

LV-2019-032



Landsvirkjun



Krafla

Jarðskjálftar og niðurdæling

LV-2019-032



Krafla

Jarðskjálftar og niðurdæling



ÍSOR-2019/022

Verknr.: 17-0172

Mars 2019

Lykilsíða

Skýrsla LV nr.: LV-2019-032

Dags: Mars 2019

Fjöldi síðna: 36

Upplag: 3

Dreifing:

- Birt á vef LV
 Opin
 Takmörkuð til

Titill: Krafla – Jarðskjálftar og niðurdæling

Höfundar/fyrirtæki: Kristján Ágústsson og Hanna Blanck

Verkefnisstjóri: Anette K. Mortensen f.h. LV

Bjarni Richter f.h. ÍSOR

Unnið fyrir: Unnið af Íslenskum orkurannsóknum fyrir Landsvirkjun

Samvinnuaðilar:

Útdráttur:

Ný niðurdælingargögn með meiri tímaupplausn en áður ásamt góðri skráningu á jarðskjálftum hafa gert það kleift að greina fylgni jarðskjálfta og breytingu á niðurdælingu. Í ljós kemur að í nokkrum tilvikum verða skýrt afmarkaðar hrinur samhliða breytingum á niðurdælingu í allt að 1,8 km fjarlægð frá niðurdælingarholu. Einnig verða sambærilegar hrinur án þess að breyting sé á niðurdælingu og öfugt, þ.e. engar breytingar í skjálftavirkni þótt miklar breytingar séu á niðurdælingu. Brotlausnir eru breytilegar en flestar eru nokkurn veginn í samræmi við það svæðisbundna spennusvið sem ætla má að ríki á plötuskilunum í Kröflu. Brotlausnir skjálfta í Suðurlíðum sýna langflestir siggengi en sniðgengi í Vítismó.

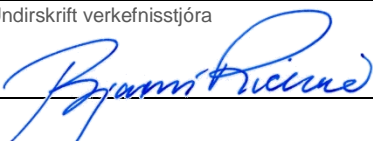
Lykilorð:

Niðurdæling, jarðskjálftar, örvaðir skjálftar, brotlausnir, skjálftaþyrpingar, skjálftahrinur, LV, ÍSOR

ISBN nr.:

Samþykki verkefnisstjóra
Landsvirkjunar

Undirskrift verkefnisstjóra



Yfirfarið

Ólafur G. Flóvenz

Efnisyfirlit

1	Inngangur	7
2	Gögn og úrvinnsla.....	7
3	Skjálftavirkni.....	8
4	Niðurdæling.....	11
5	Niðurdæling, skjálftahrinur og skjálftaþyrpingar	14
	5.1.1 Tímabilið 30.5–12.6 2014	14
	5.1.2 Aðrar hrinur	20
6	Brotlausnir	26
7	Umræða	27
8	Samantekt.....	28
9	Lokaorð.....	28
10	Heimildir	29
	Viðauki: Focal mechanisms in Krafla geothermal area from Oct. 2014 to Oct. 2017	30

Myndir

Mynd 1.	Afstætt staðsettir jarðskjálftar í Kröflu frá október 2013 til mars 2018	9
Mynd 2.	Þéttleiki jarðskjálftavirkinnar í Kröflu	9
Mynd 3.	Stefna beltis með minni skjálftavirkni norðan megin skjálftavirkinnar og sunnan virkni við IDDP-1.....	10
Mynd 4.	Þykkt brotgjörnu skorpunnar í Kröflu	11
Mynd 5.	Niðurdæling í holur IDDP-1 og K-26 og þrýstingur í K-26	12
Mynd 6.	Mæld og reiknuð niðurdæling og mældur þrýstingur í K-39, stærð og fjöldi skjálfta á dag á Kröflusvæði. Mælingar frá 2013 til 2017.....	13
Mynd 7.	Niðurdæling og þrýstingur við niðurdælingu í K-26 skráð á 5 sek. fresti á tímabilinu 20. til 25. september 2017.	14
Mynd 8.	Skjálftar og niðurdæling á tímabilinu 25.5 til 16.6. 2014.....	15
Mynd 9.	Staðsetning jarðskjálfta í hrinunum 3.06 til 6.06 2014	17
Mynd 10.	Staðsetning skjálfta í hrinu þann 3. júní 2014.....	17
Mynd 11.	Staðsetning skjálfta í hrinu þann 4. júní 2014.....	18
Mynd 12.	Staðsetning skjálfta í hrinu þann 5. júní 2014.....	18
Mynd 13.	Staðsetning skjálfta í hrinu þann 9.–10. júní 2014.....	19
Mynd 14.	Staðsetning skjálfta í hrinu þann 28. maí 2015	20
Mynd 15.	Staðsetning skjálfta í hrinu þann 7. desember 2015.....	21
Mynd 16.	Staðsetning skjálfta í hrinu þann 11. desember 2015.....	22
Mynd 17.	Staðsetning skjálfta í hrinu þann 13. maí 2017	23
Mynd 18.	Línur sem komið hafa fram í einstökum hrinum	24
Mynd 19.	Staðsetning, fjöldi skjálfta á dag og stærðir skjálfta frá 11.1. til 3.4. 2018	25

1 Inngangur

Fengist hafa niðurdælingargögn með góðri tímaupplausn frá vinnslusvæðinu í Kröflu. Jafnframt hefur rekstur skjálftamælanetsins gengið vel. Staðsettir voru yfir 8000 jarðskjálftar á árinu 2017 en frá október 2013 til mars 2018 hafa samtals verið staðsettir um 25.000 skjálftar. Því eru forsendur fyrir því að athuga með nokkurri nákvæmni hvort skjálftar verði við snöggar breytingar á niðurdælingu og hvort unnt sé að rekja þá virkni í tíma og rúmi. Sérstaklega er skoðað hvort skjálftarnir fylgi ákveðnum sprungum.

Ennfremur hafa verið gerðar brotlausnir fyrir flesta skjálfta sem orðið hafa á Kröflusvæðinu og hafa fullnægjandi fjölda aflestra á komutímum bylgna.

2 Gögn og úrvinnsla

Jarðskjálftar á Kröflusvæðinu sjálfu sem notaðir eru við þessa greiningu eru ríflega 18.100. Það er minna en heildarfjöldi skjálfta (um 25.000) þar sem krafa um gæði mælinga og fjölda aflestra fyrir afstæða staðsetningu útilokar alltaf einhverja jarðskjálfta. Hér var gerð krafa um að samtals 8 komutímar P- og S- bylgna greindust frá hverjum skjálfta.

Umfjöllunin hér byggist á afstæðri staðsetningu jarðskjálftanna (e. double difference relocation) sem fengin er með forritinu hypoDD (Waldhauser og Ellsworth, 2000). Við þá endurstaðsetningu (mynd 1) var notast við það hraðalíkan sem notað er við venjubundna staðsetningu þeirra (e. single event location). Óvissa í venjubundinni staðsetningu er venjulega minni en 300 m á láréttu þáttunum (N-S og A-V) og minni en 500 m í dýpi. Með afstæðri staðsetningu minnkar þessi óvissa um allt að stærðargráðu og er þá undir 100 m á öllum þáttum.

Metinn er þéttleiki skjálftavirkninnar, þ.e. fjöldi jarðskjálfta á flatarmálseiningu. Sömuleiðis var þykkt hinnar brotgjörnu skorpu metinn á sömu flatarmálseiningu. Við höfum skilgreint brotgjörnu skorpu þannig að 95% skjálftanna séu ofan við mörkin. Í þessu mati slepptum við svæðum þar sem eru færri en 10 skjálftar á flatarmálseiningu. Þess vegna er heildarsvæðið þar sem unnt er að meta þykkt brotgjörnu skorpu minna en svæðið þar sem þéttleiki er metinn. Flatarmálseiningin sem notuð er (e. Pixel) er 46 m A-V og 56 m N-S eða ~1/4 hektari.

Niðurdælingargögn fengust fyrir holur K-26, K-39 og IDDP-1:

K-26

- Mæligögn á 5 mínútna bili frá 2013 til 2017, niðurdæling og holutoppsþrýstingur (mynd 5).
- Mæligögn á 5 sekúndna bili frá 20.9.2017 til 25.9.2017, niðurdæling og holutoppsþrýstingur (mynd 7).

K-39

- Mæligöng á 5 mínútna bili frá 2014 til 2017, niðurdæling, reiknuð niðurdæling og holutoppsþrýstingur (mynd 6).

IDDP-1

- Mæligögn á 10 mínútna bili frá 2012 til 2015, niðurdæling (mynd 5).

Þá eru upplýsingar um borun K-41 og hreinsun K-14 og K-15. Ennfremur eru fyrir hendi upplýsingar frá holum K-5, K-6, K-11, K-13, K-16, K-19, K-20, K-21, K-24, K-28, K-30, K-31, K-35, K-37, K-38, K-39, K-40 og K-41. Þar er um að ræða vinnslugögn, gögn um boranir og hreinsanir holna og dagbækur gufuveitumanna.

Í þessum áfanga er lögð áhersla á niðurdælingargögn frá K-26, K-39 og IDDP-1.

Fyrirfram var talið ólíklegt að allt virka svæðið í Kröflu svaraði breytingu á niðurdælingu í einstökum holum heldur aðallega svæðin í grennd við æðar í holunum. Því voru í fyrstu athuguð tengsl á milli niðurdælingar og skjálftavirkni á afmörkuðum svæðum í grennd við holurnar sem dælt var í. Nokkur tímabil þar sem slík tenging virtist geta verið til staðar voru skoðuð nánar. Síðar kom ljós kom að með þessu fóru framhjá athyglisverðar upplýsingar sem fólust m.a. í því að í nokkrum tilvikum virtist breyting á niðurdælingu hafa áhrif á skjálftavirkni í talsverðri fjarlægð frá holunni sem dælt var í en ekki rétt við hana eins og við gáfum okkur í fyrstu. Í seinni fasa úrvinnslu voru allar afmarkaðar og skýrar skjálftahrinur skoðaðar óháð því hvort breytingar voru á niðurdælingu eða ekki. Í því skini var sett upp forrit og þróað viðmót þar sem þetta var þægilegt. Það er ekki ástæða til að fjalla hér um fyrri nálgunina þar sem seinni nálgunin felur þá fyrri í sér.

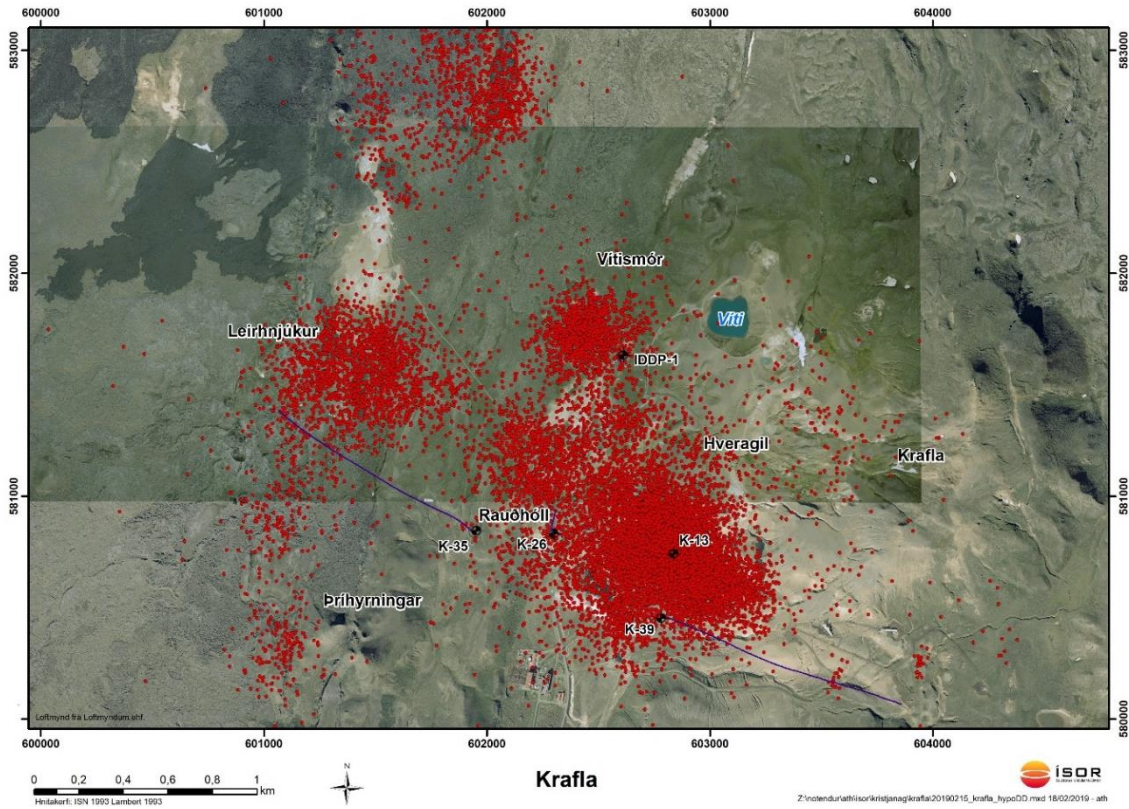
3 Skjálftavirkni

Eins og sjá má á myndum 1 og 2 er jarðskjálftavirknin að mestu í 5 þyrpingum. Langmest virkni er í grennd við við holutopp K-13, eða yfir 160 skjálftar á flatarmálseiningu, og sú þyrping er einnig stærst að flatarmáli. Aðrar helstu þyrpingarnar eru norðan við holu K-26, umhverfis IDDP-1 og sunnan og norðan við Leirhnjúk. Að auki sjást tvær minni þyrpingar, önnur við Þríhyrninga og hin NNV þeirra. Athyglisvert er að norðan við þyrpingarnar við K-13 og K-26 er NV-SA lína með lítilli virkni og tvær afmarkaðar þyrpingar norðan þessarar línu en sunnan þyrpingarinnar við IDDP-1 (mynd 3). Þetta er stefna Húsavíkur-Flateyjar misgengisins og kemur víða fram í jarðfræði og jarðeðlisfræðilegum mælingum á Kröflu-svæðinu.

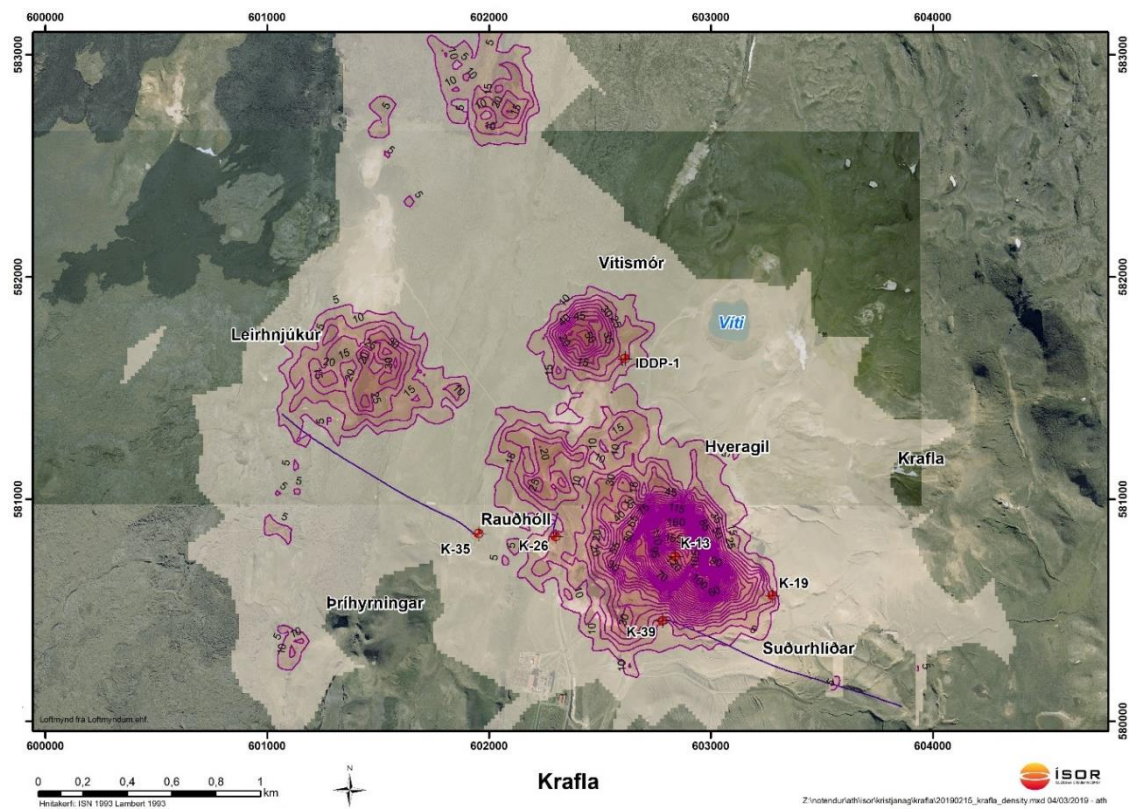
Þykkt brotgjörnu skorpunnar skv. þessum gögnum er sýnd á mynd 4. Þar má sjá að þykktin minnkar úr rúmum 2400 m í Suðurhlíðum í minnst um 1800 m vestan við IDDP-1, eða um 600 m munur. Svæðin beggja vegna Leirhnjúks eru með um 2200 m þykkt. Það er því ljóst að grynnt er á þessi mörk í grennd við IDDP-1.

Sá flötur sem afmarkar neðri mörk brotgjörnu skorpunnar skilgreinir mestu stærð jarðhitageymisins í dýpi þar sem vatnsleiðandi sprungur neðan hans geta ekki verið opnar til lengri tíma. Rannsókn sem byggist á skjálftavirkni við borholur sem hafa vel ákvarðaðan hitastigul bendir til þess að mörk brotgjarnar og deigrar skorpu eru við $750^{\circ} \pm 100^{\circ}$ (Kristján Ágústsson og Ólafur G. Flóvenz, 2007) þannig að þetta getur þá verið slíkur jafnhitaflötur.

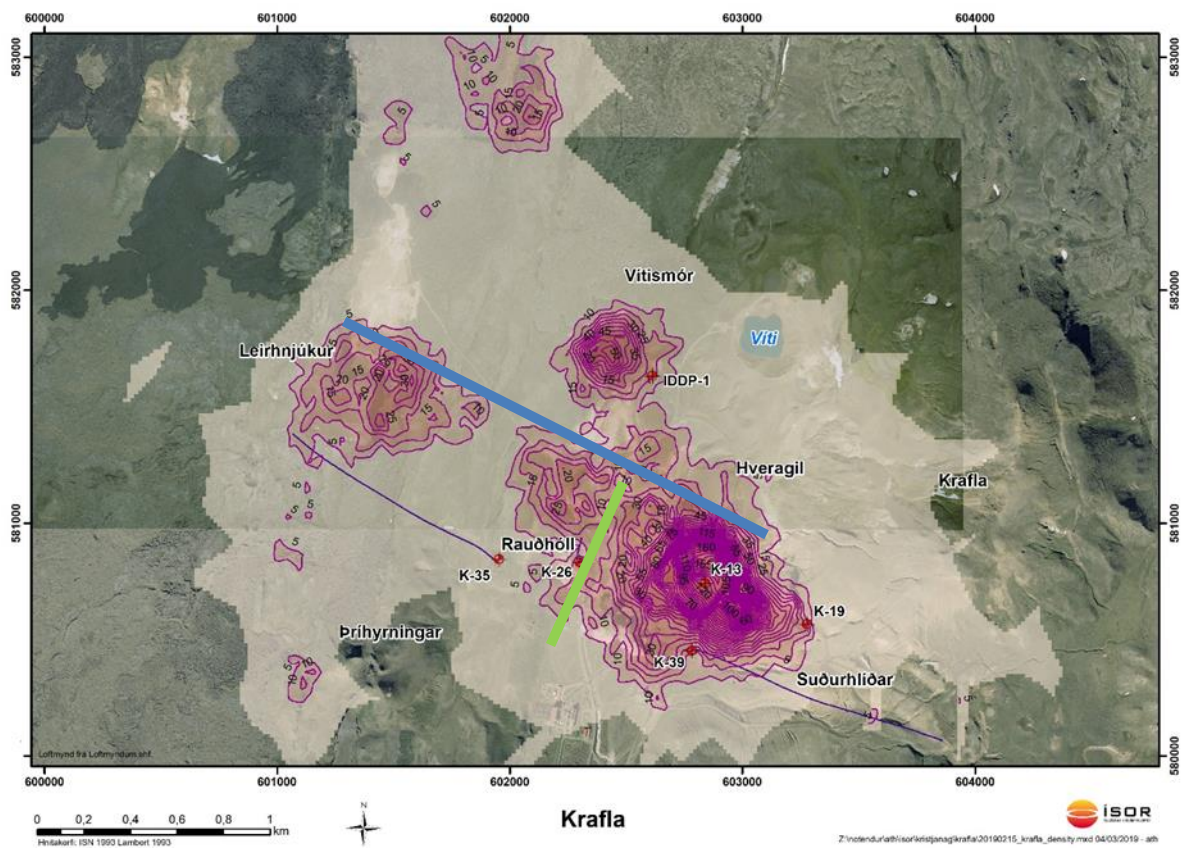
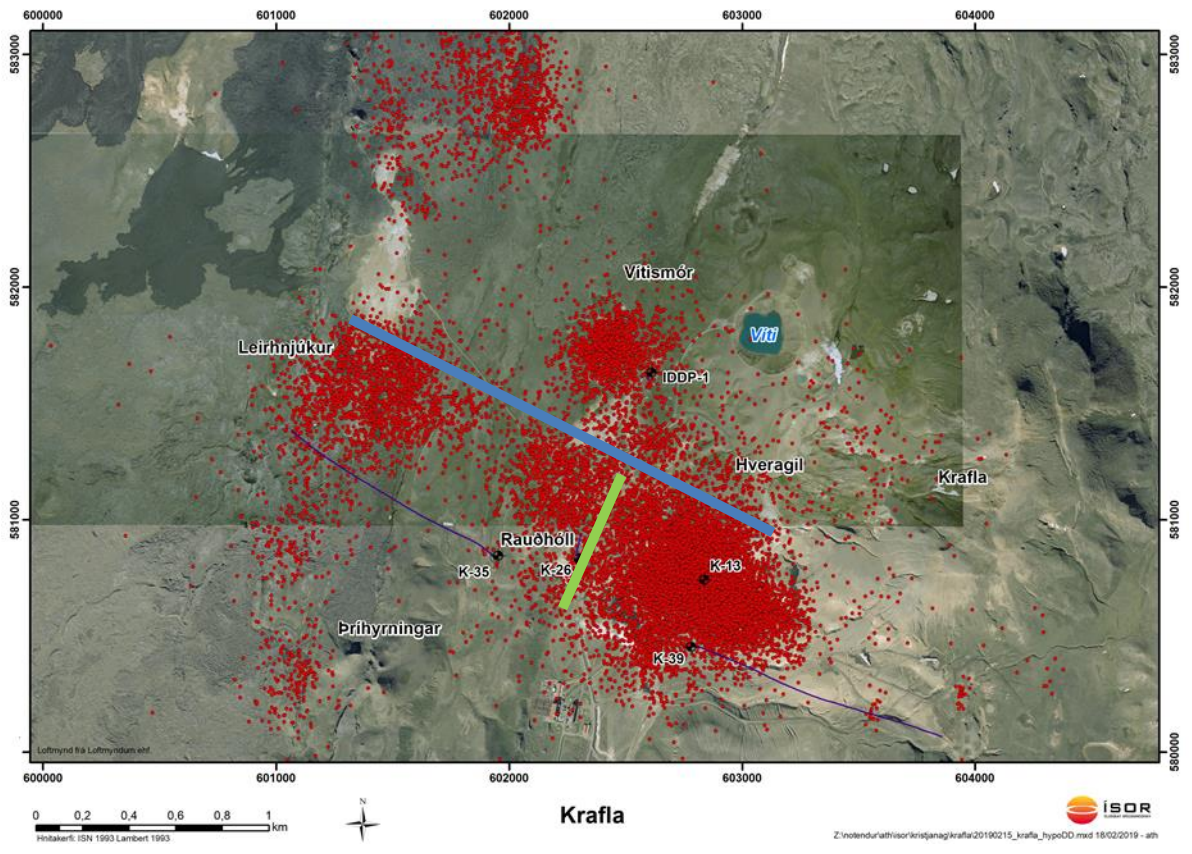
Tímaraðir sem sýna stærðir jarðskjálfta og fjölda skjálfta á dag eru á mynd 6. Stærsti skjálfti á tímabilinu er um 3,2 Ml en um 17 skjálftar eru 2 Ml og yfir þar sem Ml er skilgreind sem staðbundin stærð (e. local magnitude) og almennt notuð ef fjarlægðir skjálfta frá mælinetum er minni en 500 km. Að meðaltali eru um 16 skjálftar á dag á tímabilinu 2013 til 2018, færri í byrjun tímabilsins en fjölga með tíma og eru um 20 skjálftar á dag árið 2017.



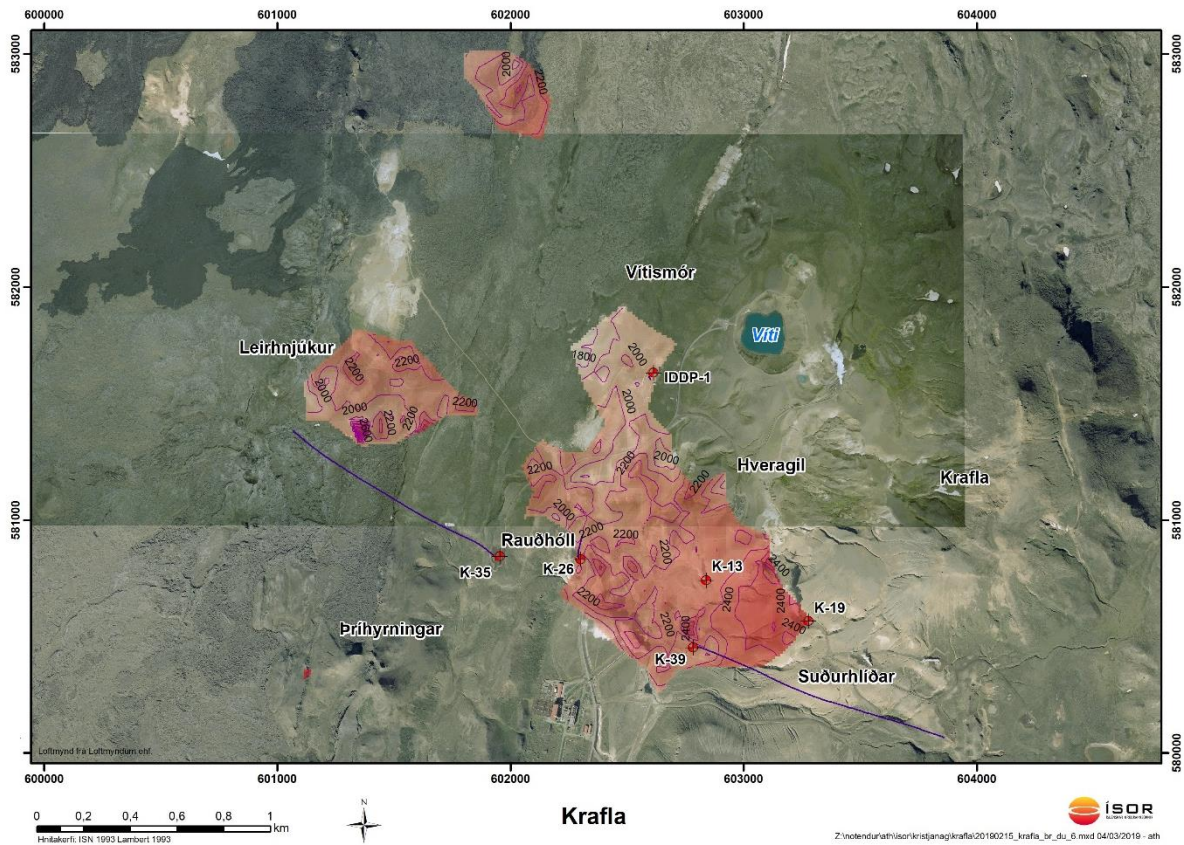
Mynd 1. Afstætt staðsettir jarðskjálftar í Kröflu frá október 2013 til mars 2018, holutoppar og holuferlar.



Mynd 2. Þéttleiki jarðskjálftavirkinnar í Kröflu. Myndin sýnir fjölda skjálfta á reit sem er 46 m austur-vestur og 56 m norður-suður.



Mynd 3. Blá lína sýnir stefnu beltis með minni skjálftavirkni norðan megin skjálftavirkinnar og sunnan virkni við IDDP-1. Gul lína skilur milli meginvirkni og þyrpingar við K-26.



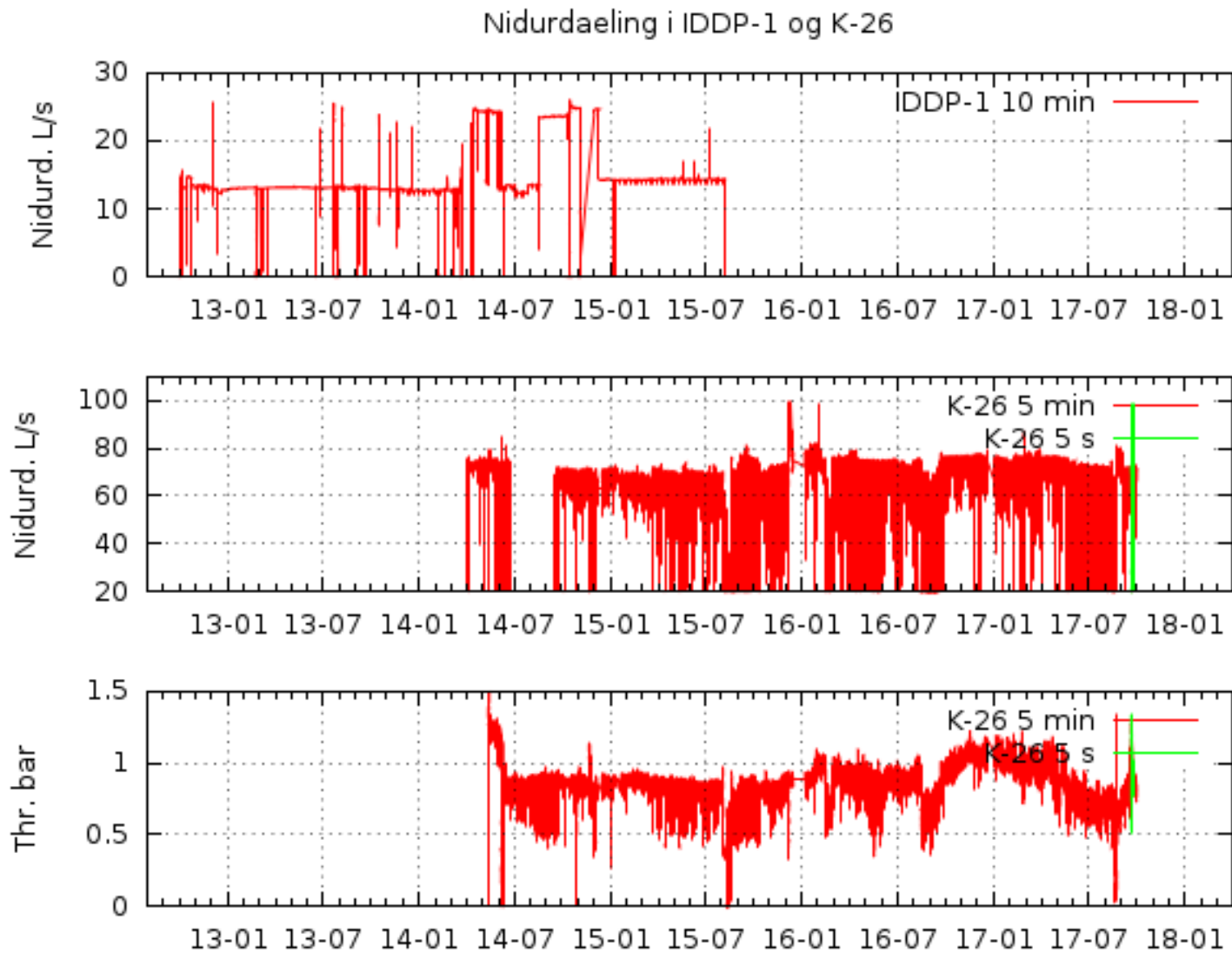
Mynd 4. Þykkt brotgjörnu skorpunnar í Kröflu.

4 Niðurdæling

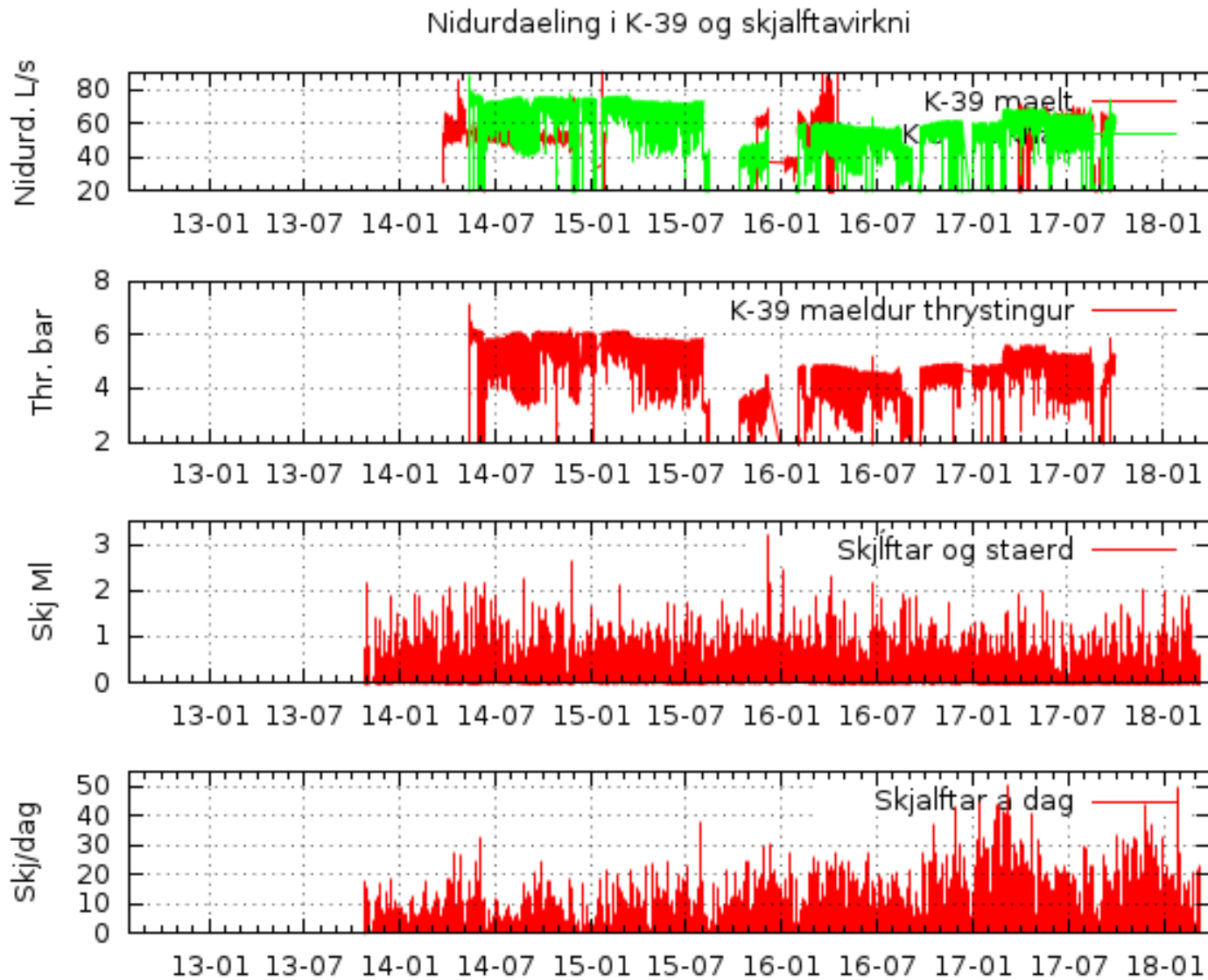
Á myndum 5, 6 og 7 má sjá að talsvert suð er í gögnunum, einkum á niðurdælingunni en einnig nokkur á holutoppsprýstingi. Ástæður þess eru í mörgum tilvikum eðlilegar vegna skammtímabreytinga á vinnslu. En almennt má segja að erfitt er að mæla rennsli og hugsanlegt að eitthvað tækjasuð sé til staðar. Niðurdæling í K-39 hefur verið reiknuð út frá þrýstingi þar sem mæling á honum var talin traustari en mæling á rennsli auk þess sem hún var samfelldari.

Mælingarnar í K-26 sem gerðar eru á 5 sek. fresti (mynd 7) eru mjög góðar. Vegna hinnar háu söfnunartíðni er líklegt að suðið sem þar kemur fram sé tækjasuð þar sem ólíklegt er að niðurdæling og þrýstingur breytist eins ört og raun ber vitni.

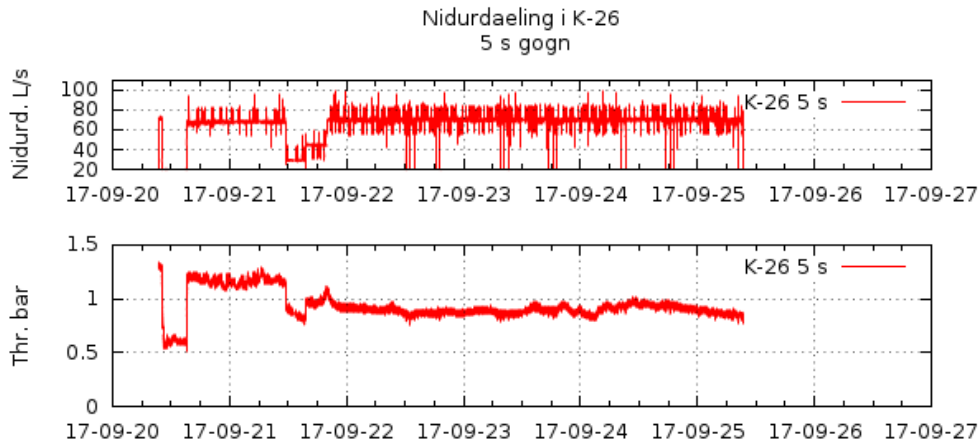
Töluverð fylgni er á niðurdælingu í K-26 og K-39 og því getur verið óvíst hvor holan gæti tengst örвуðum skjálftum.



Mynd 5. Niðurdæling í holur IDDP-1 og K-26 og þrýstingur í K-26. Mælingar frá 2013 til 2017 og tímabilið þegar mælt var með 5 sek. upplausn (grænt) er sýnt með meiri upplausn á mynd 7.



Mynd 6. Mæld og reiknuð niðurdæling (græn) og mældur þrýstingur í K-39, stærð og fjöldi skjálfta á dag á Kröflusvæði. Mælingar frá 2013 til 2017.



Mynd 7. Niðurdæling og þrýstingur við niðurdælingu í K-26 skráð á 5 sek. fresti á tímabilinu 20. til 25. september 2017.

5 Niðurdæling, skjálftahrinur og skjálftaþyrpingar

Hér á eftir er fjallað um styttri tímabil þar sem hrinur áttu sér stað.

5.1 Tímabilið 30.5–12.6 2014

Á mynd 8 má sjá að niðurdæling í IDDP-1 er breytileg á bilinu 13 og 24 kg/s frá 30.5 til 7.6 2014. Litlar breytingar eru á niðurdælingu í K-26 og K-39 fram til 6. júní en þá verða þær umtalsverðar. Athyglisverðar eru þrjár hrinur sem verða síðustu þrjú skiptin (3. 4. og 5. júní) sem gerast þegar dregið er úr niðurdælingu í IDDP-1 en engar augljósrar breytingar eru samtímis á niðurdælingu í hinar holurnar. Síðan hefst stök hrina 6. júní á svipuðum slóðum og fyrri hrinurnar. Þá eru engar breytingar á niðurdælingu í IDDP-1 en breytingar eru á niðurdælingu í K-26 og K-39.

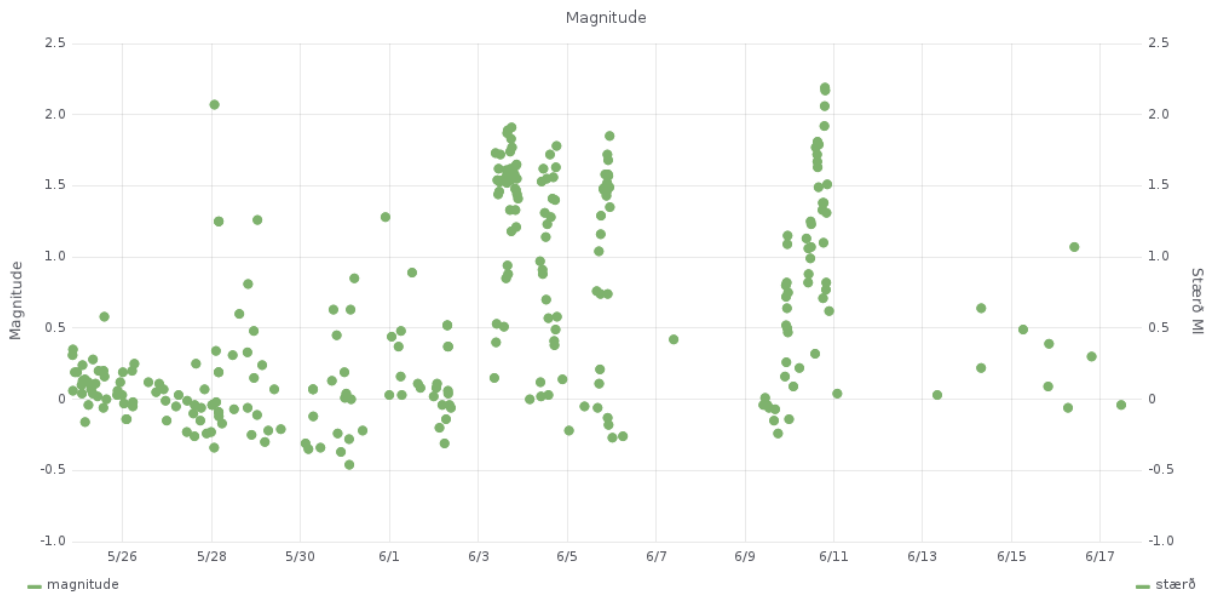
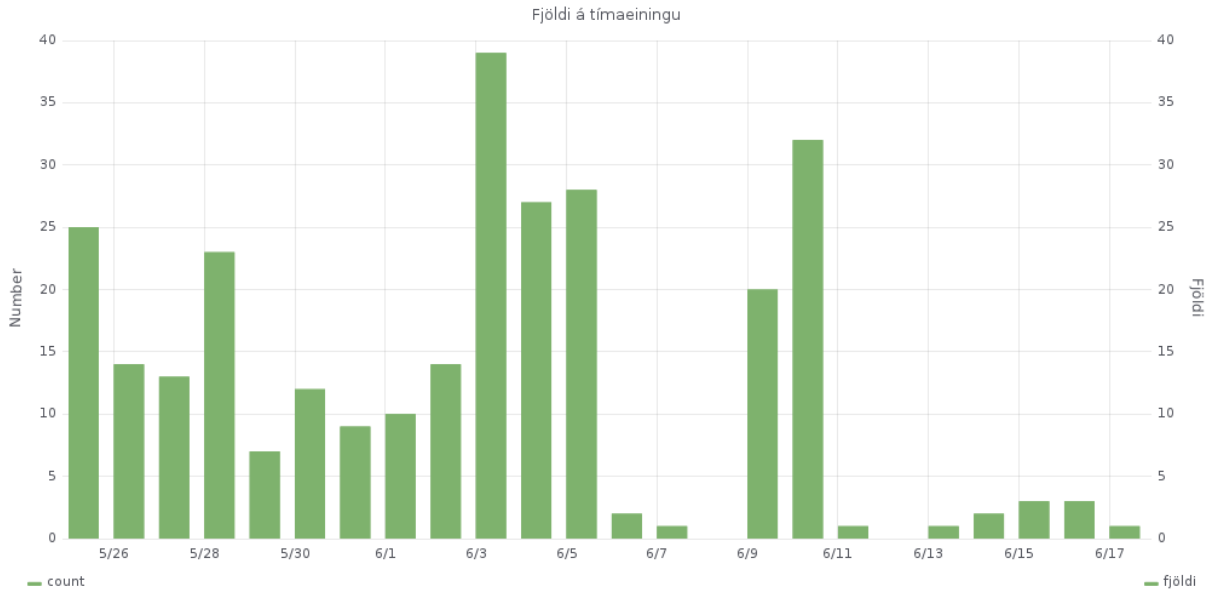
Staðsetning jarðskjálftanna er á mynd 9 og er greinilegt að þeir mynda nokkuð vel skilgreindar þyrpingar á sunnanverðu vinnslusvæðinu en engar í grennd við IDDP-1. Langflestir skjálftanna eru á innan við 1 km dýpi. Ef einstakar hrinur eru skoðaðar sést að þetta er nokkuð flókið útlausnarmynstur.

Hrina 3.6. 2014: Þetta eru þrjár stakar þyrpingar (mynd 10) og hefur virknin í aðalatriðum færst frá vestri til austurs.

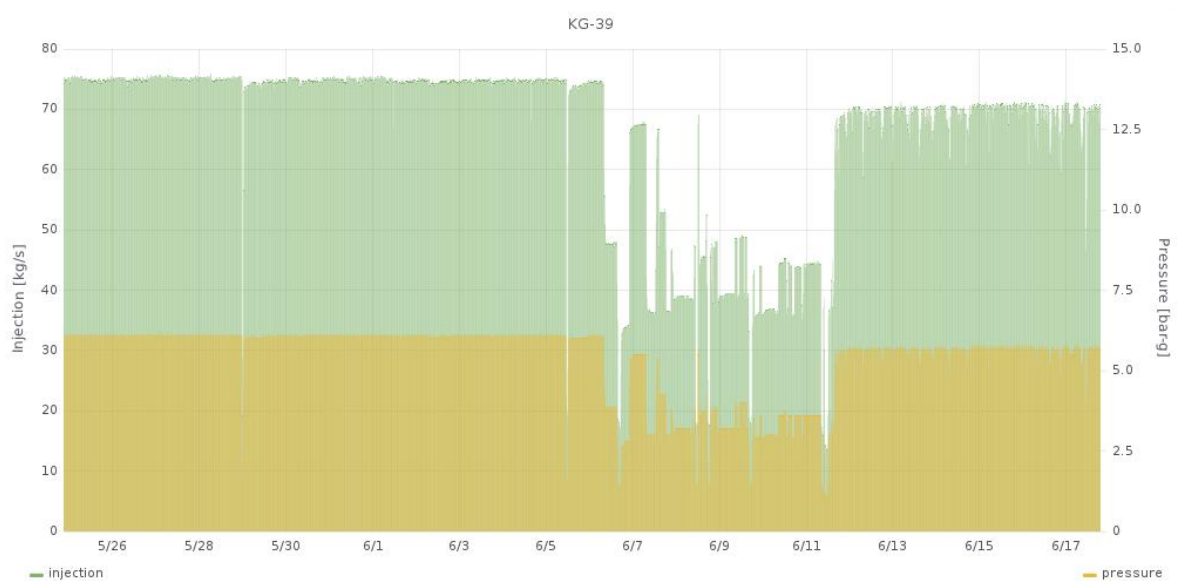
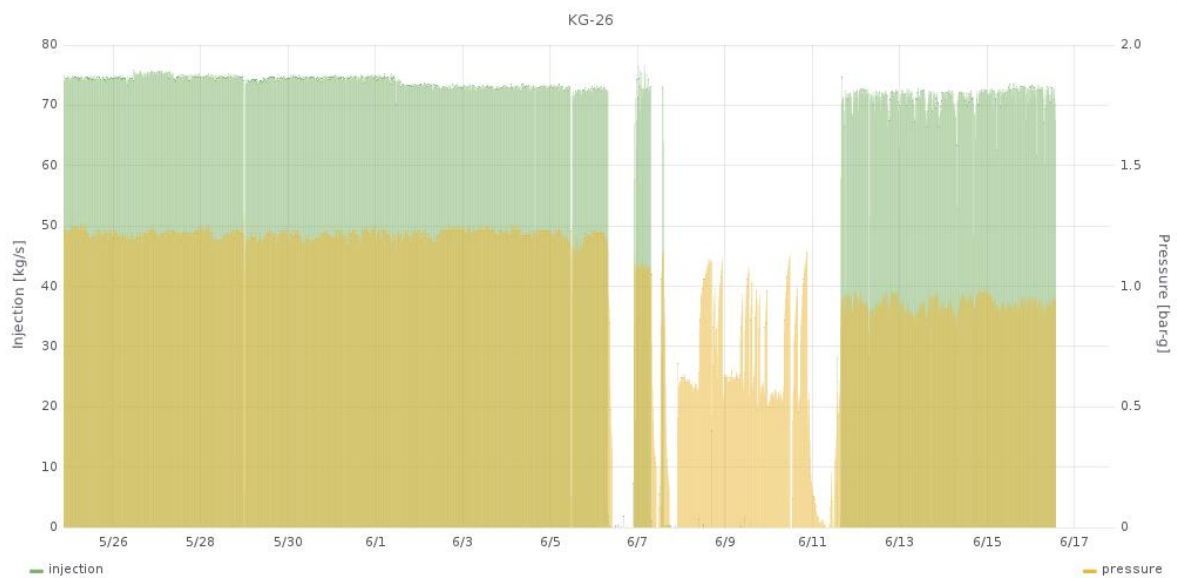
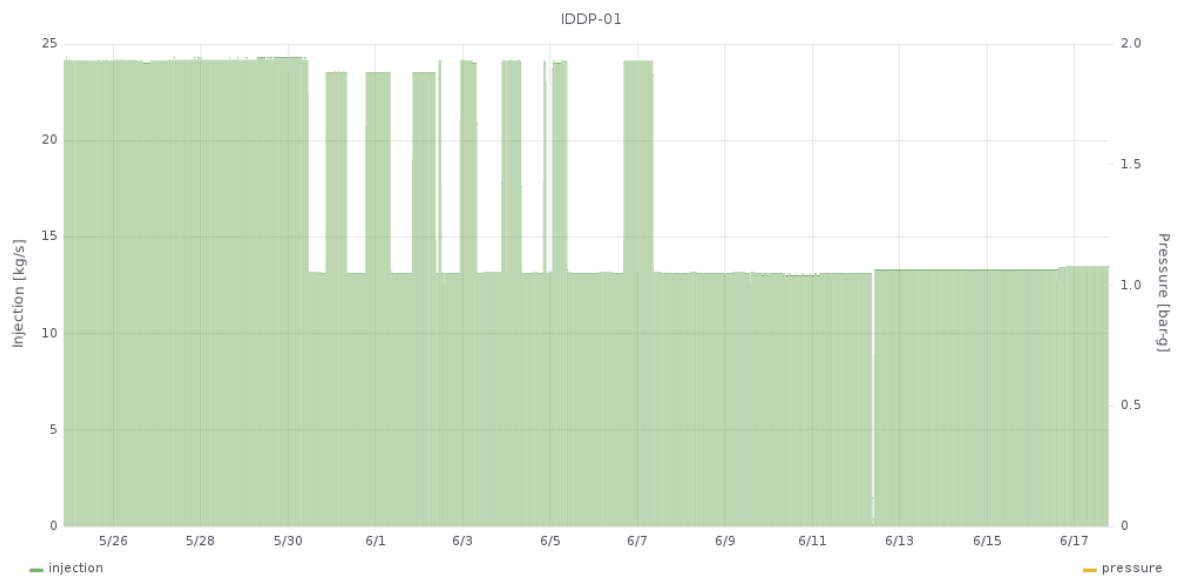
Hrina 4.6. 2014: Þetta eru tvær aðskildar hrinur (mynd 11) og virknin samtímis í báðum.

Hrina 5.6. 2014: Þetta eru einnig tvær aðskildar hrinur (mynd 12) og virknin færst frá austri til vesturs.

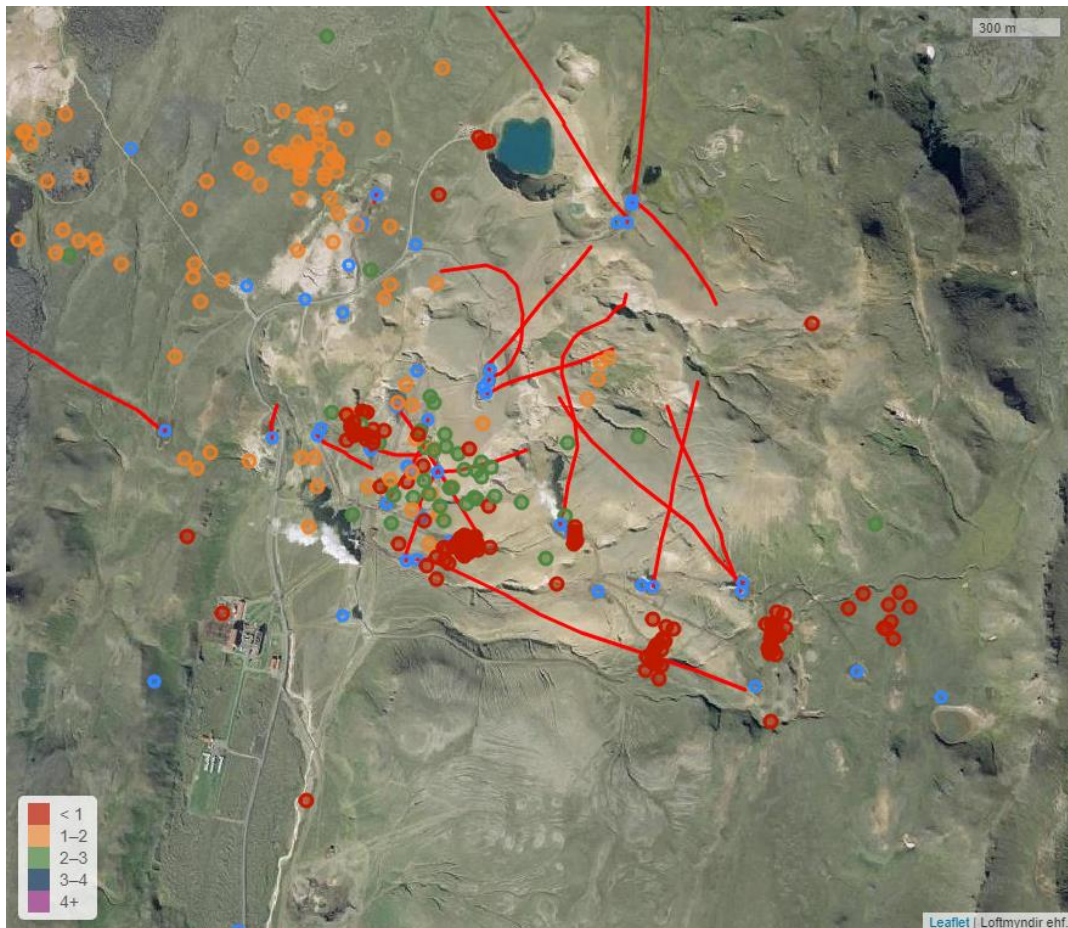
Hrina 9.–10.6. 2014: Hér er um að ræða 4 aðskildar þyrpingar (mynd 13). Tvær austustu þyrpingarnar eru fyrst, síðan sú vestasta og síðan er flutningur til austurs. Mjög skýr tengsl eru milli niðurdælingar og skjálftavirkni þ.a. hrinurnar verða þegar niðurdæling er aukin á K-26 og K-39. Það er ekki algilt þar sem ekki verða hrinur þann 6. fram til kl. 20 þótt breytingar séu á niðurdælingu. Þar sem niðurdæling á K-26 og K-39 eru samfasa á þessu tímabili er ekki unnt að fullyrða hvor holan hefur þessi áhrif þótt líklegra sé vegna staðsetninga og holuferils að K-39 geri það.



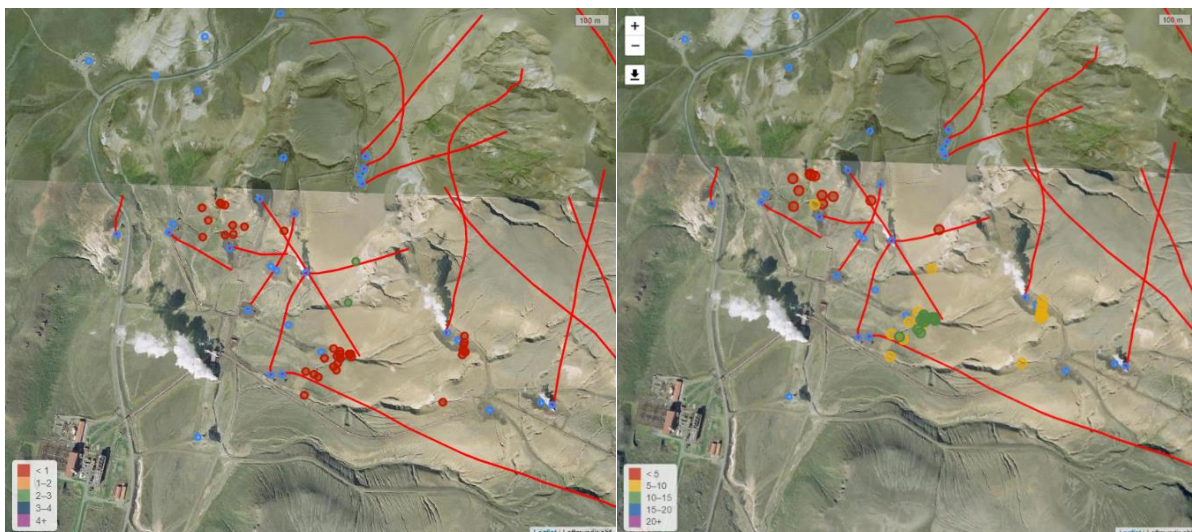
Mynd 8. Skjálftar og niðurdæling á tímabilinu 25.5 til 16.6. 2014.



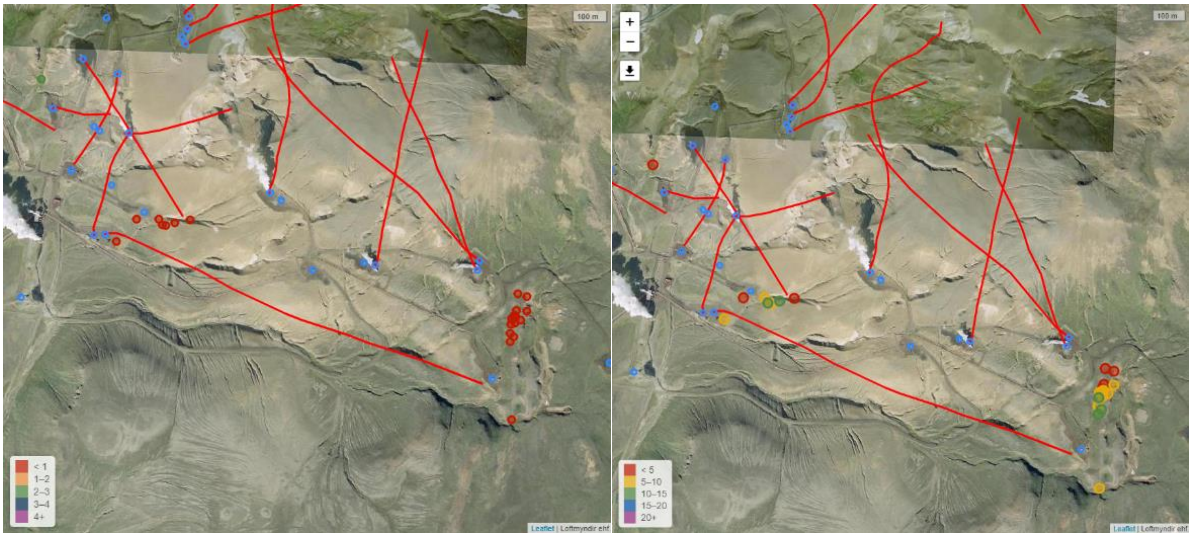
Mynd 8. (Frh.) Skjálftar og niðurdæling á tímabilinu 25.5 til 16.6. 2014.



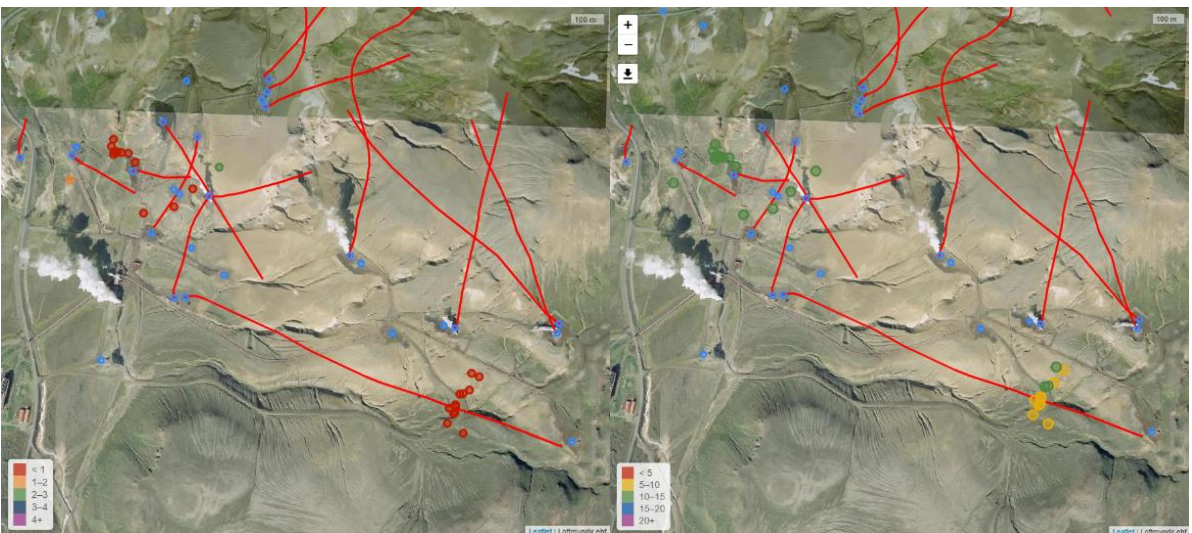
Mynd 9. Staðsetning jarðskjálfta í hrinunum 3.06 til 6.06 2014. Litaskali í horni neðst til vinstri sýnir dýpi í km. Bláir hringir með gati sýna holutoppa og rauðar línur holuferla.



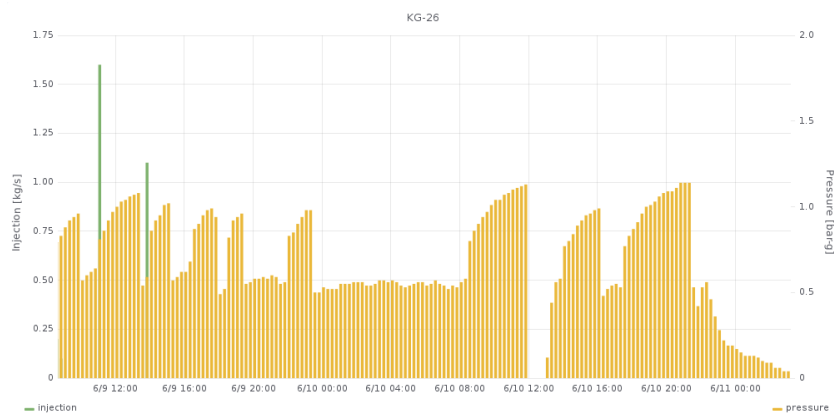
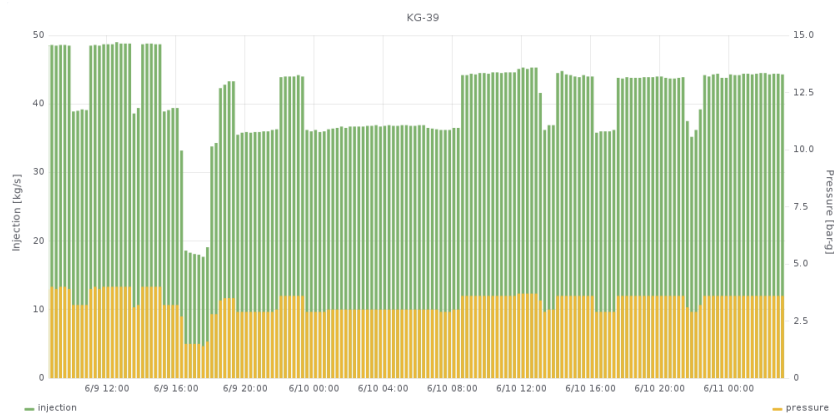
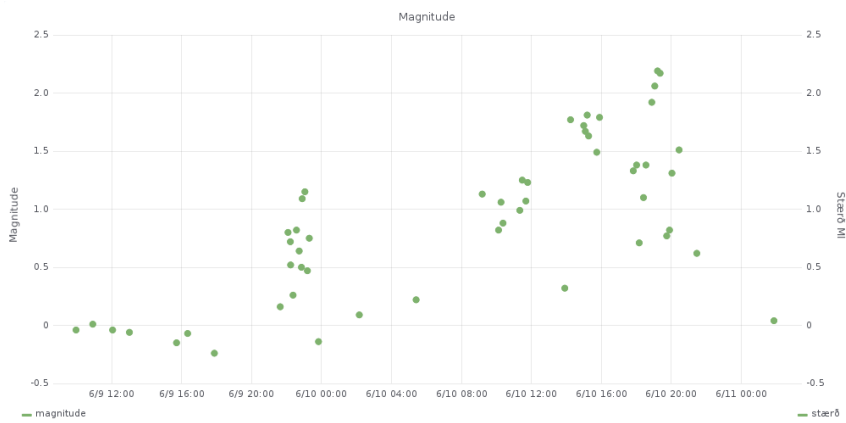
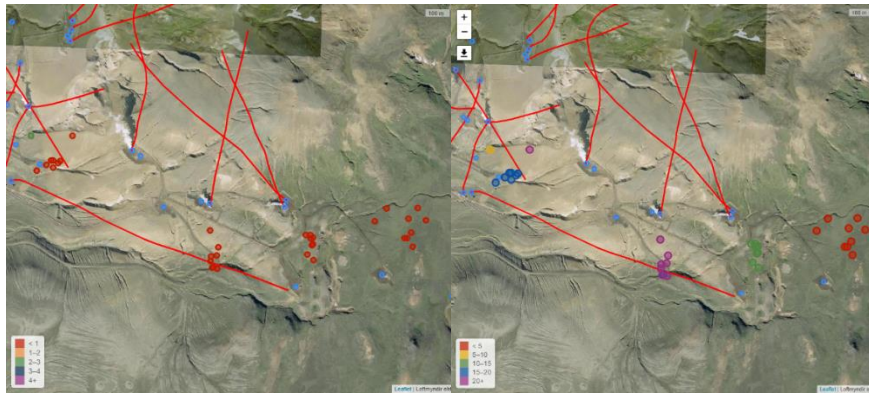
Mynd 10. Staðsetning skjálfta í hrinu þann 3. júní 2014. Litaskali í neðri, vinstri hornum sýna dýpi skjálfta í km á vinstri mynd og tíma í klst. frá því að niðurdæling minnkaði á hægri mynd. Bláir hringir með gati sýna holutoppa og rauðar línur holuferla.



Mynd 11. Staðsetning skjálfta í hrinu þann 4. júní 2014. Litaskali í neðri, vinstri hornum sýna dýpi skjálfta í km á vinstri mynd og tíma í klst. frá því að niðurdæling minnkaði á hægri mynd. Bláir hringir með gati sýna holutoppa og rauðar línur holuferla.



Mynd 12. Staðsetning skjálfta í hrinu þann 5. júní 2014. Litaskali í neðri, vinstri hornum sýna dýpi skjálfta í km á vinstri mynd og tíma í klst. frá því að niðurdæling minnkaði á hægri mynd. Bláir hringir með gati sýna holutoppa og rauðar línur holuferla.

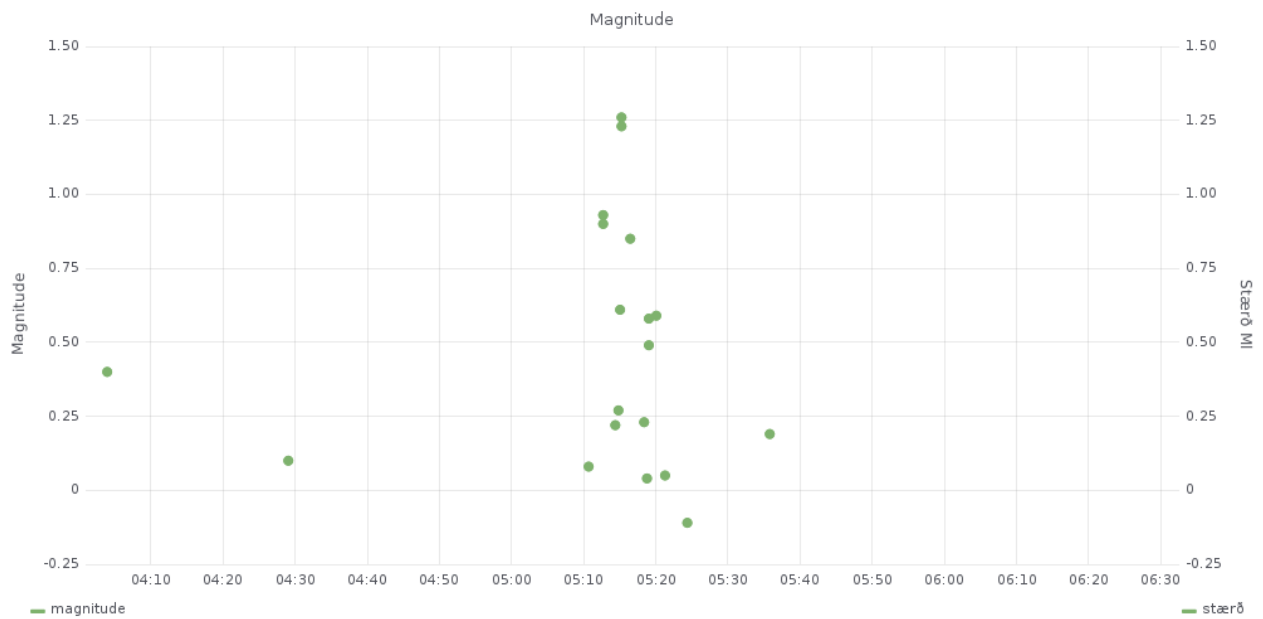
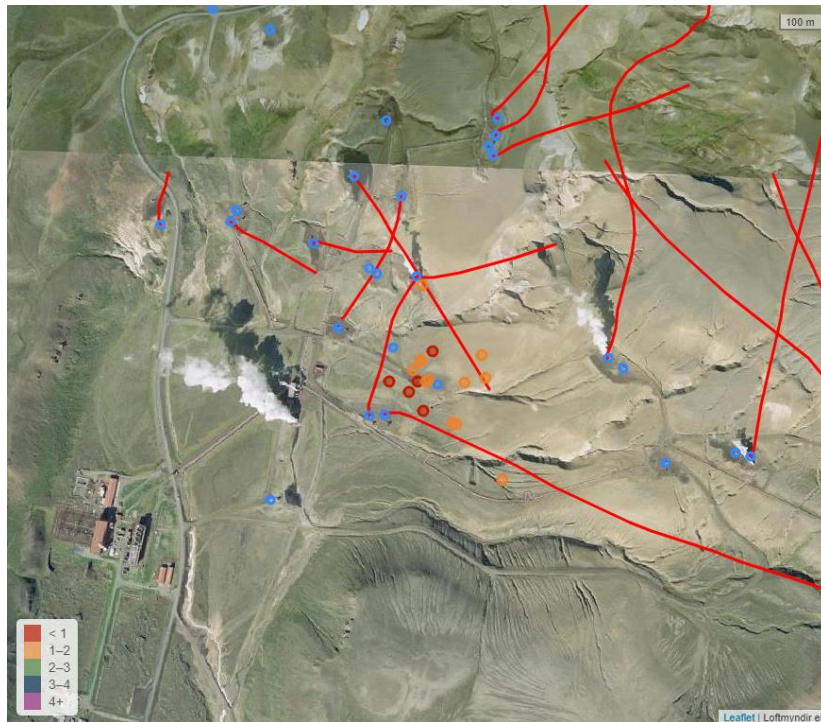


Mynd 13. Staðsetning skjálfta í hrinu þann 9.–10. júní 2014. Litaskali í neðri, vinstri hornum sýna dýpi skjálfta í km á vinstri mynd og tíma í klst. frá því að niðurdæling minnkaði á hægri mynd. Bláir hringir með gati sýna holutoppa og rauðar línur holuferla.

5.2 Aðrar hrinur

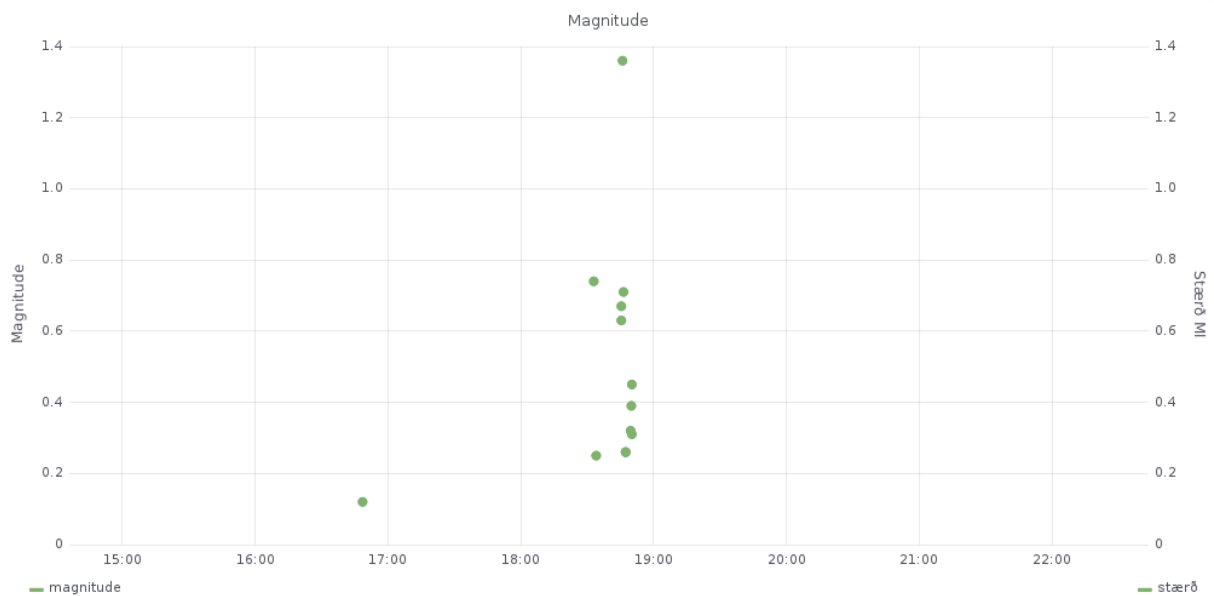
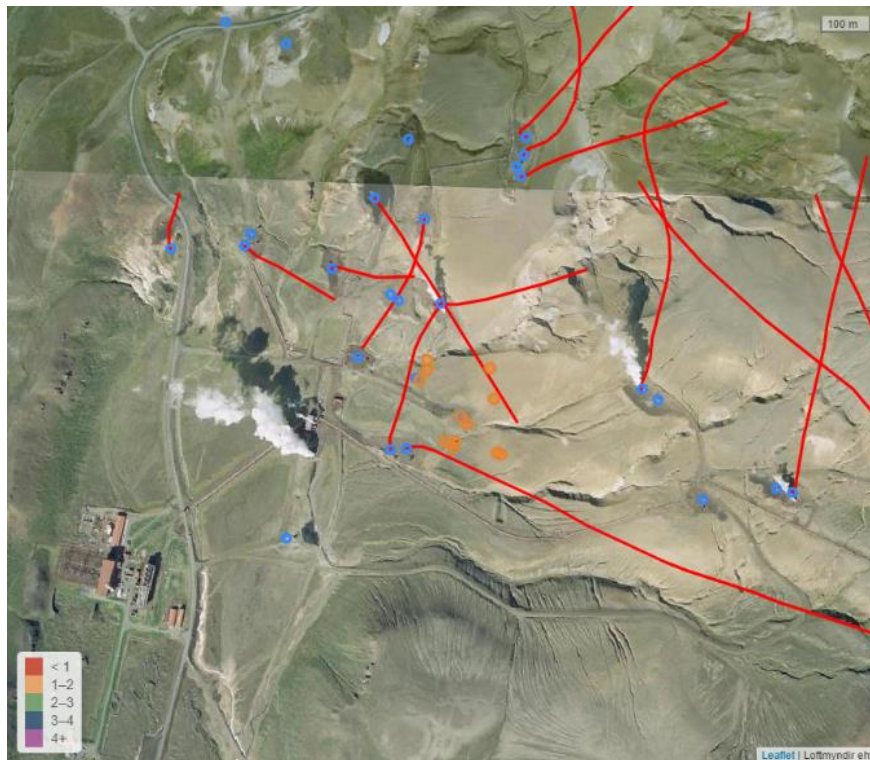
Almennt er nokkuð um snarpar hrinur með tiltölulega fáum skjálftum og samhliða þeim er ýmist breyting á niðurdælingu eða ekki. Hér á eftir er þeim helstu lýst en jafnframt hafa orðið fleiri og smærri hrinur en oftast á svipuðum slóðum og hrinurnar sem voru 2014..

Hrina 28.5. 2015: Þetta er lítil, snörp og þétt hrina við holutopp K-39 frá kl. 4:29 til 5:35 á svipuðum slóðum og hrina 3. og 4. og 10. júní 2014 (mynd 14). Engar breytingar eru á niðurdælingu á þessum tíma og hefur hún verið stöðug nokkra mánuði áður en hrinan verður.



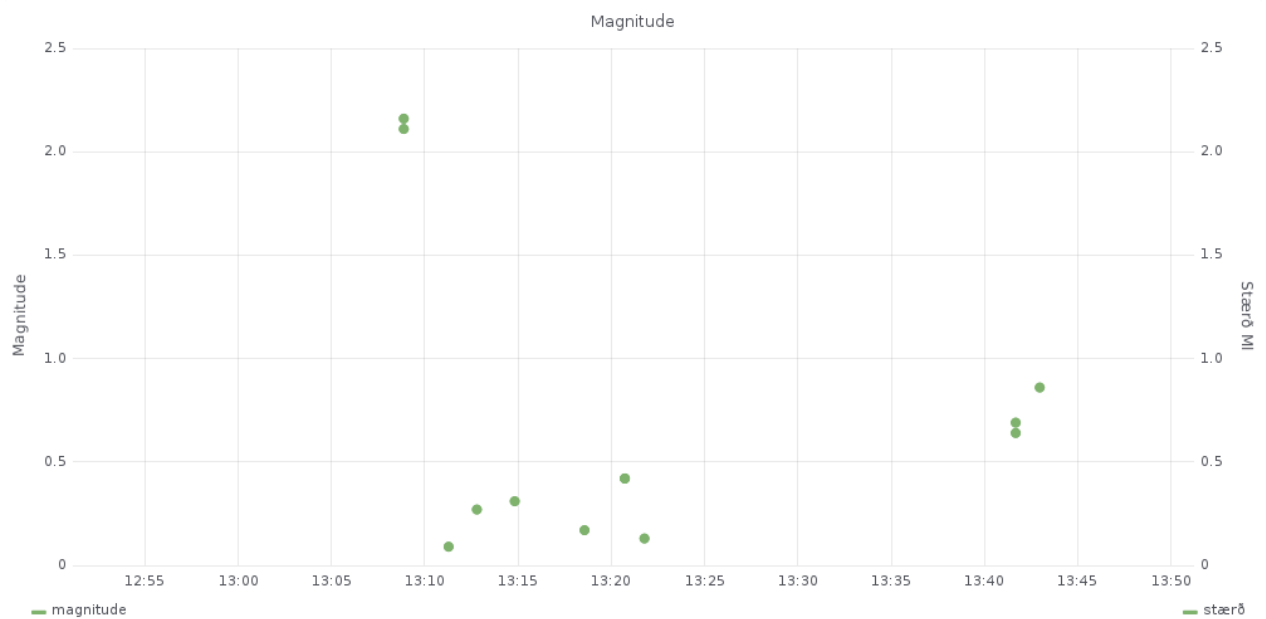
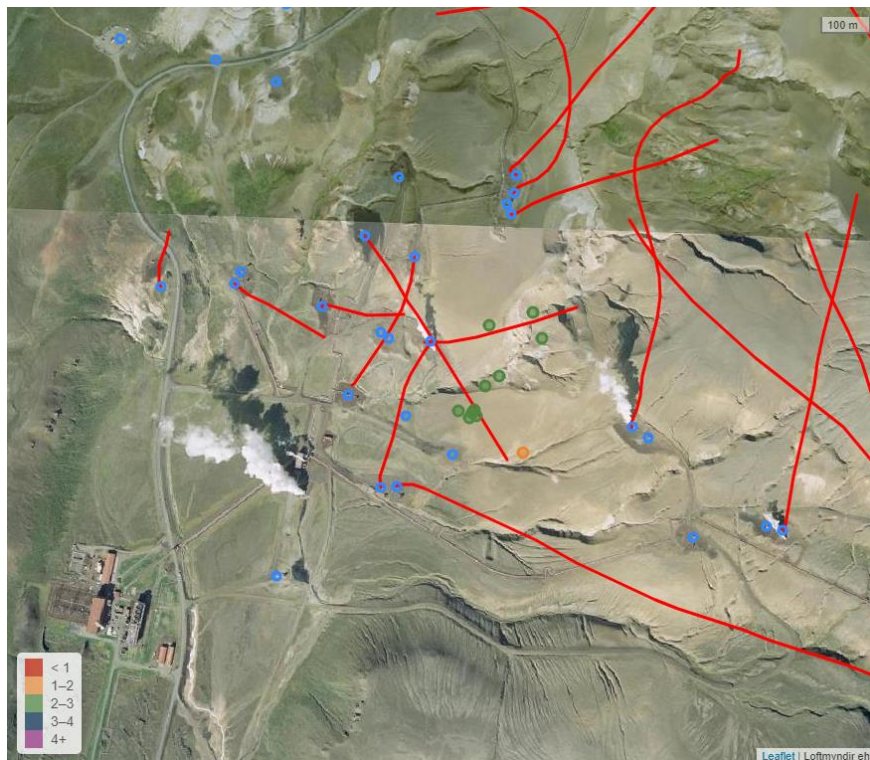
Mynd 14. Staðsetning skjálfta í hrinu þann 28. maí 2015. Litaskali í neðra, vinstra horni sýnir dýpi skjálfta í km og hægri mynd sýnir upphafstíma og stærð jarðskjálftanna frá kl. 4:10 til 7:00. Bláir hringir með gati sýna holutoppa og rauðar línur holuferla.

Hrina 7.12. 2015: Þessi hrina var á sömu slóðum og hrinan frá 28.5.2015 og mjög svipuð. Á þessum tíma er niðurdæling í K-26 breytileg, frá 64 í 72 kg/s. Hvorki er niðurdæling í IDDP-1 né K-39.



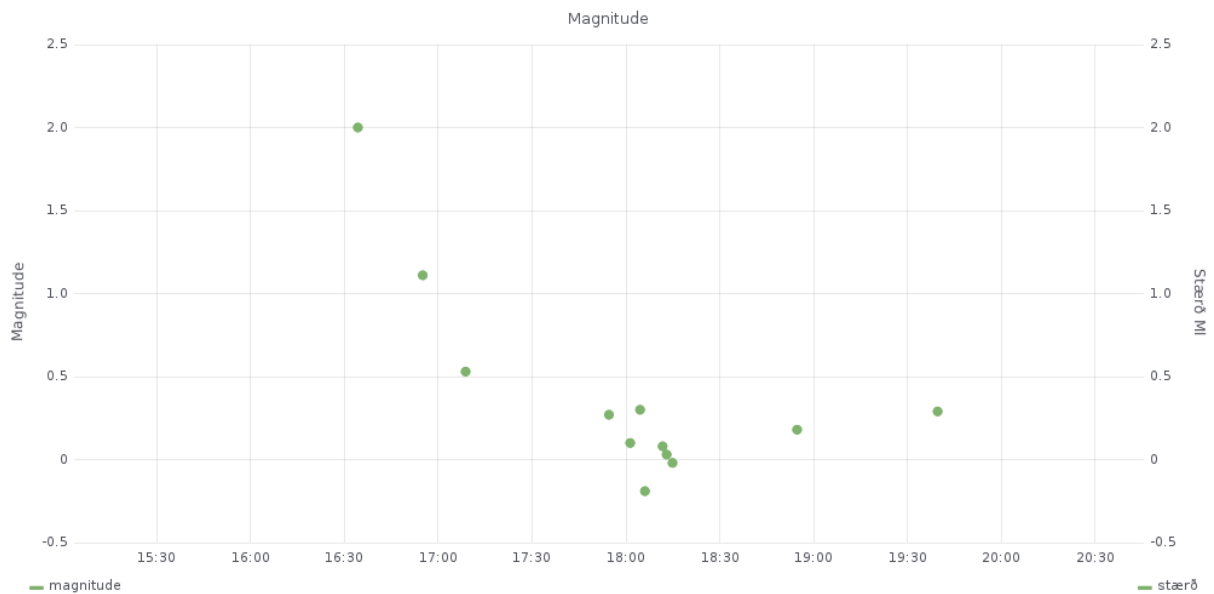
Mynd 15. Staðsetning skjálfta í hrinu þann 7. desember 2015. Litaskali í neðri, vinstra horni sýnir dýpi skjálfta í km og hægri mynd sýnir upphafstíma og stærð jarðskjálftanna frá kl. 16:30 til 23:20. Bláir hringir með gati sýna holutoppa og rauðar línur holuferla.

Hrina 11.12. 2015: Þessi hrina er einnig á sömu slóðum og hrinurnar 28.5. og 7.12. 2015 en er á meira dýpi. Engin niðurdæling er í gangi á þessum tíma.



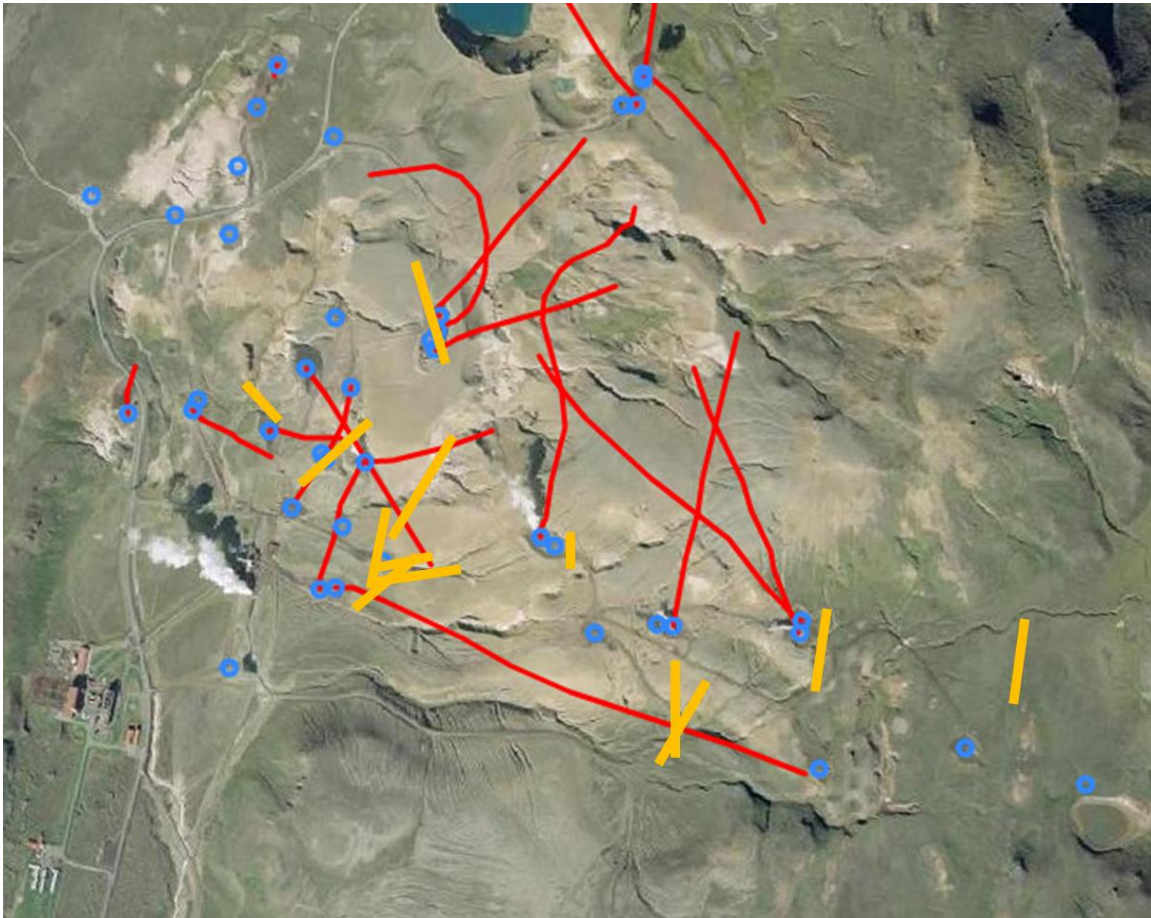
Mynd 16. Staðsetning skjálfta í hrinu þann 11. desember 2015. Litaskali í neðri vinstra horni sýnir dýpi skjálfta í km og hægri mynd sýnir upphafstíma og stærð jarðskjálftanna frá kl. 12:50 til 14:00. Bláir hringir með gati sýna holutoppa og rauðar línur holuferla.

Hrina 13.5.2017: Þessi hrina er dreifð, annars vegar við holutopp K-13 og hins vegar norðan við skiljustöð. Engin niðurdæling er í IDDP-1 á þessu tímabili en örar breytingar á dælingu á K-26 á litlu bili, eða 73 til 76 kg/s. Breytingar á niðurdælingu í K-39 fylgja dælingu á K-26.



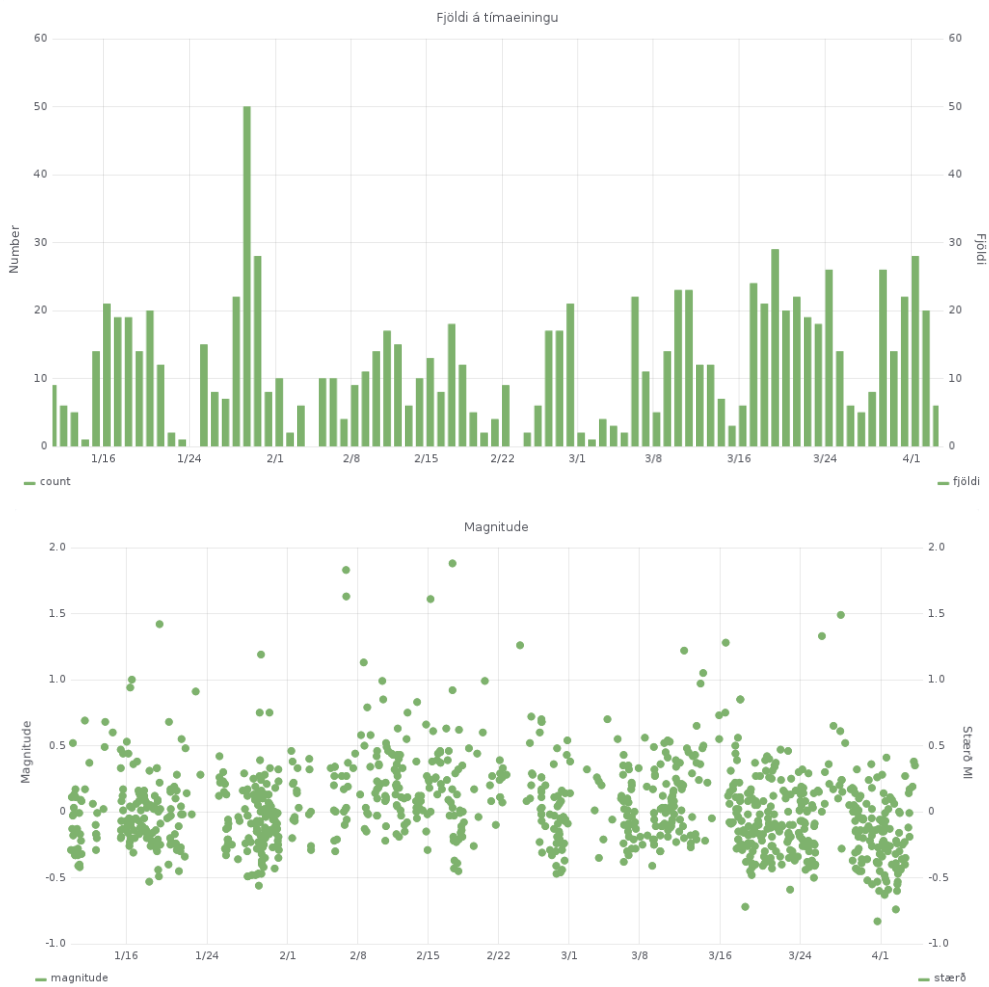
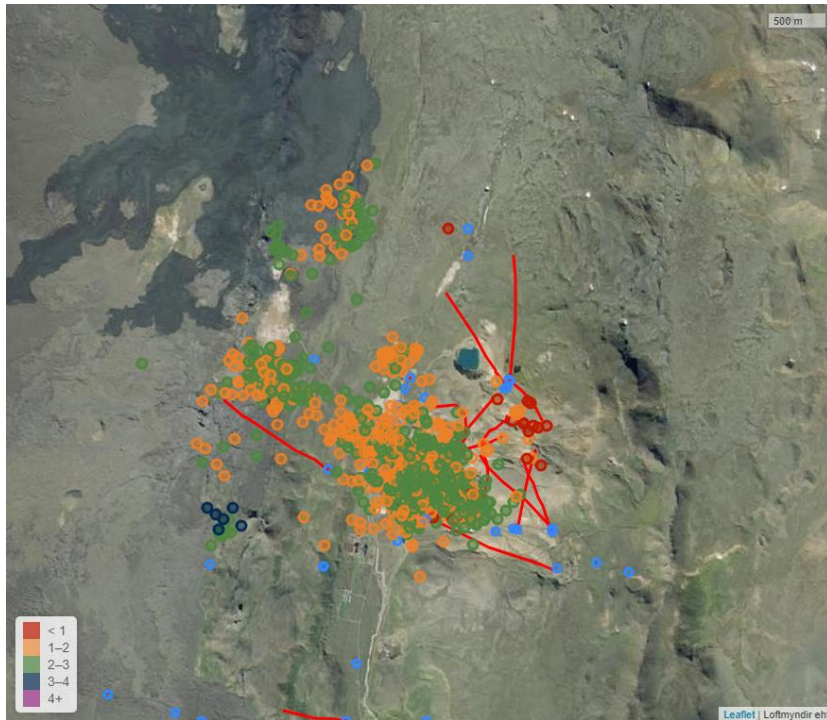
Mynd 17. Staðsetning skjálfta í hrinu þann 13. maí 2017. Litaskali í neðra, vinstra horni sýnir dýpi skjálfta í km og hægri mynd sýnir upphafstíma og stærð jarðskjálftanna frá kl. 16:30 til 20:00. Bláir hringir með gati sýna holutoppa og rauðar línur holuferla.

Staðsetning og stefna þeirra hrina sem lýst er að framan er dregin upp á mynd 18. Flestar eru með norðlæga stefnu. Áberandi eru nokkrar þyrpingar frá holutoppi K-19 í átt að Hveragili með stefnu til NNA.



Mynd 18. Línur sem komið hafa fram í einstökum hrinum. Bláir hringir með gati sýna holutoppa og rauðar línur holuferla.

Þegar tímaþróun í virkni er skoðuð með góðri upplausn sést að almennt er hún er nokkuð ójöfn og í hrinum sem eru nokkurra daga langar þótt til lengri tíma litið sé hún jöfn. Einkennandi dæmi um það er sýnt á mynd mynd 19. Í þessum „þyrpingum“ í tíma sem þar koma fram dreifast jarðskjálftarnir í langflestum tilvikum um allt svæðið að undanskildum hrinum sem fjallað hefur verið um að framan og eru mun styttri.



Mynd 19. Staðsetning, fjöldi skjálfta á dag (skjálftar á tímaeiningu) og stærðir skjálfta á tímabilinu 11.1. til 3.4. 2018. Litaskali í neðra, vinstra horni korts sýnir dýpi skjálfta í km. Bláir hringir með gati sýna holutoppa og rauðar línur holuferla.

Almennt má segja um jarðskjálftavirknina að hún er nokkuð jafndreifð um svæðið með tíma þótt hún verði í einhvers konar hrinum eins og sjá má mynd 19. Jarðskjálftavirkin við IDDP-1 er stöðug og heldur áfram þótt steipt hafi verið í holuna. Hvort núverandi virkni er náttúruleg virkni eða afleiðing borunar og niðurdælingar í IDDP-1 er ekki unnt að meta með fullri vissu út frá þeim gögnum sem unnið hefur verið úr. Hins vegar eru til gögn frá um það bil tveimur árum fyrir borunina sem ekki hefur að fullu verið unnið úr.

Þar sem áætlanir eru um að nota K-35 til niðurdælingar er áhugavert að skoða hvort niðurdæling í K-26 hefði áhrif á virkni við Leirhnjúk en nokkrar æðar í K-35 eru á þeim slóðum. Ekki koma fram hrinur á þessu svæði við breytingar á niðurdælingu í K-26 og því ekki að sjá augljósa tengingu þar á milli.

6 Brotlausnir

Brotlausnir voru gerðar fyrir þá skjálfta sem höfðu nægilega marga aflestra til að örugg lausn fengist. Alls voru það 48 jarðskjálftar. Gerð er grein fyrir brotlausnum í viðauka og þeim kröfum sem skjálftarnir þurfa að fullnægja til að unnt sé að finna örugga brotlausn.

Helstu niðurstöður eru að flestir skjálftanna flokkast sem snið- og siggengisskjálftar (mynd 1 í viðauka). Einnig er að finna samgengisskjálfta og skjálfta sem eru blanda af þessum þremur meginflokkum. Algengasta stefna snið- og siggengisskjálfta er milli N og N30°A (og S til S30°V) sem er nokkurn veginn samsíða sprungusveimi Kröflusvæðisins (mynd 3 í viðauka). Aðrar lausnir sýna breytilega stefnu eins og búast má við þar sem reikna má með að spennusviðið sé samspil flekahreyfinga, kvikuhreyfinga, jarðhitavirkni, niðurdælingar og vinnslu.

Athyglisvert er að nær allir skjálftar í Suðurhlíðum eru siggengisskjálftar en nær allir skjálftar í Vítismó eru sniðgengisskjálftar (mynd 2 í viðauka). Við Leirhnjúk eru bæði sig- og sniðgengisskjálftar.

Á milli skjálfta í Suðurhlíðum annars vegar og Vítismós hins vegar eru skjálftahrinur frá holutoppi K-19 í stefnu á Hveragil (mynd 18) og einnig NNA-línan með minni virkni sem sýnd er á mynd 3. Þessar brotlausnir segja að í Suðurhlíðum er mesta spenna lóðrétt en í Vítismó lárétt (NA). Algengasta stefna brotflata er frá N til NNA í báðum tilvikum eins og nefnt var hér að framan en það er stefna miðspennu spennusviðsins (e. intermediate stress). Minnsta spenna er oftast VNV sem er í samræmi við landrekið sem veldur tognun þvert á rekstefnu. Ekki er augljóst hvernig á að túlka þetta m.t.t. eiginleika jarðhitageymis og vinnslu. En sá munur er á svæðunum að í austurhlutanum eru holur á suðuferli en á vesturhlutanum eru efra og neðra kerfi þar sem hræring (e. convection) veldur því að hiti í efra kerfi er jafn niður á um 1000 m dýpi þar sem suðumarksferill tekur við.

7 Umræða

Meginmarkmið þessa verkefnis var að athuga hvort breytingar á niðurdælingu hefðu áhrif á jarðskjálftavirkni, einkum hvort einstakar sprungur yrðu virkar og gætu þar með gefið upplýsingar legu þeirra, þrýstingstengsl og hugsanlegar lekaleiðir. Á myndum sem sýna skjálftavirkni og niðurdælingu eru nokkur tímabil þar sem svo virðist vera. Á sömu svæðum og hrinur verða samhliða breytingum í niðurdælingu eiga sér einnig stað hrinur án hennar. Áður hefur komið fram að á þeim tímabilum sem niðurdæling er í gangi eru fleiri og stærri skjálftar en þegar engin dæling er í gangi en staðsetning þeirra oftast dreifð (t.d. Hanna Blanck o.fl., 2016).

Reikna má með að breytingar á niðurdælingu hafi haft áhrif á skjálftavirkni við IDDP-1. Virkni hefur haldið áfram eftir að holunni var lokað. Hún er dreifð vestan holunnar og virðist ekki fylgja ákveðnum sprungum.

Nokkur skýr dæmi um fylgni milli breytinga í niðurdælingu og skjálftavirkni er að finna. En jafnframt eru dæmi um hrinur á sömu slóðum þegar ekki er um breytingar á niðurdælingu og jafnvel þegar engin niðurdæling er í gangi. Í fyrsta lagi eru hugsanleg langtímaáhrif af niðurdælingu þannig að uppsafnað vökvamagn og hægur vaxandi þrýstingur geti valdið jarðskjálftum. Í öðru lagi er jarðskorpan á þessu svæði greinilega mjög veik eins og mat á b-gildum bendir til (t.d. Hanna Blanck o.fl., 2016) þannig hugsanlegt er að litlar, tektónískar hreyfingar eða áhrif vinnslunnar hleypi skjálftum af stað en hið síðarnefnda hefur ekki verið skoðað í þessari skýrslu. Það er einnig rétt að benda á að hrinurnar sem fylgja breytingum á niðurdælingu í IDDP-1 verða þegar dæling er minnkuð en þó ekki í öllum tilvikum. Einnig verða þær í 0,5 til 1 km fjarlægð og nánast um leið og dælingin minnkar.

Annað markmið var að kanna hvort dæling í K-26 gæti haft áhrif á virkni við æðar K-35 og þannig bent til að skammhlaup gæti átt sér stað ef dælt væri niður í K-35. Það er fremur ólíklegt að svo sé skv. þessum gögnum. Það er rétt að hafa í huga að líklegast er að vökvi frá K-26 streymi inn á á svæðið þar sem vinnsla fer fram og þrýstingur er minnstur og muni því ekki örva sprungur við Leirhnjúk. Þannig má segja að þessi niðurstaða sé ekki afgerandi.

Til að unnt sé að gera brotlausnir þurfa skjálftarnir að mælast á sem flestum stöðvum kerfisins og því eru það stærstu skjálftarnir, eða yfir Ml 0,5. Þessir skjálftar eru yfirleitt tiltölulega djúpt eða ekki langt ofan við mörk deigrar og brotgjarnrar skorpu. Brotlausnir eru breytilegar eins og búast má við í þessu umhverfi kviku, jarðhitavirkni og vinnslu. Engu að síður hafa margir skjálftanna brotlausnir í samræmi við landrekið. Siggengisskjálftar eru í Suðurhlíðum en sniðgengisskjálftar í Vítismó. Skjálftar í Suðurhlíðum eru aðeins dýpri en í Vítismó (mynd 4 í viðauka). Á milli þessara svæða eru Hveragil og lína með minni virkni milli K-26 og meginvirkninnar (mynd 3).

Skjálftar við IDDP-1 eru grynri en annars staðar á Kröflusvæðinu.

8 Samantekt

- Gögn hafa tímaupplausn sem leyfa nákvæma greiningu á tengslum niðurdælingar og jarðskjálftavirkni. Ástæða er til að athuga hvort ekki sé unnt að fá stöðugri mælingar á þrýstingi og niðurdælingu.
- Skjálftavirkni er aðallega í fimm tiltölulega afmörkuðum þyrpingum auk a.m.k. þriggja minni þyrpinga.
- Þykkt brotgjarnrar skorpu er mest um 2400 m SA til á svæðinu en þynnst um 1800 m vestan IDDP-1. Þykktin er um 2000 m beggja vegna Leirhnjúks.
- Staðsetning einstakra skarpra hrina í tíma mynda í flestum tilvikum stuttar, línulegar þyrpingar af grunnnum skjálftum. Þessar þyrpingar eru að mestu á suðurjaðri virka svæðisins í Kröflu. Þessar hrinur tengjast augljóslega breytingum á niðurdælingu í sumum tilvikum. Þær sem eiga sér einnig stað án slíkra breytinga eru á svipuðum slóðum og hinar. Fjarlægð frá holu þar sem breytingar eru á niðurdælingu er allt að 1,8 km.
- Til langs tíma litið er virknin jöfn en við nánari skoðun verður hún í viku til 10 daga hrinum og skjálftarnir dreifðir.
- Brotlausnir skjálfta sýna í flestum tilvikum sig- og sniðgengi með nokkuð breytilegri stefnu en algengast er þó N til N30°A. Nær allir skjálftar í Suðurhlíðum eru siggengis-skjálftar en nær allir skjálftar í Vítismó eru sniðgengisskjálftar.

9 Lokaorð

Segja má að þetta séu fyrstu tiltölulega nákvæmu athuganirnar á tengslum niðurdælingar og skjálftavirkni á Kröflusvæðinu. Talsvert verk er óunnið. Óháð niðurdælingum hefur athugun á legu einstakra hrina gefið verðmætar upplýsingar um eðli, virkni (e. dynamic) og tektóník svæðisins.

10 Heimildir

- Hanna Blanck, Kristján Ágústsson og Karl Gunnarsson (2016). *Seismic monitoring in Krafla. November 2014 to November 2015*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2016/002, LV-2016-008.
- Kristján Ágústsson og Ólafur G. Flóvenz (2007). The Thickness of the Seismogenic Crust in Iceland and its Implications for Geothermal System, extended abstract. *WGC Antalia, 2007*.
- Waldhauser, Felix og Ellsworth, William L. (2000). A Double-Difference Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California. *BSSA, 90, 6, 1353–1368*, December 2000.

Viðauki: Focal mechanisms in Krafla geothermal area from October 2014 to October 2017

Hanna Blanck and Kristján Ágústsson

Focal mechanisms in geothermal areas show often that a great variety and different stress regimes can be found on local scale (e.g. Kristjánsdóttir, 2013; Guðnason et al., 2016). This is also the case for Krafla geothermal area where we have tectonic rifting motion in addition to the activity associated with geothermal activity, magma movement and exploitation of the field. In rift zones the dominant rupture process is typically normal faulting (e.g. Chouliaras et al., 2013; Wilks et al., 2017). In the Krafla geothermal field, we see all sorts of rupture processes and fault plane orientations, including strike-slip and occasional thrust faulting events.

We used the HASH1.2 software from Hardebeck and Shearer (2002) which takes first motion polarities to relocate earthquakes relatively and calculate best fitting double-couple fault plane solutions but unlike other approaches it does take errors in computed take off angles into account. A set of acceptable mechanisms is computed and after the removal of outliers the preferred mechanism is chosen to be average of all mechanisms. This method has been shown to make solutions stable and reliable.

We classified the events according to their dominant rupture process with the method by Frohlich (1992). This approach makes use of the orientation of the T, P and B axis to classify the breaking mechanisms. Mechanisms with vertical T, P and B axis describe pure reverse, normal and strike-slip faults, respectively, and are plotted in the corners of a triangle (Figure 1). These distinct cases are indicated as black beachballs at the corners of the diagram. The curved lines limit areas in which the T, P and B axis lie within 40° of the vertical and mechanisms that lie inside these areas are classified as mainly trust fault, normal fault or strike-slip fault, respectively. Mechanisms that lie outside these limited areas cannot be associated with one fault type or the other and are generally referred to as intermediate in the following text.

To ensure a reasonable accuracy of the calculated fault plane solution we considered only earthquakes with a magnitude or 1.5 or larger, a minimum of 8 P-picks and an azimuth gap of less than 180° (angle between adjacent stations). 113 earthquakes which are of magnitude 1.5 or bigger, have been recorded by at least 8 stations between October 2013 and October 2017 and lie inside the seismic network have been analysed with the HASH1.2 software. For 48 of these earthquakes focal mechanisms of sufficient quality could be estimated and are presented on Figure 2.

Most bigger earthquakes in Krafla for which focal mechanisms could be calculated are either normal or strike-slip dominated (20 and 19, respectively). Three earthquakes are classified as reverse fault events and 6 are intermediate. Figure 3 shows a sub set of earthquakes in the Krafla production area in a vertical profile.

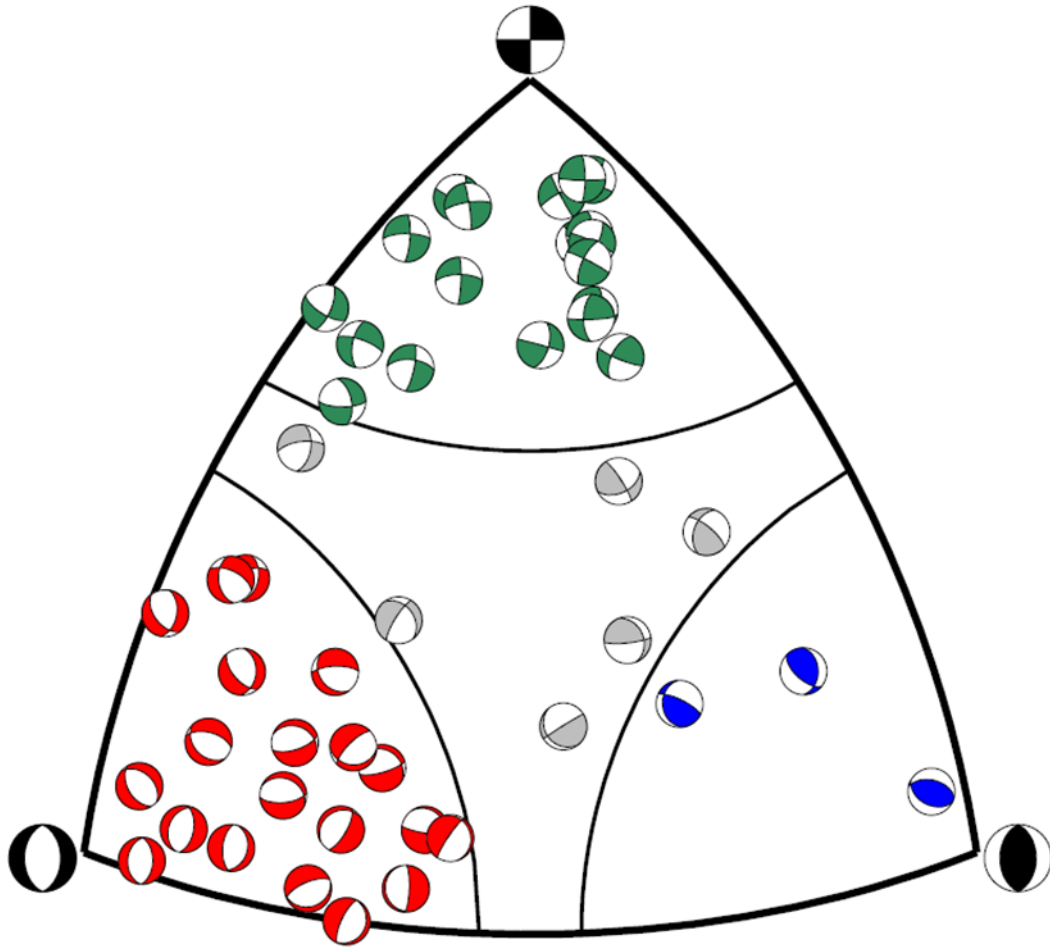


Figure 1. Classification of focal mechanisms based on the orientation of the normal axis of the fault plane. The mechanisms are represented by lower hemisphere plots and the compressional quadrants are coloured. The lower-left corner shows normal fault, lower right reverse and the top strike slip. The thin lines inside the triangle represent the 40° angle from vertical. Most earthquakes are normal, or strike-slip dominated while few occurred on reverse faults or are combinations of fault mechanisms.

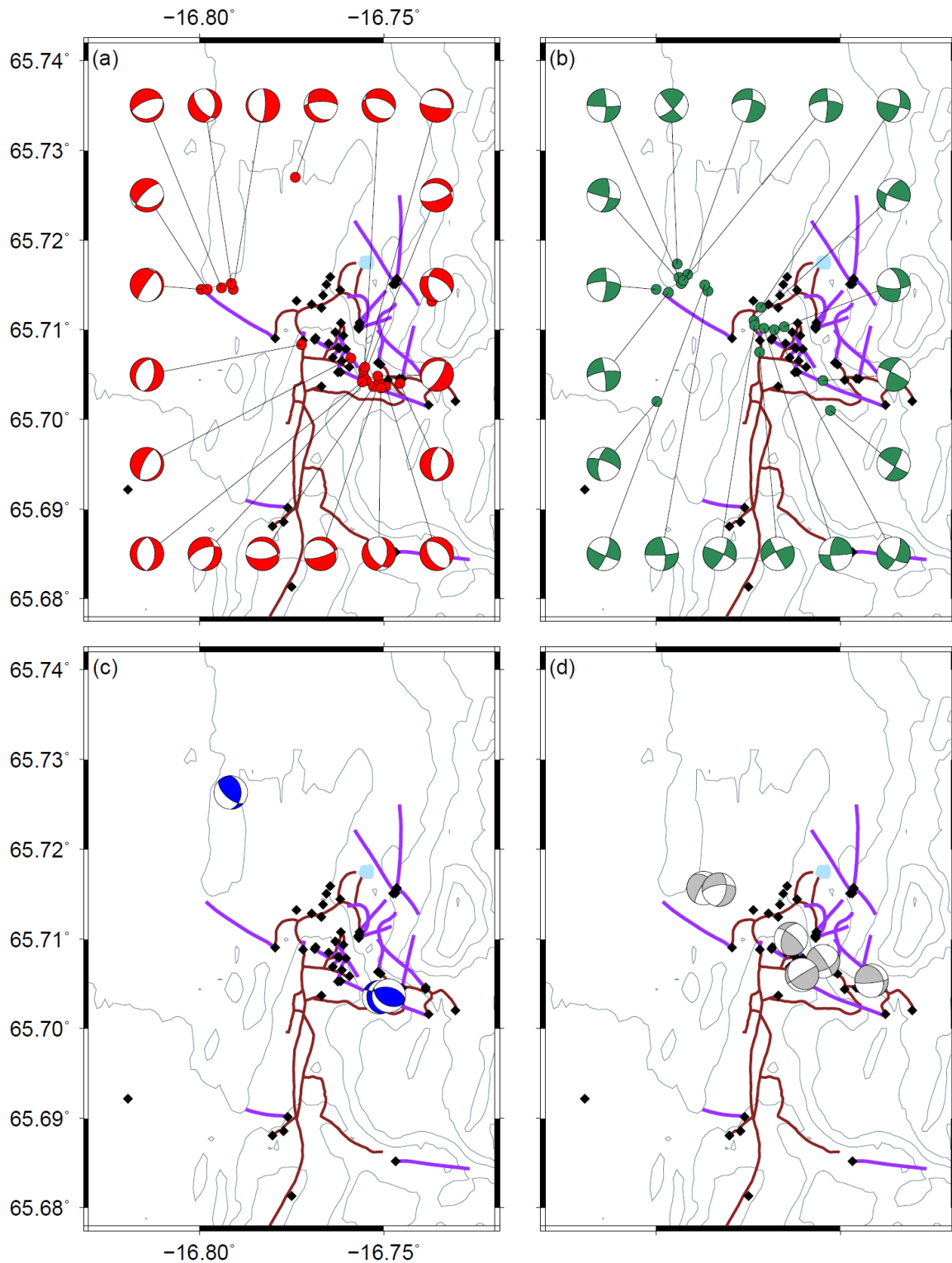


Figure 2. Focal mechanisms of earthquakes in Krafla. Black diamonds and purple lines show the positions of boreholes and their progression at depth in the case of a directional well. Most earthquakes occur on normal faults (upper left) and strike-slip faults (upper right). Few are reverse faults (lower left) or intermediate (lower right).

To see if there are some preferred orientations of the fault planes their directions was plotted on rose diagrams shown on Figure 4 and written out in Table 1 (strike1 and 2). In Figure 4, the both planes in the double-couple solution are plotted (primary and auxiliary).

The normal faults have three distinctive directions: Just east of N (N15°E), close to EW and finally, SE. The strike slip events are predominantly N15°E and N105°E oriented. Reverse and intermediate faults have variable orientation.

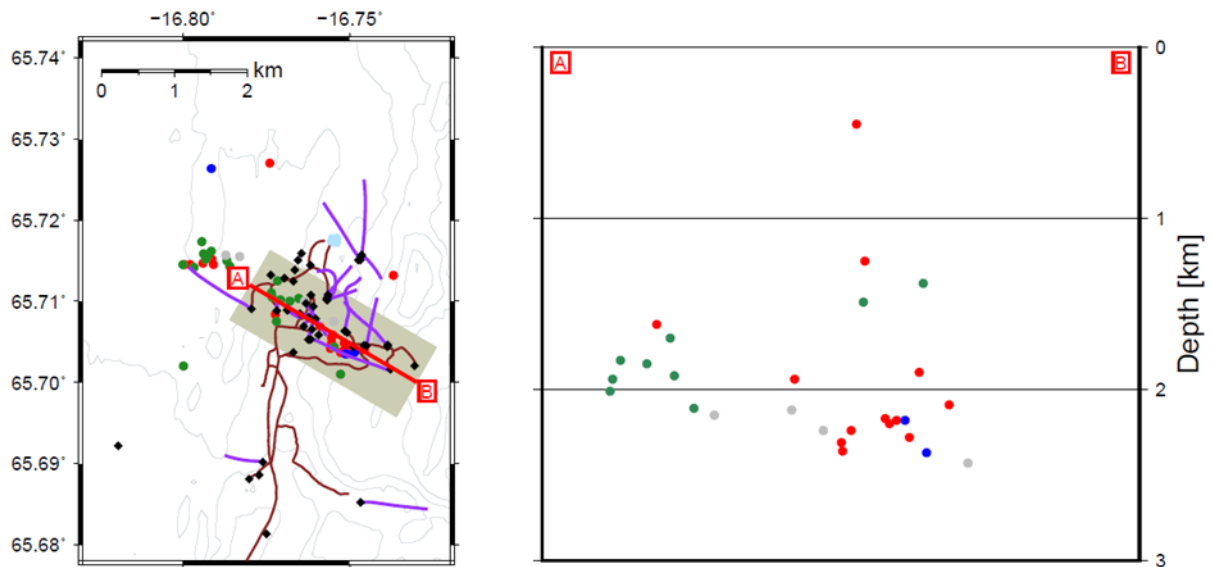


Figure 3. Map view and profile through the Krafla production area. Earthquakes located up to ca. 550 m from the profile (grey box in map view) are projected to the profile and shown to the right. Red dots denote normal faults, green strike-slip faults, blue reverse and grey intermediate faults.

The most common orientation is between N and N30°E as well as the opposite direction N90° to N110° (normal and strike slip events) and that is close to being parallel to the fissure swarm and orthogonal to the spreading. It is expected in case of strike slip events on near vertical faults that auxiliary fault should be present and it can be seen on Figure 2 b) that most strike-slip events are close to being on vertical faults. These orientations indicate minimal stress in WNW-ESE direction and maximum stress either vertical or NNE.

Other directions seem to be quite random and this analysis confirms what has been said above or that the stress field is variable in the area and probably also in time. Furthermore, as it can be expected that the crust is heavily fractured, earthquakes can occur on non-optimally oriented faults. This distribution may show some pattern, as more events will be analyzed, particularly orientation of fault planes of events that are not directly coupled to the plate spreading.

In Vítismór all earthquakes are strike slip events and in Suðurhlíðar most earthquakes are normal. A profile from Vítismór to Suðurhlíðar (Figure 3) shows that the depth of these earthquakes is about 2 km, slightly deeper in Suðurhlíðar.

Fault plane solutions that have been presented in former reports to Landsvirkjun were not of same quality as the network was not as dense at that time as now. Still, those solutions are consistent with the solutions presented here.

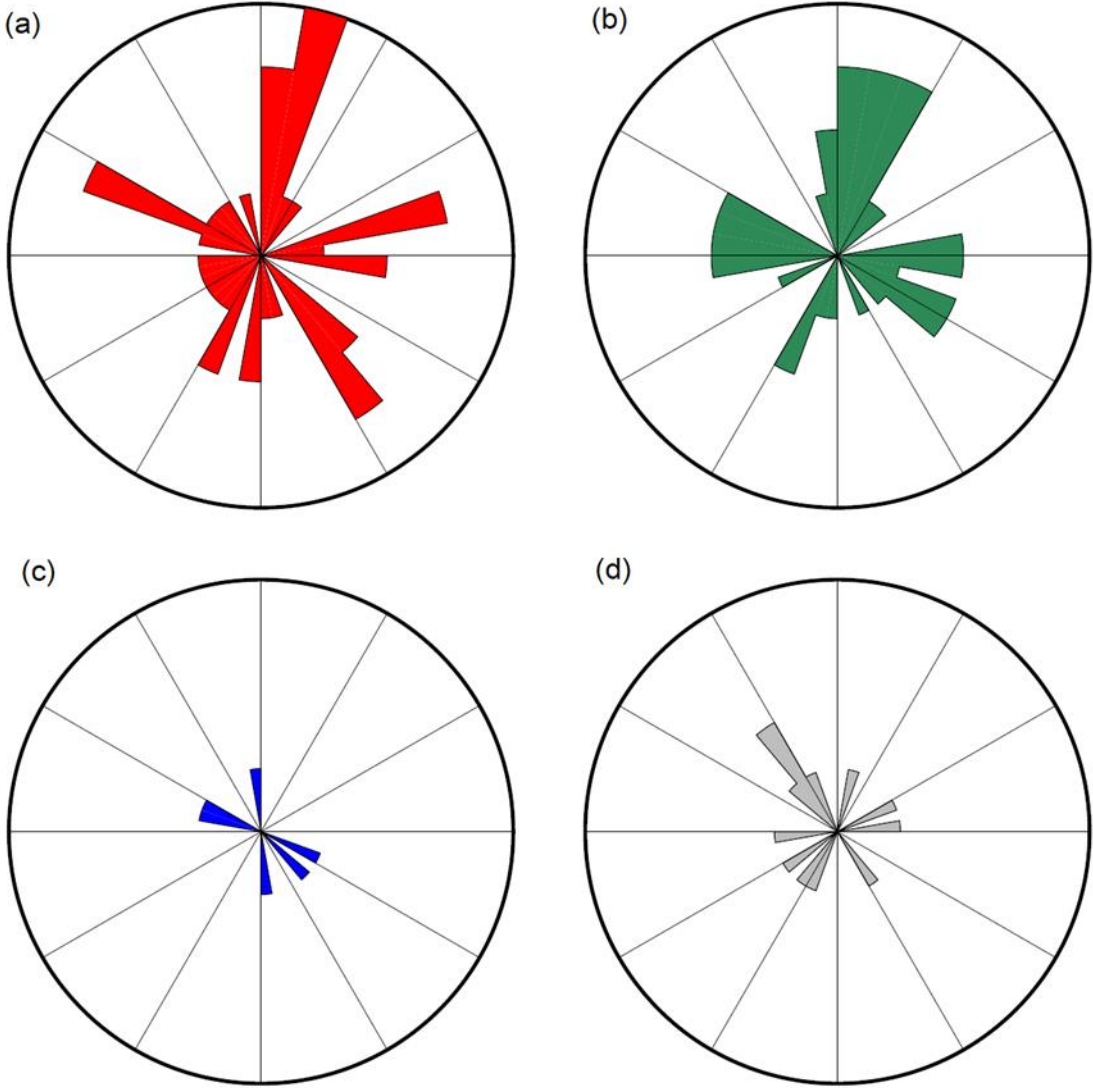


Figure 4. *Distribution of nodal plane orientations of normal faults (a), strike-slip faults (b), reverse faults (c) and intermediate faults (d)*

Table 1. Earthquakes for which focal mechanisms of sufficient quality could be calculated.

nr	date	time	lat [°]	lon [°]	x	y	depth [km]	M _L	polarities	strike 1	strike 2	faulting mechanism
1	29.01.2014	20:41:59.29	65.70533	-16.74167	603698	580490	2.43	2.07	10	338	84	intermediate
2	10.07.2014	02:40:46.30	65.70834	-16.77233	602278	580776	1.62	1.60	9	10	202	normal
3	29.07.2014	23:38:32.75	65.70750	-16.75483	603085	580711	2.24	1.51	22	327	65	intermediate
4	26.08.2014	02:39:33.97	65.70433	-16.75467	603105	580358	1.25	1.61	21	13	250	normal
5	09.09.2014	19:18:29.14	65.71616	-16.79150	601368	581616	2.09	1.93	23	12	275	strike-slip
6	05.10.2014	07:27:13.86	65.71450	-16.79083	601405	581433	1.67	1.72	9	163	2	normal
7	01.11.2014	21:30:01.71	65.70367	-16.74950	603345	580293	1.90	1.87	9	149	312	normal
8	05.11.2014	23:05:17.01	65.70750	-16.77200	602297	580683	1.70	1.63	8	152	243	strike-slip
9	21.03.2015	15:39:59.44	65.71450	-16.80000	600985	581418	1.47	1.52	9	4	270	strike-slip
10	28.05.2015	17:53:58.60	65.70483	-16.75550	603065	580412	2.24	1.84	16	72	292	normal
11	08.06.2015	10:04:31.92	65.70417	-16.75583	603052	580338	0.45	1.83	9	184	1	normal
12	02.07.2015	01:09:54.40	65.71550	-16.79267	601317	581541	2.03	1.59	13	2	269	strike-slip
13	31.07.2015	02:50:09.09	65.71516	-16.79133	601380	581505	1.99	1.60	10	4	139	normal
14	15.09.2015	22:24:03.49	65.71467	-16.79400	601259	581446	2.02	1.57	8	247	75	normal
15	17.09.2015	19:50:35:87	65.70367	-16.75283	603192	580287	2.20	1.57	14	85	294	normal
16	15.10.2015	16:06:50.99	65.70550	-16.75550	603062	580487	2.36	1.74	13	325	99	normal
17	05.11.2015	03:50:13.68	65.71250	-16.77167	602292	581241	2.01	1.50	12	285	16	strike-slip
18	07.12.2015	18:48:05.75	65.70433	-16.75483	603097	580357	1.49	3.37	20	205	297	strike-slip
19	11.12.2015	13:08:52.58	65.70417	-16.75133	603259	580345	2.18	2.29	16	74	304	normal
20	01.01.2016	11:58:25.07	65.70367	-16.74867	603383	580294	2.37	1.61	15	283	118	reverse
21	02.01.2016	09:56:58.75	65.70350	-16.75133	603261	580271	2.18	2.63	17	175	296	reverse
22	24.01.2016	05:12:54.90	65.71000	-16.76800	602471	580968	1.92	1.82	14	122	23	strike-slip
23	25.02.2016	00:14:48.11	65.70600	-16.76050	602831	580534	2.12	1.60	15	140	238	intermediate
24	07.03.2016	23:48:20.67	65.71733	-16.79433	601234	581742	1.96	2.04	15	47	139	strike-slip
25	25.03.2016	21:11:00.06	65.71317	-16.73700	603881	581372	1.81	1.69	11	297	173	normal
26	01.04.2016	16:21:00.30	65.71500	-16.78683	601587	581495	2.16	1.97	11	114	22	strike-slip
27	04.04.2016	13:13:54.49	65.71433	-16.78600	601628	581421	2.30	2.43	16	355	87	strike-slip
28	10.04.2016	11:46:47.60	65.71450	-16.79950	601008	581419	2.29	1.56	12	214	342	normal
29	15.04.2016	10:33:12.07	65.70200	-16.79983	601041	580025	3.26	1.57	16	289	190	strike-slip
30	23.04.2016	19:46:37.72	65.71100	-16.77350	602214	581070	1.94	1.54	11	112	207	strike-slip
31	24.06.2016	19:36:09.32	65.70100	-16.75283	603202	579990	1.38	2.27	18	30	121	strike-slip
32	01.07.2016	13:17:25.74	65.71416	-16.79667	601139	581385	1.24	1.61	13	352	261	strike-slip
33	25.08.2016	23:26:20.29	65.70400	-16.74567	603519	580336	2.09	1.96	17	185	17	normal
34	01.09.2016	14:24:13.78	65.72633	-16.79150	601329	582750	2.26	1.95	19	359	132	reverse
35	15.09.2016	01:47:51.60	65.71017	-16.77083	602340	580982	1.85	2.01	19	88	181	strike-slip
36	15.10.2016	16:44:05.54	65.72700	-16.77400	602129	582853	2.08	1.54	17	268	144	normal
37	15.11.2016	23:25:00.06	65.71516	-16.79317	601295	581502	2.15	1.93	11	10	103	strike-slip
38	04.03.2017	05:18:52.67	65.71584	-16.79383	601263	581577	2.08	1.69	14	360	91	strike-slip

39	07.03.2017	10:03:38.11	65.70583	-16.75517	603076	580524	2.31	1.65	17	285	136	normal
40	29.03.2017	08:46:04.86	65.71000	-16.76350	602677	580975	2.15	2.08	15	201	310	intermediate
41	11.04.2017	22:20:35.37	65.70483	-16.75167	603241	580418	2.17	1.76	13	30	238	normal
42	13.05.2017	16:34:18.40	65.71567	-16.78717	601569	581569	1.77	2.16	11	322	212	intermediate
43	23.05.2017	03:45:17.30	65.71050	-16.77333	602224	581015	1.83	1.72	18	295	27	strike-slip
44	23.05.2017	10:01:08.05	65.71550	-16.78300	601761	581557	2.31	1.55	13	10	262	intermediate
45	03.06.2017	00:42:19.42	65.70350	-16.75083	603284	580272	2.28	1.50	14	143	10	normal
46	13.09.2017	09:54:15.98	65.71033	-16.76533	602592	581009	2.11	1.69	18	90	348	strike-slip
47	13.10.2017	03:46:36.50	65.71450	-16.79783	601084	581421	2.18	1.84	10	225	93	normal
48	26.10.2017	05:28:06.79	65.70683	-16.75900	602896	580629	1.94	1.67	12	205	25	normal

References

- Ágústsson, K. and Fóvenz O. G., 2007. The Thickness of the Seismogenic Crust in Iceland and its Implications for Geothermal System, extended abstract WGC Antalia, 2007.
- Chouliaras, G., Kassaras, I., Kapetanidis, V., Petrou, P., Drakatos, G., 2015. Seismotectonic analysis of the 2013 seismic sequence at the western Corinth Rift, *Journal of Geodynamics* 90, 42-57.
- Frohlich, C., 1992. Triangle diagrams: ternary graphs to display similarity and diversity of earthquake focal mechanisms, *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 75, 193-198.
- Guðnason, E.Á., Ágústsson, K., Gunnarsson, K., 2016. *Seismic Activity on Reykjanes December 2015 – November 2016*, Iceland GeoSurvey, ÍSOR-2016/090.
- Hardebeck, J.L., Shearer, P.M., 2002. A new method for determining first-motion focal mechanisms, *Bulletin of the Seismological Society of America* 92, 2264-2276.
- Kristjánsdóttir, S., 2013. Microseismicity in Krýsuvík Geothermal Field, SW Iceland, from May to October 2009 (Master's thesis 2013). Retrieved from <http://www.skemman.is>.
- Wilks, M., Kendall, J.-M., Nowacki, A., Biggs, J., Wookey, J., Birhanu, Y., Ayele, A., Bedada, T., 2017. Seismicity associated with magmatism, faulting and hydrothermal circulation at Aluto Volcano, Main Ethiopian Rift, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 340, 52-67.