

Jarðskjálftavirkni við Blöndulón 1991–2017 og kortlagning sprungna með smáskjálftum

Sigurlaug Hjaltadóttir
Kristín S. Vogfjörð
Gunnar B. Guðmundsson

Jarðskjálftavirkni við Blöndulón 1991–2017 og kortlagning sprungna með smáskjálftum

Sigurlaug Hjaltadóttir, Veðurstofu Íslands
Kristín S. Vogfjörð, Veðurstofu Íslands
Gunnar B. Guðmundsson, Veðurstofu Íslands

Lykilsíða

Skýrsla nr. VÍ 2018-001	Dags. Janúar 2018	ISSN 1670-8261	Opin <input checked="" type="checkbox"/> Lokuð <input type="checkbox"/> Skilmálar:
Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill: Jarðskjálftavirkni við Blöndulón 1991–2017 og kortlagning sprungna með smáskjálftum		Upplag: 12 Fjöldi síðna: 46	
Höfundar: Sigurlaug Hjaltadóttir, Kristín S. Vogfjörð og Gunnar B. Guðmundsson		Framkvæmdastjóri sviðs: Jórunn Harðardóttir	
		Verkefnisstjóri: Kristín S. Vogfjörð	
		Verknúmer: 2821-3-0001	
Gerð skýrslu/verkstigi:		Málsnúmer: 2018-71	
Unnið fyrir: Landsvirkjun			
Samvinnuaðilar:			
Útdráttur: Í lok október 2010 hófst stærsta jarðskjálftahrina sem mælst hefur við suðaustanvert Blöndulón og stóð hún fram í miðjan janúar 2011. Þremur auka jarðskjálftamælum var komið fyrir tímabundið til þess að auka næmni SIL-jarðskjálftamælanetsins og til þess að hægt væri að kortleggja virknina með nákvæmari hætti. Fjöldi smáskjálfta mældist aukalega á viðbótarstöðvunum. Greint er frá jarðskjálftavirkni við lónið frá 1991 til júní 2017 og kortlagningu á þeim sprungum sem í ljós koma þegar skjálftarnir hafa verið endurstaðsettir (afstæðar staðsetningar). Fjórar sprungur voru kortlagðar við suður og suðausturenda lónsins. Þrjár þeirra voru virkar í 2010–2011 hrinunni, sú fjórða og vestasta í lítilli hrinu sem varð í ágúst 2011. Auk þess var lítill brotflötur kortlagður um 2 km norðaustan lónsins út frá skjálftum sem urðu í ágúst 2015. Brotfletir sprungnanna hafa nær allir NNV-læga stefnu, líkt og þær yfirborðsprungur sem kortlagðar hafa verið allra nyrst í Vestra gosbeltinu, rétt norður af Langjökli. Samtúlkun á brotlausnum skjálftanna á hverjum sprungufleti fyrir sig bendir til þess að lóðrétt hreyfing sé ráðandi á sprungunum við sunnanvert Blöndulón en hægri-sniðgengishreyfing við norðanvert lónið.			
Lykilorð: Blöndulón, Vestra gosbeltið, smáskjálftar, skjálftavirkni, afstæðar staðsetningar, upptakagreining, brotflétir		Undirskrift framkvæmdastjóra sviðs: 	
		Undirskrift verkefnisstjóra: 	
		Yfirfarið af: SG	

Efnisyfirlit

1	ÁGRIP	9
2	INNGANGUR	11
3	GÖGN OG FRUMÚRVINNSLA.....	14
3.1	Uppsetning mæla og söfnun gagna	14
3.2	Skjálftavirkni við Blöndulón 1991–2017	15
3.3	Skjálftavirkni við Blöndulón 26. október 2010 – 16. janúar 2011	18
4	AÐFERÐIR	21
4.1	Afstæðar staðsetningar	21
4.2	Brotlausnir og hreyfing á kortlögðum sprungum	21
5	ÚRVINNSLA OG NIÐURSTÖÐUR	23
5.1	Afstæðar staðsetningar skjálfta staðsettir eingöngu í SIL-kerfi	23
5.2	Afstæðar staðsetningar með SIL stöðvum og aukastöðvum	23
5.3	Kortlagðar sprungur	27
5.3.1	Sprungur á tímabili 1, 1991–2017	28
5.3.2	Sprungur á tímabili 2, 26. október 2010 – 16. janúar 2011	29
5.4	Könnun á hliðrun sprungna	32
6	UMRÆÐA OG SAMANTEKT	39
	ÞAKKIR	42
	HEIMILDIR	43
	VIÐAUKI I. DREIFING SKRÍÐHORNA FYRIR KORTLAGÐAR SPRUNGUR	45

Myndaskrá

Mynd 1. Uptök jarðskjálfta sem mældust með SIL-kerfinu við Blöndulón og nágrenni frá 1991 og til 1.júní 2017 (tímabil 1).....	12
Mynd 2. Uppsafnaður fjöldi skjálfta sem mælt hafa í SIL-kerfi á tímabili 1 (1991–2017) og stærðir jarðskjálfta frá Blöndulóni og suður að Langjökli.	13
Mynd 3. Upphaflegar staðsetningar skjálfta við Blöndulón sem mældust í SIL-kerfinu á tímabilinu frá 1. janúar 1991 til 1. júní 2017 (tímabili 1).	16
Mynd 4. Efri hluti: Uppsafnaður fjöldi skjálfta og uppsafnað skjálftavægi jarðskjálfta við Blöndulón (á svæði 1) frá október 2010 fram í janúar 2011 (tímabil 2). Neðri hluti: Stærðir jarðskjálftanna.	17
Mynd 5. Upphaflegar og enduryfirfarnar staðsetningar 670 skjálfta sem mældust í SIL-kerfinu og á viðbótarstöðvum við Blöndulón á tímabilinu frá 26. október 2010 til 16. janúar 2011 (tímabili 2).	19
Mynd 6. Sömu skjálftar og staðsetningar og á Mynd 5 nema hér hefur litakvarða verið breitt til að fá betri upplausn í tíma, og spannar hér aðeins tímabil 2	20
Mynd 7. Afstæðar staðsetningar skjálfta sem mældust við Blöndulón í SIL-kerfinu á tímabilinu frá 1. janúar 1991 til 1. júní 2017.....	24
Mynd 8. Afstæðar staðsetningar skjálfta sem mældust í SIL-kerfinu og á viðbótarstöðvum við Blöndulón á tímabilinu frá 26. október 2010 til 16. janúar 2011 (tímabili 2).....	25
Mynd 9. Sömu skjálftar og staðsetningar og á Mynd 8 (afstæðar staðsetningar á tímabili 2) nema hér hefur litakvarða verið breitt og spannar hér aðeins tímabil 2.	26
Mynd 10. Kortlagðar sprungur sýndar sem litaðir hringir og svört strik á tímabili 1, út frá endurstaðsettum skjálftum sem mældust á SIL-stöðvum 1991–2017.	30
Mynd 11. Kortlagðar sprungur sýndar sem litaðir hringir og svört strik á tímabili 2, út frá endurstaðsettum skjálftum sem mældust á SIL- og viðbótarstöðvum (bl1, bl2 og bl3) 26. október 2010 – 16. janúar 2011.	31
Mynd 12. Úrval 75 skjálfta sem samanstendur af þremur 25 skjálfta hópum: 1) skjálftum sem urðu áður en aukastöðvar voru settar upp; 2) þeim skjálftum sem urðu eftir að aukastöðvar voru settar upp og mældust bæði í SIL-kerfinu og á aukastöðvum; og 3) skjálftum sem mældust aðeins á aukastöðvum á sama tímabili og skjálftar í hóp 2.	34
Mynd 13. Afstæðar staðsetningar þeirra skjálfta sem sýndir eru á Mynd 12.	35
Mynd 14. Kortlagðar sprungur frá tímabilum 1 og 2.	36
Mynd 15. Hliðraðar, kortlagðar sprungur frá tímabilum 1 og 2.	37
Mynd 16. Normuð tíðnirit sem sýna dreifingu skriðhorna (λ) á kortlögðum sprungum/þyrpingum við Blöndulón fyrir tímabil 1 (skjálfta sem mældust aðeins með SIL-kerfinu).	45
Mynd 17. Normuð tíðnirit sem sýna dreifingu skriðhorna (λ) á kortlögðum sprungum/þyrpingum við Blöndulón fyrir tímabil 2.	46
Mynd 18. Normuð tíðnirit sem sýna dreifingu skriðhorna (λ) á brotflatinum spr-06 sem skilgreindur er út frá þeim 74/75 skjálftum sem endurstaðsettir voru til þess að meta hliðrun á stærstu sprungunni.	47

Töfluskra

Tafla 1. Upplýsingar um Blöndulónsstöðvar.....	14
Tafla 2. Helstu frávik á fjölda skráa á dag fyrir hverja stöð.....	14
Tafla 3. Fjöldi skráðra skjálfta á mánuði í SIL-kerfinu og aukalega með stöðvunum bl1, bl2 og bl3.....	18
Tafla 4. Helstu kennistærðir fyrir sprungur/skjálftaþyrpingar við Blöndulón sem greindust bæði á tímabili 1 og tímabili 2.....	27
Tafla 5. Hliðrun á kortlögðum sprungum og endurmat á staðsetningu þeirra.....	38

Ágrip

Í lok október 2010 hófst jarðskjálftahrina við suðaustanvert Blöndulón og stóð hún fram í miðjan janúar 2011. Hrinan er sú stærsta sem mælst hefur við lónið. Eftir að hún hófst var þremur auka jarðskjálftamælum komið fyrir tímabundið til þess að auka næmni SIL-jarðskjálftamælanetsins og til þess að hægt væri að kortleggja virknina með nákvæmari hætti. Fjöldi smáskjálfta mældust aukalega á viðbótarstöðvunum. Hér er greint frá jarðskjálftavirkni við lónið frá árinu 1991 til júní 2017 og kortlagningu á þeim sprungum sem í ljós koma þegar skjálftarnir hafa verið endurstaðsettir (afstæðar staðsetningar). Fjórar sprungur voru kortlagðar við suður og suðausturenda lónsins. Þrjár þeirra voru virkar í 2010–2011 hrinunni, sú fjórða og vestasta í lítilli hrinu sem varð í ágúst 2011. Auk þess var lítill brotflötur kortlagður um 2 km norðaustan lónsins út frá skjálftum sem urðu í ágúst 2015. Brotfletir sprungnanna hafa nær allir NNV-læga stefnu, líkt og þær yfirborðssprungur sem kortlagðar hafa verið allra nyrst í vestra gosbeltinu, rétt norður af Langjökli. Samtúlkun á brotlausnum skjálftanna á hverjum sprungufleti fyrir sig bendir til þess að lóðrétt hreyfing sé ráðandi á sprungunum við sunnanvert Blöndulón, en hægri-sniðgengishreyfing við norðanvert lónið.

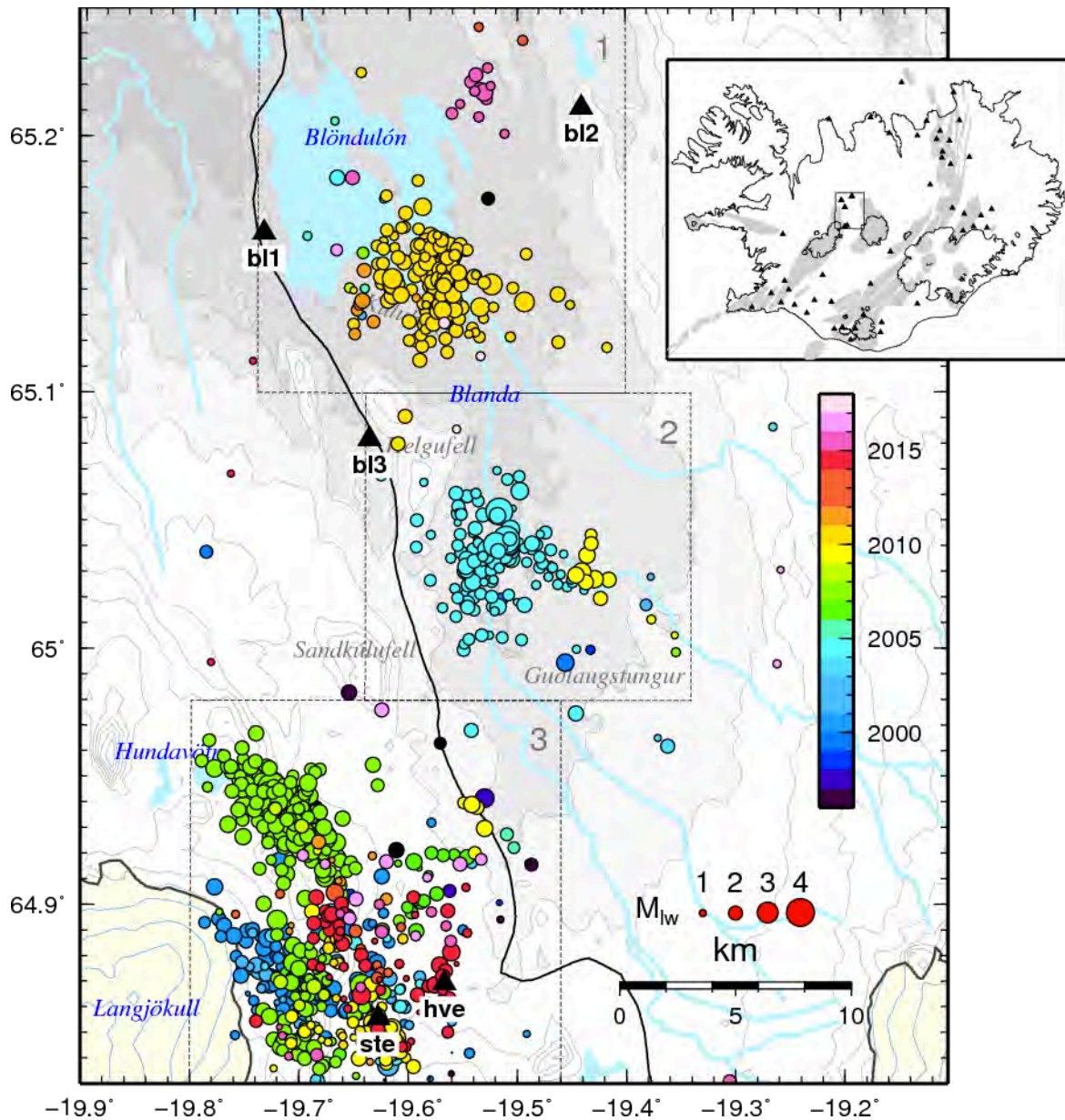
1 Inngangur

Þann 26. október árið 2010 hófst jarðskjálftahrina við sunnanvert Blöndulón og stóð hún fram í miðjan janúar 2011. Hrinan var sú fyrsta og sú stærsta sem mælst hefur við lónið frá því að sjálfvirkar, stafrænar jarðskjálftamælingar hófust á Íslandi með SIL-kerfi Veðurstofu Íslands um mitt ár 1991 (Reynir Böðvarsson o.fl., 1996). Frá þeim tíma og fram að hrinunni haustið 2010 höfðu aðeins stöku skjálftar verið mældir við Blöndulón (á svæði 1, Mynd 1), eða um tugur skjálfta.

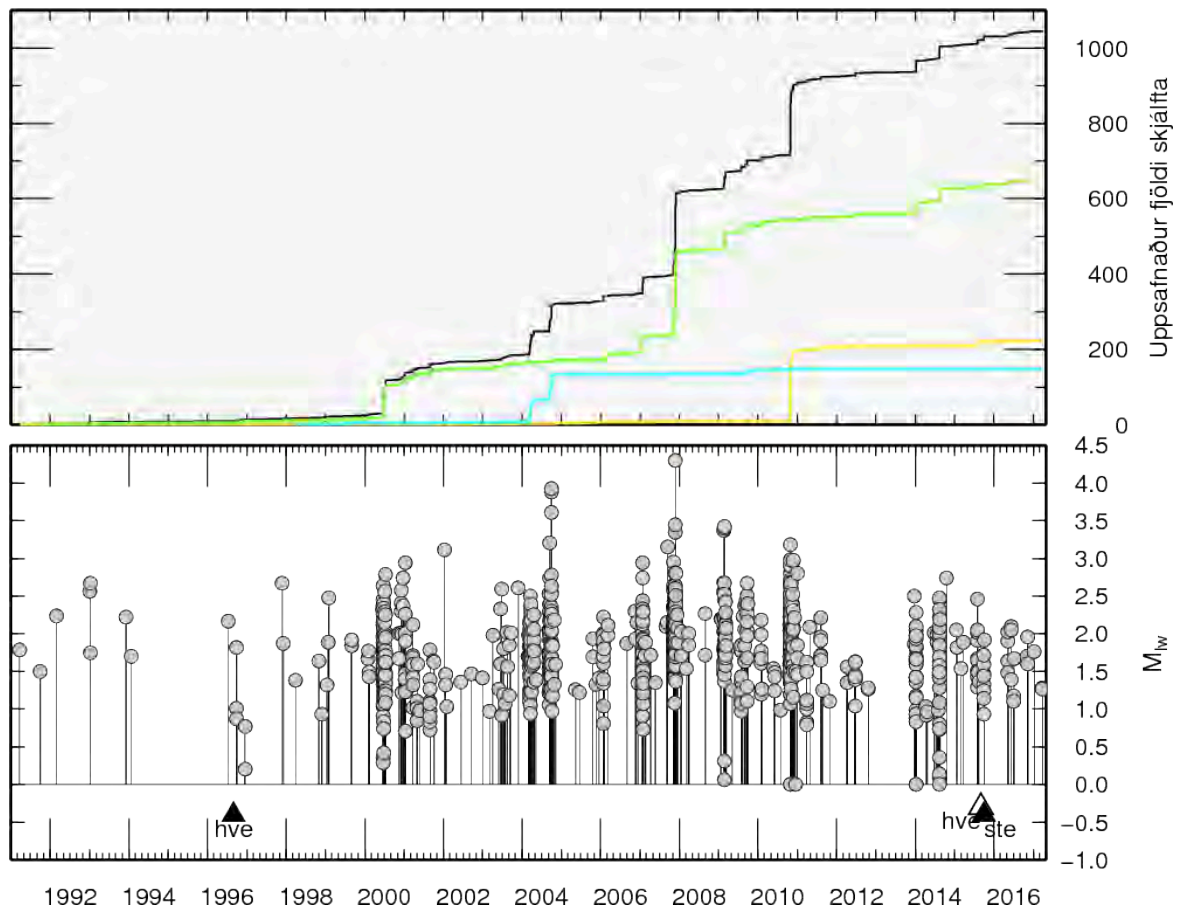
Skjálftar verða nokkuð reglulega í nyrsta hluta Vestra gosbeltisins, rétt norðvestur af Langjökli (svæði 3), en frá upphafi mælinga með SIL-kerfinu hafa mælst þar um 650 skjálftar ($0,1 \leq M_{lw} \leq 4,3$) eða ríflega 60 % þeirra u.þ.b. 1050 skjálfta sem mælst hafa á svæðinu öllu frá norðvestanverðum Langjökli og norður fyrir Blöndulón (Mynd 2). Sjaldgæfara er að skjálftar mælist norðan Sandkúlufells (norðan $\approx 64.97^\circ\text{N}$).

Árið 2004 mældust þó tvær hrinur nokkuð norðar, eða við Guðlaugstungur, 10–15 km sunnan Blöndulóns, nærri farvegi Blöndu (svæði 2 á Mynd 1; blár ferill á Mynd 2). Í fyrri hrinunni mældust um 60 skjálftar en sú hrina hófst með stökum skjálfta þann 26. febrúar og stóð svo yfir fram í lok marsmánaðar. Síðari hrinan varði frá 10. september fram í byrjun október; á því tímabili mældust á áttunda tug skjálfta. Jarðskjálftarnir ($0,9 \leq M_{lw} \leq 3,9$) sem urðu í þessum tveimur hrinum voru endurstaðsettir og brotpletirnir sem þeir urðu á kortlagðir (Sigurlaug Hjaltadóttir o.fl., 2005). Skjálftaupptök mars-hrinunnar mynduðu N-S línu en upptök skjálftanna í október urðu um kílómetra austar og mynduðu fremur þetta þyrpingu sem virtist hafa NNV-læga stefnu. Skjálftarnir voru skv. þessum niðurstöðum frekar grunnir, flestir á 1,5–5 km dýpi en dýptarnákvæmni staðsetninganna takmarkast þó af því að næsta stöð var í 16–20 km fjarlægð. Þriðja hrinan við Guðlaugstungur varð í september 2009 en þá mældist um tugur skjálfta 4–5 km austan 2004-sprungnanna, allir að stærð $M_{lw} \leq 2,7$.

Stuttu eftir að hrinan við Blöndulón hófst í lok október 2010 var þremur tímabundnum jarðskjálftastöðvum komið fyrir við lónið til að hægt væri að auka næmni og staðsetja virknina þar með meiri nákvæmni. Nálægustu fastastöðvar SIL-netsins voru þá í 30 km fjarlægð á Hveravöllum, á Skrokköldu (Sprengisandi) í 85 km fjarlægð, á Ásbjarnarstöðum í Þverárhlið (í uppsveitum Borgarfjarðar) í 93 km fjarlægð og á Hellu á Árskógsströnd í Eyjafirði í 105 km fjarlægð. Hér verður fjallað um úrvinnslu á þeim skjálftagögnum sem safnað var og þeim atburðum sem skráðir hafa verið á svæðinu með SIL-kerfinu frá upphafi og fram til 1. júní 2017. Markmið rannsóknarinnar var að auka bæði næmni kerfisins og nákvæmni skjálftastaðsetninganna með gögnum frá nýju stöðvunum og að beita víxl-fylgniaðferð (*e. cross-correlation*) á öll bylgjugögnin, til þess að auka staðsetningar-nákvæmni skjálftanna og kortleggja þær sprungur sem skjálftarnir verða á.



Mynd 1. Upptök jarðskjálfta sem mældust með SIL-kerfinu við Blöndulón og nágrenni frá 1991 og til 1. júní 2017 (tímabil 1). Hringir eru litaðir eftir því hvenær skjálftarnir urðu. Skjálftar sem mældust á tímabilinu 1991–1995 eru aðeins átta og eru svartir að lit. Svartir þríhyrningar sýna staðsetningu skjálftastöðva. Tímabundnar stöðvar sem settar voru upp við Blöndulón eru merktar b11, b12 og b13. Innfellda myndin sýnir sprungureinar (grá svæði, Páll Einarsson og Kristján Sæmundsson, 1987) og stærð svæðisins sem kortið spannar.



Mynd 2. Uppsafnaður fjöldi skjálfta sem mælt hafa í SIL-kerfi á tímabili 1 (1991–2017) (efri hluti) og stærðir jarðskjálfta (neðri hluti) frá Blöndulóni og suður að Langjökli (á því svæði sem kort á mynd 1 spannar). Uppsafnaður fjöldi fyrir allt svæðið er teiknaður með svartri línu. Uppsafnaður fjöldi á svæðum 1–3 á mynd 1 er einnig sýndur: með gulri línu fyrir svæði 1, ljósblárra fyrir svæði 2 og grænni fyrir svæði 3. Svartir þríhyrningar sýna hvenær nálægustu stöðvar (við Hveravelli og síðar Stélfbratt) voru teknar í notkun, hvítur þríhyrningur sýnir hvenær Hveravallastöðin var lögð niður.

2 Gögn og frumúrvinnsla

2.1 Uppsetning mæla og söfnun gagna

Aukastöðvarnar þrjár voru settar upp dagana 8., 9. og 10. nóvember 2010 og skráðu gögn fram í byrjun árs 2011. Þær voru staðsettar vestan lónsins á Áfangafelli (**bl1**), austan lóns, suður af Buguskála (**bl2**) og sunnan lóns, vestur af Helgufelli (**bl3**), í 6–12 km fjarlægð frá upptökum jarðskjálftanna. Reftek skráningartæki voru notuð á öllum stöðvunum til þess að safna gögnum á söfnunartíðninni 100 gildi á sekúndu. Á tveimur stöðvanna var nemi af gerð Lennartz LE-5s sem er stuttbylgjunemi með horntíðni við 0,2 Hz og jafna svörun í hraða á tíðnum þar fyrir ofan og upp að hæstu tíðni (50 Hz, Nyquist) sem takmarkast af söfnunartíðni gagnanna. Á þriðju stöðinni var breiðbandsnemi af gerð Geotech KS-2000M með jafna svörun frá 0,008 Hz (120 s) og upp að hæstu tíðni (50 Hz). Rafgeymum, stafsetjurum, GSM-módemum og lágspennurofa var komið fyrir í einöngruðum álkassa við hlið nemans og stöng með GSM-loftneti var fest við kassann. Upplýsingum um ástand stöðvarinnar var streymt í rauntíma til Veðurstofu, en gögn voru sótt sérstaklega yfir netið eða af minniskortum skráningartækisins þegar stöðvarmar voru teknar niður. Tafla 1 sýnir yfirlit yfir staðsetningu nemanna, söfnunartíma og tækniupplýsingar. Gögnin úr auka-stöðvunum þremur voru ekki með í sjálfvirkri úrvinnslu SIL-kerfisins.

Tafla 1. Upplýsingar um Blöndulónsstöðvar.

Stöð	Upphafs-tími	Lokatími	Hnit	Kennileiti	Nemi	Stafsetjari	Fjöldi skráa
bl1	2010-11-08 20:16	2011-01-31 13:16	N65,16247° A-19,73447°	Á Áfangafelli	LE-5	Reftek AF43	47
bl2	2010-11-09 14:32	2011-02-02 06:30	N65,21150° A-19,44090°	Suður af Buguskála	LE-5	Reftek AF81	27
bl3	2010-11-10 08:58	2011-01-26 11:04	N65,08193° A-19,63644°	SV af Helgufelli	Geotech KS-2000M	Reftek AF1D	14

Reftek skrárnar eru að jafnaði 2 mínútur að lengd þannig að ef allt er með felldu eiga að vera 720 skrár fyrir hvern dag og hver skrá um 45056 bæti að stærð. Til að fá yfirlit yfir gagnasöfnun var tekinn saman fjöldi skráa á dag fyrir nemana svo og stærð þeirra. Tafla 1 sýnir fjölda Reftek-skráa á hverri stöð sem er undir 45056 bæti að stærð. Fyrir utan byrjunar- og lokadaga var daglegur fjöldi Reftek-skráa að jafnaði ekki mikið undir 720. Tafla 2 sýnir helstu undantekningar og tvo verstu daga á hverri stöð. Þar sést að eingöngu einn dagur hefur dottið algerlega út, á stöðinni **bl2** þann 27. nóvember 2010.

Tafla 2. Helstu frávik á fjölda skráa á dag fyrir hverja stöð.

Stöð	Dagur 1	Fjöldi 1	Dagur 2	Fjöldi 2
bl1 (AF43)	2010-12-31	708	2011-01-02	714
bl2 (AF81)	2010-11-27	0	2010-12-31	710
bl3 (AF1D)	2010-12-22	693	2010-12-31	712

2.2 Skjálftavirkni við Blöndulón 1991–2017 skráð á SIL-stöðvar og staðsett með SIL-kerfinu (tímabil 1)

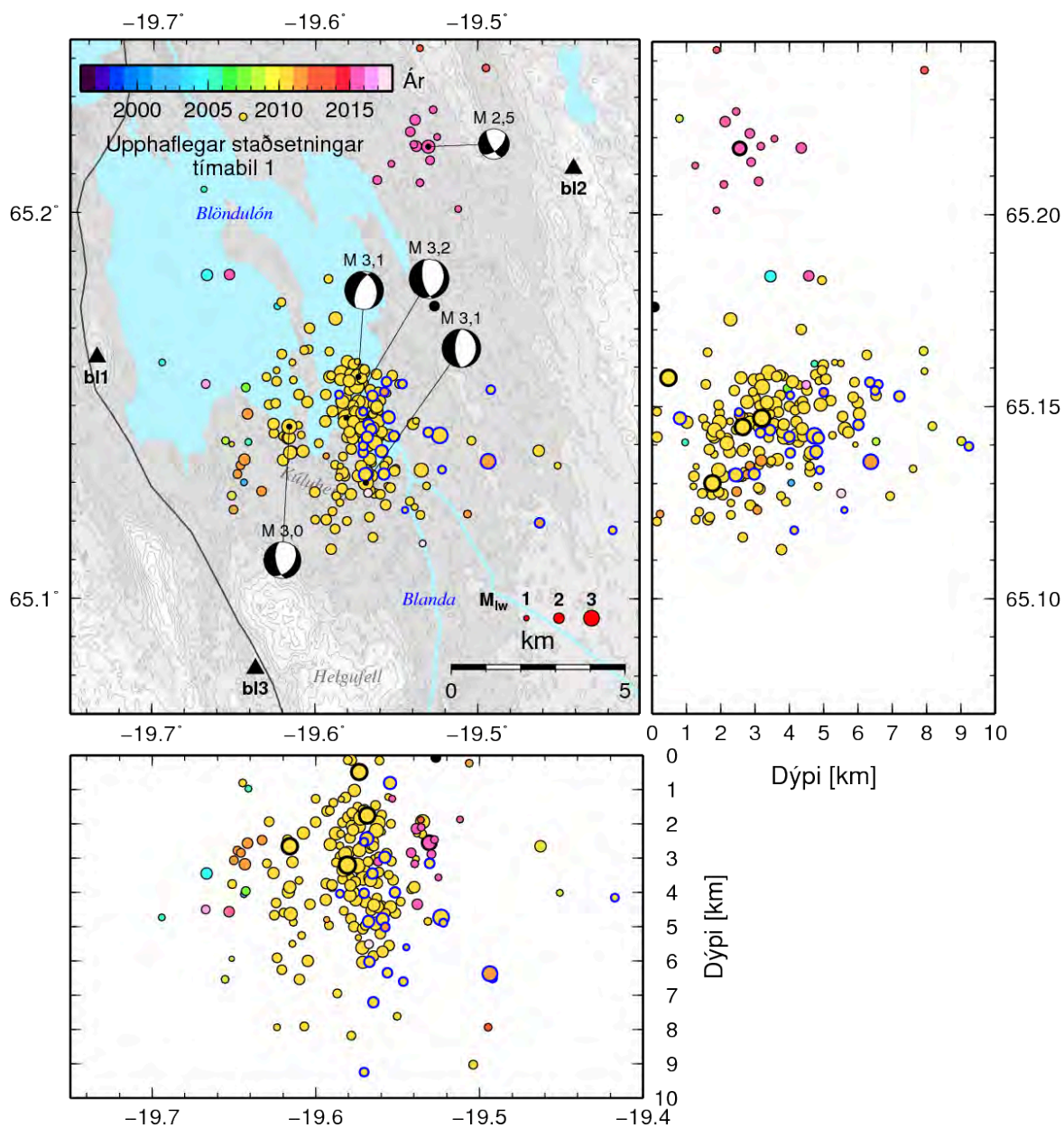
Frá 1991 og fram til 1. júní 2017 (tímabil 1) voru samtals 225 skjálftar á stærðarbilinu $1,1 \leq M_{Iw} \leq 3,2$ skráðir við Blöndulón og nágrenni (Mynd 2, gul lína), á svæði sem nær frá $65,1^\circ\text{N}$ til $65,25^\circ\text{N}$ og frá $-19,74^\circ\text{A}$ til $-19,4^\circ\text{A}$ (svæði 1 á Mynd 1). Upphaflegar staðsetningar skjálftanna má sjá á Mynd 3. Eins og áður sagði voru skjálftar sem mældust fyrir hrinuna 2010 aðeins 9 talsins ($1,2 \leq M_{Iw} \leq 2,2$), sá fyrsti þeirra varð í mars 1991 og var staðsettur austan lónsins. Óvissa í staðsetningu hans er þó mun meiri en í síðari virkni því á þeim tíma voru stöðvar SIL-kerfisins aðeins átta talsins og allar staðsettar á Suðurlandi, næst þeirra var Gýgjarhólskot í um 105 km fjarlægð til SSV. Árið 1992 var stöð sett upp á Akureyri (tekin niður snemma árs 1995) og aðrar stöðvar á Norðurlandi voru settar upp 1993–1994, þar á meðal stöðvarnar Hella á Árskógsströnd í Eyjafirði sem kom í stað Akureyrarstöðvarinnar og var þá nálægasta stöð til NNA (rúmir 100 km), og Hraun á Skaga (rúmunum 100 km til N). Stöðin á Ásbjarnarstöðum var sett upp 1. ágúst 1994 og var þá nálægasta stöð í vesturátt (93 km fjarlægð). Skrokkalda á Sprengisandi var sett upp haustið 1996 (90 km til SA) svo og stöðin á Hveravöllum sem var þá nálægasta stöð í suðri í 30 km fjarlægð. Hveravallastöðin (hve, Mynd 1) var starfrækt fram í byrjun september 2015 en hún var þá flutt 3,5 km til suðvesturs, að Stélbratti (ste).

Hinir skjálftarnir átta sem mældust á svæði 1 urðu á árunum 2002 (1 skj.), 2004 (2 skj.), 2005 (3 skj.), 2007 (1 skj.) og 2008 (1 skj.) og voru upptök þeirra annað hvort nokkuð dreifð undir lóninu eða sunnan lónsins, rétt vestan 2010-skjálftanna (Mynd 3).

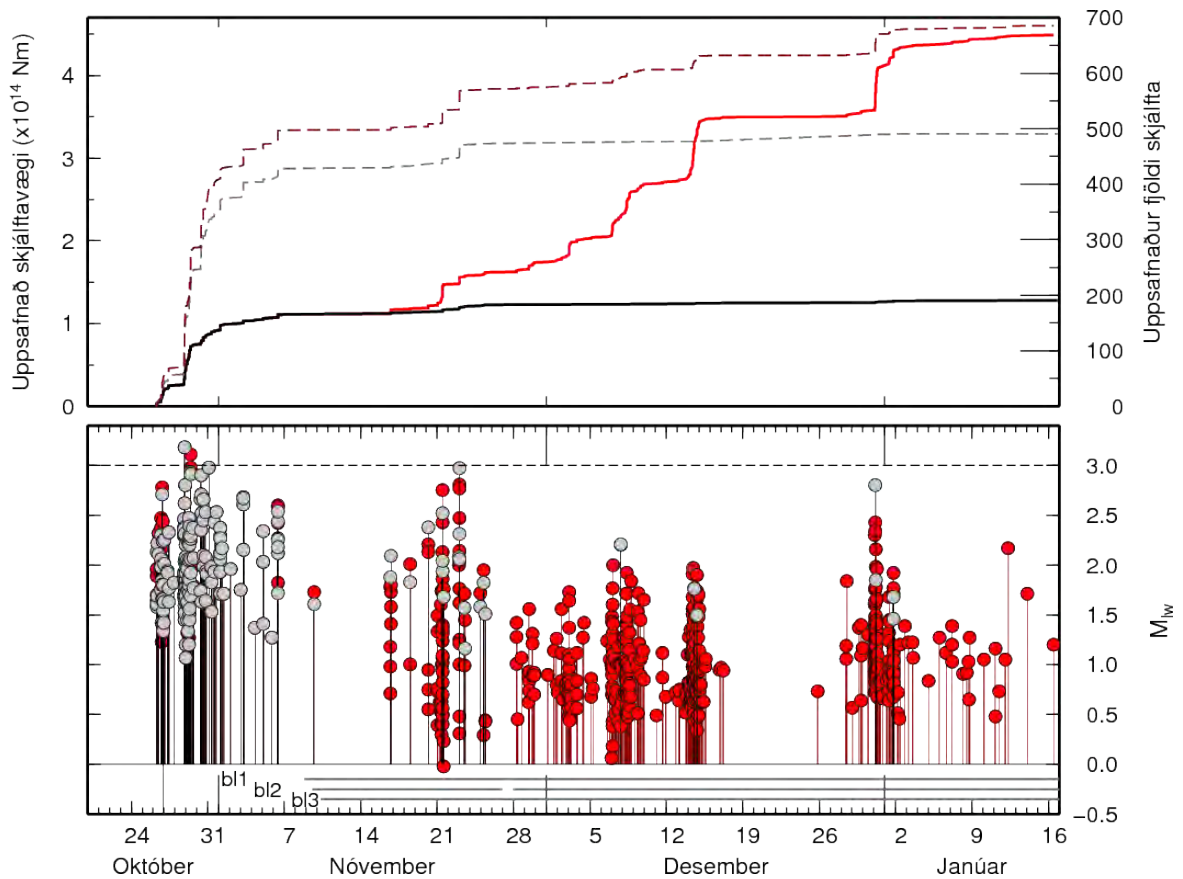
Þann 26. október 2010 hófst svo hrina við suðaustanvert Blöndulón. Skjálftavirknin var mest fyrstu daga hrinunnar, frá 26. október til 6. nóvember, en strjál virkni mældist þó á SIL-kerfið til 1. janúar 2011. Alls var 191 skjálfti staðsettur með SIL-kerfinu á þessu tímabili (gráir punktar og ferlar á Mynd 4). Skjálftarnir voru á stærðarbilinu $1,1 \leq M_{Iw} \leq 3,2$ og mynda flestir nokkuð breiða en aflanga þyrpingu með N-S-læga stefnu við suðaustanvert lónið. Hluti virkninnar þann 29. október (u.þ.b. milli kl. 05:00 og 08:00) hliðraði sér um 2 km til vesturs og myndaði þar allstrjála N-S-læga þyrpingu við miðjan suðurenda lónsins. Stærstu skjálftar hrinunnar urðu 28. október ($M_{Iw} 3,2$), 29. október ($M_{Iw} 3,1$), 31. október ($M_{Iw} 3,1$), allir þrír í stærstu þyrpingunni, og þann 29. október í vestari, minni þyrpingunni ($M_{Iw} 3,0$).

Árið þar á eftir, dagana 7. og 8. ágúst 2011 varð svo önnur hrina, mun minni en þá mældust sex skjálftar á stærðarbilinu $1,3 \leq M_{Iw} \leq 2,2$ rétt sunnan lónsins, um 3 km vestan stærstu skjálftaþyrpingarinnar frá því í október 2010.

Frá september 2011 og fram í júlí 2015 var jarðskjálftavirkni við lónið mjög lítil og aðeins fjórir skjálftar voru skráðir á því tímabili. Þriðja hrinan þar mældist frá júlílokum og fram í miðjan ágúst árið 2015. Hrinan var lítil, tólf skjálftar á stærðarbilinu $1,3 \leq M_{Iw} \leq 2,5$ voru staðsettir norðaustan lónsins (dökkbleikir hringir á Mynd 1 og Mynd 3). Lítil jarðskjálftavirkni hefur mælst á svæðinu síðan og aðeins þrír skjálftar hafa verið staðsettir þar frá árinu 2016 og fram á mitt ár 2017.



Mynd 3. Upphaflegar staðsetningar skjálfta við Blöndulón sem mældust í SIL-kerfinu á tímabilinu frá 1. janúar 1991 til 1. júní 2017 (tímabili 1). Hægra megin kortsins er N-S-þversnið, séð frá austri. Neðan kortsins er A-V-þversnið, séð frá suðri. Brotlausnir fjögurra stærstu skjálfta í hrinunni í lok árs 2010 eru sýndar, einnig stærsta skjálftans í hrinunni 2015 norðaustan lónsins; þeir skjálftar eru auðkenndir með breiðari útlínunum á þversniðum. Skjálftar sem mældust á tímabilinu 9. nóv. 2010 – 1. jan. 2011 (á meðan aukastöðvarnar voru uppi) eru auðkenndir með breiðari, bláum útlínunum.



Mynd 4. Efri hluti: Uppsafnaður fjöldi skjálfta (heilar línur) og uppsafnað skjálftavægi (brotalínur) jarðskjálfta við Blöndulón (á svæði 1) frá október 2010 fram í janúar 2011 (tímabil 2). Neðri hluti: Stærðir jarðskjálftanna. Grár og svartur eru notaðir til þess að teikna fjölda, skjálftavægi og stærðir fyrir þá skjálfta og sem mældust eingöngu í SIL-kerfinu á tímabilinu (gagnasafn 1 á tímabili 2), rauðir litir eru notaðir fyrir þá skjálfta sem staðsettir voru með SIL og tímabundnu stöðvunum þremur (gagnasafn 2 á tímabili 2). Brotlausnir og stærðir voru endur-reiknaðar fyrir alla skjálfta hrinunnar á tímabili 2 (eða fyrir gagnasafn 2), bæði fyrir þá sem mældust aðeins með SIL-stöðvum (28. nóv. – 9. nóv.) og þá sem mældust líka eða eingöngu á aukastöðvunum (eftir 9. nóv.); þess vegna hafa stærðir sumra skjálftanna breyst. Þunnar, gráar línur neðst á myndinni sýna yfir hvaða tímabil bl1, bl2 og bl3 söfnuðu gögnum.

2.3 Skjálftavirkni við Blöndulón 26. október 2010 – 16. janúar 2011, skráð á SIL-stöðvar og viðbótarstöðvar (tímabil 2)

Þau skjálftagögn sem safnað var á viðbótarstöðvunum bl1, bl2 og bl3, voru á Reftek-sniði og þurfti að breyta þeim yfir á bc-snið sem notað er við úrvinnslu skjálfta á Veðurstofunni. Hugbúnaður til þessa verkhluta hafði þegar verið skrifaður fyrir eldra verkefni (Einar Kjartansson o.fl, 2011). Líkt og gert er í sjálfvirkri úrvinnslu fyrir rauntímaskjálftagögn í SIL-kerfinu þurfti að finna fasa (fyrstu P- og S-bylgjur) í skjálftaritunum, og keyra staðsetningarforrit til að greina atburði úr fösunum og staðsetja upptökin. Síðan var farið handvirkt yfir þessa atburði, líkt og gert er í daglegri skjálftaúrvinnslu á Veðurstofunni. Flestir skjálftanna voru það litlir ($0,0 \leq M_{Iw} \leq 1,9$) að þeir sáust aðeins á stöðvunum þremur, bl1, bl2 og bl3. Þessir viðbótar skjálftar voru 479 talsins og urðu á tímabilinu frá 16. nóvember til 16. janúar.

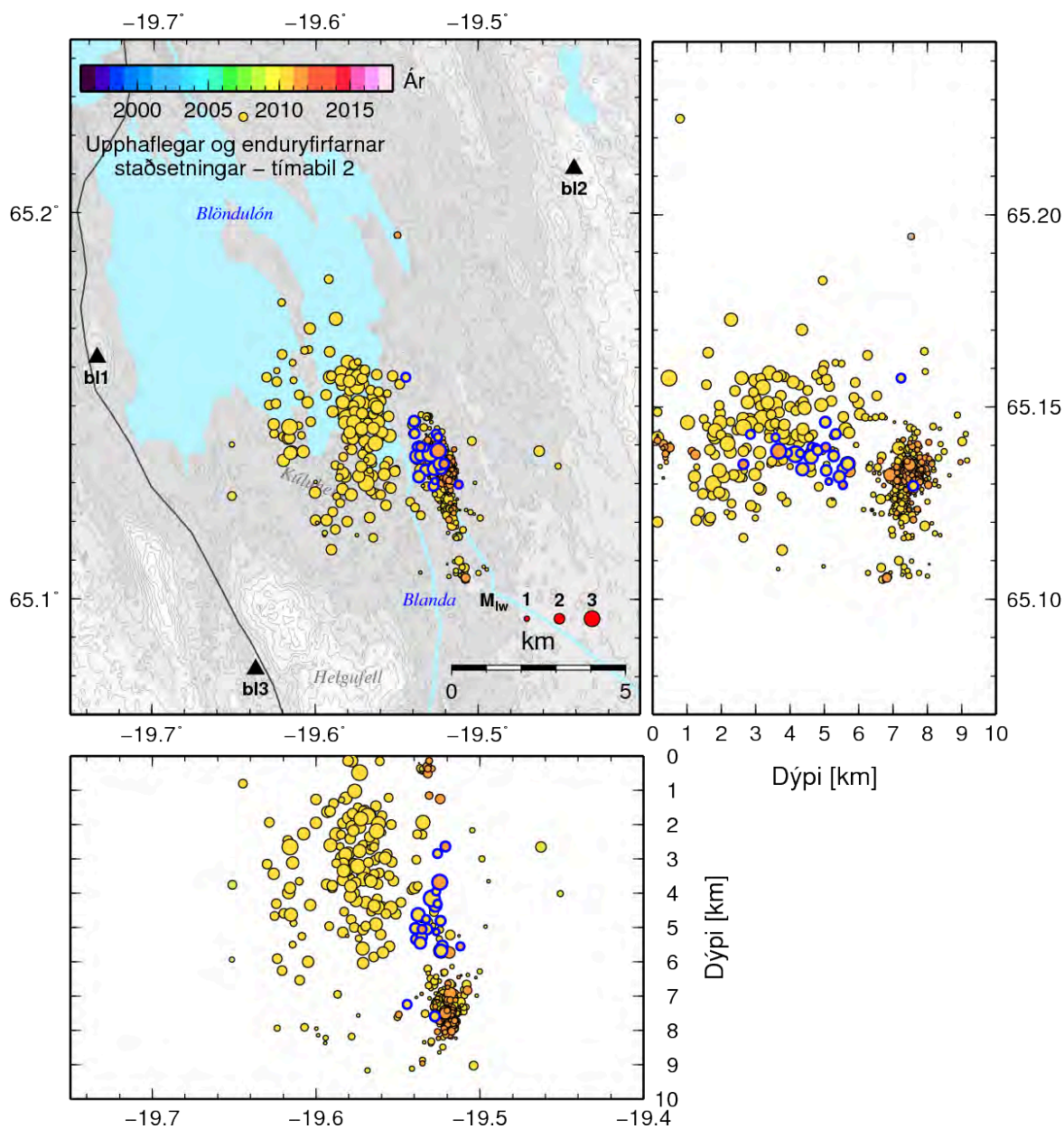
Skjálftar sem þegar höfðu verið greindir í SIL-kerfinu eftir að tímabundu stöðvunum var komið upp voru yfirfarnir aftur og staðsettir á ný bæði með SIL-stöðvum og þeim nýju. Af þeim 191 skjálfta sem mældist á SIL-kerfið í hrinunni urðu aðeins 25 á tímabilinu 9. nóvember – 1. janúar. Í heildina voru viðbótarstöðvarnar því notaðar til að staðsetja 504 skjálfta. Stærðir þeirra og uppsafnaður fjöldi og skjálftavægi eru sýnd með rauðum hringjum og línunum á Mynd 4. Uppsafnað vægi allra skjálftanna við lónið eykst um u.þ.b. 40% (úr $3,3 \times 10^{14}$ Nm í $4,6 \times 10^{14}$ Nm) þegar skjálftar sem greindust aukalega bættust við. Langstærstur hluti, eða 73% þeirra skjálfta sem voru skráðir aukalega, urðu í desember eins og sjá má á Mynd 4 og í Töflu 3 þar sem sýnt er hvernig fjöldi skráðra skjálfta skiptist á mánuði. Staðsetningar allra þeirra 670 skjálfta sem skráðir voru við Blöndulón 26. október 2010 – 16. janúar 2011 má bæði sjá á Mynd 5, í sama litakvarða og notaður er á Mynd 3, og á Mynd 6 þar sem litakvarðinn spannar einungis 26. október 2010 – 16. janúar 2011 til að sýna betur þróun hrinunnar með tíma.

Flestir þeir skjálftar sem mældust aukalega með nýju stöðvunum mynda þetta aflanga þyrpingu með stefnu NNV-SSA, 2–2,5 km suðvestur af miðju þyrpingar skjálftanna sem urðu í lok október 2010. Minni þyrpingu skjálfta má einnig greina um 1 km suður af stærri þyrpingunni. Dýpi skjálftanna er 6,5–8,5 km.

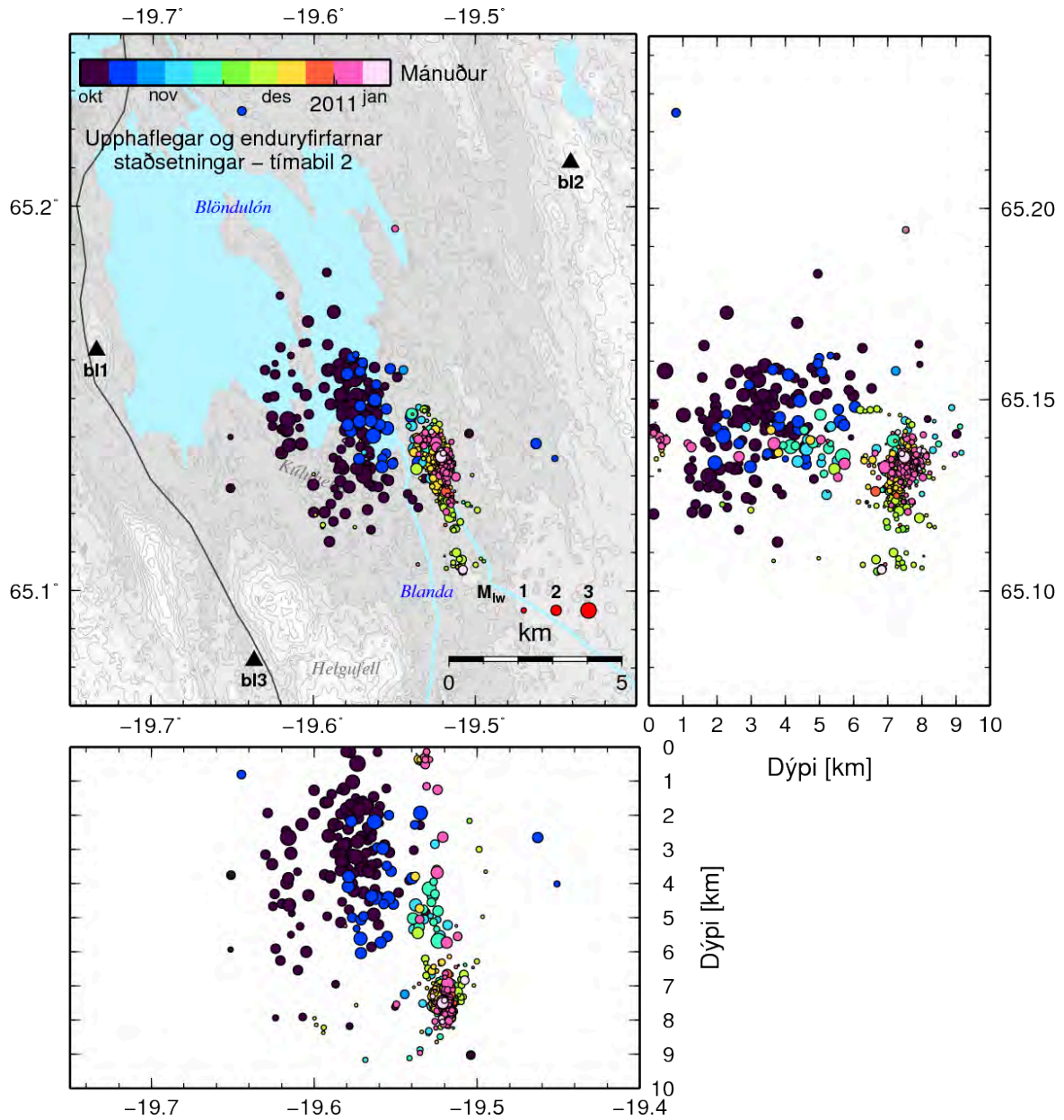
Þeir 25 skjálftar sem mælst höfðu í SIL-kerfinu eftir að viðbótarstöðvum var komið fyrir eru auðkenndir með breiðari, bláum útlínunum á Mynd 5. Ef þessar nýrri staðsetningar þeirra eru bornar saman við fyrri staðsetningar (einnig sýndar með bláum útlínunum á Mynd 3) má sjá að flestir skjálftarnir hliðrast um 2–2,5 km til suðausturs og falla nánast ofan í þyrpingu nýrri skjálftanna í lengd og breidd, en eru þó ennþá um 2,5 km grynri en nýja þyrpingin. Dýpi þeirra er 3,5–6 km en áður voru þeir að mestu dreifðir á 2–6 km dýpi.

Tafla 3. Fjöldi skráðra skjálfta á mánuði í SIL-kerfinu og aukalega með stöðvunum bl1, bl2 og bl3.

Mánuður	Fjöldi skjálfta skráðir eingöngu í SIL-kerfinu	Fjöldi skjálfta skráðir aukalega á bl1, bl2 og bl3
október 2010	137	0
nóvember 2010	47	76
desember 2010	5	349
janúar 2011	2	54



Mynd 5. Upphaflegar og enduryfirfarnar staðsetningar 670 skjálfta sem mældust í SIL-kerfinu og á viðbótarstöðvum við Blöndulón á tímabilinu frá 26. október 2010 til 16. janúar 2011 (tímabili 2). Hluti skjálftanna (166) var aðeins staðsettur með SIL-stöðvum, hluti með SIL- og viðbótarstöðvum (25, auðkenndir með bláum útlínum eins og á Mynd 3) og hluti (479) aðeins með viðbótarstöðvum (minnstu skjálftarnir).



Mynd 6. Sömu skjálftar og staðsetningar og á Mynd 5 nema hér hefur litakvarða verið breytt til þess að fá betri upplausn í tíma og spannar hér aðeins tímabil 2 (26.okt. 2010 – 16. jan. 2011).

3 Aðferðir

3.1 Afstæðar staðsetningar

Bylgjuform frá smáskjálftum mótast aðallega af nálægum jarðlagastrúktúr, útgeislunarmynstri skjálftanna og jarðlögunum sem bylgjurnar fara um á leið sinni í mælistöð. Ef smáskjálftar eru staðsettir nálægt hver öðrum og nógu langt er í mælistöðina til að farbrautir bylgnanna frá upptökunum í mælistöðina séu nánast 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 svipuð. Með því að beita víxlfylgniaðferð (*e. cross-correlation*) á bæði P- og S-bylgjur frá mismunandi skjálftum á hverri mælistöð er hægt að mæla mismunastíma bylgnanna 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 og ákveða strik og halla hverrar sprungu út frá skjálftadreifinni. Gæði niðurstaðnanna eru þó algerlega háð nákvæmni í tímamælingum, eða klukkunákvæmninni á mælistöðvunum. Óvissa í algildum staðsetningum (*e. absolute locations*) skjálftanna er einnig háð dreifingu stöðva í kringum virknina og því hversu vel hraðalíkan á svæðinu er þekkt og gert er ráð fyrir því að hægt sé að nálgast bylgjuhraðann með einvíðu hraðalíkani, þ.e. þannig að hraði jarðskjálftabylgna breytist aðeins með dýpi. Afstæðum staðsetningaraðferðum hefur verið beitt víða á síðastliðnum tveim áratugum (Got o.fl. 1994; Slunga o.fl., 1995; Waldhauser & Ellsworth, 2000) og meðal annars við sprungukortlagningu á Íslandi (t.d. Sigurður Th. Rögnvaldsson o.fl., 1998; Sigurlaug Hjaltadóttir, 2010; Kristín S. Vogfjörð o. fl. 2005). Hér var víxlfylgniaðferð og hugbúnaður Slunga o.fl. (1995) notaður til þess að endurstaðsetja skjálftana við Blöndulón. Notast var við SIL-hraðalíkanið (Ragnar Stefánsson o.fl., 1993) til þess að endurstaðsetja skjálftana, sama líkan og notast er við í daglegri yfirferð skjálfta á þessu svæði. Líkanið er byggt á bylgjuferlum á Vestur- og Suðvesturlandi (Ingi Bjarnason o.fl., 1993).

Fyrir endurstaðsetningu var skjálftunum skipt upp í hópa sem spönnuðu svæði með geisla (radíus) að lengd 3 km og skörun 2 km (fjarlægð milli miðju hvers hóps) þannig að hver skjálfti lenti helst í nokkrum hópum og fengi þannig nýja (afstæða) staðsetningu úr nokkrum hópum, en lokastaðsetning er svo fengin með meðaltali úr öllum hópum. Fjöldi skjálfta í hóp var á bilinu 6–44. Notuð voru bylgjugögn frá að hámarki 20 stöðvum og út að 150 km fjarlægð frá upptökum skjálftanna.

3.2 Brotlausnir og hreyfing á kortlögðum sprungum

Brotlausn skjálfta lýsir þeim tveim hornréttu skriðflötum (*e. double couple fault plane solution*) sem passa við útgeislunarmynstur hans og ákvarðast hvor flötur af þremur hornum: striki (ϕ), halla (δ), og skriðhorni (λ). Brotlausnin ein og sér getur ekki greint á milli hvor flatanna tveggja er hinn raunverulegi skriðflötur (hann er ákvarðaður út frá skjálftadreifinni). Strikstefnan (stefna brotflatarins/sprungunnar í láréttum fleti) er skilgreind þannig að hallinn er til hægri ef horft er eftir striki brotflatarins og stefnan er mæld réttsælis frá norðri. Halli flatarins er mældur frá lárétu og skriðhorn er mælt í fletinum, rangsælis frá láréttri stefnu (strikinu).

Til að ákvarða brotlausn skjálftanna er notuð svokölluð netleit (*e. grid search*) til þess að finna allar mögulegar samsetningar á ϕ , δ og λ í fjögurra gráða þrepum (Sigurður Th. Rögnvaldsson & R. Slunga, 1993 og 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 ekki rúmmálsþátt, eins og t.d. gliðnun á sprungufletinum.

Notuð var aðferð Slunga o.fl. (1995) til að túlka saman skjálftadreif og brotlausnir. Með samtúlkun dreifingar margra smáskjálfta (skjálftadreifarinnar) og brotlausna skjálftanna er hægt að ákvarða hvor brotlausnaflöturinn samsvarar hinum raunverulega brotfleti 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 er fundinn. Fyrir sérhvern skjálfta á sprungunni er sú brotlausn valin sem best fellur að striki og halla sprungunnar og sem er innan ákveðinna skekkjumarka. Svo er heildarhreyfistefna á sprungufletinum metin með því að taka 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. Við mat á hreyfistefnu eru eingöngu notaðar brotlausnir þar sem hægt var að meta skriðhorn. Þeir brotflétir sem kortlagðir eru sýna þann hluta sprungna sem virkur er á því tímabili sem skjálftagögnin sem byggt er á ná yfir. Á sumum svæðum hefur komið í ljós mismunandi eða stærri hluti sprungna þegar endurteknar hrinur verða á þeim (t.d. Sigurlaug Hjaltadóttir & Kristín S. Vogfjörð, 2006; Sigurlaug Hjartadóttir o.fl., 2016). Samtúlkun skjálftadreifar og brotlausna hefur verið nefnd upptakgreining.

4 Úrvinnsla og niðurstöður

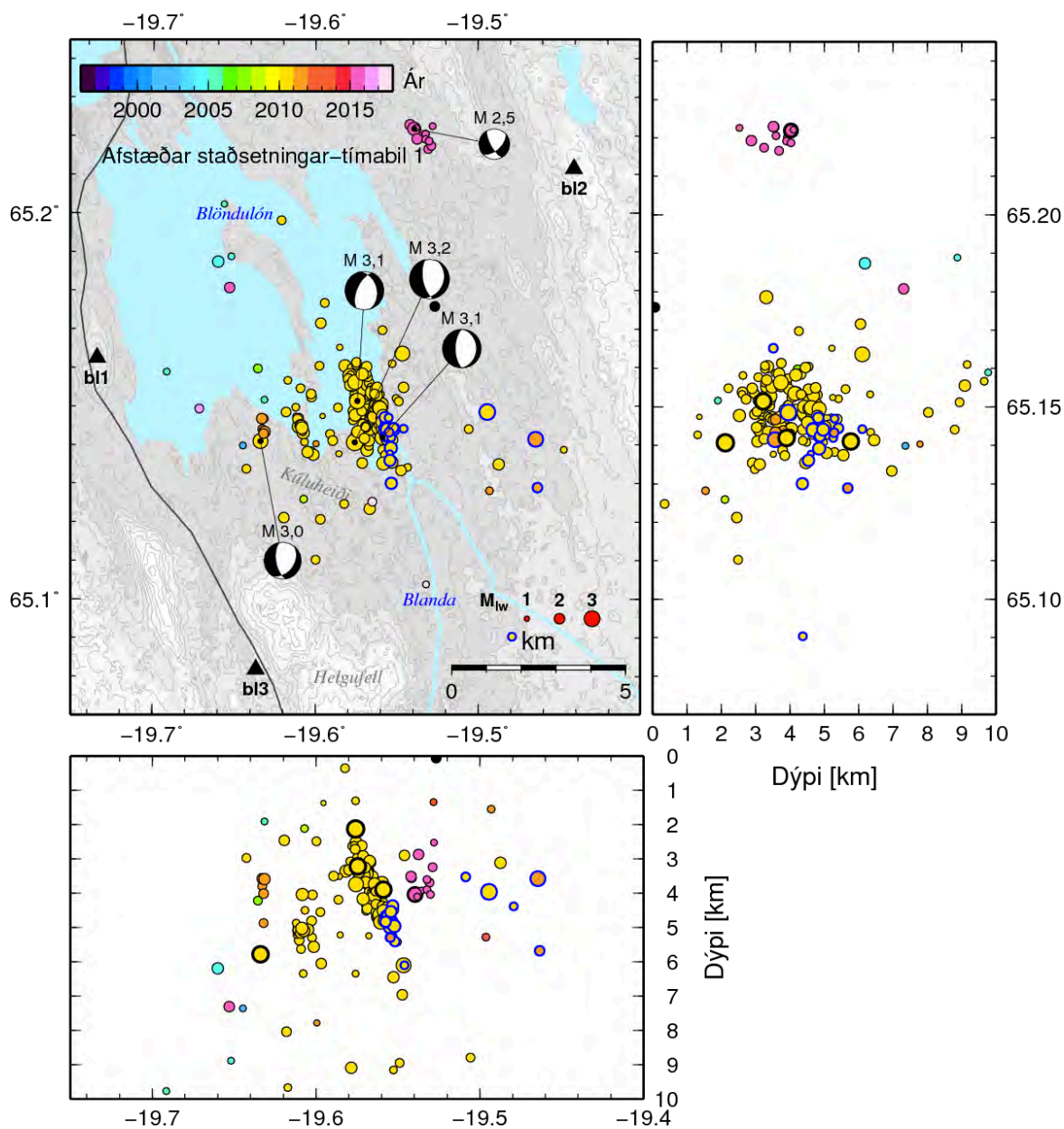
Skjálftarnir á Blöndulónssvæðinu voru endurstaðsettir með víxlfylgnaðferðinni í tvennu lagi, annars vegar voru þeir skjálftar sem mældust með SIL-kerfinu á öllu tímabilinu, frá 1991 til 2017 (sem sýndir eru á Mynd 3; tímabil 1), og hins vegar þeir skjálftar sem mældust í hrinunni frá 26. október 2010 – 16. janúar 2011, bæði á SIL-mælum og aukastöðvunum (þ.e. þeir skjálftar sem sýndir eru á Mynd 5 og Mynd 6; tímabil 2). Brotlausnir endurstaðsettra skjálfta voru endurmetnar fyrir síðara tímabilið (tímabil 2) miðað við nýjar staðsetningar og viðbótargögn frá aukastöðvum. Þær sprungur sem skjálftarnir röðuðust á voru kortlagðar og heildarhreyfing á kortlögðu brotflötunum metin þar sem hægt var út frá dreifingu skriðvigna best passandi brotlausna.

4.1 Afstæðar staðsetningar skjálfta staðsettir eingöngu í SIL-kerfi

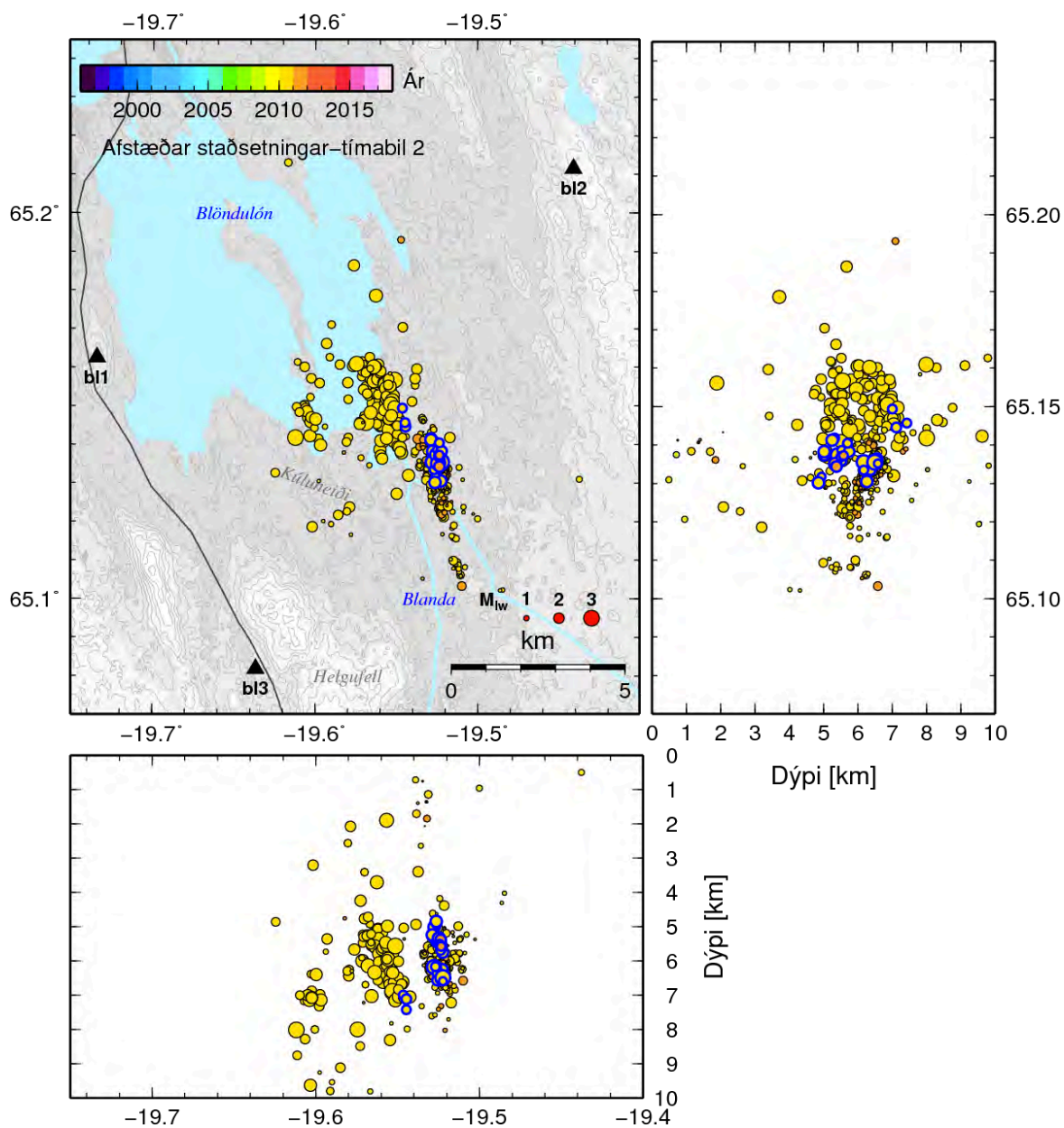
Afstæðar staðsetningar skjálfta sem mældust í SIL-kerfinu á tímabili 1 má sjá á Mynd 7. Samanborið við upphaflegar staðsetningar (Mynd 3) má sjá að allar þyrpingarnar fjórar sem greina mátti þéttast, bæði á láréttum fleti og í dýpi. Stærsta þyrpingin úr 2010-hrinunni er hér að mestu leyti á 2–5,5 km dýpi, sú næsta til vesturs (frá 29. okt) er á 4–5,5 km dýpi og flestir skjálftar í þeirri vestustu (frá ágúst 2011) mynda þetta og litla norðlæga þyrpingu á um 3,5–4 km dýpi; sú síðastnefnda hefur hliðrast um 1,5 km til norðurs m.v. upphaflegar staðsetningar. Skjálftarnir sem urðu árið 2015 norðvestan lónsins mynda eftir endurstaðsetningu stutta NV-læga þyrpingu á 2–3 km dýpi. Stærsti skjálftinn á miðsprungunni (M_w 3,0), sem varð 29. október 2010, hliðrast hér til vesturs og á ágúst-2011 sprunguna en þó þykir líklegra að hann hafi orðið á miðsprungunni, líkt og aðrir skjálftar sem mældust þar þann 29. október. Stærsta þyrpingin er hér enn nokkuð breið, en á neðra dýptarsniðinu á Mynd 7 má sjá að skjálftar vestast í þyrpingunni liggja grynna en skjálftar austan til í þyrpingunni og sprungufletinum virðist halla til austurs.

4.2 Afstæðar staðsetningar með SIL stöðvum og aukastöðvum

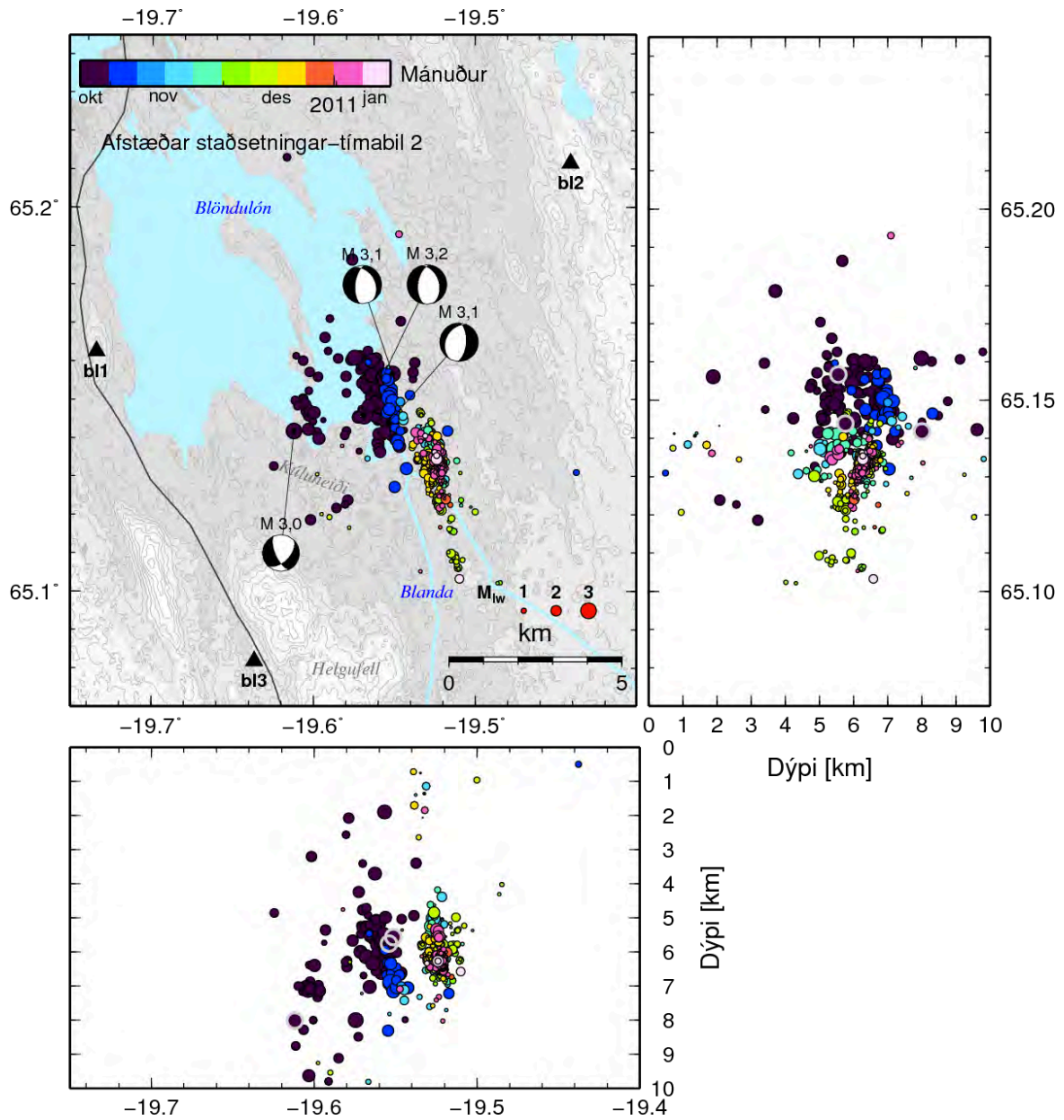
Afstæðar staðsetningar skjálftanna sem mældust á tímabili 2 (26. október 2010 – 16. janúar 2011) með SIL-stöðvum og aukastöðvunum bl1, bl2 og bl3 má sjá á Mynd 8 (í litakvarða fyrir tímabil 1, til samræmis við Mynd 5) og á Mynd 9 (í litakvarða fyrir tímabil 2, til samræmis við Mynd 6). Skjálftarnir mynda þéttari hópa eins og endurstaðsetningar fyrir tímabil 1 gerðu, þyrpingarnar tvær, sem myndaðar eru af skjálftum fyrstu daga hrinunnar (í lok október 2010) þéttast og liggja á nær sama stað og áður (Mynd 7), nema hægt er að greina um 0,5 km hliðrun stærri þyrpingarinnar til austurs (dökkfjólubláir og -bláir hringir á Mynd 9). Skjálftarnir 25 sem staðsettir voru með bæði SIL- og viðbótarstöðvum falla nú enn betur í þyrpingu skjálftanna sem mældust með viðbótarstöðvunum eingöngu, einnig í dýpi. Dýpi stærstu þyrpinganna tveggja verður nánast það sama, hér um bil 5–7 km, og vestari, minni þyrping skjálftanna sem urðu 29. október dýpkar um 2 km, flyst niður á 6–8 km dýpi. Vestasta þyrping á Mynd 7 er ekki innan tímabils 2 og sést því ekki á Myndum 8 og 9. Endurreiknuðu brotlausnir stærstu skjálftanna eru sýndar á Mynd 9; þær hafa lítið breyst frá upphaflegum brotlausnum (Mynd 7).



Mynd 7. Afstæðar staðsetningar skjálfta sem mældust við Blöndulón í SIL-kerfinu á tímabilinu frá 1. janúar 1991 til 1. júní 2017 (skráðir 20. mars 1991 – 26. mars 2017). Hægra megin kortsins er N-S-þversnið, séð frá austri. Neðan kortsins er A-V-þversnið, séð frá suðri. Upphaflegar brotlausnir fjögurra stærstu skjálfta í hrinunni í lok árs 2010 eru sýndar, einnig stærsta skjálftans í hrinunni 2015 norðaustan lónsins; þeir skjálftar eru auðkenndir með breiðari útlínunum á þversniðum. Skjálftar sem urðu á tímabilinu 9. nóv. 2010 – 1. jan. 2011 (á meðan aukastöðvarnar voru uppi) eru með breiðari bláum útlínunum.



Mynd 8. Afstæðar staðsetningar skjálfta sem mældust í SIL-kerfinu og á viðbótarstöðvum við Blöndulón á tímabilinu frá 26. október 2010 til 16. janúar 2011 (tímabili 2). Skjálftar sem urðu á tímabilinu 9. nóv. 2010 – 1. jan. 2011 (á meðan auka-stöðvarnar voru uppi) eru með breiðari bláum útlínum.



Mynd 9. Sömu skjálftar og staðsetningar og á Mynd 8 (afstæðar staðsetningar á tímabili 2) nema hér hefur litakvarða verið breytt og spannar hér aðeins tímabil 2 (u.p.b. 26.okt. 2010 – 16. jan. 2011). Endurreiknaðar brotlausnir stærstu skjálftanna eru sýndar; staðsetning þeirra skjálfta er sýnd með gráum útlínum á þversniðum. Samanborið við upphaflegu brotlausnirnar á Mynd 7 eru þær endurreiknuðu ekki mikið frábrugðnar. Dýpi M 3,2 skjálftans var 11 km, hann sést því ekki á þversniðunum.

4.3 Kortlagðar sprungur

Langstærstur hluti þeirra skjálfta sem mældust og staðsettir voru urðu í hrinum og upptök þeirra mynda fjórar til fimm, vel afmarkaðar þyrpingar/sprungur sem voru kortlagðar, bæði fyrir tímabil 1 og fyrir tímabil 2, þótt að hluta væri um sömu skjálfta og sprungur að ræða. Strik og halli sprungnanna ákvarðast af skjálftadreifinni en hreyfistefnan er metin út frá dreifingu skriðhorna best passandi brotlausna skjálftanna. Lýsing á þeim fer hér á eftir. Niðurstöðurnar eru teknar saman í Töflu 4 og dreifingu skriðhorna má sjá á normuðum tíðniritum í viðauka I.

Tafla 4. Helstu kennistærðir fyrir sprungur/skjálftaþyrpingar við Blöndulón sem greindust bæði á tímabili 1 og tímabili 2. Í dálkinum undir fjölda skjálfta má finna fjölda þeirra skjálfta sem hægt er að meta skriðhorn fyrir ásamt heildarfjölda skjálfta á sprungunni. Rms er meðalfjarlægð skjálfta frá fletinum (fundin með aðferð minnstu kvaðrata). Strik eða strikstefna (ϕ) er mæld réttisælis (til austurs) frá norðri. Halli (δ) er mældur frá láréttu, niður til hægri ef horft er eftir strikstefnu. λ_{ave} er meðal-skriðvigur og λ_{wav} er veginn meðal-skriðvigur (vegin með skjálftavægi). Miðja hverrar sprungu (X-ave, Y-ave) er meðaltal hnita (lengd og breidd) allra skjálftanna sem skilgreina flötinn. Línur í sama lit tákna sömu sprungu sem staðsett var með mismunandi gagnasetti (á mismunandi tímabili).

Sprungu nr.	Fjöldi skjálfta	rms (m)	Strik ϕ	Halli δ	λ_{ave}	λ_{wav}	Lengd (km)	X-ave ($^{\circ}$ A)	Y-ave ($^{\circ}$ N)
1-03*	55/114	54	348 $^{\circ}$	72 $^{\circ}$	-143 $^{\circ}$	-172 $^{\circ}$	2,992	-19,5635	65,1482
1-05	8/14	32	157 $^{\circ}$	90 $^{\circ}$	-138 $^{\circ}$	-128 $^{\circ}$	1,461	-19,6080	65,1437
1-07	6/8	22	177 $^{\circ}$	88 $^{\circ}$	-99 $^{\circ}$	-107 $^{\circ}$	1,181	-19,6323	65,1455
1-08	10/11	47	318 $^{\circ}$	83 $^{\circ}$	161 $^{\circ}$	156 $^{\circ}$	0,869	-19,5359	65,2203
2-02	13/13	10	156 $^{\circ}$	88 $^{\circ}$	-58 $^{\circ}$	-62 $^{\circ}$	0,501	-19,5120	65,1078
2-03*	64/100	75	347 $^{\circ}$	73 $^{\circ}$	-132 $^{\circ}$	-118 $^{\circ}$	2,903	-19,5566	65,1507
2-04*	438/443	119	354 $^{\circ}$	83 $^{\circ}$	19 $^{\circ}$	26 $^{\circ}$	2,925	-19,5241	65,1329
2-05	8/14	18	158 $^{\circ}$	80 $^{\circ}$	-136 $^{\circ}$	-131 $^{\circ}$	1,236	-19,6018	65,1459
4-06***	49/54	32	351 $^{\circ}$	74 $^{\circ}$	6 $^{\circ}$	-13 $^{\circ}$	2,160	-19,5365	65,1393

* 04 er líklega sama sprunga og 03, en fær aðra staðsetningu vegna aukastöðva.

*** Hluti af stærstu sprungunni (03 og 04), sjá umfjöllun í kafla 5.4.

4.3.1 Sprungur á tímabili 1, 1991–2017

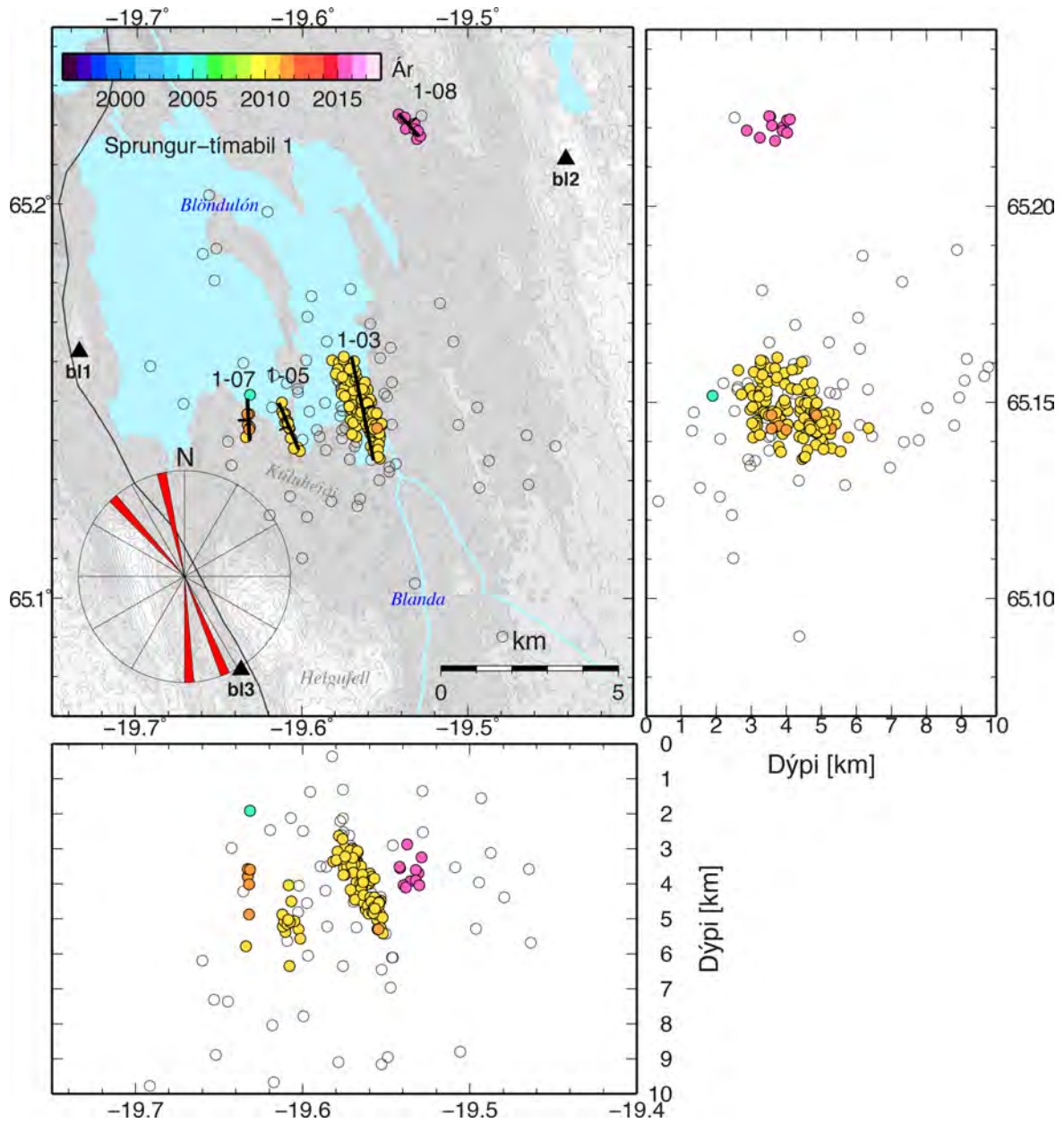
Þær virku sprungur sem greina mátti með endurstaðsettum skjálftum sem mældust í SIL-kerfinu eingöngu eru sýndar á Mynd 10.

- **1-03** Stærsta sprungan á svæðinu þar sem skjálftavirknin hófst 26. október 2010 og flestir skjálftarnir í hrinunni urðu á. Skjálftadreifin myndar 3 km langan flöt með strikstefnu 348° og halla 72° á 2,5–5,5 km dýpi, og virðist hér vera staðsett þar sem Blanda rennur í lónið og þar norður af. Af þeim 114 skjálftum sem marka sprunguna er hægt að ákvarða skriðhorn fyrir 55 þeirra, sjá Mynd 16. Dreifing skriðhornanna er allnokkur; þungamiðju skriðhorna má finna á bilinu -85° – -130° sem bendir til siggengishreyfingar eða siggengishreyfingar ásamt (minni) hægri sniðgengisþætti þannig að vestari barmur misgengisins hreyfist upp. Ef brotlausnir þriggja stærstu skjálftanna á sprungunni eru skoðaðar (sýndar á Mynd 7) má sjá að þær sýna einnig að stærstum hluta siggengishreyfingu.
- **1-05** Fjórtán skjálftar skilgreina þennan lóðrétt, 1,5 km langa sprunguflöt með strikstefnu $N157^\circ A$ sem liggur um 2 km vestan sprungu 1-03, við suðurjaðar lóns. Nær allir skjálftarnir urðu milli kl. 05:00 og 08:00 þann 29. október 2010. Dýpi skjálftanna er 4–6,5 km (flestir á 5–5,5 km dýpi) og halli hennar (90°) því ekki vel ákvarðaður. Hægt er að ákvarða skriðhorn fyrir átta skjálfta, dreifing þeirra er breytileg, en meðalskriðstefna og vegin meðalskriðstefna er eins og helmingur skjálftanna (fjórir) sem hafa skriðhorn á milli -115° og -145° , þ.e. lóðrétt hreyfing ásamt hægri-sniðgengisþætti, svipað og fyrir sprungu 1-03 en hér hreyfist eystri barmurinn upp.
- **1-07** Átta skjálftar eru á 1,2 km löngu sprungunni, með strikstefnu 177° og halla 88° , sem er staðsett um 1,5 km vestan sprungu 1-05, við suðurjaðar lóns. Sex skjálftanna urðu 7. og 8. ágúst 2011, hinir tveir í nóvember 2005 (stakur atburður) og 29. október 2010. Óvíst er með staðsetningu síðasta (2010) skjálftans (M_{Iw} 3,0), líklegt þykir að hann hafi orðið á sprungu 1-05 sem er skilgreind af upptökum skjálfta sem urðu líka 29. október. Hægt er að ákvarða skriðhorn fyrir sex skjálfta, þar af sýna þrjú – fjögur svipaða skriðstefnu, að mestu siggengishreyfingu þannig að eystri barmur misgengisins hreyfist upp.
- **1-08** Um 900 m langur brotflötur sem skilgreindur er af 11 skjálftum sem urðu 31. júlí – 4. ágúst 2015 og staðsettir eru 2 km norðaustan lóns. Strikstefna er 318° og þetta er eina sprungan sem hefur NV-SA stefnu, hinar hafa norðlægari stefnu (N eða NNV). Upptök skjálftanna mælast á svipuðu dýpi, 3–4 km, og hallinn (83°) er því ekki vel ákvarðaður. Besta brotlausn stærsta skjálfta hrinunnar (M_{Iw} 2,5) er siggengi (eystri barmurinn gengur niður) með hægri sniðgengisþætti (sýnd á Mynd 7). Dreifing skriðhorna og meðalskriðvigrar gefa hins vegar til kynna aðallega hægri-sniðgengisfærslu ásamt mun minni lóðréttum þætti þannig að eystri barmurinn hreyfist lítilllega upp.

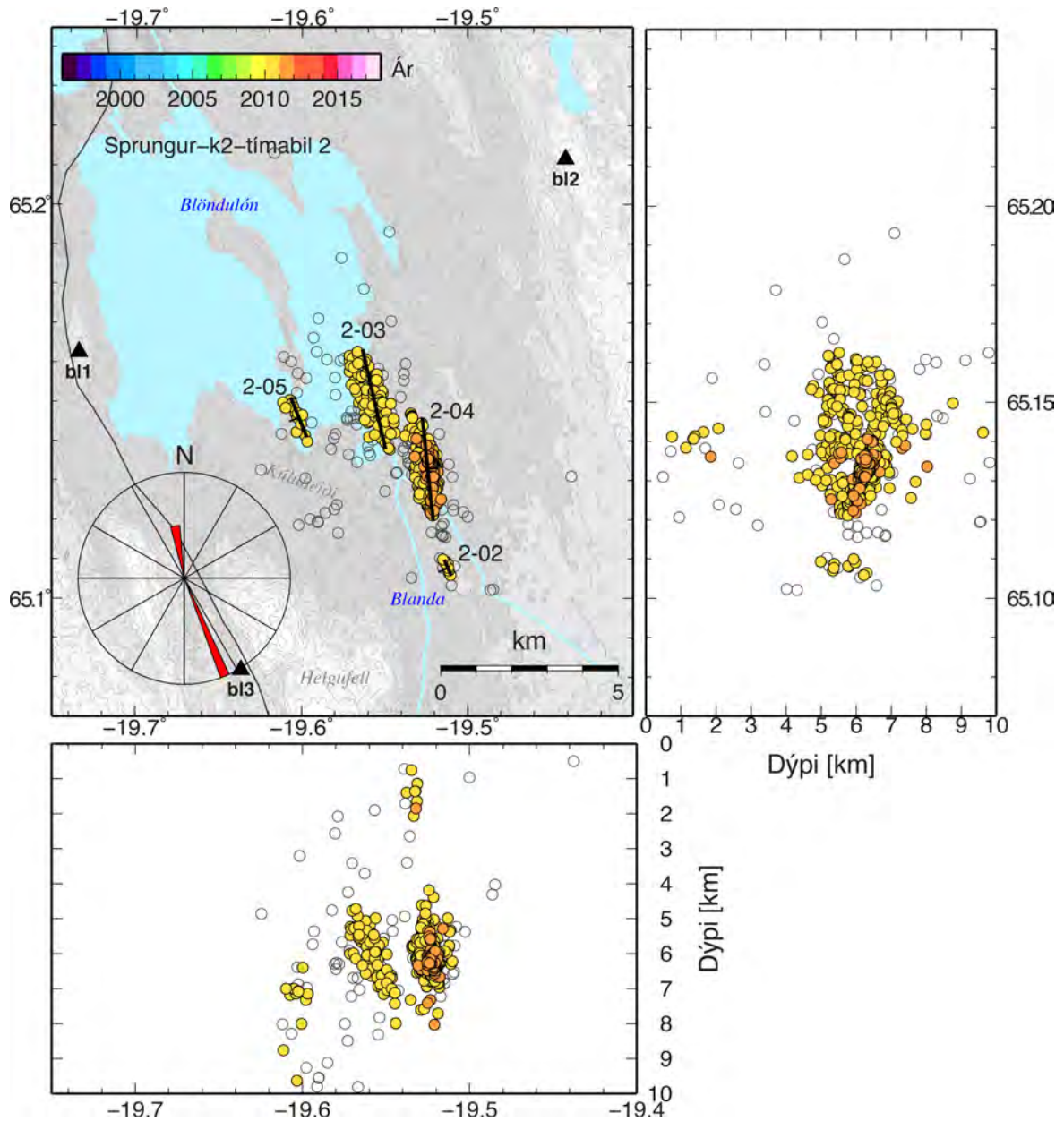
4.3.2 Sprungur á tímabili 2, 26. október 2010 – 16. janúar 2011

Þær virku sprungur sem greina mátti úr 2010–2011 hrinunni með endurstaðsettum skjálftum sem mældust bæði á SIL- og viðbótarstöðvum bl1, bl2 og bl3 eru sýndar á Mynd 11.

- **2-02** Stutt sprunga (eða sprungubrot), 500 m löng, skilgreind af 13 skjálftum á 5–6,3 km dýpi sem mældust eingöngu á aukastöðvunum 1.–9. desember 2010; hún liggur í beinu framhaldi suður af 2-04. Halli er 88° , strik 156° . Meirihluti brotlausna sýnir aðallega lóðréttu (siggengis-) færslu ásamt minni vinstri-sniðgengisþætti þannig að eystri barmur misgengisins hreyfist upp.
- **2-03** Sama sprunga og 1-03 sem hefur hér hliðrast um 0,5 km til austurs og dýpkað um 2 km (hér 4,5 km – 7 km djúp). Hún heldur sömu lögun og stefnu: lengd hennar er um 3 km, strikstefna 347° og halli 73° . Allir nema þrjú skjálftar eru einungis skráðir á SIL-stöðvarnar. Af þeim 100 skjálftum sem marka sprunguna er hægt að ákvarða skriðhorn fyrir 64 þeirra, sjá Mynd 17. Dreifing skriðhornanna er hér minni heldur en fyrir 1-03, meirihluti þeirra sýnir ráðandi siggengisfærslu, þannig að austurbarmurinn hreyfist niður, ásamt minni hægri-sniðgengisþætti. Minni hópur brotlausnanna bendir hins vegar til að austurhlutinn gangi upp. Þetta er frekar rætt í samantekt. Endurreiknaðar brotlausnir þriggja stærstu skjálftanna á sprungunni (sýndar á Mynd 7 og Mynd 9) gefa til kynna ráðandi lóðréttu færslu.
- **2-04** Þessi brotflötur er ákvarðaður af 443 skjálftum sem urðu 16. nóvember 2010 – 16. janúar 2011 og inniheldur langstærstan hluta þeirra skjálfta sem mældust eingöngu á aukastöðvunum þremur. Þó eru um 20 skjálftar einnig skráðir á SIL-stöðvarnar. Lengd sprungunnar er um 3 km, strikstefna 354° og halli 83° . Hægt er að ákvarða skriðhorn fyrir flesta skjálftana (438°), þau sýna afgerandi vinstri-sniðgengisfærslu (með minni samgengisþætti). Hér þarf þó að hafa í huga að flestar brotlausnir eru ekki svo vel skorðaðar þar sem þær eru nær eingöngu ákvarðaðar út frá þremur nálægum stöðvum. Samkvæmt prófun á hliðrun aðalsprungu (í kafla 5.4) þykir líklegast að sprungur 03 og 04 séu sú hin sama, en hliðrun í láréttri staðsetningu upp á 2–2,5 km til suðausturs verður vegna mismunandi stöðva sem skjálftarnir eru skráðir á. Dýpi skjálftanna er hins vegar það sama og á sprungu 2-03 þar sem skjálftarnir hafa einnig verið staðsettir með viðbótarstöðvunum.
- **2-05** Sama sprunga og 1-05, hér skilgreind af 14 skjálftum sem urðu nær allir milli kl. 05:00 og 08:00 29. október 2010. Hér mælist sprungan aðeins styttri, 1,2 km, og á meira dýpi (um 7 km, 1-05 á 5 km dýpi) en strikstefnan er sú sama (158°). Hallinn mælist meiri (80°) en fyrir 1-05 en þar sem upptök skjálftanna eru á fremur þröngu dýptarbili er hallinn illa ákvarðaður. Brotlausnir eru frekar breytilegar, en mesta tíðni skriðhorna er í kringum -125° , sem bendir til siggengisfærslu ásamt hægri-sniðgengishreyfingar, í samræmi við meðalfærsluvigur fyrir 1-05 (austurbarmurinn gengur upp). Brotlausn stærsta skjálftans hér (sýnd á Mynd 9) sýnir svipaða færslu, sig- ásamt hægri-sniðgengisþætti.



Mynd 10. Kortlagðar sprungur sýndar sem litaðir hringir og svört strik á tímabili 1, út frá endurstaðsettum skjálftum sem mældust á SIL-stöðvum 1991–2017. Aðrir skjálftar eru sýndir sem gráir hringir. Hallastefna er sýnd með stuttu, svörtu haki, niður til hægri ef horft er eftir strikstefnu. Strikstefna sprungnanna (sem sýndar eru á myndinni) er sýnd (í rauðu) á tíðniriti í neðra vinstra horni á kortinu.



Mynd 11. Kortlagðar sprungur sýndar sem litaðir hringir og svört strik á tímabili 2, út frá endurstaðsettum skjálftum sem mældust á SIL- og viðbótarstöðvum (bl1, bl2 og bl3) 26. október 2010 – 16. janúar 2011. Aðrir skjálftar eru sýndir sem gráir hringir. Hallastefna er sýnd með styttra, svörtu haki út frá hverri sprungu. Strikstefna sprungnanna (sem sýndar eru á myndinni) er sýnd (í rauðu) á tíðniriti í neðra vinstra horni á kortinu.

4.4 Könnun á hliðrun sprungna

Þar sem nokkur munur var á staðsetningu þeirra skjálfta sem aðeins voru staðsettir með SIL-stöðvum annars vegar og svo hins vegar þeirra sem staðsettir voru með SIL-stöðvum og/eða viðbótarstöðvunum þremur var ákveðið að kanna frekar þá tvo möguleika að (1) raunveruleg hliðrun hefði orðið á virkninni til suðausturs í nóvember 2010, eftir að stöðvarnar voru settar upp, eða (2) hvort um hliðrun á staðsetningum væri að ræða vegna áhrifa nýju stöðvanna, en niðurstöður í köflum 3.3 og 5.2 bentu frekar til þess að um áhrif nálægu stöðvanna væri að ræða.

Aðeins 25 skjálftar greindust með SIL-kerfinu eftir að nærstöðvarnar voru settar upp. Á milli endurstaðsetninga frá tímabili 1 (Mynd 7, bláar útlínur) og tímabili 2 (Mynd 8, bláar útlínur) mátti greina um 2 km hliðrun þessara skjálfta til suðausturs og 1–2 km hliðrun í dýpi þeirra. Ákveðið var að kanna hvort þeir skjálftar sem urðu fyrir í hrunni (fyrir 9. nóv.), og því eingöngu skráðir á SIL-stöðvar, myndu líka hliðrast til ef þeir væru endurstaðsettir með skjálftum sem einnig voru skráðir á aukastöðvum.

Nærri 20 sinnum fleiri skjálftar greindust með viðbótarstöðvunum eingöngu. Til að gæta jafnvægis í fjölda skjálfta og fasa á stöðvum sem notaðar voru til endurstaðsetningar, voru 25 skjálftar valdir dagana fyrir 9. nóvember (30. okt.–1. nóv.) til að endurstaðsetja með þeim 25 sem urðu 9. nóvember og síðar og staðsettir voru bæði með SIL- og viðbótarstöðvum. Að auki voru valdir 25 skjálftar sem aðeins voru staðsettir með aukastöðvunum (16.–29. nóv.). Alls voru því 75 skjálftar valdir til endurstaðsetningar, upphaflegar staðsetningar þeirra eru sýndar á Mynd 12. Eftir afstæða staðsetningu (sjá Mynd 13) falla flestir skjálftanna, eða 54 þeirra, í eina línulega þyrpingu (Tafla 4, spr. 4-06), staðsetta á milli hinna tveggja fyrri (grænir hringir á Mynd 14). Af samanburði á Mynd 12 og Mynd 13, þar sem sjá má að skjálftar frá öllum þremur tímabilum falla í eina og sömu þyrpinguna við endurstaðsetningu, má draga þá ályktun að mismunandi staðsetning á stóru þyrpingunum (sprungunum) tveimur (03 og 04) sé vegna nærstöðvanna og að skjálftarnir sem skilgreina þá fleti hafi orðið á einni stórru sprungu, sem liggur við suðausturjaðar lónsins. Hægt var að meta hreyfistefnu (skriðhorn) fyrir 49 skjálfta í þyrpingunni en brotlausnir skjálftanna í þyrpingunni (4-06) sýna mjög mismunandi skriðhorn eftir því frá hvaða tímabili skjálftarnir eru og á hvaða stöðvum þeir mældust (aðeins SIL-stöðvum, SIL- og viðbótarstöðvum eða eingöngu viðbótarstöðvum, Mynd 18). Brotlausnir skjálftanna 25 sem mældust á SIL- og aukastöðvar eru hins vegar mjög svipaðar og benda aðallega til lóðrétrar færslu á sprungunni, þar sem austurbarmur hennar færir upp.

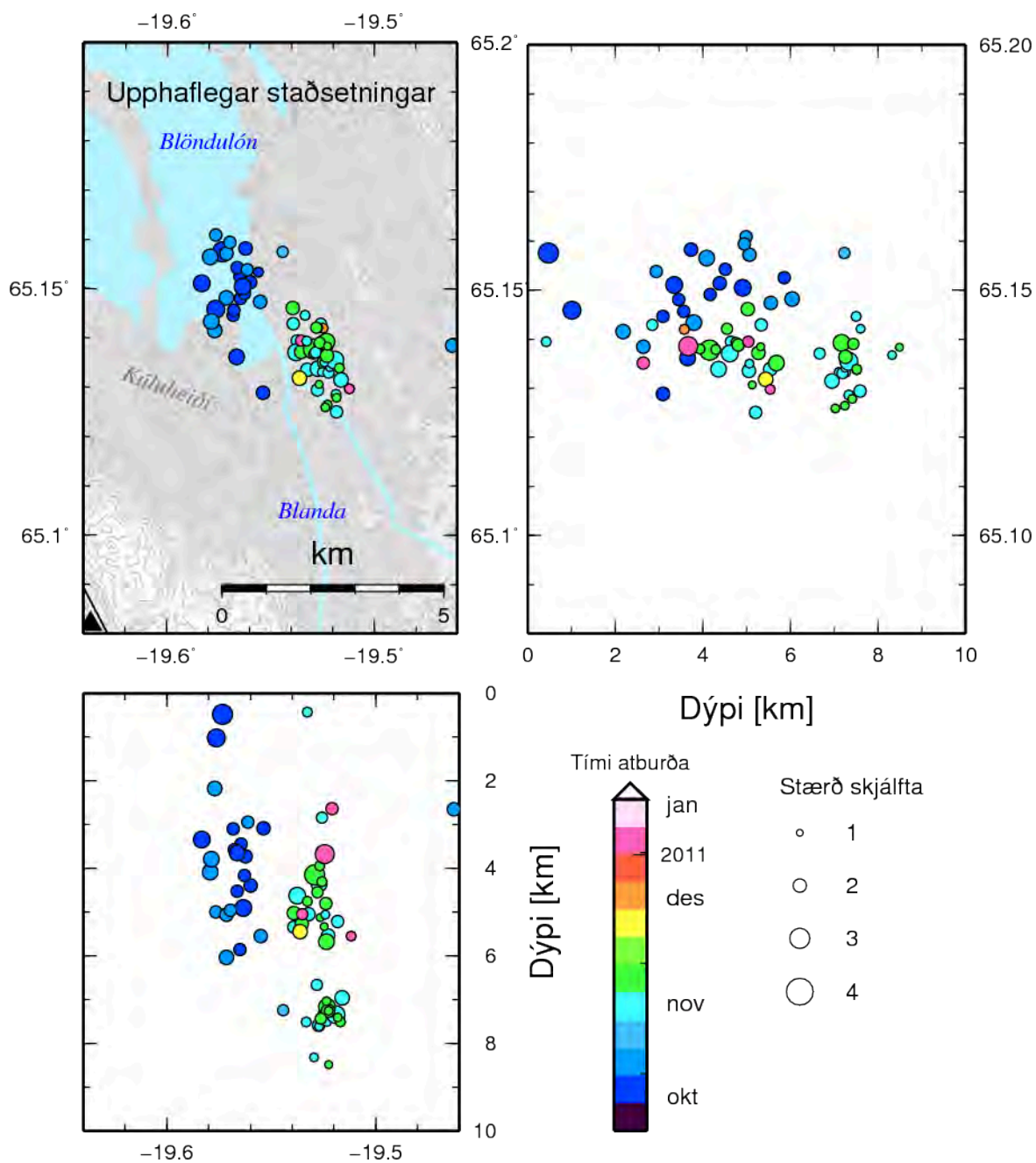
Tímabundnu stöðvarnar þrjár juku staðsetningarnákvæmni enda voru næstu SIL-stöðvar í 30 og 90 km fjarlægð frá skjálftavirkninni. Því var talið að sú staðsetning sem fékkst með bæði SIL-netinu og viðbótarstöðvum þætti áreiðanlegust. Nýjar staðsetningar skjálftanna á sprungufleti 4-06 voru því notaðar til að finna líklegri staðsetningu hinna kortlögðu sprungnanna (Mynd 14). Hliðrunin var fundin í þrennu lagi með því að bera saman staðsetningu þeirra skjálfta úr 1-03, 2-03 og 2-04 sem einnig voru á sprungu 4-06, þ.e. staðsetningu skjálftanna var hliðrað til þannig að þeir féllu því sem næst ofan í þyrpingu sömu skjálfta innan 4-06.

Öllum sprungum, sem kortlagðar voru á tímabili 1 einungis með SIL-stöðvum, var hliðrað jafnt og sprungu 1-03, um $0,0047^\circ$ til suðurs og $0,0208^\circ$ til austurs, hliðrunin nemur um 1100 m til suðausturs. Ennfremur var þeim hliðrað lóðrétt niður um 1 km, til að samræma dýpi 1-03 og 4-06.

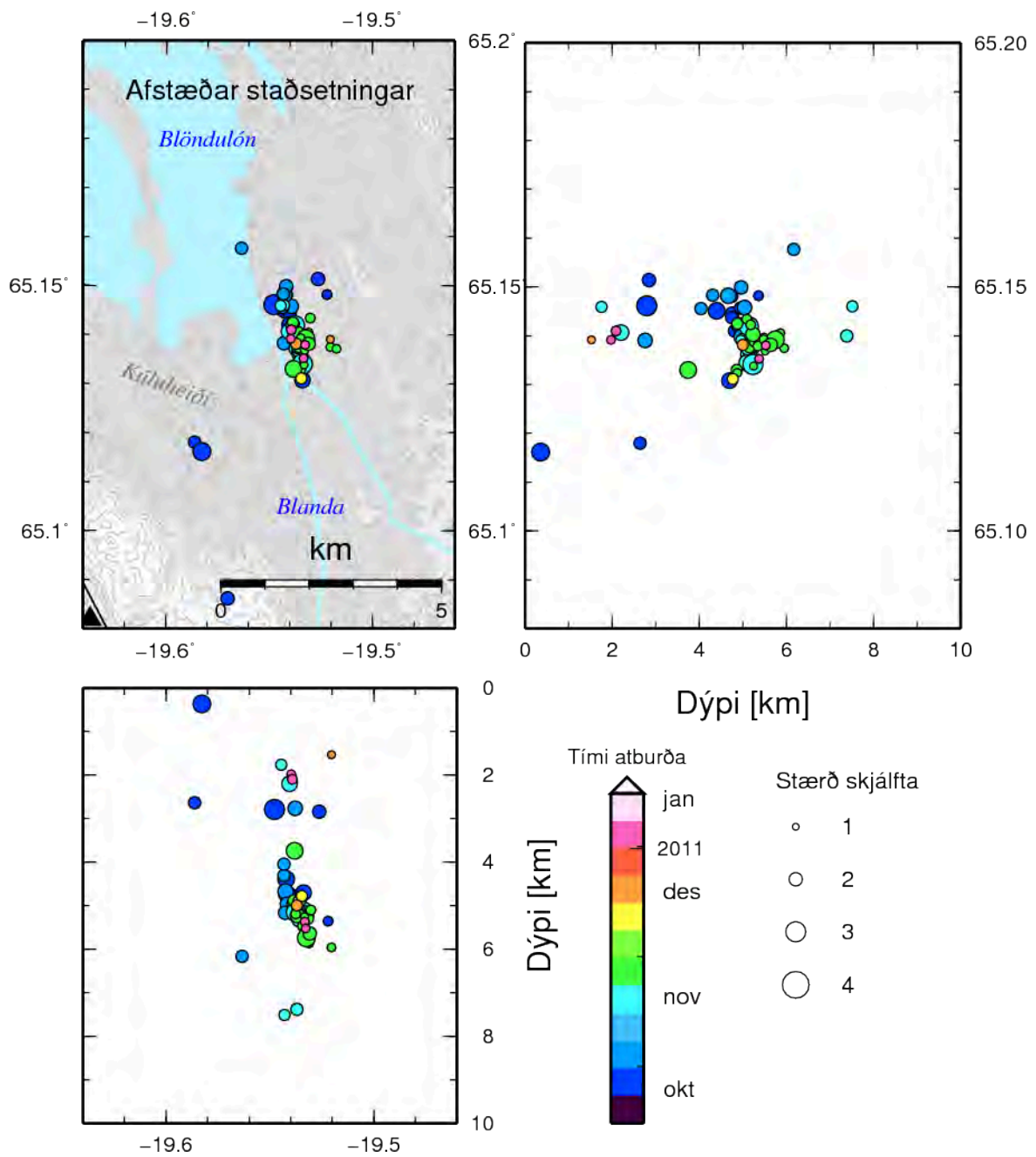
Sprungum 2-03 og 2-05, sem kortlagðar voru nær eingöngu með SIL-stöðvum, var hliðrað um $0,0071^\circ$ til suðurs og $0,0128^\circ$ til austurs (hliðrun um ≈ 1000 m til SSA).

Sprungum 2-02 og 2-04, sem kortlagðar voru nær eingöngu með nærstöðvunum, (byggðar á skjálftum sem mældust meðan aukastöðvarnar voru uppi) var hliðrað um $0,0033^\circ$ til norðurs og $0,012^\circ$ til vesturs (hliðrun um ~ 700 m til NNW). Öllum sprungum (skjálftum) frá tímabili 2 var jafnframt hliðrað upp um 1 km til að samræma dýpi 2-03, 2-04 og 4-06.

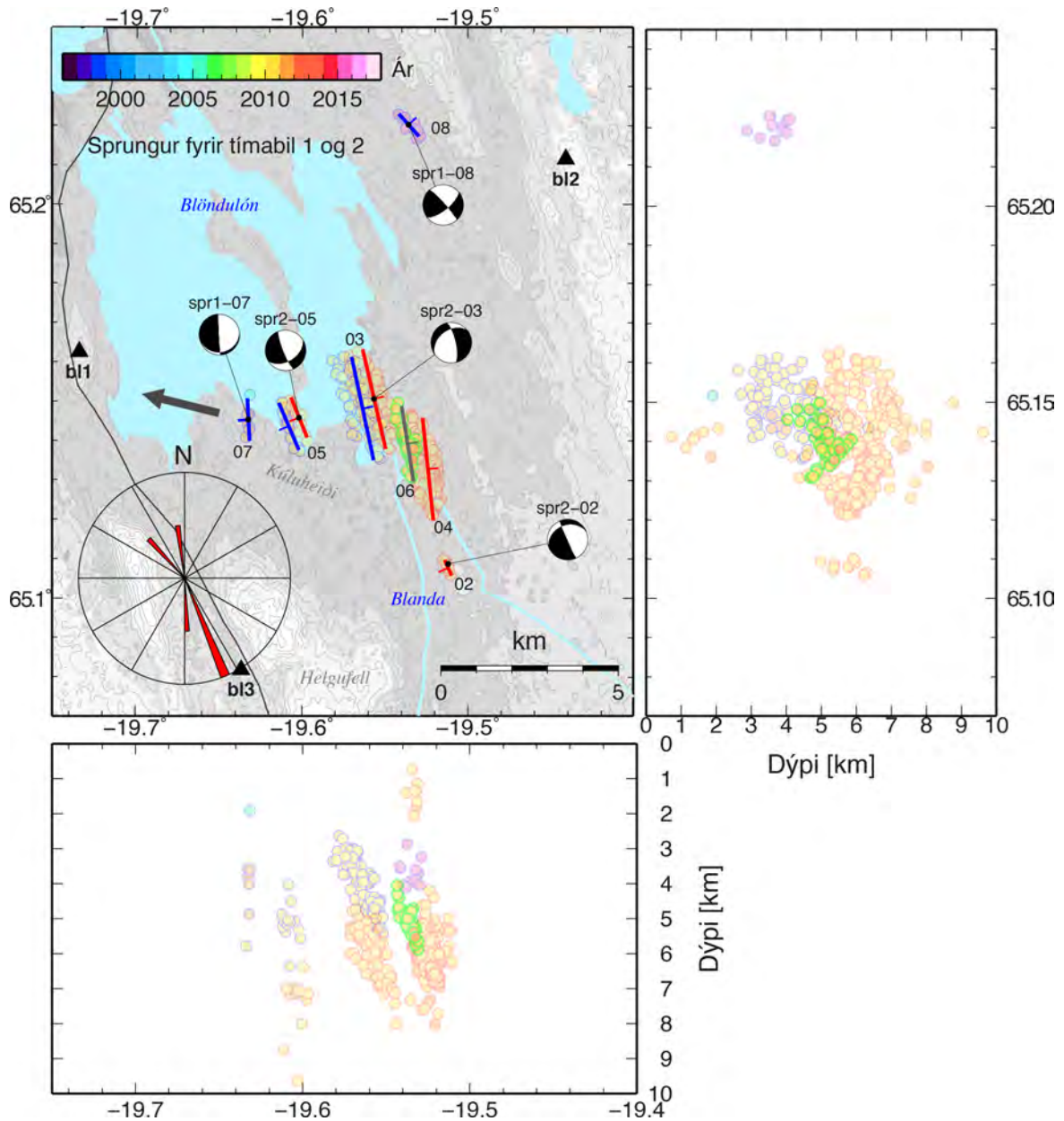
Ný staðsetning sprungnanna (og skjálftanna sem notaðir voru til að kortleggja þær) er sýnd með svörtum strikum á Mynd 15. Grunnu skjálftunum á 2-04 (dýpi $< 2,5$ km) var þó ekki hliðrað á Mynd 15; ólíklegt þótti að þeir væru í yfirborði. Hringir með grænum útlínum sýna staðsetningu 4-06 sem miðað var við. Ef þróun virkninnar með tíma er skoðuð (Mynd 9) og staðsetning skjálfta í 1-03/2-03 og 2-04 er borin saman við staðsetningu þeirra í 4-06, þá virðist skjálftavirkni að einhverju leyti þokast til suðurs með tíma og 03 virðist sýna miðbik og nyrðri enda sprungunnar (fyrri hluti tímabilsins) en smærri skjálftarnir á 04, sem mældust á aukastöðvunum í síðari hluta desember og fram í janúar, sýna sprunguna enn lengra til suðurs en 03. Það er því hugsanlegt að stærsta sprungan sé ríflega 3,5 km löng. Tafla 5 sýnir samantekt á hliðrun sprungnanna og líklegri staðsetningu þeirra.



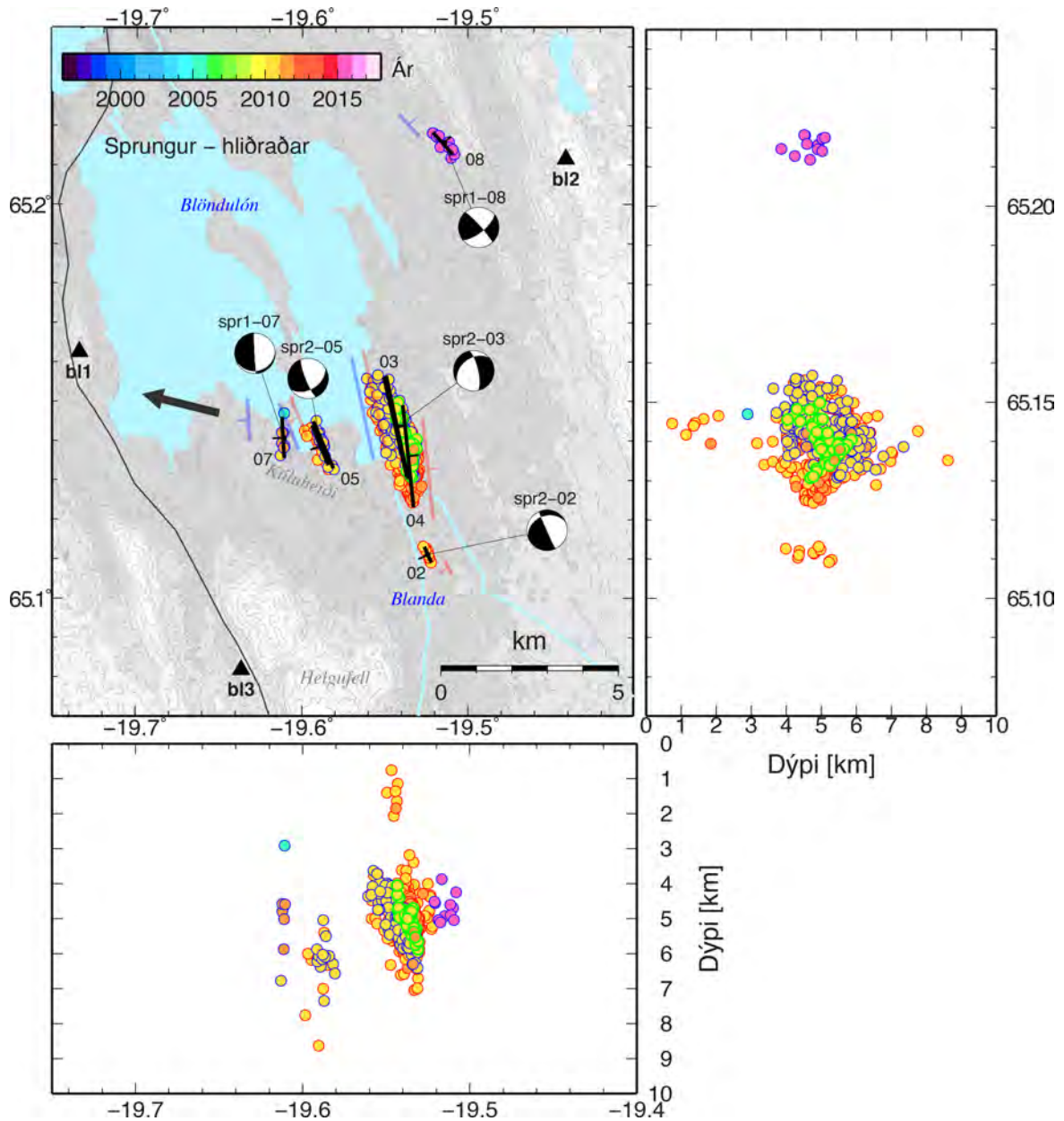
Mynd 12. Úrval 75 skjálfta sem samanstendur af þremur 25 skjálfta hópum: 1) skjálftum sem urðu áður en aukastöðvar voru settar upp (dökk- og millibláir), 2) þeim skjálftum sem urðu eftir að aukastöðvar voru settar upp og mældust bæði í SIL-kerfinu og á aukastöðvum (marglitir, efri þyrping á þversniðum), og 3) skjálftum sem mældust aðeins á aukastöðvum á sama tímabili og skjálftar í hóp 2 (marglitir, neðri þyrping).



Mynd 13. Afstæðar staðsetningar þeirra skjálfta sem sýndir eru á Mynd 12.



Mynd 14. Kortlagðar sprungur frá tímabilum 1 og 2. Þeir skjálftar sem skilgreina kortlagðar sprungur eru sýndir sem dauflitaðir hringir, bláar útlínur og strik eru notað fyrir tímabil 1 en rauð strik og útlínur eru notað fyrir tímabil 2. Hringir með grænum útlínum tákna þá skjálfta sem skilgreina brotflöt 4-06 (sem notaður var til að meta hliðrun en hann er sýndur með grágrænni línu). Brotlausnir sem hér eru sýndar eru teiknaðar eftir kortlagningunni, þ.e. með striki, halla og skriðhorni úr töflu 4. Ein brotlausn er sýnd fyrir hverja sprungu, sú sem þótti áreiðanlegri/áreiðanlegust. Breiða dökkgráa örín sýnir rekstefnu N-Ameríkuflekans miðað við Evrasíuflekann.



Mynd 15. Hliðraðar, kortlagðar sprungur frá tímabilum 1 og 2 sýndar með svörtum strikum. Staðsetningum skjálftanna (lituðum hringjum) sem skilgreina sprunguflötina hefur einnig verið hliðrað frá fyrri staðsetningum sprungnanna (Mynd 14), sem sýndar eru með daufari rauðum og bláum strikum. Bláar útlínur hringja og blá strik eru notuð fyrir tímabil 1 en rauð strik og rauðar útlínur eru notuð fyrir tímabil 2. Hringir með grænum útlínunum tákna þá skjálfta sem skilgreina brotflöt 4-06 sem notaður var til að meta hliðrun. Brotlausnir eru þær sömu og sýndar eru á Mynd 14. Breiða, dökkgráa örin sýnir rekstefnu N-Ameríkuflekans miðað við Evrasíuflekann.

Tafla 5. Hliðrun á kortlögðum sprungum og endurmat á staðsetningu þeirra. Samlitar línur tákna sömu sprungu, kortlagða á mismunandi tímabilum eða mismunandi hluta hennar. Fjórdi dálkur sýnir lárétta hliðrun í metrum.

Sprungu nr.	Hliðrun (°A)	Hliðrun (°N)	Hliðrun (m)	Hliðrun dýpi (km)	Ný X-ave (°A)	Ný Y-ave (°N)
1-03	+0,0208	-0,0047	1100	+1	-19,5427	65,1435
1-05	+0,0208	-0,0047	1100	+1	-19,5872	65,1390
1-07	+0,0208	-0,0047	1100	+1	-19,6115	65,1408
1-08	+0,0208	-0,0047	1100	+1	-19,5151	65,2156
2-02*	-0,0120	+0,0033	700	-1	-19,5240	65,1111
2-03	+0,0128	-0,0071	1000	-1	-19,5438	65,1436
2-04*	-0,0120	+0,0033	700	-1	-19,5361	65,1362
2-05	+0,0128	-0,0071	1000	-1	-19,5890	65,1388
03/04	-	-	-	-	-19,540	65,141

* Aukastöðvarnar bl1, bl2 og bl3 voru notaðar við að staðsetja skjálfta á þessum sprungum.

5 Umræða og samantekt

Í þessari könnun á jarðskjálftavirkni og kortlagningu á virkum skjálftasprungum við Blöndulón á tímabilinu 1991–2017 hafa ríflega 700 jarðskjálftar verið endurstaðsettir við Blöndulón, langflestir þeirra urðu í hrinunni sem varð við sunnanvert lónið 26. október 2010 – 16. janúar 2011. Um það bil tveim vikum eftir að hrinan hófst var þremur viðbótarstöðvum komið fyrir í 6–12 km fjarlægð frá skjálftavirkninni. Langflestir þessara 700 skjálfta mældust á meðan aukastöðvarnar voru í gangi og þar af mældust um 480 smáskjálftar á þeim eingöngu; þó var mesta virknin fyrstu daga hrinunnar, áður en aukastöðvarnar voru settar upp. Viðbótar skjálftavirknin sem mældist á aukastöðvarnar jók uppsafnað skjálftavægi sem mælt hefur á svæðinu um u.þ.b. 40%, úr $3,3 \times 10^{14}$ Nm í $4,6 \times 10^{14}$ Nm. Eftir að aðalhrinunni lauk datt virkni verulega niður en litlar skjálftahrinur mældust einnig í ágúst 2011 og júlí – ágúst 2015, en aðeins nokkrir skjálftar mældust þá með SIL-kerfinu í hvorri hrinu.

Við kortlagningu sprungna út frá nákvæmari, afstæðum staðsetningum skjálftanna komu í ljós fimm sprungur, 0,5–3 (3,5) km langar. Fjórar þeirra, sem staðsettar eru við suðaustanvert lónið, hafa NNW-læga stefnu, en sú fimmta, sem staðsett er um 2 km norðaustan lónsins, hefur NV-læga stefnu. Lengsta sprungan sem kortlögð er (03/04) var virk í hrinunni í október 2010 og fram í miðjan janúar 2011. Hún er 3–3,5 km löng og liggur þar sem Blanda rennur inn í lónið, undir Kaldalækjarmelum (Mynd 15). Um 1,5 km SSA hennar er stutt (0,5 km löng) sprunga (02), sem sýndi virkni í sömu hrinu, eða í byrjun desember 2010. Þriðja sprungan (05), um 1,2 km löng og einnig virk í sömu hrinu, eða þann 29 október, liggur undir suðurjaðri lónsins, norðan Kúluheiðar og um 2 km vestan við sprungu 03. Ríflega einum kílómetra vestar, einnig undir suðurjaðri lónsins liggur fjórða sprungan (07), álíka löng og sprunga 05, og sýndi aðallega virkni í ágúst 2011. Eina sprungan (08) sem greindist við norðaustanvert lónið liggur um 2,5 km norðaustan þess, suður af Öfuguggavatnshæðum.

Skjálftavirknin við Blöndulón er utan þess svæðis sem vanalega telst til Vestra gosbeltisins (Freysteinn Sigmundsson o.fl., 2013) en það er hugsanlegt að sprungurnar við Blöndulón hafi myndast þegar svæðið lá í jaðri þess forna rekbeltis sem talið er að hafi legið norður um Vatnsnes (Haukur Jóhannesson, 1980). Sprungustefnan sem kortlögð er hér er í samræmi við stefnu þeirra yfirborðssprungna og móbergshryggja sem kortlagðir hafa verið nyrst í Vestra gosbeltinu, beint norður af Langjökli (Ásta R. Hjartardóttir o.fl., 2016), þar sem sprungur og dalir fá vestlægari stefnu en norðar dregur, en frábrugðin þeirri NA–NNA stefnu sprungna sem greindar hafa verið sunnar í Vestra gosbeltinu, bæði á yfirborði og með nákvæmum staðsetningum jarðskjálfta, líkt og hér er gert (t.d. Ásta R. Hjartardóttir o.fl., 2015). Umhverfi lónsins er að mestu jökulruðningur, árset og mýrar (Ingibjörg Kaldal & Skúli Víkingsson, 1980) og ekki er vitað til þess að yfirborðssprungur hafi greinst þar.

Lítill eða nánast engin gliðnun mælist yfir nyrðri hluta Vestra gosbeltisins (Freysteinn Sigmundsson o.fl., 1995), og stærsti hluti gliðunarinnar fer fram í Eystra gosbeltinu (Halldór Geirsson o.fl., 2006) og Norðurgosbeltinu; svæðið við Blöndulón ætti því að fylgja N–Ameríkuflékanum og vera frekar stöðugt. Við gerum ráð fyrir að spennusvið á svæðinu ráðist aðallega af flekahreyfingum og ef lítills háttar togs gætir á svæðinu væri það í rekstefnu Norður–Ameríkuflékans. Samkvæmt Nuvel-1A flekahreyfingarlíkani DeMets o.fl. (1990, 1994) er rekstefnan $N284^\circ A$ miðað við Evrasíuflekann (sjá ör á Mynd 14 og Mynd 15). Hnik á sprungum sem liggja í N–NNV ætti þá aðallega að vera gliðnun eða siggengishreyfing með minni hægri-sniðgengisþætti. Eftir því sem sprungurnar fá vestlægari stefnu ætti hreyfing á þeim að fá stærri hægri-sniðgengisþátt. Brotlausnirnar sem reiknaðar eru fyrir skjálftana innihalda ekki rúmmálsbreytingu, aðeins hliðrun, en sú hreyfistefna sem

greind er hér á sprungunum er nokkurn veginn í samræmi við þetta. Þ.e.a.s. lóðréttar færslur virðist vera ráðandi sunnan lónsins og eystri barmur misgengjanna færast upp: Á sprungum 05 og 07 er aðallega siggengisfærsla og minni hægri-sniðgengisþáttur; á sprungu 02 er aðallega siggengisfærsla en minni vinstri-sniðgengisþáttur, brotlausnirnar eru þó aðeins ákvarðaðar út frá þremur stöðvum og því allmikil óvissa í þeim. Norðaustan lónsins, á sprungu 08 virðist hægri-sniðgengisfærsla vera ráðandi; lóðrétti þátturinn er mun minni en sýnir samgengi, og eystri barmur sprungunnar færast upp, eins og sunnan lóns.

Sprungu 03 hallar til austurs og ef siggengishreyfing er ráðandi á svæðinu ætti austurbarmurinn að færast niður. Meirihluti brotlausnanna sýnir slíka hreyfingu, þ.e. siggengishreyfingu ásamt minni hægri-sniðgengisfærslu, eins og sýnt er á Mynd 17. Þegar þessar brotlausnir eru kannaðar nánar kemur í ljós að flestar þeirra hafa mun meiri halla en brotflöturinn sem skjálftadreifin skilgreinir, eða um 40° í samanburði við þann 73° - 83° halla sem sprungan virðist frekar hafa skv. dreifingu skjálftaupptakanna. Þær brotlausnir sem hafa halla nær 80° eru mun færri og benda einnig til siggengishreyfingar ásamt minni hægri-sniðgengisþætti þannig að austurbarmur sprungunnar gengur upp, en brotflötum þeirra lausna hallar til vesturs, öfugt við skjálftadreifina. Þetta á einnig við um brotlausnir þeirra skjálfta á stóru sprungunni sem greindust bæði á SIL- og viðbótarstöðvum (og voru á sprungu 04), þ.e. þær eru mjög líkar en þar hallar brotflötinum til vesturs og eystri barmur sprungunnar gengur upp. Það er því vart hægt að greina hreyfingu á sprungunni með óyggjandi hætti.

Óvissa í afstæðum staðsetningum skjálftanna innan hvernar sprungu er lítil, hún mælist innan við 100 m í lengd og breidd fyrir 80% skjálftanna á tímabili 2 (miðað er við að afstæð staðsetningaróvissa sé innan 300m í dýpi). Hlutfall skjálfta á sama tímabili með afstæða óvissu undir 20 m í lengd og breidd er 40–45%. Almennt er óvissan aðeins meiri í lengd en breidd. Þessi litla afstæða óvissa endurspeglar í því að lögun og lengd hvernar sprungu er mjög svipuð fyrir mismunandi tímabil, jafnvel áður en gögnum frá aukastöðvum var bætt við. Meiri óvissa er þó á halla sprungnanna því í flestum tilfellum greinast skjálftarnir á fremur litlu dýptarbili. Þetta á sér í lagi við minni sprungurnar 05, 07 og 08 þar sem færri skjálftar mældust, en upptakadýpi skjálfta á sprungu 03/04 er á stærra bili og skorða því hallann betur. Þó munar um 10° á halla sprungunnar eftir því hvort hann er metin út frá skjálftum sem mældust nær eingöngu á SIL-stöðvum (72° – 73°) eða nær eingöngu á tímabundnu stöðvunum en þá er halli sprungunnar meiri (84°), þ.e. nær lóðréttu.

Tímabundnu viðbótarstöðvarnar þrjár, í nokkurra kílómetra fjarlægð frá Blöndulóni, juku til muna næmni á smáskjálftavirkni svæðisins miðað við næmni SIL-kerfisins eingöngu, þar sem tvær nálægustu fastastöðvar kerfisins eru í 30 og 90 km fjarlægð frá lóninu. Samt sem áður er nokkur óvissa um algilda staðsetningu sprungnanna sem kortlagðar voru, sem stafar af breytilegu mælaneti á úrvinnslutímabilinu og að einhverju leyti af mismunandi hraðastrúktúr sem jarðskjálftabylgjurnar fara um til mismunandi mælistöðva. Möguleg óvissa og breytilegur hraðastrúktúr á Blöndulónssvæðinu sjálfu hefur líklega einhver áhrif á sprungustaðsetningar ákvarðaðar með tímabundnu stöðvunum þremur eingöngu, en vegna nálægðar stöðvanna má ætla að sprungustaðsetningar sem fengnar eru með þeim séu nákvæmari en staðsetningar sem fást með SIL-kerfinu einu og sér. Þrátt fyrir óvissuna í algildum staðsetningum sprungnanna sem skjálftarnir afmarka, þá gefa niðurstöður skýrslunnar skýrt til kynna að hægt er að kortleggja betur virkar sprungur við Blöndulón með þeirri auknu næmni sem skapast af viðbótarstöðvunum þremur.

Þegar skjálftahrinan hófst í október 2010, tók u.þ.b. tvær vikur að koma upp tímabundnum viðbótarstöðvum, en á því tímabili var virknin mest og töpuðust því mörg hundruð smáskjálftar sem hefðu enn frekar skorðað virkar sprungur á Blöndulónssvæðinu. Niður-

stöðurnar gefa því einnig ótvírætt til kynna að hægt er að kortleggja mun betur virkar sprungur við Blöndulón með því að reka þar samfelldar skjálftamælistöðvar. Það getur hins vegar verið kostnaðarsamt að reka þétt net mælistöðva á svæði þar sem ekki er samfelld virkni, en þann kostnað má lágmarka með því að reka 1–2 fastastöðvar samfelld (til að nema fljótt aukningu í virkni), en hafa 3–5 viðbótarstöðvar tilbúnaðar til uppsetningar um leið og aukinnar virkni yrði vart. Til að svona tímabundið kerfi skilaði hámarksárangri, þyrfti að gera forkönnun á staðsetningum stöðva, sem miðaði að því að finna staði með litlum bakgrunnshávaða og einföldum yfirborðshraðastrúktúr sem ekki truflaði bylgjuformin, eins og gert er fyrir uppsetningar SIL-fastastöðva; staðirnir fyrir bl1, bl2 og bl3 reyndust t.a.m. vel, bakgrunnshávaði var lítil og auðvelt var að greina skjálftabylgjurnar. Jafnframt þyrfti að undirbúa staðina fyrir uppsetningu á búnaði til orkuframleiðslu og kanna samskiptamöguleika þannig að uppsetning hverrar stöðvar tæki nokkra klukkutíma. Kostnaðarlega gæti þetta tímabundna smáskjálftanet verið ákjósanlegt, þar sem nú er í gangi hröð þróun á ódýrum jarðskjálftamælum sem gætu nýst í þannig net (sbr. <http://www.raspberrysshake.org>).

Þakkir

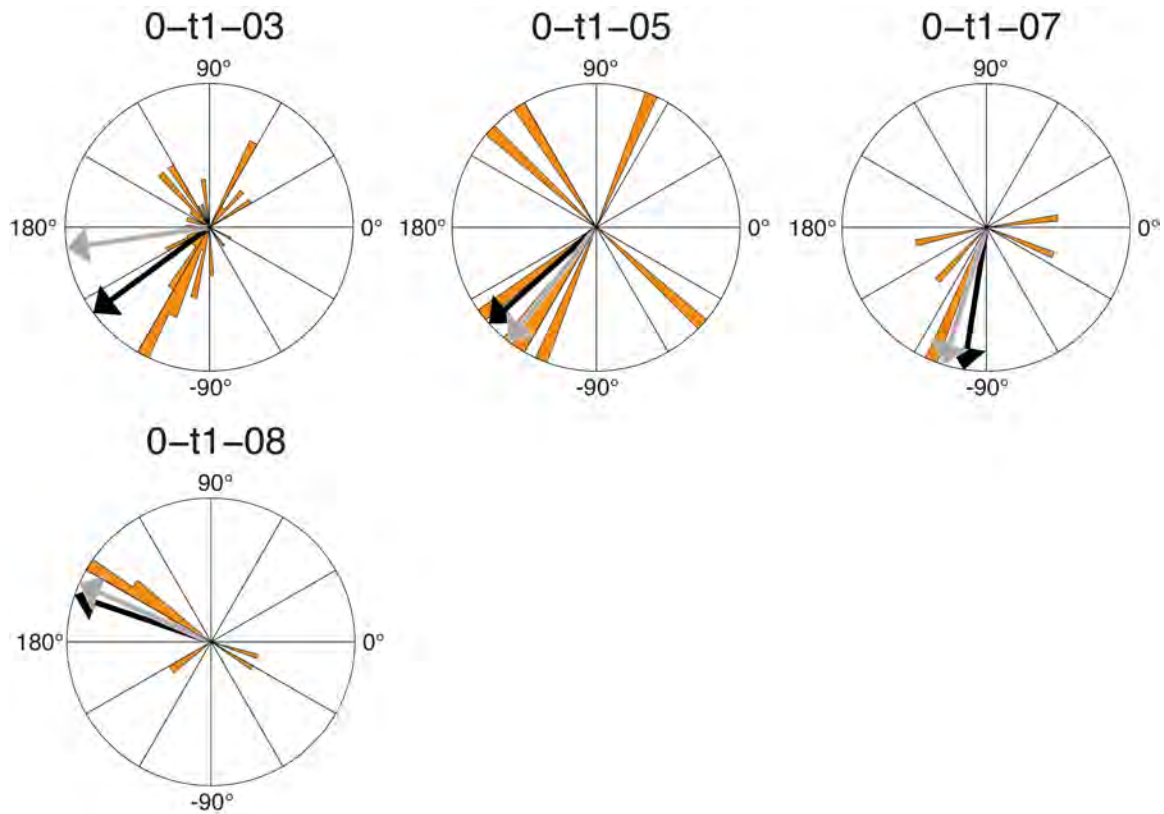
Allar myndir í skýrslunni voru gerðar með opna hugbúnaðinum GMT (Generic Mapping Tools; Wessel & Smith, 1998).

Heimildir

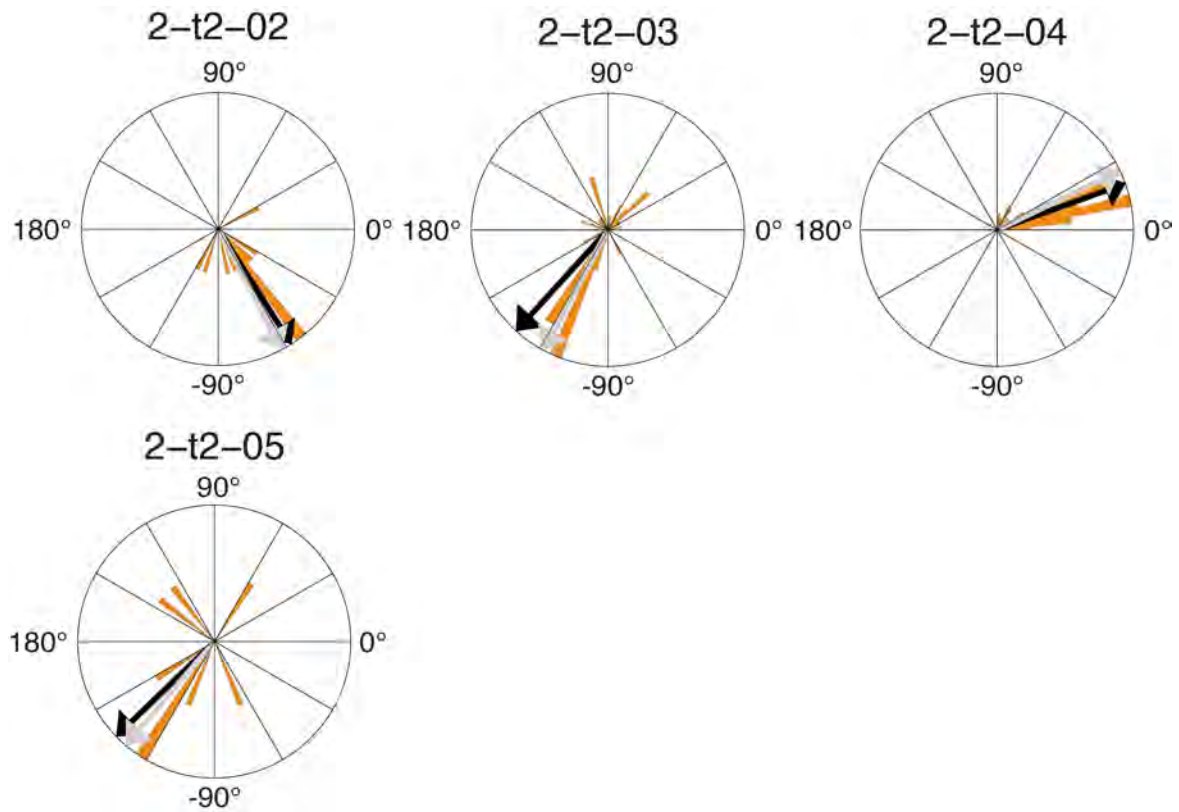
- Ásta Rut Hjartardóttir, Sigurlaug Hjaltadóttir, Páll Einarsson, Kristín Vogfjörð, & Muñoz-Cobo Belart, J. (2015). Fracturing and earthquake activity within the Prestahnúkur fissure swarm in the Western Volcanic Rift Zone of Iceland. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(12), 8743-8757.
- Ásta Rut Hjartardóttir, Páll Einarsson & Sigríður G. Björgvinsdóttir (2016). Fissure swarms and fracture systems within the Western Volcanic Zone, Iceland—Effects of spreading rates. *Journal of Structural Geology*, 91, 39-53.
- Bjarnason, I. T., Menke, W., Flóvenz, Ó. G., & Caress, D. (1993). Tomographic image of the mid-Atlantic plate boundary in southwestern Iceland. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 98(B4), 6607-6622.
- DeMets, C. G., Gordon, R. G., Argus, D. F. & Stein, S. (1990). Current Plate Motions, *Geophys. J. Int.*, 101, 425-478.
- DeMets, C. G., Gordon, R. G., Argus, D. F. & Stein, S. (1994). Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions, *Geophys. Res. Lett.*, 21, 2191-2194.
- Einar Kjartansson, Sigurlaug Hjaltadóttir & Kristín S. Vogfjörð (2011). *Könnun á smáskjálftavirkni við Hágöngulón 2010*. Unnið fyrir Landsvirkjun. Reykjavík: Veðurstofa Íslands, VÍ 2011/011, ISSN 1670-8261. Landsvirkjun, LV-2011-100.
- Freysteinn Sigmundsson, Páll Einarsson, Bilham, R., & Sturkell, E. (1995). Rift-transform kinematics in south Iceland: Deformation from Global Positioning System measurements, 1986 to 1992. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B4), 6235-6248.
- Freysteinn Sigmundsson, Sveinn P. Jakobsson, Guðrún Larsen, Páll Einarsson & Magnús Tumi Guðmundsson (2013). Eldvirk svæði á Íslandi, kafla í bókinni *Eldvirkni á Íslandi*. Reykjavík, Háskólaútgáfan.
- Got, J-L., Frechet, J. & Klein, F. W. (1994). Deep fault plane geometry inferred from multiple relative location beneath the south flank of Kilauea, *J. Geophys. Res.*, 99, 15375-15386.
- Halldór Geirsson, Þóra Árnadóttir, Völksen, C., Jiang, W., Sturkell, E., Villemin, T., & Ragnar Stefánsson (2006). Current plate movements across the Mid-Atlantic Ridge determined from 5 years of continuous GPS measurements in Iceland. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B9).
- Haukur Jóhannesson (1980). Jarðlagaskipan og þróun rekbelta á Vesturlandi. *Náttúrufræðingurinn*, 50, 13-31.
- Ingibjörg Kaldal & Skúli Víkingsson, 1980. Blönduvirkjun, jarðgrunnkort af lónstæði. Orkustofnun, raforkudeild. Kvarði 1:50.000.
- Kristín Vogfjörð, Sigurlaug Hjaltadóttir & 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.
- Páll Einarsson & Kristján Sæmundsson (1987). Upptök jarðskjálfta 1982–1985 og eldstöðvakerfi á Íslandi. Kort með bókinni *Í hlutarins eðli* (afmælisrit Þorbjarnar Sigurgeirssonar), ritstj. Þorsteinn I. Sigfússon, Menningarsjóður, Reykjavík.

- Ragnar Stefánsson, Reynir Böðvarsson, Slunga, R., Páll Einarsson, Steinunn Jakobsdóttir, Bungum, H., & Korhonen, H. (1993). Earthquake prediction research in the South Iceland Seismic Zone and the SIL project. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83(3), 696-716.
- Reynir Böðvarsson, Sigurður Th. Rögnvaldsson, Steinunn S. Jakobsdóttir, Ragnar Slunga & Ragnar Stefánsson (1996). The SIL Data Acquisition and Monitoring System. *Seism. Res. Lett.*, 67, 5, 35-46.
- Sigurður Th. Rögnvaldsson & Slunga, R. (1993). Routine fault plane solutions for local and regional networks: a test with synthetic data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 11, 1247-1250.
- Sigurður Th. Rögnvaldsson & Slunga, R. (1994). Single and joint fault plane solutions for microearthquakes in South Iceland, *Tectonophysics*, 237, 73-80.
- Sigurður Th. Rögnvaldsson, Ágúst Guðmundsson & R. 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).
- Sigurlaug Hjaltadóttir, Halldór Geirsson & Þórunn Skaftadóttir (2005). Seismicity in Iceland 2004. *Jökull* 55. árg. Bls. 107-119.
- Sigurlaug Hjaltadóttir & Kristín S. Vogfjörð (2006). *Kortlagning sprungna í Fagradalsfjalli á Reykjanesskaga með smáskjálftum. Kortlagning jarðhita í gosbeltum Íslands – fyrsti áfangi.* Unnið fyrir Orkustofnun. Reykjavík: Veðurstofa Íslands, greinargerð 06001.
- 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., Sigurður Th. Rögnvaldsson & Reynir Böðvarsson (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.
- Wessel, P., & Smith, W. H. (1998). New, improved version of Generic Mapping Tools released. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 79(47), 579-579.

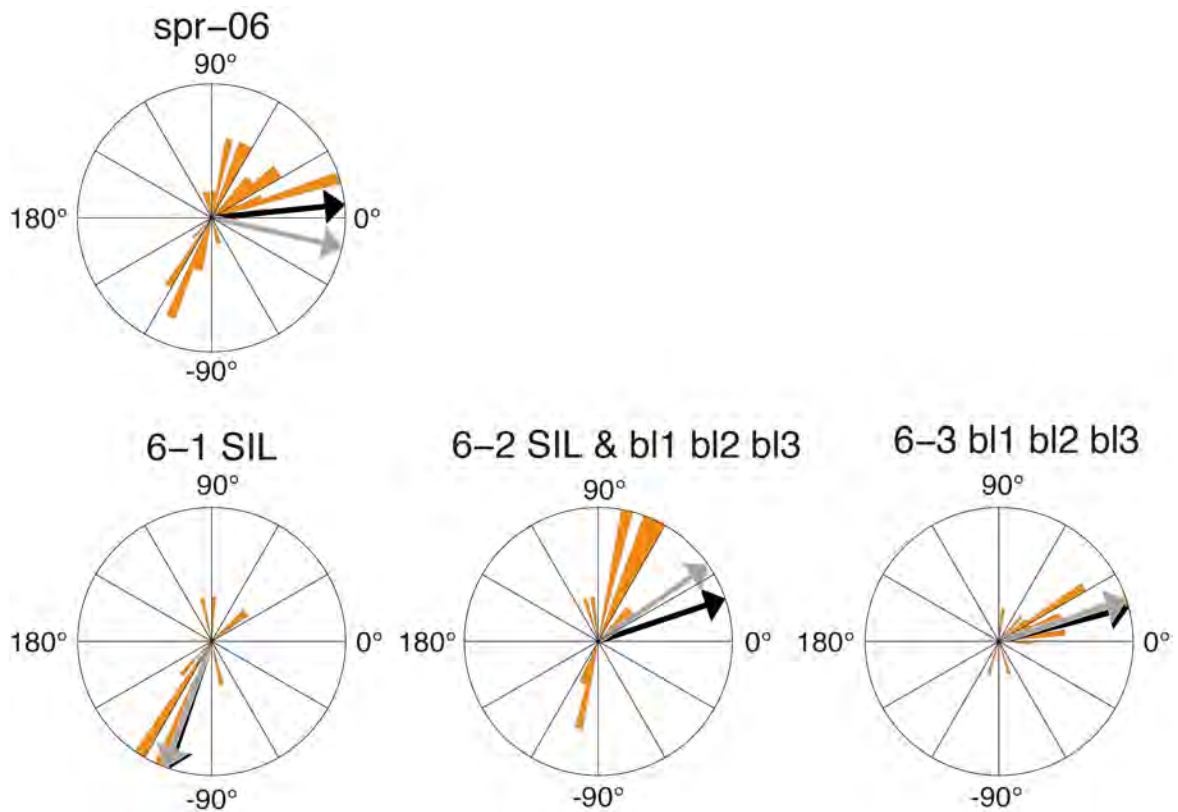
Viðauki I. Dreifing skriðhorna fyrir kortlagðar sprungur



Mynd 16. Normuð tíðnirit sem sýna dreifingu skriðhorna (λ) á kortlögðum sprungum/pyrpingum við Blöndulón fyrir tímabil 1 (skjálfta sem mældust aðeins með SIL-kerfinu). Skriðhorn er mælt rangsælis frá láréttu. Svört, þykk ör sýnir þann þátt meðal-skriðvigurs (λ_{ave}) sem liggur í fletinum sem skjálftadreifin ákvarðar en grá ör þátt vegins meðaltals (λ_{wav}), þar sem vigtað er með vægi skjálftanna, M_0 . Hornadreifinni er skipt niður í 5° bil (geira) fyrir allar sprungur.



Mynd 17. Normuð tíðnirit sem sýna dreifingu skriðhorna (λ) á kortlögðum sprungum/þyrpingum við Blöndulón fyrir tímabil 2 (skjálfta sem mældust 9. nóvember 2010 – 16. janúar 2011, bæði með SIL- og viðbótarstöðvum). Skriðhorn er mælt rangsælis frá láréttu. Svört, þykk ör sýnir þann þátt meðal-skriðvigurs (λ_{ave}) sem liggur í fletinum sem skjálftadreifin ákvarðar en grá ör þátt vegins meðaltals (λ_{wav}), þar sem vigtað er með vægi skjálftanna, M_0 . Hornadreifinni er skipt niður í 5° bil (geira) fyrir allar sprungur.



Mynd 18. Normuð tíðnirit sem sýna dreifingu skriðhorna (λ) á brotflatinum spr-06 sem skilgreindur er út frá þeim 74/75 skjálftum sem endurstaðsettir voru til þess að meta hliðrun á stærstu sprungunni. Í efri línu eru skriðhorn allra skjálfta (sem hægt var að meta skriðhorn fyrir ótvírætt, 49 skj.), fyrir neðan er skriðhornum þessara skjálfta skipt niður í þrjú rit eftir því á hvaða stöðvum skjálftarnir greindust. „6-1 SIL“ sýnir dreifingu skriðhorna 12 skjálfta sem urðu áður en viðbótarstöðvar voru settar upp, og er hluti þeirra skriðhorna sem sýndur er undir 2-t2-03 á Mynd 17. „6-2 SIL & bl1 bl2 bl3“ sýnir dreifingu skriðhorna 19 skjálfta sem staðsettir voru með SIL og viðbótarstöðvum og er hluti þeirra sem sýndur er undir 2-t2-04 á Mynd 17. „6-3 bl1 bl2 bl3“ sýnir dreifingu skriðhorna 18 skjálfta sem staðsettir voru með viðbótarstöðvum og er hluti þeirra sem sýndur er undir 2-t2-04 á Mynd 17. Skriðhorn er mælt rangsælis frá láréttu. Svört, þykk ör sýnir þann þátt meðal-skriðvigurs (λ_{ave}) sem liggur í flatinum sem skjálftadreifin ákvarðar og grá ör sýnir þátt vegins meðaltals (λ_{wav}), þar sem vigtað er með vægi skjálftanna, M_0 . Hornadreifinni er skipt niður í 5° bil (geira) fyrir allar sprungur.