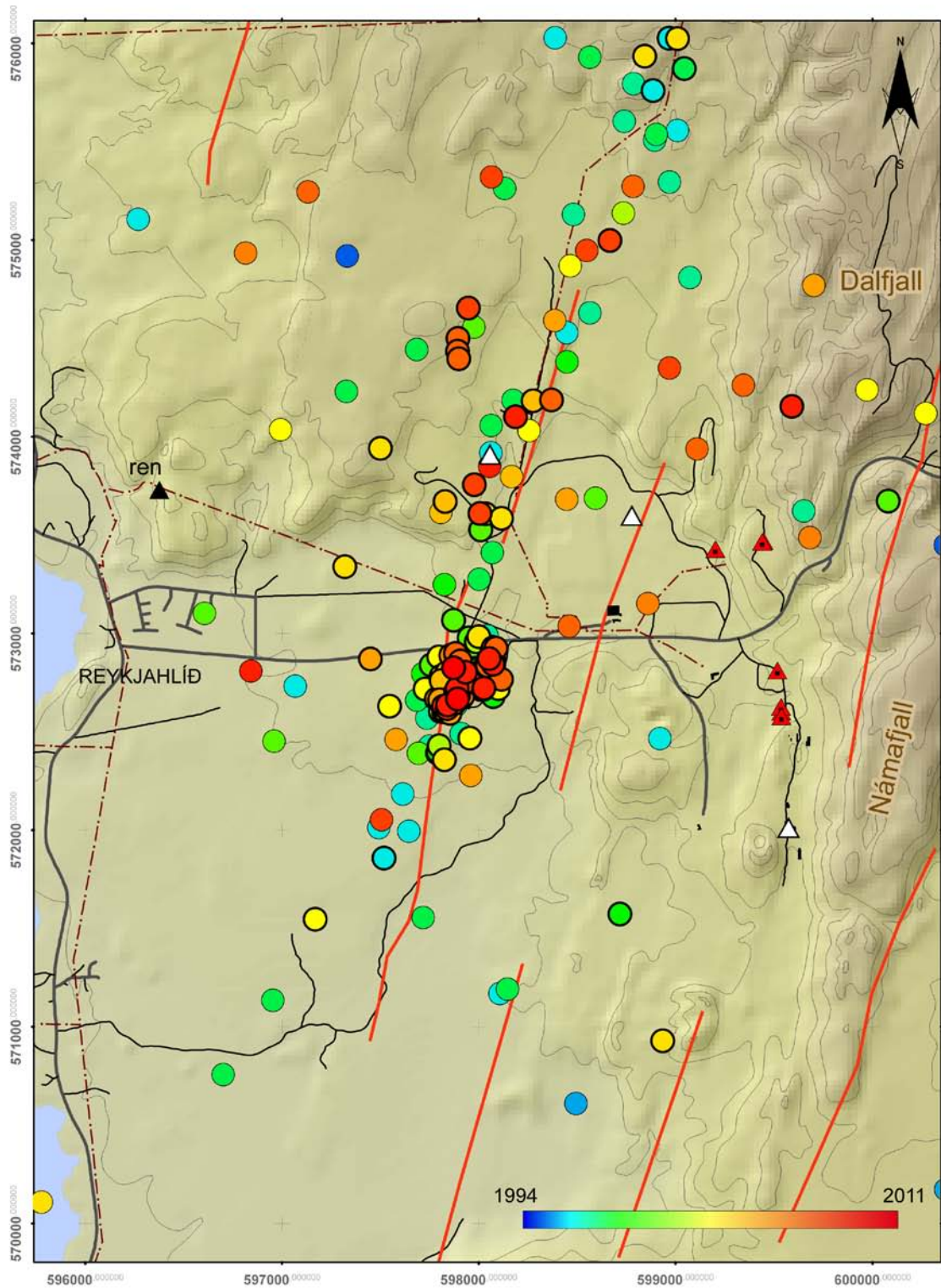
Virkar sprungur á Þeistareykjasvæðinu einkennast að mestu leyti af norðlægum sprungustefnum og fylgja að miklu leyti þeim yfirborðssprungum og misgengjum sem kortlögð hafa verið á svæðinu (Haukur Jóhannesson & Kristján Sæmundsson, 1998; Gestur Gíslason o.fl., 1984). Stærsta skjálftaþyrpingin liggur á línu vestan í Bæjarfjalli með stefnu N7–8°A og í fleti sem hallar 76–82° til austurs (sprunga þei-06 eða þei-15 skv. mynd 8 og töflu 2). Sömu stefnu má jafnframt greina á tveimur skástígum flötum um 1600 m norðar (við 600.000 km N á mynd 13). Beggja vegna við sprungu þei-06 (um 100–200 m frá miðju hennar), vestan í Bæjarfjalli, liggja tvær þyrpingar (þei-09 og þei-10) sem líklega gefa til kynna virkni á stuttum samsíða brotum. Sprungan sem nyrst liggur, SSA af Keldunesheiði (14 km NA Þeistareykja, á um 65,96°N) hefur einnig svipaða stefnu, N26°A. Allnokkuð er um dreifða skjálftavirkni sunnan Þeistareykjargungu (og sunnan Kvíhólafjalla og Þórunnarfjalla) en ekki greindust neinar sprungur eða þyrpingar þar. Fyrir utan nyrstu sprunguna SA Keldunesheiðar er virknin dýpst á skástígu sprungunum tveimur norðan við Þeistareyki (7,2 km) en grynnskar suður með Bæjarfjalli þar sem grynnssta þyrpingin (þei-10) liggur á 4–5 km dýpi.

Frávik frá hinni ríkjandi norðlægu stefnu má sjá norðan í Bæjarfjalli þar sem virknin sveigir til austurs með hlíðum fjallsins á um 65,87°N (598.500 km N á mynd 13). Virknin á þessari austlægar sprungu (strik N257°A, halli 85°) er langþéttust þar sem hún tengist N-S-sprungunni og jafnvel má þar greina innan hennar tvær litlar þyrpingar með N-S-stefnu (13 og 14). Hugsanlega er þetta brot því samansett úr mörgum minni, samsíða norðlægar

sprungum. Hreyfingarstefnur á kortlögðum sprungum eru mjög breytilegar, en þó virðist austurhluti flestra norðlægra sprungna færast í suður.



Mynd 13. Endurstaðsettir skjálftar við Bæjarfjall-Þeistareyki. Skjálftar með lága afstæða skekkju (innan við 100 m í lengd og breidd og 300 m í dýpi) eru teiknaðir með breiðari útlínur. Rauðar línur tákna yfirborðssprungur, svartar vegslóða. Svartir þríhyrningar tákna skjálftastöðvar og rauðir borholur. Kortagerð: Emmanuel Pierre Pagneux.



Mynd 14. Endurstaðsettir skjálftar við Bjarnarflag. Skjálftar með lága afstæða skekkju (innan við 100 m í lengd og breidd og 300 m í dýpi) eru teiknaðir með breiðari útlínum. Rauðar línur tákna yfirborðssprungur, svartar vegi og vegslóða. Svartir þríhyrningar tákna skjálftastöðvar og rauðir borholur. Hvítir þríhyrningar sýna mögulega kosti staðsetningar stöðvarhúss (kostur A er syðst, C vestast). Kortagerð: Emmanuel Pierre Pagneux.

Samanburður skjálftadreifar við jarðhitaummyndun á yfirborði (Gestur Gíslason o.fl., 1984) sýnir að sprungurnar sem skjálftavirknin framkallar fylgja ummerkjum jarðhitans á yfirborði mjög greinilega. Leirhverir, gufuauðu og ummyndun, svokallaðar Hitur, ná frá miðjum vesturhlíðum Bæjarfjalls (597.500 km N, kort 13) rúma 3 km til norðurs, þar sem skjálftavirknin er þéttust. Á svipuðum slóðum og þyrping þei-05 liggur má jafnframt greina jarðhita á yfirborði vestan Hitanna. Þéttasta skjálftavirknin á venslaða misgenginu norðan í Bæjarfjalli fylgir einnig jarðhitaummyndun á yfirborði en austan hennar er skjálftavirknin mun strjálí. Þéttasta skjálftavirknin virðist því helst vera bundin við lekar sprungur sem leiða líklega jarðhitavatn til yfirborðs. Tvær borholur hafa verið boraðar við sitt hvorn enda venslaða ANA misgengisins (mynd 13).

Athyglisvert er að sjá að misgengi með stefnu SA hefur verið kortlagt í norðvestanverðu Bæjarfjalli (Gestur Gíslason o.fl., 1984). Það tengist norðlæga misgenginu sem liggur í gegnum þyrpingar þei-03 og þei-04, norðvestan fjallsins (mynd 7 og 13) og sker því skjálftavirknina þar sem hún sveigir til austurs. Norðan í fjallinu hefur einnig verið kortlagt um 800 m langt misgengi með N-S-stefnu, austan við þyrpingar þei-13 og þei-14 sem greindust innan sprungu þei-11. Kortlagða N-S skjálftadreifin frá 1999 virðist falla á þetta misgengi og suður af því (Kristín S. Vogfjörð, 2000). Merki um stærri A-V-lægari sprungu hafa hins vegar ekki verið kortlögð á yfirborði.

Við Bjarnarflag er svipuð sprungustefna ríkjandi og greina má á yfirborði (Haukur Jóhannesson & Kristján Sæmundsson, 1998) en eina sprungan sem greindist þar (bja-03) hefur strikstefnu  $N195^{\circ}A$ . Þessi megin-sprungu virðist þó vera gerð úr tveimur skástígum hlutum með ögn austlægari stefnu,  $N201^{\circ}A$  (bja-05 og bja-06). Syðri hlutinn (06) er styttri og mestur hluti virkninnar er nyrst á honum, þar sem sprungan hliðrast um 250–300 m til vesturs á brot 05 (mynd 12 og 14). Borholur á Bjarnarflagssvæðinu eru staðsettar við vesturhlíðar Námafjalls (mynd 14), en engin virk brot voru kortlögð þar og nær ekkert er um staðsetta skjálfta austur af Námaskarði og allt austur í Búrfellshraun þar sem ein stutt sprungu með strikstefnu  $N11^{\circ}A$  greindist á um  $16,55^{\circ}A$ . Þrír kostir hafa verið nefndir fyrir virkjunarhús við Bjarnarflag og eru þeir merktir inn á kort 14 sem hvítir þríhyrningar. Sjá má að einn þeirra (sá vestasti, kostur C) lendir nær beint ofan á bja-03/bja-06 sprungunni.

Brotin sem skjálftarnir skilgreina við Þeistareyki eru ólík þeim sprungum sem kortlagðar hafa verið annars staðar í gosbeltunum, í Fagradalfjalli og við Prestahnúk (Sigurlaug Hjaltadóttir & Kristín S. Vogfjörð 2006 og 2009b), að því leyti að virknin liggur að miklu leyti í litlum þyrpingum sem saman mynda stundum sprungumynstur, en aðrar eru meira eins og strompar og sýna þá hugsanlega aðeins þann hluta sprungunnar þar sem jarðhitavatn er leitt til yfirborðs. Virknin á öðrum kortlögðum sprungum verður jafnframt venjulega í afmörkuðum hrinum á meðan sprungurnar sem kortlagðar eru hér við Bjarnarflag og Þeistareyki sýna nær jafna virkni yfir langt tímabil. Líklega er hér um áhrif jarðhitavatns að ræða.

Samkvæmt NUVEL-1A flekahreyfingarlíkaninu (DeMets o.fl., 1990, 1994; reiknað á <http://www.unavco.ort/dxdt/model>) er rekstefna á  $65,83^{\circ}N$  og  $-17^{\circ}A$  nálægt  $N106^{\circ}A$  (eða  $N286^{\circ}A$ ) miðað við Evrasíuflekann. Ef færsla á sprungum tæki eingöngu mið af þessari rekstefnu ættu sprungur með strikstefnu  $16^{\circ}$ – $106^{\circ}$  og  $196^{\circ}$ – $286^{\circ}$  að sýna sambland af vinstri-sniðgengisfærslu og gliðnun en sprungur með strikstefnu  $106^{\circ}$ – $196^{\circ}$  og  $286^{\circ}$ – $16^{\circ}$  ættu að sýna sambland af hægri-sniðgengisfærslu og gliðnun. Hrein gliðnun á sprungu felur í sér rúmmálsbreytingu sem ekki er gert ráð fyrir í brotlausnum hér. Hins vegar má segja að sig eða normalhreyfing á hallandi brotflæti feli einnig í sér gliðnun svo skriðhorn ( $\lambda$ ) nærri  $-90^{\circ}$  er hér túlkað sem gliðnunarþáttur. Samantekt á skriðhornum á kortlögðum brotflötum (sjá myndir A1-A2 í viðauka A) sýnir að dreifing þeirra er mjög

mikil og svo mikil í sumum tilfellum að varla er hægt að ákvarða eina megin skriðstefnu í þeim flötum. Í hópi þeirra kortlögðu brotflata sem hafa strikstefnu innan ofangreindra marka fyrir vinstri-færslu og sýna sambland af sigi og vinstri-sniðgengisfærslu eru bja-03 (nyrðri hlutinn, bja-06 sýnir þó meira sig en sniðgengisfærslu). Brotfletir sem ættu að hafa hægri-sniðgengisfærslu en sýna frekar vinstri-færslu eru bja-04 og þei-14. Kortlagðir brotflötir sem sýna hægri-færslu (í bland við lóðréttu), í samræmi við flekahreyfingarlíkan, eru þei-09, þei-06 og þei-13. Aftur á móti er þei-11 líka með ríkjandi hægri-færslu en ætti að sýna vinstri-færslu skv. líkaninu. Í ljósi þess að svæðin tvö eru í nágrenni við virka megineldstöð er líklega of mikil einföldun að gera ráð fyrir því að tektóník á svæðinu sé eingöngu hægt að túlka út frá flekahreyfingum.

Mikil dreifing brotlausna innan hveftrar sprungu gæti einnig stafað af þeim langa tíma sem kortlagningin nær yfir og þeirri staðreynd að flestar sprungurnar sýna virkni á um 15 ára tímabili eða lengur. Nýjar borholur í grennd við sprungurnar gætu haft staðbundin áhrif á spennusviðið og þar með aukið dreifingu brotlausna, t.d. eins og samanburður á virkni á bja-03 fyrir og eftir 2006 gæti gefið til kynna (mynd A2). Aukning lítilla skjálfta eftir fjölgun nálægra stöðva (sjá myndir 2 og 3) er einnig líkleg til að hafa áhrif og valda meiri dreifingu brotlausna, þar sem útslag bylgna frá minni skjálftum truflast meira af bakgrunnssuði. Til þess að kanna þennan þátt var prófað að skoða sérstaklega skriðhorn skjálfta á mismundandi stærðarbílum. Við Bjarnarflag var nyrðri hluti sprungu bja-03, þ.e. bja-06, valinn. Niðurstöður má finna á mynd A2 í viðauka A. Fyrir skjálfta af stærð  $M < 1$  var dreifingin mikil og engin ein stefna ríkjandi. Átta af 16 skjálftum af stærð  $M \geq 1$  sýndu ríkjandi sig ásamt hægri-sniðgengishreyfingu, fyrir  $M \geq 1,3$  voru 6/9 skjálftanna sem sýndu einnig ríkjandi sig ásamt hægri-færslu, 5/6 fyrir  $M \geq 1,5$  og 3/3 eða allir fyrir  $M \geq 1,8$ , þ.e.a.s. brotlausnardreifing varð einsleitari eftir því sem stærri skjálftar voru skoðaðir. Sama könnun var gerð á sprungu þei-03, þar sem skjálftarnir falla nokkuð vel að litlum fleti og þeir urðu allir 2007 og síðar. Fyrir sömu stærðarbil var dreifingin afar misjöfn, nema fyrir  $M \geq 1,8$  þar sem brotlausn þriggja skjálfta af fjórum sýndu sambland af risi og hægri-sniðgengisfærslu, eins og vegni meðalskriðvigurinn endurspeglar (mynd A1).

Með afstæðum staðsetningum skjálfta er hægt að bæta innbyrðis staðsetningarnákvæmni skjálftanna svo um munar – allt niður í tugi metra – og gera þannig kleift að kortleggja virkar sprungur (Slunga o.fl., 1995; Waldhauser & Ellsworth, 2000). Aðferðin veldur því að staðsetningarnar eru ekki mjög háðar hraðalíkani, en þó getur rangt hraðalíkan haft áhrif, einkum á algildar staðsetningar skjálftanna, og einkum ef engin mælistöð er nálægt virkninni eða virknin fyrir utan mælanetið. Jafnframt hættir aðferðin að bæta staðsetningar ef stöðvarnar eru of nálægt. Við staðsetningu skjálftanna í þessari skýrslu hefur verið notast við einvíð hraðalíkon sem eru einungis nálgun við hraðastrúktúr Þeistareykja- og Bjarnarflagssvæðanna. Þau byggja á bylgjubrotssniði á svæðinu, sem gaf til kynna að undir Kröfluöskjunni væri um 30 km breiður háhraðastrompur og þynnri skorpa (Bryndís Brandsdóttir o.fl., 1997). Hraðalíkonin sem valin voru til staðsetninga í Bjarnarflagi og á Þeistareykjum eru þversnið í gegnum þennan strúktúr, nokkurn veginn í fjarlægðum frá miðju strompsins, sem samsvarar fjarlægð svæðanna frá Kröflu. Nokkuð ítarlegar kannanir voru gerðar á áreiðanleika staðsetninganna og því hversu viðkvæmar þær væru fyrir mismunandi hraðalíkönunum. Prófanir sýndu að algilt dýpi staðsetninganna var viðkvæmast fyrir hraðalíkani. Ásættanlegur stöðugleiki fékkst á Þeistareykjasvæði með nálgunarlíkaninu *kra3-20W* og út frá samanburði við staðsetningar í *SIL*-líkani má áætla að algild staðsetningarnákvæmni skjálftanna sé um 50–100 m lárétt og um 600–700 m í dýpi fyrir þéttustu og best staðsettu þyrpingarnar. Niðurstöður voru ekki jafn stöðugar á Bjarnarflagssvæði vegna óvissu um hvaða hraðalíkan væri áreiðanlegast. Minni skekkja fæst í algildum staðsetningum ef þær eru bornar saman í *SIL* og *kra3-20W* líkönun, eða um 50–100 m

lárétt og um 500 m í dýpi fyrir best staðsettu þyrpingarnar nærri **ren**. Samanburður *kra3-20W* staðsetninga við *kra3-10S* gefur hins vegar til kynna að óvissan sé mun meiri eða upp á um 200 m lárétt og um 1500 m í dýpi, og allt að 3 km í dýpi fyrir sprungu bja-04.

## 6 English Summary

We have used high-precision relative earthquake locations (Slunga et al., 1995) of microearthquakes recorded between 1993 and 2011 to map subsurface faults in the area of Þeistareykir and Bjarnarflag in the Northern volcanic zone (figure 1). These two areas lie north and south of the Krafla caldera. Six hundred earthquakes were relocated at Þeistareykir and roughly 300 at Bjarnarflag. Time distribution and magnitude range is shown in figures 2 and 3. The earthquakes were relocated in the usual *SIL*-model (Stefánsson et al., 1993), used for routine analysis at the Icelandic Meteorological office, and in 2-to-3 different 1D velocity models (figure 4) which were derived from velocity structure estimated for the region around the Krafla volcano (Brandsdóttir et al., 1997). The locations in different models are shown in Figure 6 for Þeistareykir and in Figure 10 for Bjarnarflag and in Appendix B. At Þeistareykir, locations in model *kra3-20W* (figure 4), which is a 1D approximation to the velocity structure 20 km west of the Krafla caldera (Brandsdóttir et al., 1997), were stable and chosen for further interpretation. The faults and clusters mapped in the Þeistareykir-area are shown in figures 7 and 8 and fault parameters are listed in table 2. In the Bjarnarflag area, locations in model *kra3-20W* seemed more clustered but model *kra3-10S* – a 1-D model approximation derived 10 km south of the Krafla caldera – was also considered an appropriate model since Bjarnarflag is closer to the caldera than Þeistareykir. Thus, faults were mapped in both of these models, but more detailed interpretation was done for model *kra3-10S*. The faults and clusters mapped in the Bjarnarflag-area are shown in figures 11, 12 and B8 and fault parameters are listed in table 3.

Over 10 faults and clusters were mapped in the Þeistareykir area, most of which show activity through many years, unlike faults mapped elsewhere in the Icelandic fissure zones that are normally active during shorter swarms. The faults mostly strike close to north, similar to the majority of surface faults and fissures mapped in the area (Jóhannesson & Sæmundsson, 1998; Gíslason et al., 1984) and the densest seismic activity also follows the location of surface manifestations of geothermal activity and can therefore be interpreted as active parts of the fault system, which transfers geothermal fluids towards the surface. The faults are deepest in the northern part (down to ~7,2 km ) but are shallower farther south (down to ~5 km).

Only two faults were mapped in the Bjarnarflag area, shown in figures 11 and 12 and table 3. The larger fault, crossing the Bjarnarflag geothermal area, is made of two left stepping segments where the densest seismic cluster is located on the southern segment (05) where the fault steps to the left (on to segment bj-06). The fault is located at 3–5 km depth in model *kra3-10S* but at 4–6 km in model *kra3-20W*. A smaller fault, trending ~N-S (bja-04), was located approximately 15 km further east. It is located at approximately 6 km depth in model *kra3-10S* but at 9 km in model *kra3-20W*. Due to its greater distance to the nearest station (7 km to **mel**) its depth is not as well constrained as for bja-03.

Rake angle distribution for the mapped lineaments is shown in Appendix A. Many of the segments have a rather scattered rake distribution and average slip directions in same area or on parallel faults are not always consistent. However, it seems that on most of the faults the eastern block is moving southwards (along with a vertical component). The majority of

events on fault bja-03 indicate a mix of left-lateral slip together with a normal component. The same applies for the southern part, bja-05, whereas the northern part, bja-06, mostly shows normal motion along with a smaller right-lateral component. A test was made for this same fault, bja-03, to see if new boreholes affected the distribution of mechanisms. The rake distribution turned out to be more scattered for events recorded in 2006 and later (in which period, two new boreholes were drilled nearby) but more consistent for events recorded in 2005 and earlier. Another test was made for fault-segments bja-06 and thei-03 to examine the effect of event magnitude on the distribution of rake angles. For bja-06 the rake distribution was very scattered for events with  $M < 1$  and an average rake could not be estimated. Scattering systematically decreased when smaller and smaller events were eliminated (figure A2). The same test for thei-03 showed much more scattering of rake angles for different magnitude limits, but the rake for three out of four events with  $M > 1.8$  (out of 32 events on the fault in total) showed the same rake as the weighted average rake vector shows in figure 2A, i.e. a combination of thrust and right-lateral motion. There are therefore many factors that can affect the quality of slip distribution estimation on different faults in these two areas.

Comparison of results in different velocity models show that locations are better constrained at Peistareykir, where absolute error of the best located clusters is estimated 50–100 m horizontally and 500 m in depth. Uncertainty about which 1D-velocity model approximation is more appropriate for Bjarnarflag (*kra3-20W* or *kra3-10S*) decreases the absolute location accuracy in that area to 200 m horizontally and 1500 m in depth for the best located clusters, but up to 3 km in depth for fault bja-04.

## Heimildir

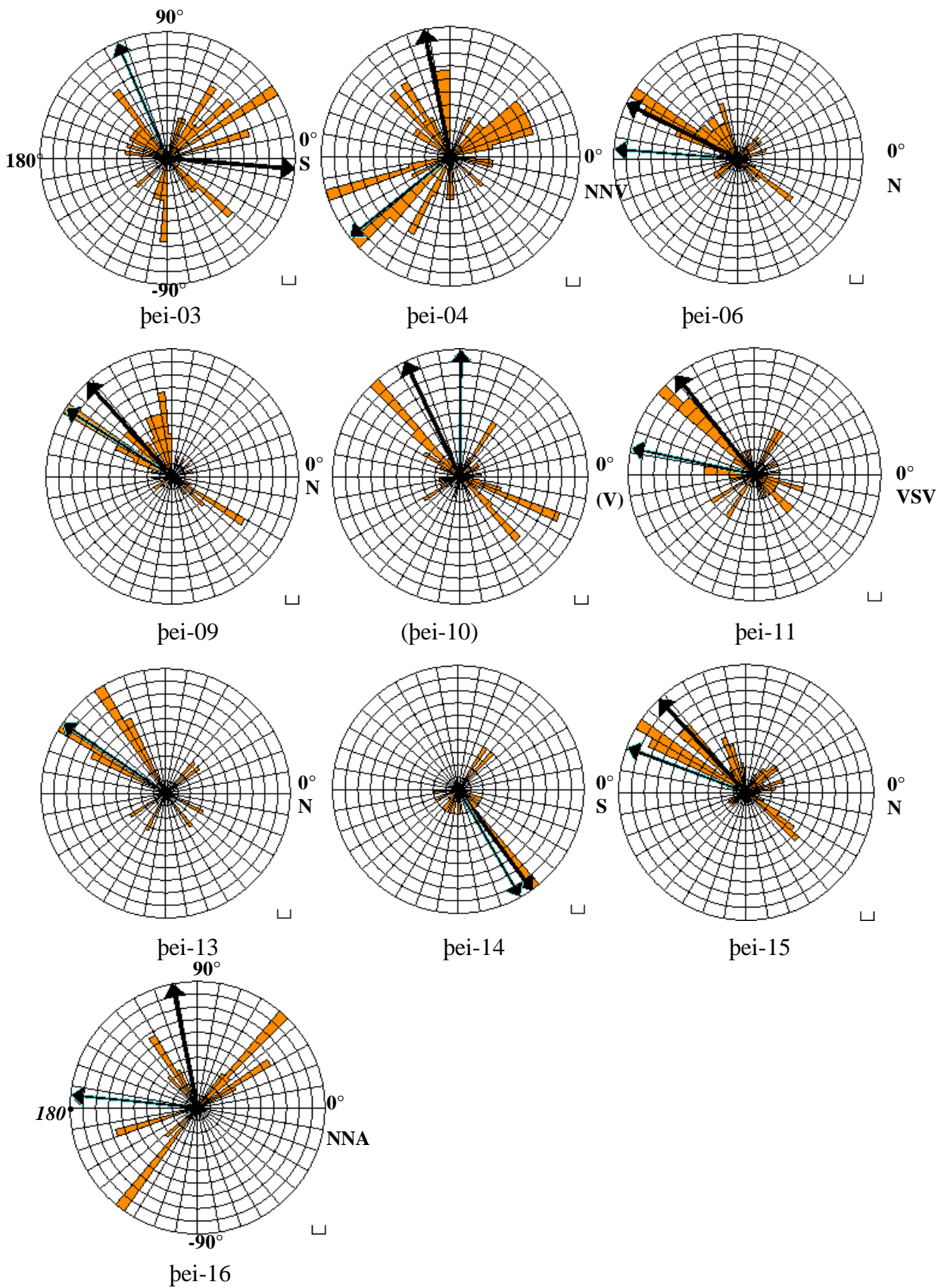
- Brandsdóttir, B., Menke, W., Einarsson, P., White, R. S. & Staples, R. K. (1997). Faeroe-Iceland Ridge Experiment 2. Crustal structure of the Krafla central volcano, *J. Geophys. Res.*, 102, 7867-7886.
- Darbyshire, F. A., Priestley, K. F., White, R. S., Stefánsson, R., Gudmundsson, G. B. & Jakobsdóttir, S. (2000). Crustal structure of central and northern Iceland from analysis of teleseismic receiver functions. *Geophys. J. Int.*, 143, 163-184.
- DeMets, C. G., Gordon, R. G., Argus, D. F. & Stein, S. (1990). Current plate motions, *Geophys. J. Int.*, 101, 425-478.
- DeMets, C. G., R. G. Gordon, D. F. Argus & 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.
- Gestur Gíslason, Gunnar V. Johnsen, Halldór Ármannsson, Helgi Torfason & Knútur Árnason (1984). *Peistareykir. Yfirborðsrannsóknir á háhitasvæðinu*. Reykjavík: Orkustofnun, OS-84089/JHD-16.
- Haukur Jóhannesson & Kristján Sæmundsson (1998). Jarðfræðikort af Íslandi 1:500000 Höggun. *Náttúrufræðistofnun Íslands*. Reykjavík (1. útgáfa).
- Got, J-L., Frechet, J. & Klein, F. W. (1994). Deep fault plane geometry inferred from multiple relative relocation beneath the south flank of Kilauea, *J. Geophys. Res.*, 99, 15375-15386.
- Kristín S. Vogfjörð (1999). *Smáskjálftar í Kröflu í lok borunar holu KJ-31 í október 1997*. Samvinnuverk Landsvirkjunar og Orkustofnunar. Reykjavík: Orkustofnun, OS-99012.



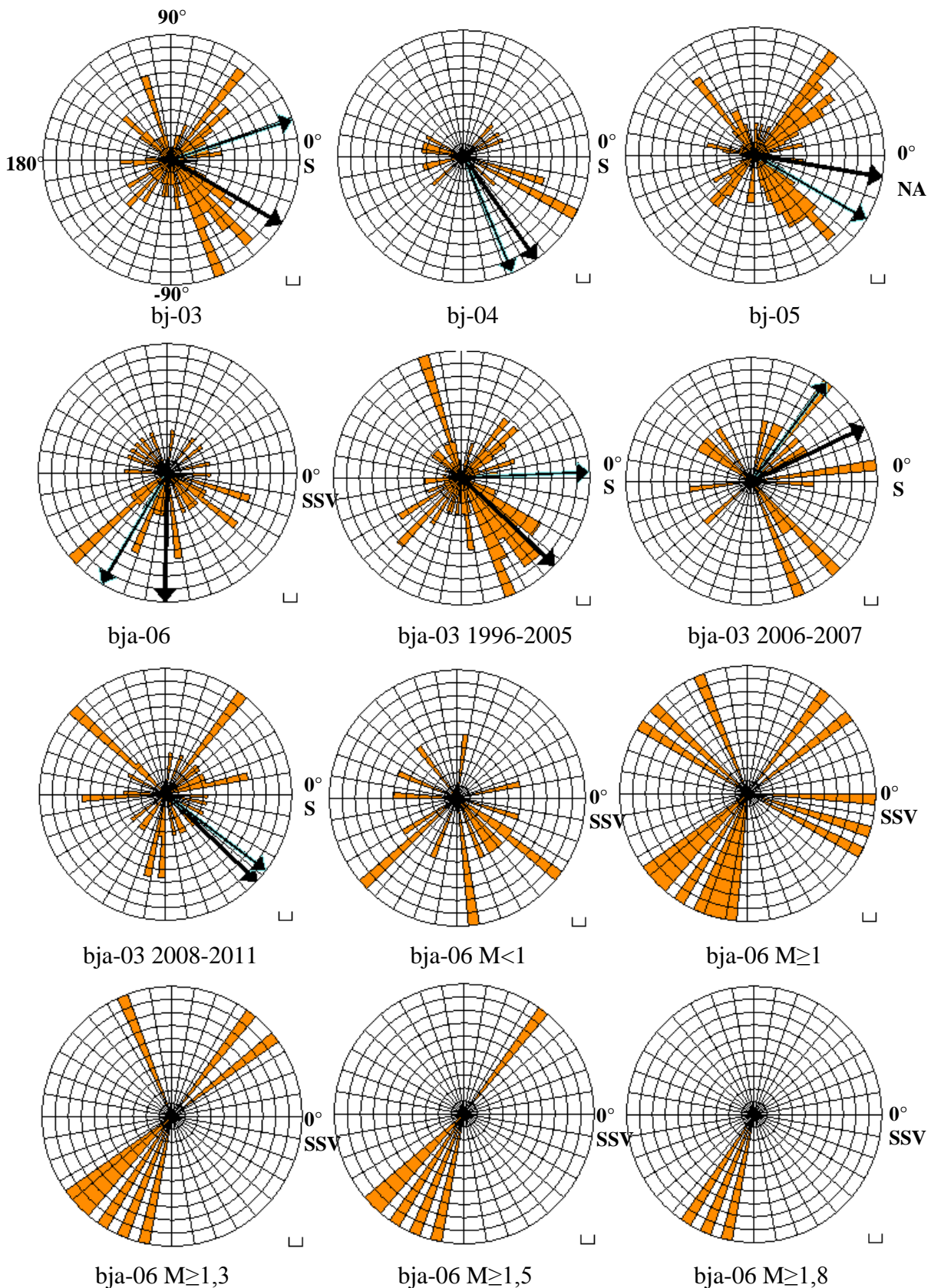
- Kristín S. Vogfjörð (2000). *Smáskjálftavirkni við Þeistareyki og uppsetning jarðskjálfta-mælanets í norður gosbelti*. Unnið fyrir Landsvirkjun, Þeistareyki ehf og Íslenska orku ehf. Reykjavík: Orkustofnun, OS-2000/037.
- Vogfjörð, K. S., Hjaltadóttir, S. & Slunga, R. (2005). Subsurface fault mapping with microearthquakes reveals volcano-tectonic interaction in the Hengill region, Iceland. *AGU Fall Meeting*, San Francisco, California, 5-9 December 2005, V14B-08.
- Kristín S. Vogfjörð & Sigurlaug Hjaltadóttir (2007). *Kortlagning skjálftavirkni við Hverahlíð á Hellisheiði í febrúar 2006*. Unnið fyrir Orkuveitu Reykjavíkur. Reykjavík: Veðurstofa Íslands, greinargerð 07010.
- Haukur Einarsson (2003). *Bjarnarflagsvirkjun 90 MWe og 132 kV Bjarnarflagslína 1 í Skútustaðahreppi. Mat á umhverfisáhrifum*. Reykjavík: Landsvirkjun, skýrsla 052.
- Stefánsson, R., Böðvarsson, R., Slunga, R., Einarsson, P., Jakobsdóttir, S., Bungum, H., Gregersen, S., Havskov, J., Hjelme, J. & Korhonen, H. (1993). Earthquake prediction research in the South Iceland seismic zone and the SIL project, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 83, 696–716.
- Rögnvaldsson, S. Th. & Slunga, R. (1993). Routine fault plane solutions for local and regional networks: a test with synthetic data. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 11, 1247-1250.
- Rögnvaldsson, S. Th. & Slunga, R. (1994). Single and joint fault plane solutions for microearthquakes in South Iceland, *Tectonophysics*, 237, 73-80.
- Sigurður Th. Rögnvaldsson, Kristín S. Vogfjörð & Ragnar Slunga (1999). Kortlagning brotflata á Hengilssvæði með smáskjálftum. *Rit Veðurstofu Íslands*, VÍ-R99002-JA01.
- Sigurlaug Hjaltadóttir & Kristín S. Vogfjörð (2006). *Kortlagning sprungna í Fagradalsfjalli á Reykjanes-skaga með smáskjálftum. Kortlagning jarðhita í gosbeltum Íslands – fyrsti áfangi*. Unnið fyrir Orkustofnun. Reykjavík: Veðurstofa Íslands, greinargerð 06001.
- Sigurlaug Hjaltadóttir & Kristín S. Vogfjörð (2009a). *Bitrusprungna á Hellisheiði kortlögð við gamla þjóðveg með endurstaðsettum smáskjálftum*. Reykjavík: Veðurstofa Íslands, VÍ 2009-005.
- Sigurlaug Hjaltadóttir & Kristín S. Vogfjörð (2009b). *Kortlagning sprungna í nágrenni Prestahnjúks, með smáskjálftum. Kortlagning jarðhita í gosbeltum Íslands – annar áfangi*. Unnið fyrir Orkustofnun. Reykjavík: Veðurstofa Íslands, VÍ 2009-011
- Sigurlaug Hjaltadóttir (2010). *Use of relatively located microearthquakes to map fault patterns and estimate the thickness of the brittle crust in Southwest Iceland*. Reykjavík: Veðurstofa Íslands, VÍ 2010-003.
- Slunga, R., Rögnvaldsson, S. Th. & Böðvarsson, R. (1995). Absolute and relative locations of similar events with application to microearthquakes in southern Iceland. *Geophys. J. Int.*, 123, 409–419.
- Waldhauser, F. & Ellsworth, W., (2000). A double-difference earthquake algorithm: Method and application to the northern Hayward Fault, California. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 90, 1353-1368.



# Viðauki A. Dreifing skriðhorna fyrir kortlagðar sprungur

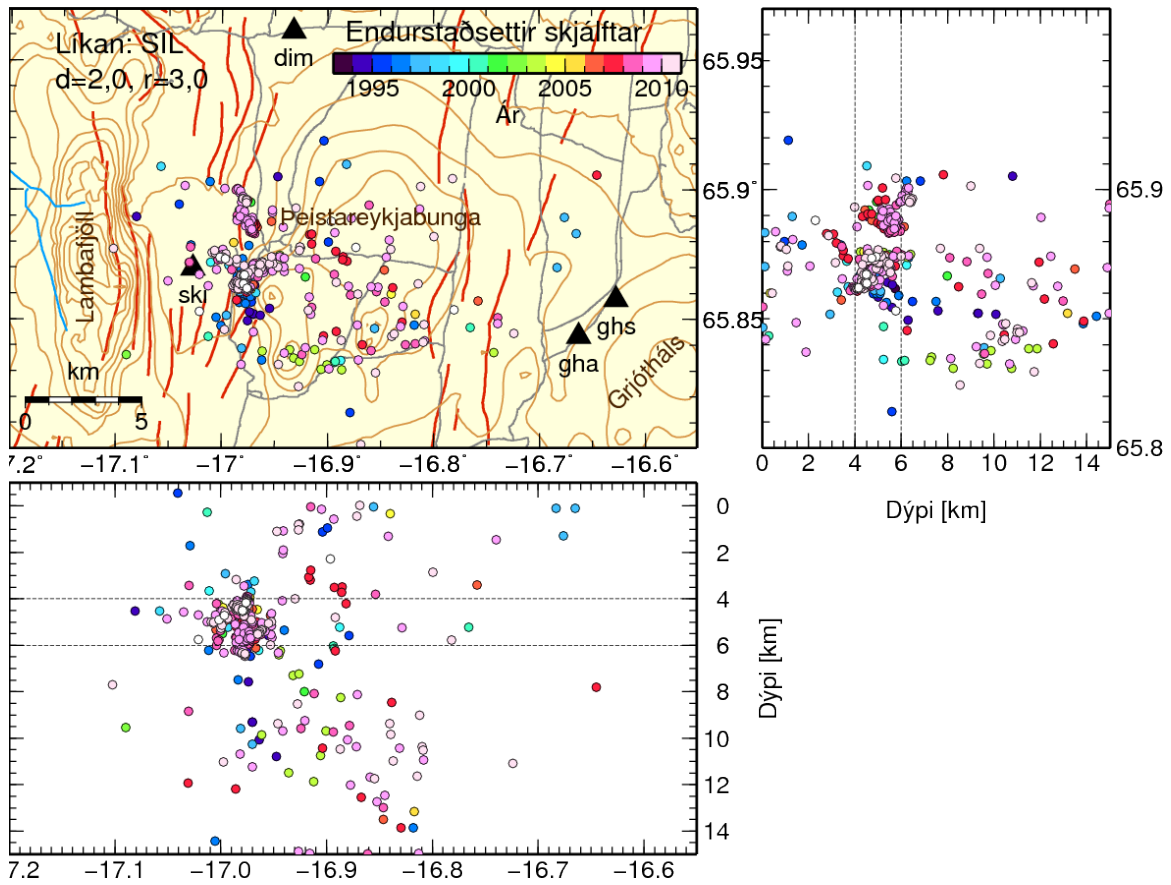


*Mynd A-1. Á fyrri síðu: Dreifing skriðhorna ( $\lambda$ ) á kortlögðum sprungum/þyrpingum á Þeistareykjasvæði. Skriðhorn er mælt rangsælis frá láréttu (sjá merkingar á fyrstu mynd). Svört, þykk ör sýnir þann þátt meðal-skriðvigurs ( $\lambda_{ave}$ ) sem liggur í fletinum sem skjálftadreifin ákvarðar en svört ör með grænbláum útlínunum þátt vegins meðaltals ( $\lambda_{wav}$ ), þar sem vigtað er með vægi skjálftanna,  $M_0$ . Hornadreifinni er skipt niður í  $5^\circ$  bil fyrir allar sprungur. Við  $0^\circ$  skriðhorn hefur einnig verið sett stefna striks til frekari glöggvunar.*

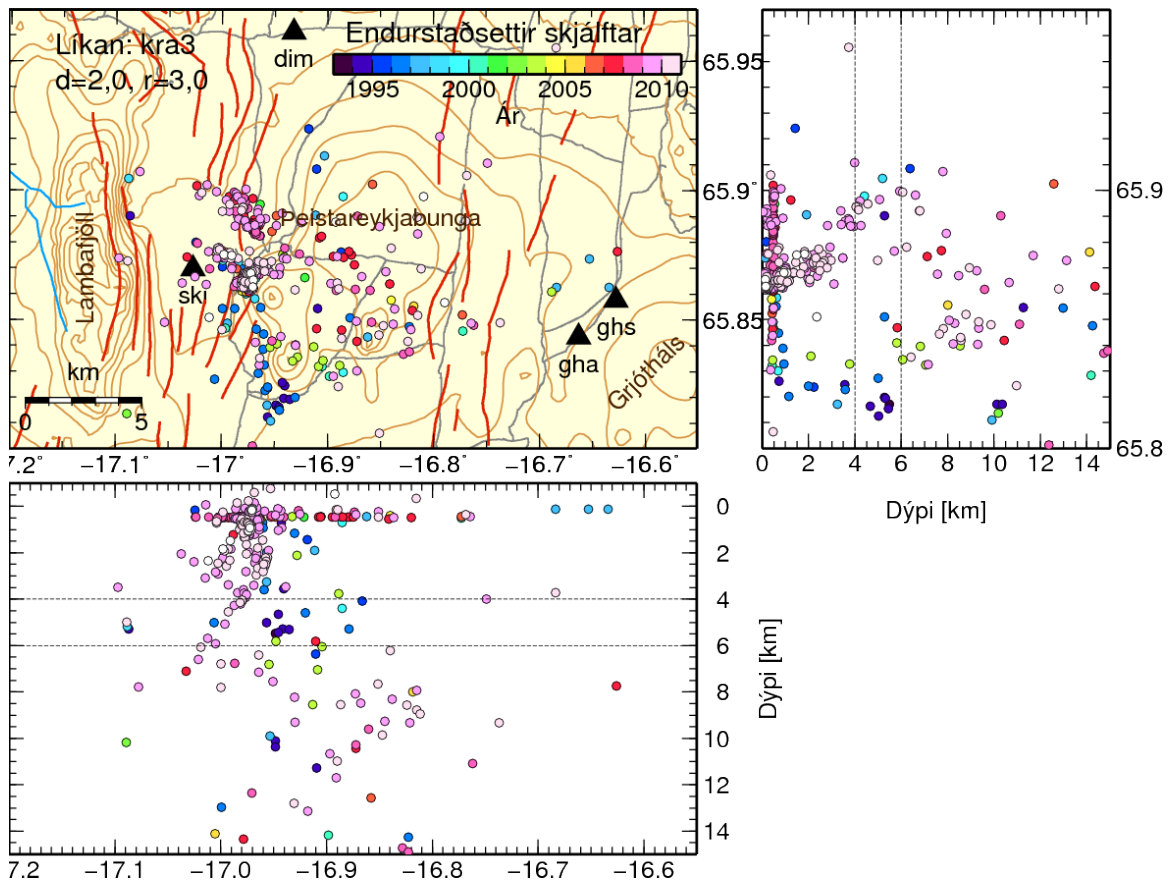


Mynd A-2. Dreifing skriðhorna ( $\lambda$ ) á kortlögðum sprungum/þyrpingum við Bjarnarflag. Skriðhorn er mælt rangsælis frá láréttu. Svört, þykk ör sýnir þann þátt meðal-skriðvigurs ( $\lambda_{ave}$ ) sem liggur í fletinum sem skjálftadreifin ákvarðar en svört ör með grænbláum útlínum þátt vegins meðaltals ( $\lambda_{wav}$ ), þar sem vigtað er með vægi skjálftanna,  $M_0$ . Hornadreifinni er skipt niður í  $5^\circ$  bil fyrir allar sprungur.

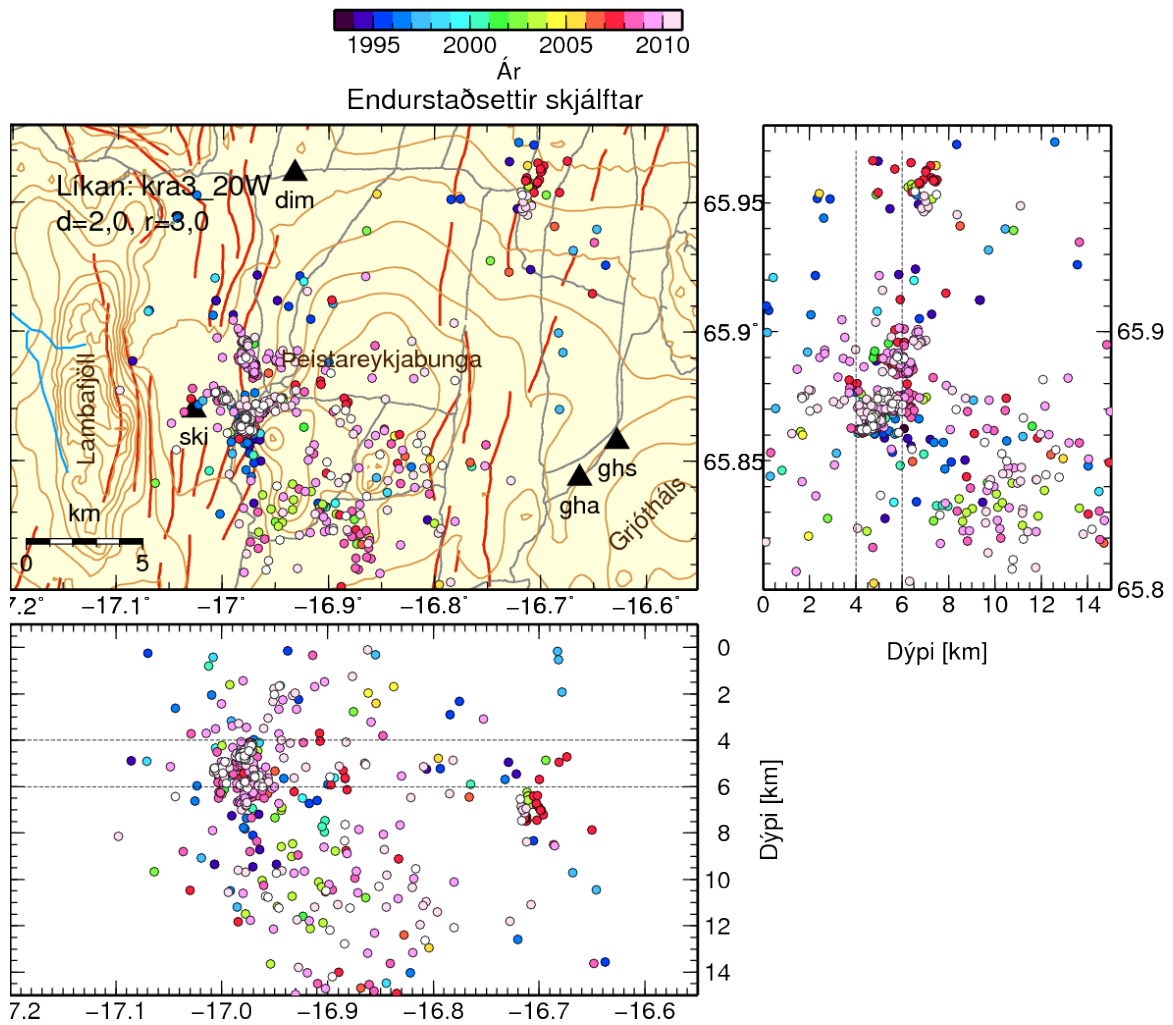
## Viðauki B. Kort af endurstaðsettum skjálftum í mismunandi hraðalíkönum.



Mynd B-1. Endurstaðsettir skjálftar á Þeistareykjasvæði í SIL-hraðalíkani. Svartir þríhyrningar sýna staðsetningu skjálftastöðva. Gráar línur tákna vegslóða, rauðar kortlagðar yfirborðssprungur (Haukur Jóhannesson & Kristján Sæmundsson, 1998). Viðmiðunarlínur til að auðvelda samanburð eru á 4 og 6 km dýpi.

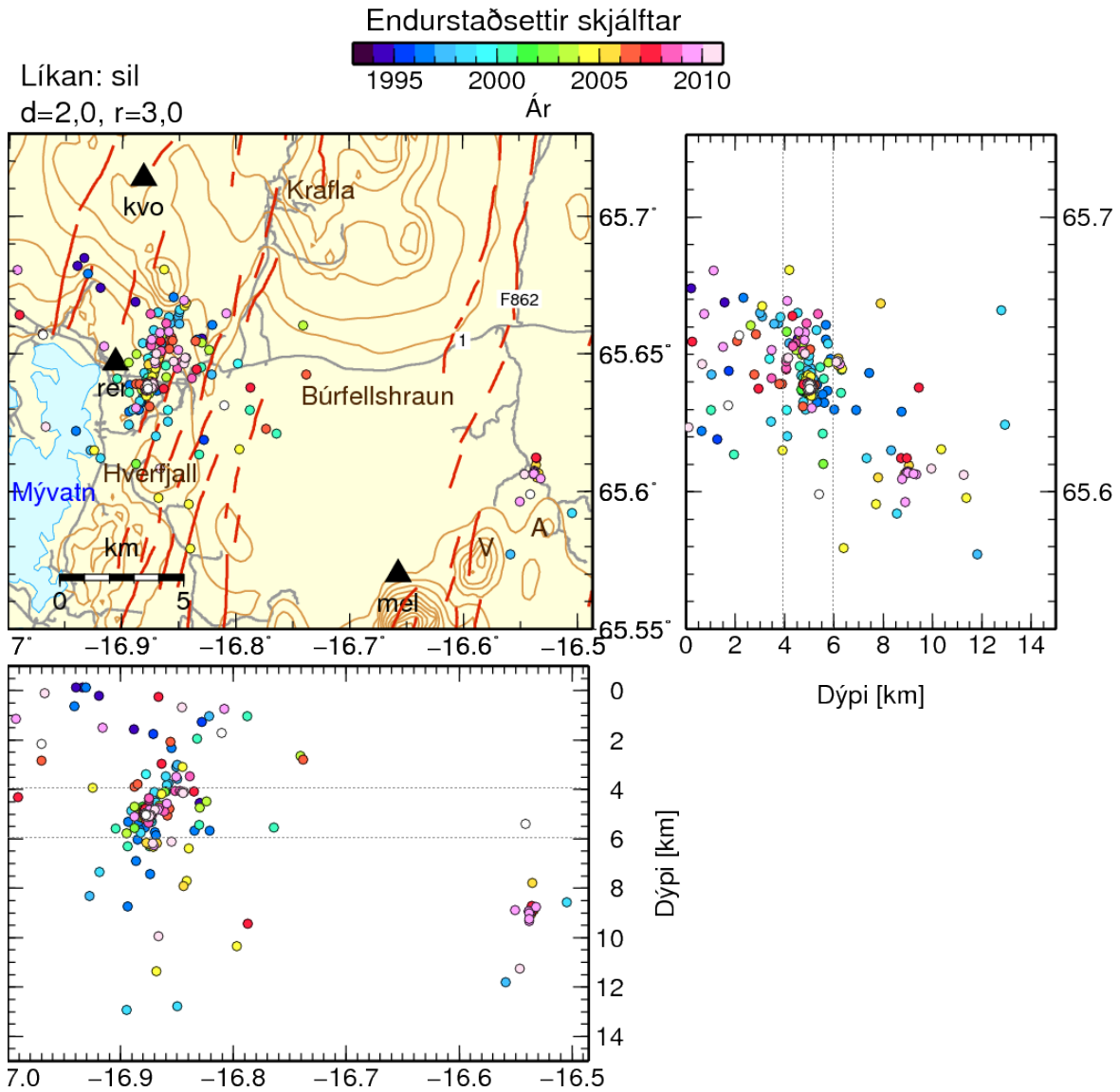


Mynd B-2. Endurstaðsettir skjálftar á Peistareykjasvæði í kra3-hraðalíkani. Svartir þríhyrningar sýna staðsetningu skjálftastöðva. Gráar línur tákna vegslóða, rauðar kortlagðar yfirborðssprungur (Haukur Jóhannesson & Kristján Sæmundsson, 1998). Viðmiðunarlínur til að auðvelda samanburð eru á 4 og 6 km dýpi.

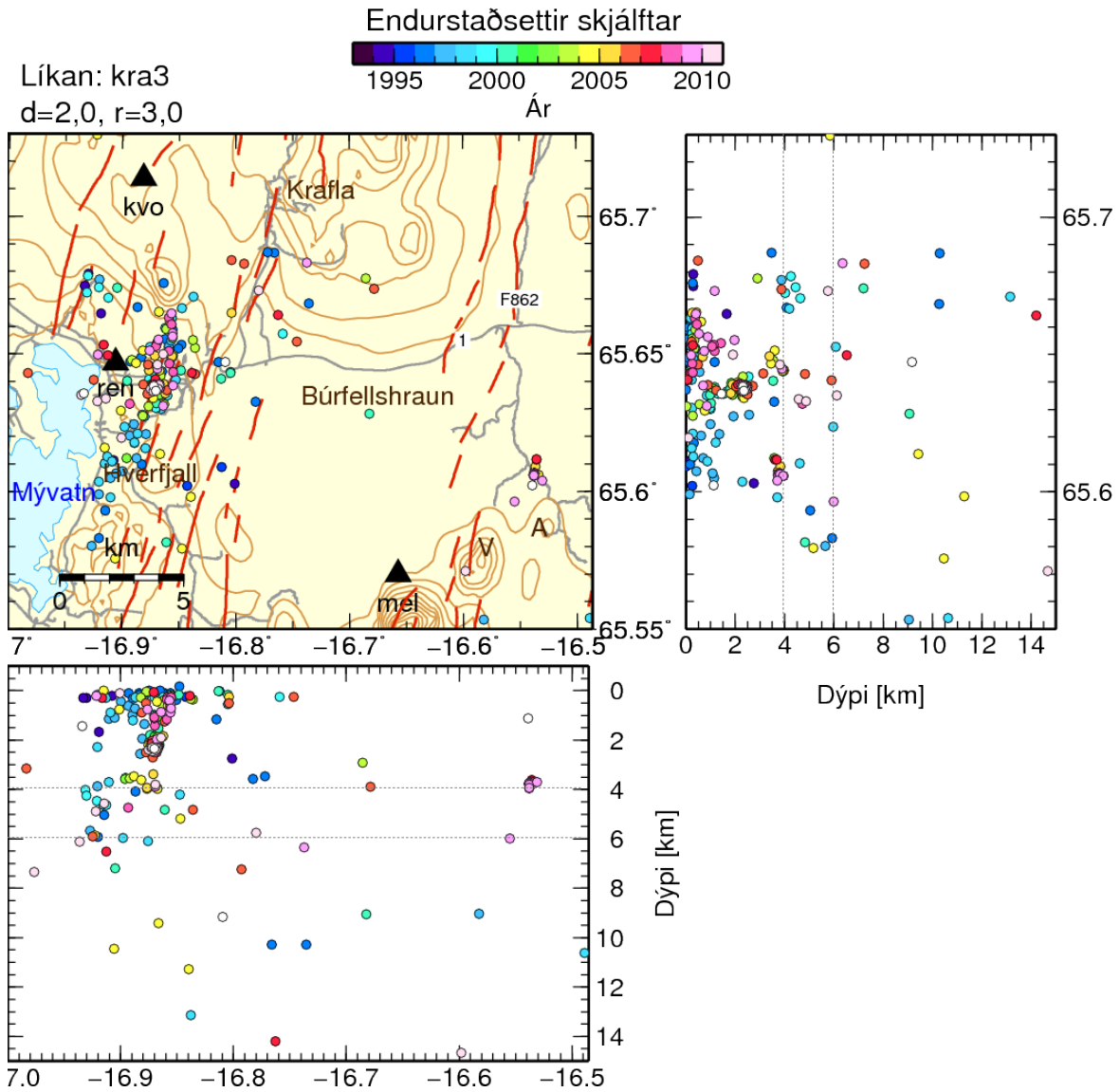


Mynd B-3. Endurstaðsettir skjálftar á Peistareykjasvæði í kra3-20W-hraðalíkani. Svartir þríhyrningar sýna staðsetningu skjálftastöðva. Gráar línur tákna vegslóða, rauðar kortlagðar yfirborðssprungur (Haukur Jóhannesson & Kristján Sæmundsson, 1998). Viðmiðunarlínur til að auðvelda samanburð eru á 4 og 6 km dýpi.

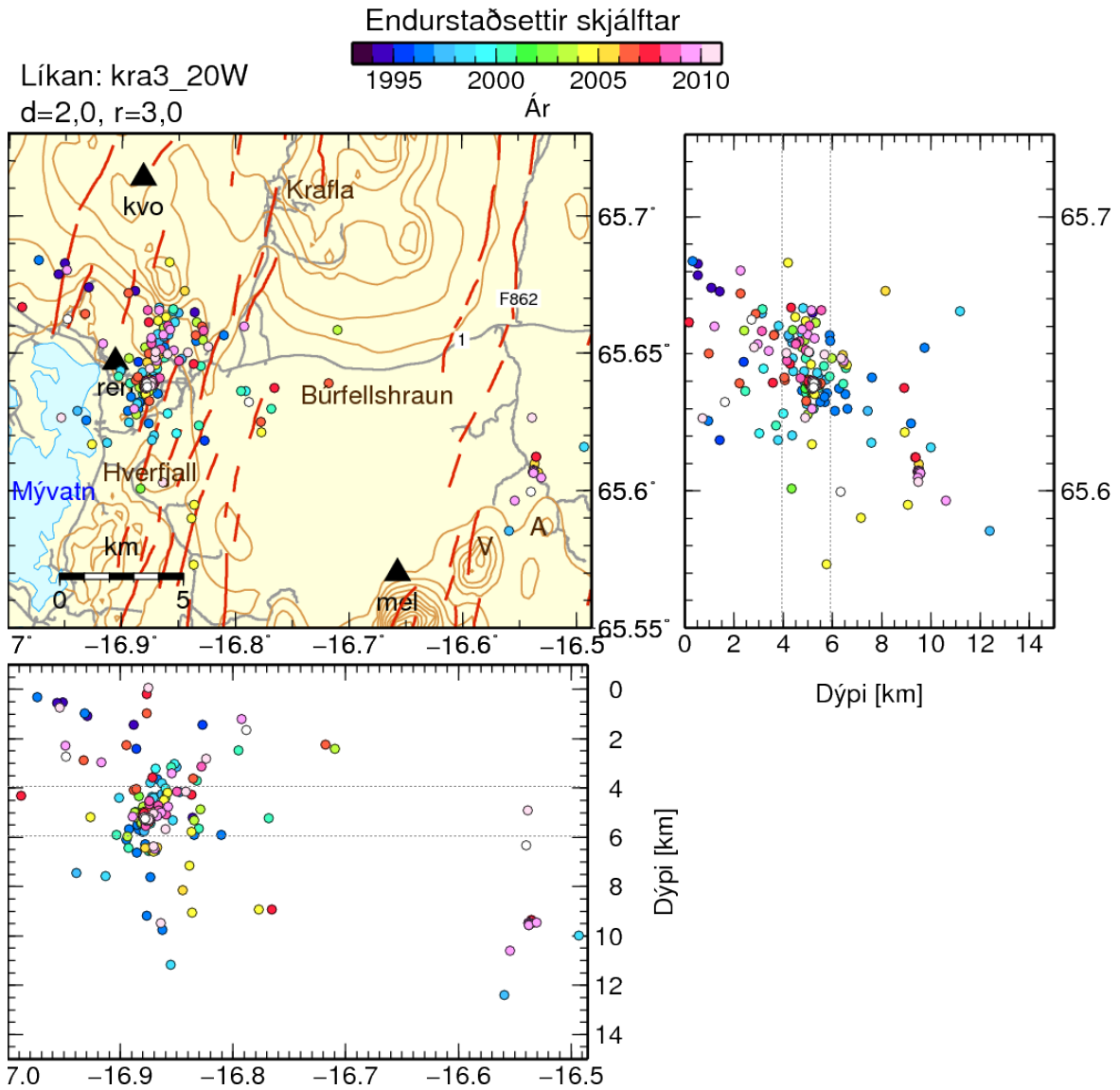




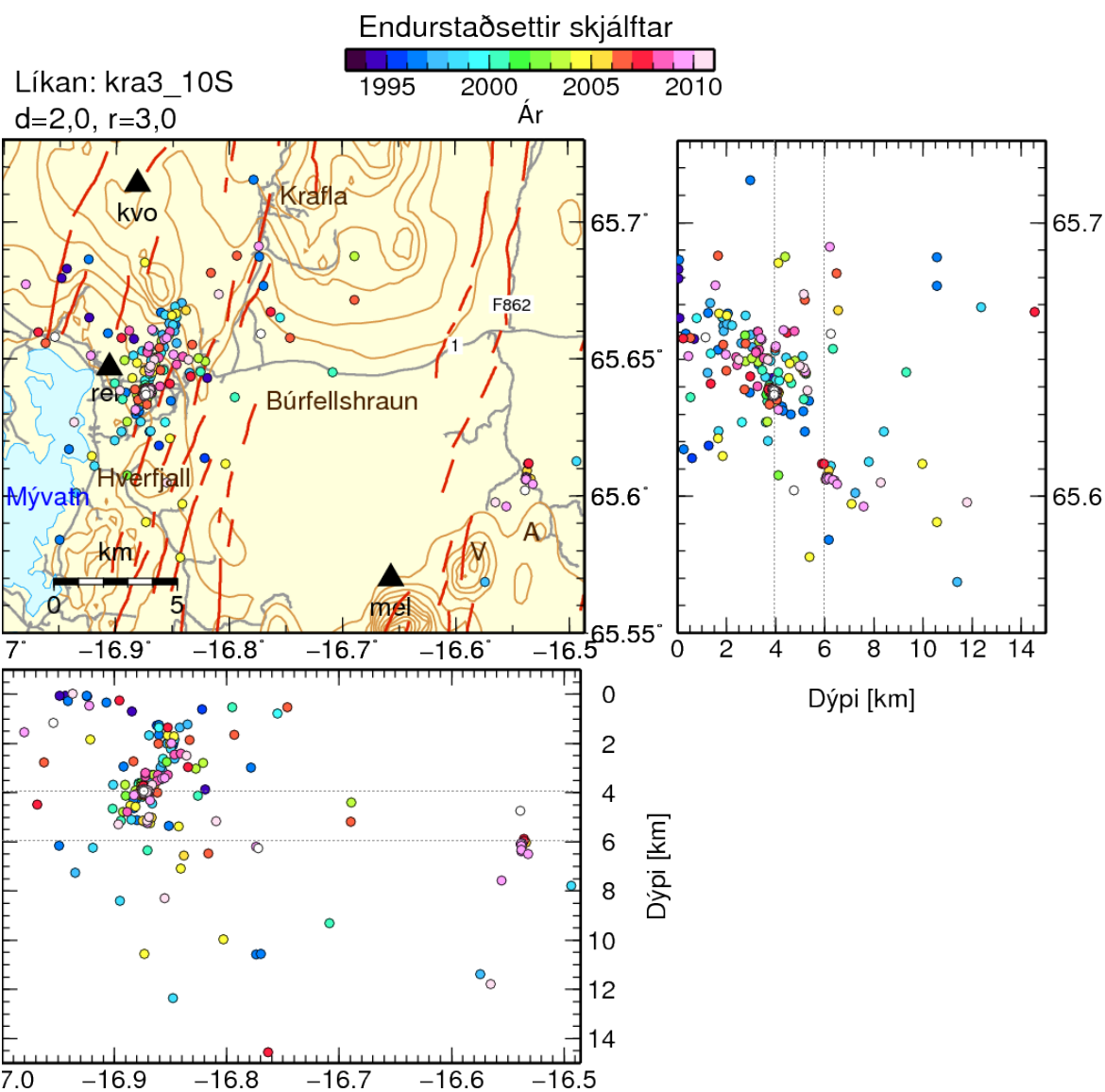
*Mynd B-4. Endurstaðsettir skjálftar við Bjarnarflag í SIL-hraðalíkani. Svartir þríhyrningar sýna staðsetningu skjálftastöðva. Gráar línur tákna vegslóða, rauðar kortlagðar yfirborðs-sprungur (Haukur Jóhannesson & Kristján Sæmundsson, 1998). Viðmiðunarlínur til að auðvelda samanburð eru á 4 og 6 km dýpi.*



Mynd B-5. Endurstaðsettir skjálftar við Bjarnarflag í kra3-hraðalíkani. Svartir þríhyrningar sýna staðsetningu skjálftastöðva. Gráar línur tákna vegslóða, rauðar kortlagðar yfirborðssprungur (Haukur Jóhannesson & Kristján Sæmundsson, 1998). Viðmiðunarlínur til að auðvelda samanburð eru á 4 og 6 km dýpi.



Mynd B-6. Endurstaðsettir skjálftar við Bjarnarflag í kra3-20W-hraðalíkani. Svartir þríhyrningar sýna staðsetningu skjálftastöðva. Gráar línur tákna vegslóða, rauðar kortlagðar yfirborðssprungur (Haukur Jóhannesson & Kristján Sæmundsson, 1998). Viðmiðunarlínur til að auðvelda samanburð eru á 4 og 6 km dýpi.



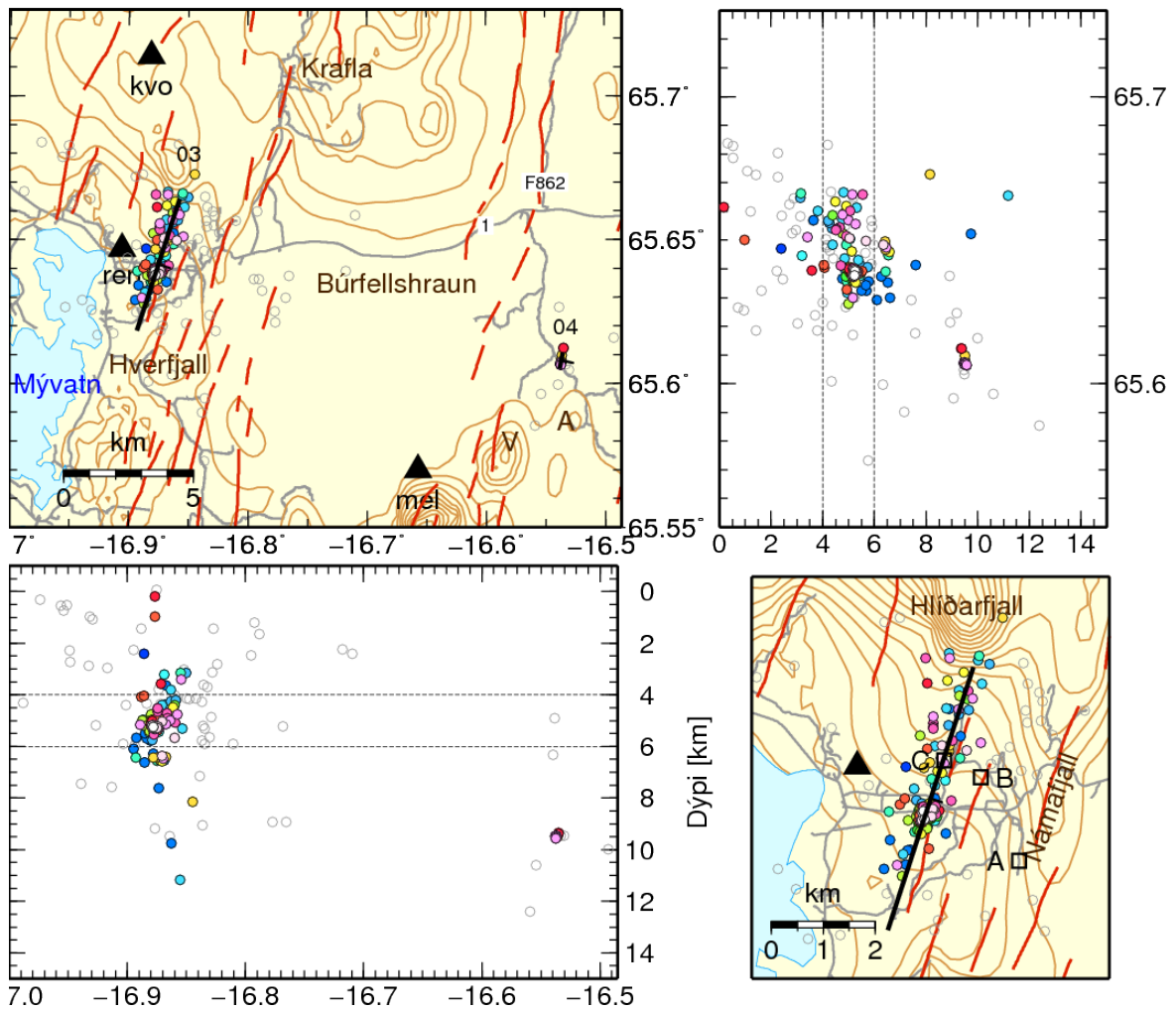
Mynd B-7. Endurstaðsettir skjálftar við Bjarnarflag í kra3-10S-hraðalíkani. Svartir þríhyrningar sýna staðsetningu skjálftastöðva. Gráar línur tákna vegslóða, rauðar kortlagðar yfirborðssprungur (Haukur Jóhannesson & Kristján Sæmundsson, 1998). Viðmiðunarlínur til að auðvelda samanburð eru á 4 og 6 km dýpi.

Líkan: kra3–20W

d=2,0, r=3,0

Grátt: aðrir skjálftar

Kortlagðar sprungur/þyrpingar



Mynd B-8. Sprungur sem greindar voru við Bjarnarflag í líkani kra3-20W. Skjálftar sem skilgreina sprungufleti eru litaðir eftir aldri, aðrir skjálftar sem mældust á svæðinu eru sýndir sem hringir í gráum lit. Gráar línur tákna vegi og vegslóða, rauðar línur tákna kortlagðar yfirborðssprungur (Haukur Jóhannesson & Kristján Sæmundsson, 1998). Svartir opnir ferningar sýna þrjár mögulegar staðsetningar nýs stöðvarhúss, A–C (Haukur Einarsson, 2003).



**Landsvirkjun**

Háaleitisbraut 68  
103 Reykjavík  
landsvirkjun.is

landsvirkjun@lv.is  
Sími: 515 90 00

