

LV-2012-058



Landsvirkjun



# Skjálftamælingar í Kröflu

Staðan í apríl 2012



LV-2012/058



# Skjálftamælingar í Kröflu

## Staðan í apríl 2012



ÍSOR-2012/018

Verknr. 521007

Apríl 2012



Skýrsla LV nr.: LV-2012/058

Dags: Apríl 2012

Fjöldi síðna: 23	Upplag: 9	Dreifing:	<input checked="" type="checkbox"/> Opin <input checked="" type="checkbox"/> Birt á vef LV <input type="checkbox"/> Takmörkuð til
------------------	-----------	-----------	---

Titill: Skjálftaverkefnið í Kröflu. Staðan í apríl 2012.

Höfundar / fyrirtæki Kristján Ágústsson, Sigurveig Árnadóttir og Ólafur Flóvenz.

Verkefnisstjóri: Ásgrímur Guðmundsson Magnús Ólafsson f.h. ÍSOR

Unnið fyrir: Unnið af Íslenskum orkurannsóknum fyrir Landsvirkjun

Samvinnuaðilar: \_\_\_\_\_

Útdráttur: Í skýrslunni er gerð grein fyrir stöðu skjálftaverkefnis í Kröflu sem unnið hefur verið að á undanförunum árum. Rauntímagagnasendingar skjálftagagna og -úrvinnsla er hafin en bæta þarf öryggi í gagnasöfnun og eftirlit með mælakerfinu. Hraðalíkan fyrir Kröflu hefur verið endurbætt og allir jarðskjálftar endurstaðsettir. Kortleggja má kvikuhólfið betur með jarðskjálftum og sprengingum í nokkurra tuga km fjarlægð. Samanburður skjálftavirkni og niðurdælinga bendir til að umtalsverður hluti skjálftanna árin 2009 og 2010 tengist niðurdælingum og borunum. Bæta þarf skráningu á niðurdælingum og helst gera ferilpróf til að meta þessi tengsl nánar.

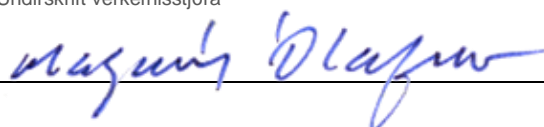
Lykilorð:

Krafla, rauntímaúrvinnsla, gagnasendingar, jarðskjálftar, hraðalíkon, kvika, kvikuhólf, niðurdæling, ferilprófanir

ISBN nr.:

Samþykki verkefnisstjóra  
Landsvirkjunar

Undirskrift verkefnisstjóra



Yfirfarið af

MÓ, HrH



## Efnisyfirlit

<b>1 Inngangur</b> .....	<b>7</b>
<b>2 Rauntímaúrvinnsla og eftirlit</b> .....	<b>7</b>
<b>3 Úrvinnsla</b> .....	<b>12</b>
3.1 Bylgjuhraðamælingar .....	12
3.2 Skjálftavirkni.....	13
3.3 Kvikuhólf.....	15
3.4 Skjálftavirkni og niðurdæling .....	17
<b>4 Samantekt og tillögur</b> .....	<b>21</b>
<b>5 Heimildir</b> .....	<b>23</b>

## Myndir

Mynd 1. <i>Gagnaflæði</i> .....	8
Mynd 2. <i>Magn gagna sem safnað hefur verið á árunum 2009 til 2011.</i> ....	10
Mynd 3. <i>Staðsetningar jarðskjálfta í Kröflu árin 2009 og 2010.</i> .....	13
Mynd 4. <i>Horft til NV frá Suðurhlíðum eftir skjálftaþyrpingunni.</i> .....	14
Mynd 5. <i>Dýptardreifing jarðskjálftar á Kröflusvæðinu árin 2009 og 2010.</i> .....	15
Mynd 6. <i>Skráning Kröflunetsins á jarðskjálfta í Tjörneshvambeltinu í um 85 km fjarlægð.</i> .....	16
Mynd 7. <i>Afmörkun þyrpinga í Suðurhlíðum og Leirbotnum</i> .....	19
Mynd 8. <i>Niðurdæling og skjálftavirkni</i> .....	20





# 1 Inngangur

Í skýrslu þessari er farið yfir stöðu jarðskjálftaverkefnisins í Kröflu. Það felst í rekstri á sex jarðskjálftamælum í Kröflu, sjálfvirkum gagnaflutningi til Landsvirkjunar (LV) og Íslenskra orkurannsóknna (ÍSOR) og úrvinnslu gagna. Landsvirkjun á og rekur skjálftamælana með eigin mannskap og sér um gagnaflutning en sérfræðingar ÍSOR sjá um úrvinnslu gagnanna og jarðhitafræðilega túlkun þeirra.

Aðgangur ÍSOR að þjóni á Landsvirkjun (LV), sem sér um söfnun gagna frá mælanetinu í Kröflu, komst á um miðjan júní 2011. Í nóvember kom á tenging milli LV og ÍSOR þannig að rauntímaúrvinnsla gat hafist. Verulegar truflanir á sendingum frá einstökum mælum hafa þó hindrað að sú úrvinnsla hafi gengið eftir þótt líkur séu á að vandinn sé loks að leysast.

Staðsettir hafa verið skjálftar frá árinu 2010 og vinna hafin við jarðskjálfta 2011. Farið hefur verið yfir jarðskjálfta frá 2009 og þeir endurstaðsettir með nýju líkani.

Bylgjubrotsmælingar sem gerðar voru árin 1961–63 og 1971–73 hafa verið skoðaðar til að endurbæta hraðalíkan. Skjálftar hafa verið staðsettir með endurskoðuðu líkani.

Samanburður á jarðskjálftavirkni og niðurdælingu hefur verið gerður fyrir það tímabil sem búið er að staðsetja skjálfta.

## 2 Rauntímaúrvinnsla og eftirlit

Frá upphafi reksturs jarðskjálftanetsins í Kröflu hefur verkum verið þannig skipt að Landsvirkjun sér um rekstur mælanna, söfnun og vistun gagnanna í tölvukerfi sínu en ÍSOR sér um úrvinnsluna. Að frumkvæði ÍSOR var komið á sjálfvirkum gagnasendingum í rauntíma frá mælunum sjálfum til móðurtölvu. Verklagið við rekstur mælakerfisins er þannig að Landsvirkjun sér um gagnaflutning, eftirlit með honum og vistun frumgagna. Samhliða vistun frumgagna hjá Landsvirkjun eru gögn send í rauntíma til ÍSOR þar sem sjálfvirkur hugbúnaður sér um rauntímaúrvinnslu og gagnavörslu. Landsvirkjun sér um eftirlit með gagnaflutningi og sækir gögn í mælistöðvarnar sjálfar ef sjálfvirki sendibúnaðurinn virkar ekki.

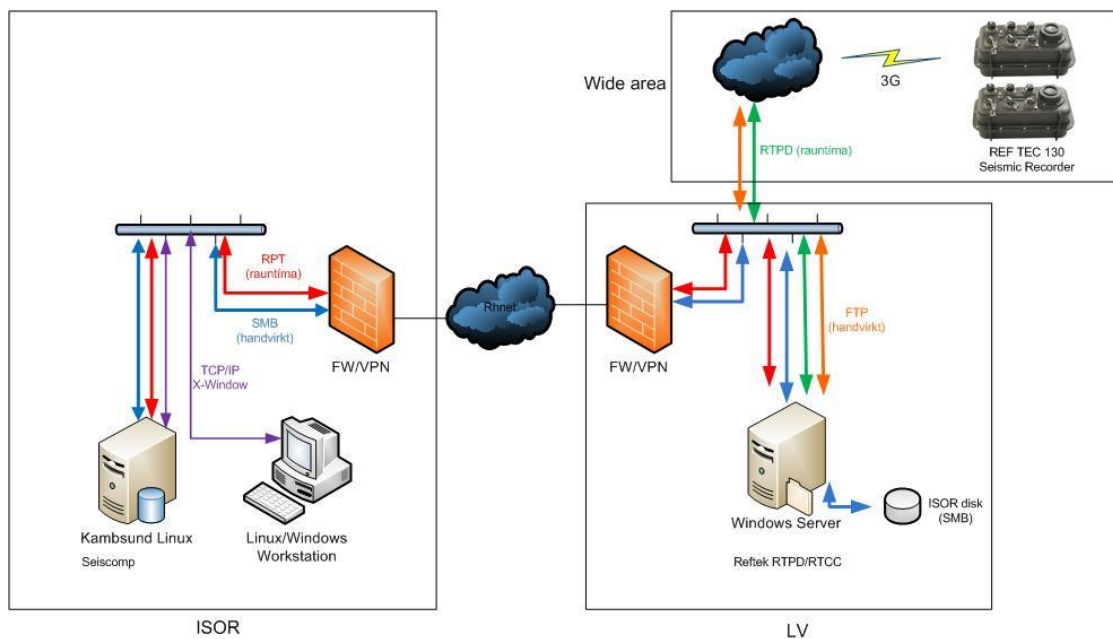
ÍSOR fjárfesti í þessu skyni í mjög þróuðum og fullkomnum hugbúnaði frá Gempa í Þýskalandi (seiscomp3). Hann var þróaður með tilstyrk þýskra stjórnvalda sem hluti af viðvörunarkerfi við flóðbylgjum af völdum jarðskjálfta við Indónesíu. Hann hefur á undanförunum árum verið tekinn í notkun hjá jarðskjálftarannsóknarstofnunum víða um heim. Stefnir í að sá hluti hugbúnaðarins sem sér um samskipti og gagnaflutning verði alþjóðlegur staðall.

Þessi hugbúnaður er jafnframt í sífellndri og örri þróun með þátttöku ýmissa stofnana á sviði jarðskjálftafræða og framleiðendur veita notendum góðan stuðning og þjónustu við notkun hans. Með notkun þessa kerfis á úrvinnslu að vera greið og geta gengið fljótt og snurðulaust fyrir sig.

Í reynd virkar kerfið þannig að skjálftastöðvarnar sex í Kröflu senda frumgögnin sjálfvirkt um internetið inn til vefþjóns hjá Landsvirkjun í Reykjavík (sjá flæðirit á

mynd 1) þar sem gögnin eru varanlega vistuð. Jafnframt er opin vefgátt með VPN-tenginum milli tölvukerfis ÍSOR og Landsvirkjunar og gögnin send um hana í rauntíma til ÍSOR. Þau gögn eru síðan vistuð og unnin sjálfvirkt í seiscomp3-kerfinu sem staðsetur skjálftanna og gefur ýmsar aðra upplýsingar um þá. Jafnframt hefur verið útbúið vefviðmót sem sýnir staðsetningu skjálftanna á korti.

Þegar kerfið virkar eins og til er ætlast felst vinna sérfræðinga ÍSOR í meginatriðum í tvennu. Annars vegar að taka við gögnum og yfirfara sjálfvirku staðsetningarnar og fjarlægja villur sem alltaf koma fyrir í svona sjálfvirkum kerfum. Að því loknu eru gögnin tilbúin til frekari jarðhitafræðilegrar úrvinnslu, endanlegar staðsetningar eru ákveðnar og ýmis önnur sérúrvinnsla fer fram með það fyrir augum að fá sem bestar upplýsingar um það sem er að gerast í jarðhitakerfinu.



**Mynd 1.** Gagnaflæði frá mælistöðvum í Kröflu á tölvu Landsvirkjunar og ÍSOR. RTPD er hugbúnaður frá Reftek sem sér um gagnasöfnunina og rauntímastraumur er sýndur með grænum og rauðum línum. Ef rauntímastraumur rofnar getur RTPD sótt eldri gögn (appelsínugul lína). ÍSOR hefur einnig tengingu við disk á tölvu Landsvirkjunar þar sem frumgögn eru varðveitt (blá lína).

Alltaf má við því búast að einhverjir hnökrar komi upp við sjálfvirka gagnasöfnun og sendingar stöku sinnum. Það getur gerst með þrennum hætti. Í fyrsta lagi geta orðið bilanir í mælistöðvunum sjálfum, í öðru lagi getur gagnasendingin frá mælunum í Kröflu, einum eða fleirum, til Landsvirkjunar í Reykjavík dottið út og í þriðja lagi geta orðið truflanir á gagnastraumnum milli vefþjóna Landsvirkjunar og ÍSOR.

Í þeim tilvikum þar sem sjálfvirka gagnasöfnunin eða sendingin til Reykjavíkur bregst þurfa starfsmenn Landsvirkjunar í Kröflu að fara að mælunum og hlaða niður gögnum

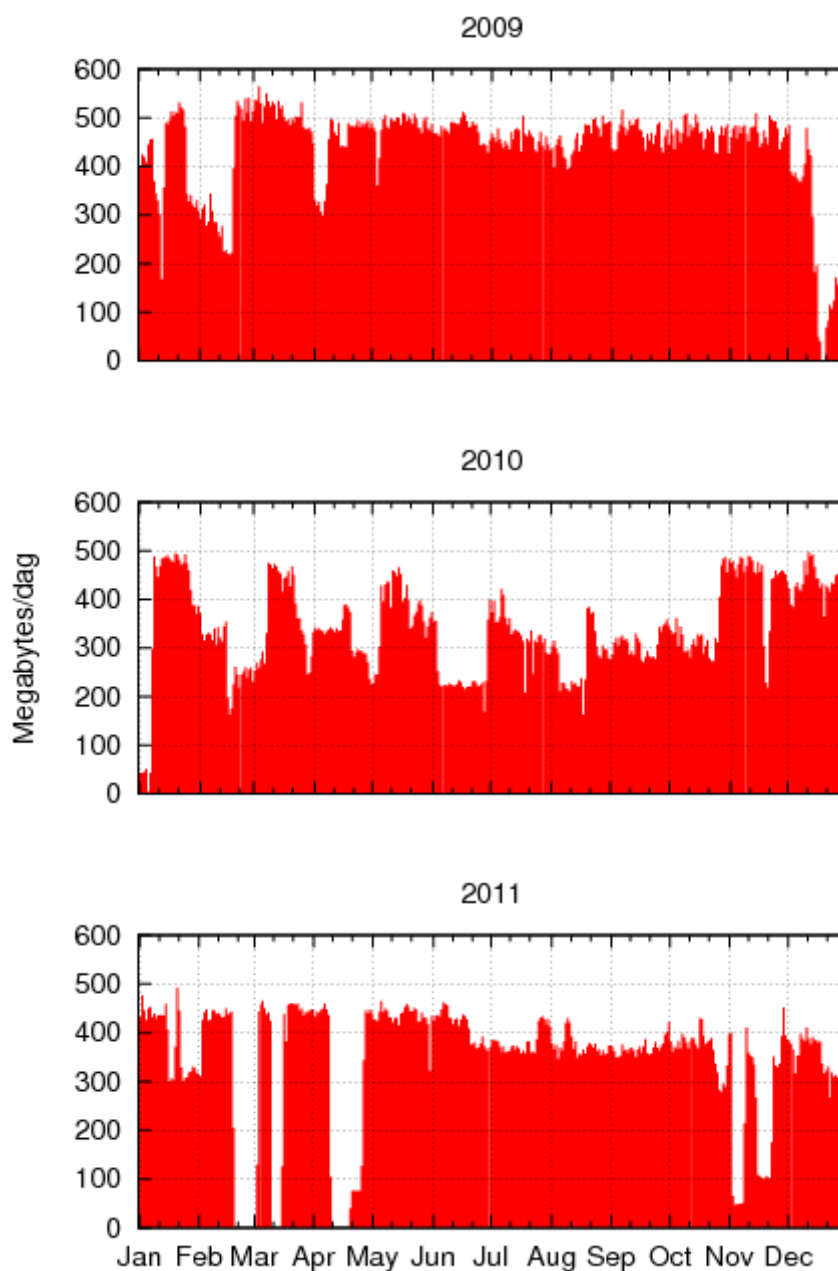
handvirkt og senda þau síðan inn í tölvukerfi Landsvirkjunar. Á sama hátt þurfa þá sérfræðingar ÍSOR að sækja þessi gögn handvirkt í gegnum gagnatenginguna milli ÍSOR og LV. Í þeim tilvikum þegar gagnastraumur milli vefþjóna ÍSOR og LV bregst þurfa kerfisstjórar beggja aðila að koma að því að greina vandann og leysa hann.

Á mynd 2 er sýnt gagnamagn sem skráð hefur verið einstaka daga, óháð því hvort gögnin hafa verið send sjálfvirkt eða sótt handvirkt. Þegar allar stöðvar safna er gagnamagnið samtals 420–530 megabæti á sólarhring. Magnið er lítils háttar breytilegt þar sem gögnin eru pökkuð og pökkunin er misöflug eftir útliti merkisins. Eins og sjá má á myndinni er gagnasöfnuninni áfátt frá desember 2009. Frá því í nóvember 2011 hafa gögnin verið send sjálfvirkt að hluta til en þó hefur iðulega þurft að sækja þau handvirkt á einstakar stöðvar að hluta. Sjálfvirka rauntímaúrvinnslan hefur því ekki haft aðgang að öllum gögnum sem safnast hafa.

Þegar gagnastraumurinn bregst leiðir það til mikillar aukavinnu og kostnaðar við verkefnið. Fyrir utan þá vinnu sem felst í handvirku gagnsöfnuninni, sendingu og vistun gagnanna er vinnan við úrvinnslu margföld miðað við það sem sjálfvirka kerfið krefst. Þegar skrárnar hafa verið sóttar þarf að setja þær saman handvirkt og koma þeim inn á réttan stað í gagnagrunn Seiscomp3 til að unnt sé að keyra út sjálfvirkar staðsetningar. Þetta er mjög tímafrek og kostnaðarsöm vinna. Ef t.d. 1–2 stöðvar detta út þarf að sækja þau gögn handvirkt og bæta þeim inn í gagnarununa sem kemur sjálfvirkt. Því er óhemju mikilvægt að sem minnstar truflanir verði á gagnasöfnun og flutningi, annað leiðir óhjákvæmilega til mikils kostnaðarauka og tafa við úrvinnslu gagna.

Umtalsverðir tæknilegir og rekstarlegir örðugleikar reyndust vera á því að þessar sjálfvirku tengingar kæmust á og hefur það falið í sér töluverða vinnu og kostnað á árinu sem ekki var reiknað með auk afleiddra tafa á úrvinnslu. M.a. var fenginn til landsins sérfræðingur frá Gempa í Þýskalandi til að vinna í þessu. Ekki tókst að leysa þessi vandamál fyrr en undir árslok. Þá kom í ljós að Cisco-beinar hjá LV og ÍSOR voru ekki samstilltir.

Þrátt fyrir að gagnasendingar kæmust loks í lag undir árslok 2011 reyndust gagnasendingar frá stöðvunum sjálfum ekki traustar. Einstakar stöðvar hafa ítrekað dottið út í rauntímaskráningu þannig að starfsmenn LV hafa áfram þurft að sækja gögnin handvirkt í þær með tilheyrandi viðbótarvinnu við úrvinnsluna hjá ÍSOR. Ekki er ljóst hvert vandamálið er. Hugbúnaður hefur verið uppfærður á mælistöðvunum (e. firmware) og virðist gagnasöfnun í lagi sem stendur.



**Mynd 2.** Magn gagna sem safnað hefur verið á árunum 2009–2011. Þegar allar sex stöðvar skrá er gagnamagnið 430–530 megabæti á sólarhring.

Megnið af tímanum sem sjálfvirku gagnasendingarnar hafa verið í gangi hafa gögn borist frá of fáum stöðvum til að sjálfvirkar staðsetningar skjálfta hafi verið mögulegar. Til að sjálfvirkar staðsetningar virki rétt þarf hver skjálfti að sjást á að minnsta kosti fjórum stöðvum. Á þeim tímabilum sem fimm eða sex stöðvar hafa sent gögn sýnir sig að kerfið virkar ágætlega og töluvert af jarðskjálftum eru staðsettir á sjálfvirkan hátt. Hins vegar er tveimur stöðvum nokkuð ábótavant. Mælir SK35 (skráningartæki 98CE) er staðsettur í holu 7. Ekki hefur verið gengið frá honum sem skyldi en hann var

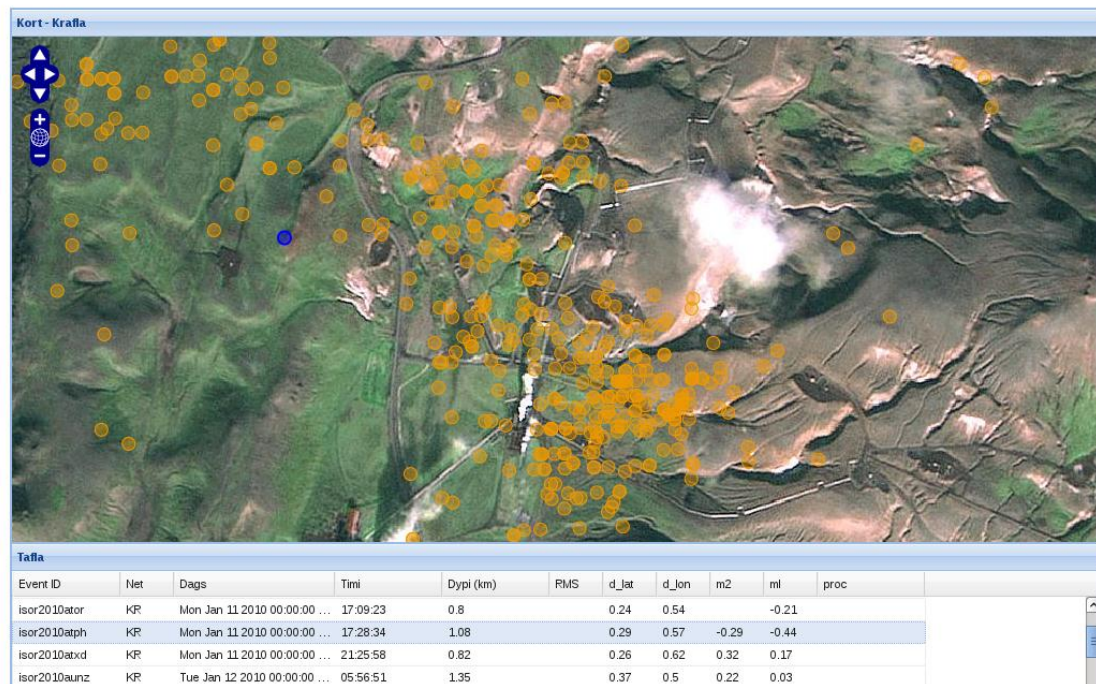
færður vegna framkvæmda og settur til bráðabirgða í holu 7. Merki frá honum er ekki gott og lagt til að sandi verði pakkað að nemanum í holunni ef hann á að fá þar varanlega vist. Þá eru einhverjar bilanir í mæli SK11 (Vestursvæði, skráningartæki 9AE9) sem lýsa sér í truflandi púlsum sem koma inn á tvær rásir af þremur í mælinum. Þetta veldur því að hann virkar illa eða ekki til að staðsetja skjálfta sjálfvirkt þótt nota megi hann í handvirkri staðsetningum. LV þarf að finna lausn á þessu vandamáli.

Samin hefur verið reynsluútgáfa af vefviðmóti sem m.a. birtir skjálfta á korti þegar þeir verða. Þetta vefviðmót má skoða á vefslóðinni:

[http://hrekkur.isor.is:8080/test/krafla\\_skjalftar/site.html](http://hrekkur.isor.is:8080/test/krafla_skjalftar/site.html).

Þetta er gagnvirkt vefviðmót sem birtir skjálftana á grunni sem má stækka eða minnka eftir þörfum og jafnframt skoða upplýsingar um einstaka skjálfta með því að smella á þá á kortinu og öfugt. Hægt verður að hafa mismunandi kort undir skjálftunum. Nú er notast við gervihnattamynd af svæðinu en einnig mætti nota jarðfræðikort eða önnur sérkort og merkja inn t.d. borholur. Dæmi um þetta er á mynd 3. Hugmyndin er að síðan verði hægt að velja afmörkuð tímabil og svæði til skoðunar að vild (í bili virkar þetta ekki með öllum vöfrum, gengur t.d. með Google Chrome og Firefox en ekki Internet Explorer).

#### Skjalftar



Mynd 3. Vefviðmót. Sjá nánari lýsingu í texta.

Það er rétt að ítreka að sjálfvirk úrvinnsla með þeim handvirkum lagfæringum sem nauðsynlegar eru felur í sér margfalt minni vinnu en úrvinnsla sem er handvirk að öllu leyti.

### 3 Úrvinnsla

Lokið er við staðsetningu jarðskjálfta frá á árinu 2010. Unnið er við staðsetningar skjálfta frá 2011. Auk þess er sjálfvirk úrvinnsla á síðasta hluta 2011 og 2012 þegar gagnasendingar eru í lagi.

Skjálftavirkni og vinnsla á Kröflusvæði hafa verið bornar saman til að kanna hvort vinnslan og breytingar á henni hafa áhrif á skjálftavirkni. Úrvinnslunni er nánar lýst hér á eftir.

#### 3.1 Bylgjuhraðamælingar

Í greinargerð um skjálftaverkefnið í Kröflu í júní 2011 (Kristján Ágústsson o.fl., 2011b) var gerð grein fyrir bylgjubrotsmælingum Jarðhitadeildar Orkustofnunar, forvera ÍSOR. Þær voru skoðaðar og endurmetnar til að athuga hvort bæta mætti hraðalíkan á Kröflusvæðinu og þar með bæta staðsetningar jarðskjálfta, einkum dýptarákvörðun. Þegar fyrrgreindar mælingar eru bornar saman við aðrar túlkanir á bylgjubrotsmælingum á svæðinu (Bryndís Brandsdóttir o.fl., 1997) kemur í ljós að töluverður munur er á hraðalíkönunum. Hann endurspeglar meðal annars þá staðreynd að hraði er ekki eingöngu háður dýpi (1D) heldur breytist hann einnig lárétt (3D). Að vísu er ekki mikill dýptarmunur á upptökum flestra skjálfta þegar fyrrgreind líkön hafa verið notuð þar sem meðalhraði frá upptökum að mælistöð er svipaður þrátt fyrir þennan mikla mun á líkönunum. En þetta gildir alls ekki um alla skjálfta og óvissu í staðsetningum er unnt að minnka þar sem aflestrartímar og staðsetningar mæla eru góðar og því forsendur fyrir öruggari staðsetningum með bættu líkani.

Líkan Bryndísar Brandsdóttur o.fl. (1997) sýnir háhraðastromp undir Kröfluöskjunni. Einnig eru þar þrjú lághraðalög. Tvö þeirra eru þunn og einungis túlkuð á einu sniði bylgjubrotsmælinga og eru á 1300 og 1600 m dýpi. Einnig er lághraðalag á um 4 km dýpi þar sem ætlað kvikuhólf er. Lághraðalögin á 1300 og 1600 m dýpi eru ekki greinileg í öðrum bylgjubrotssniðum og sjást ekki utan öskjunnar. Þau eru heldur ekki greinileg í bylgjubrotsmælingum ÍSOR (Jarðhitadeildar Orkustofnunar) en þó ber þess að geta að upplausn í þeim mælingum er minni en í mælingum Bryndísar Brandsdóttur o.fl. (1997). Það er hins vegar ekkert sérstakt í jarðlögum eða jarðlagamælingum á þessu dýpi í borholum í Kröflu sem bendir til slíks lághraðalags. Að öðru leyti er helsti munur milli hraðasniða Bryndísar Brandsdóttur o.fl. (1997) annars vegar innan öskjunnar og hins vegar utan hennar að á 0,5–5 km dýpi er mun hærri bylgjuhraði innan öskjunnar en utan hennar. Túlkun á mælingum ÍSOR (Jarðhitadeildar Orkustofnunar) er svipuð og túlkun Bryndísar Brandsdóttur o.fl. (1997) utan öskjunnar neðan 1 km dýpis. Frá yfirborði og niður á um 1 km dýpi er hærri bylgjuhraði í hraðalíkani ÍSOR.

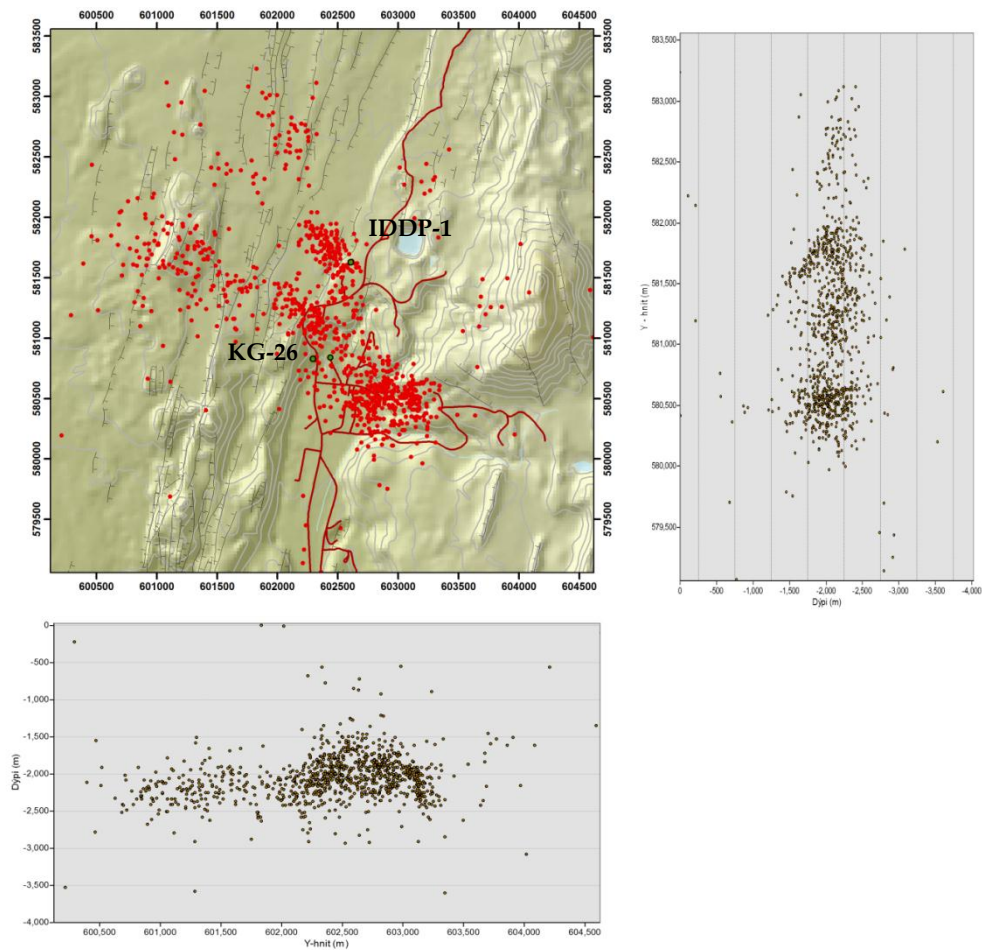
Við staðsetningar jarðskjálfta í Kröflu, sem gerð hefur verið grein fyrir í fyrri skýrslum (Kristján Ágústsson o.fl., 2011a, 2011b), hefur verið notað hraðalíkan Bryndísar Brandsdóttur o.fl. (1997). Allir skjálftar hafa nú verið endurstaðsettir með hraðalíkani ÍSOR. Í heild má reikna með að flestir skjálftar fái ívið dýpri upptök en með fyrra líkani. Gæði staðsetninga eru meiri þegar notað er líkan ÍSOR en fyrra líkan.

Langflestir jarðskjálftar eru grynri en ætlað kvikuhólf þannig að hraðfrávik á því dýpi hefur ekki áhrif á staðsetningar nema í undantekningartilvikum.

Unnt er að fá öruggari upplýsingar um hraða í efstu 2 km jarðskorpunnar með beinum mælingum í borholum, einkum VSP-mælingum (e. Vertical Seismic Profiling). Hátíðni-bylgjuhraðamælingar í borholum (e. sonic log), sem eru einfaldari í framkvæmd, gætu líka skýrt myndina. Hvort tveggja mundi treysta mjög dýpisákvæðanir.

### 3.2 Skjálftavirkni

Á mynd 4 eru sýndar staðsetningar skjálfta frá 2009 og 2010.

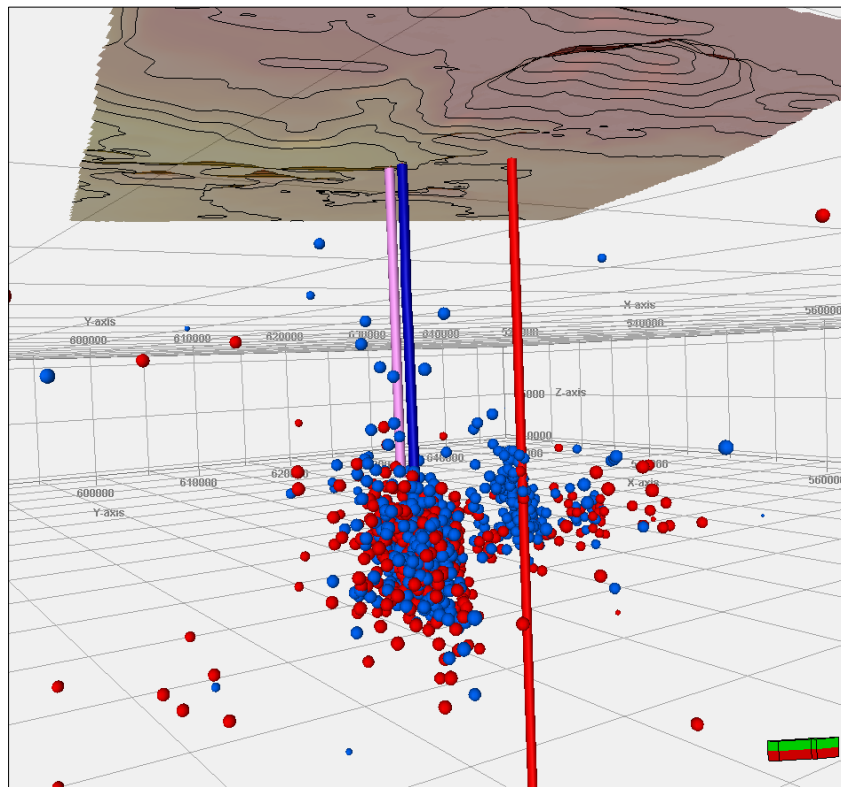


**Mynd 4.** Staðsetningar jarðskjálfta í Kröflu árin 2009 og 2010. Neðan og til hliðar eru dýptarsnið, annars vegar í austur-vestur stefnu og hins vegar í norður-suður. Takið eftir skjálftaþyrpingunum við vinnslusvæðið í Suðurhlíðum, norður af niðurdælingarholunni KG-26 og við IDDP-1 holuna. Þess fyrir utan eru dreifðir skjálftar einkum við Leirhnjúk og þar norður af.

Meginþyrping skjálftanna er með NV-læga stefnu og liggur frá Suðurhlíðum um Hveragil og Leirbotna í Leirhnjúk. Virknin er mjög misjöfn innan þessarar meginþyrpingar. Mest virkni er á A-V línu í Suðurhlíðum. Í Leirbotnum er talsverð virkni á

litlu svæði en þar fyrir vestan er virknin dreifð. Norðan meginþyrpingarinnar eru nokkrar stakar þyrpingar. Þyrpingin vestan við Víti tengist borun IDDP-1 holunnar. Athygli vekur að langflestir skjálftanna á þessu tímabili urðu í grennd við borholur Kröfluvirkjunar, bæði þar sem dælt var niður og við blásandi holur. Það bendir til þess að umrædd skjálftavirkni standi í sambandi við vinnsluna og þar með leynast í gögnunum upplýsingar um rennslisleiðir og varmanám.

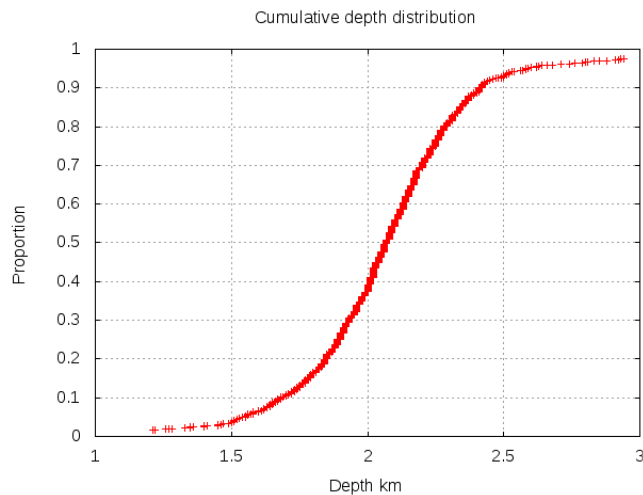
Norðausturmörk meginþyrpingarinnar eru sérlega skörp. Stefna þeirra er svipuð og NV-lægt misgengi í Suðurhlíðum. Á mynd 5 má sjá að mörkin eru skýr á 1,5–2,5 km dýpi.



**Mynd 5.** Horft til NV frá Suðurhlíðum eftir skjálftaþyrpingunni. Súlurnar eru borholur, rauð IDDP-1, bleik KG-26 og blá KJ-10. Jarðskjálftar 2009 bláir og 2010 rauðir. Takið eftir skörpu skilunum í jarðskjálftavirkninni á miðri myndinni.

Knútur Árnason (persónulegar upplýsingar) hefur leitt líkur að því út frá jarðeðlisfræðimælingum að í Kröfluöskjunni geti verið sigdæld (graben) sem hefur svipaða stefnu og legu og norðurjaðar meginþyrpingarinnar.





**Mynd 6.** Dýptardreifing jarðskjálfta á Kröflusvæðinu árin 2009 og 2010. Myndin sýnir hlutfallslegan fjölda skjálfta ofan við tiltekið dýpi (uppsafnaður fjöldi). Takið eftir að 95% allra jarðskjálfta urðu ofan 2,7 km dýpis.

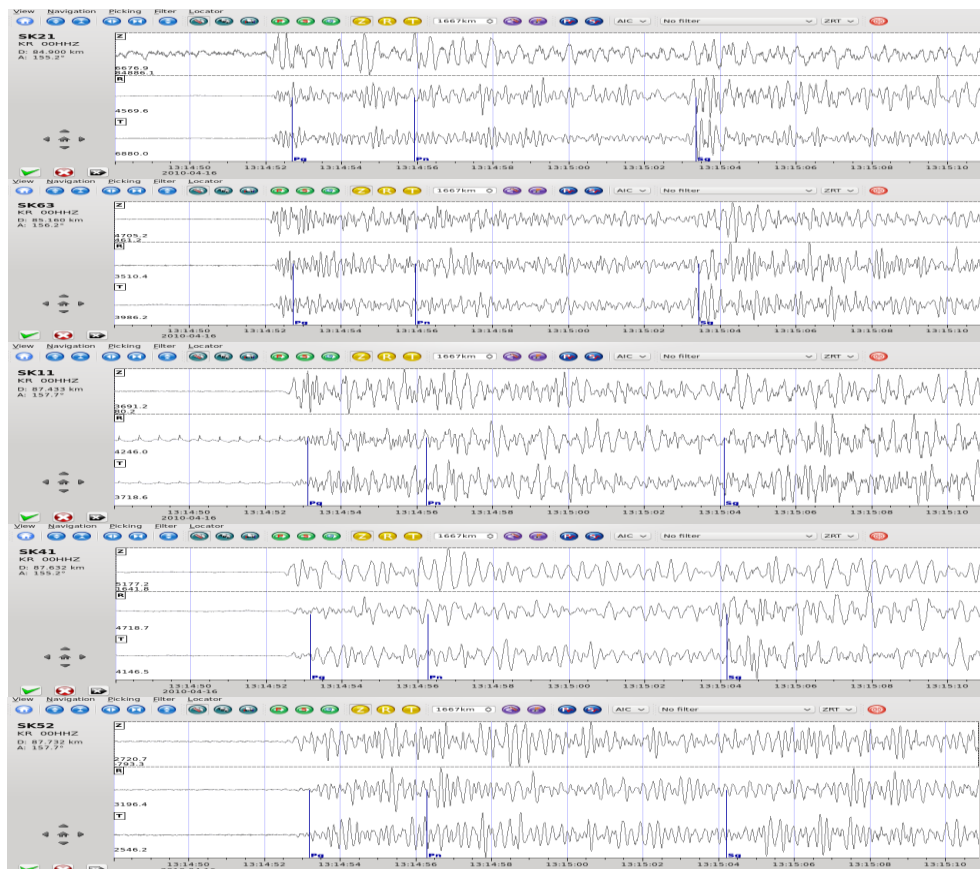
Skjálftarnir eru langflestir á 1,5–2,5 km dýpi og 95% eru grynri en 2,7 km (mynd 6). Á vestur- og norðurhluta svæðisins, þar sem virknin er dreifð, eru þeir á nokkru þrengra dýptarbili, eða á 2,0–2,5 km dýpi. Nær engin virkni er neðan við 3 km. Þetta bendir sterklega til þess að á því svæði þar sem skjálftavirknin mælist megi reikna með að mörk hinnar brotgjörnu og deigu jarðskorpu liggja á um 3 km dýpi. Talið er að hitinn við þau mörk sé á bilinu 650–850°C (Kristján Ágústsson og Ólafur G. Flóvenz, 2005). Óvisst er hversu djúpt þarf að seilast niður fyrir þau mörk til að komast í kviku sem ætla má að sé um 1000°C heit. Niðurstöður úr þeim holum sem fram að þessu hafa verið boraðar í kviku, bæði í Kröflu og í Eldfellshraunið á Heimaey, benda sterklega til þess að varmanám á yfirborði kviku í jörðu eigi sér stað á örþunnu belti ofan hennar, belti sem er varla yfir fáeina tugi metra á þykkt við aðstæður eins og í Kröflu (Guðni Axelsson, 2010) og á fárra sentímetra bili í hrauni á yfirborði.

Þar sem nær allir jarðskjálftarnir við borholurnar í Kröflu eru á svipuðu dýpi og holurnar ná til mætti álykta sem svo að skjálftar tengdir vinnslunni væru bundnir við dýpi borholnanna og segðu þar með ekkert um dýpið niður á seigt berg þar fyrir neðan. Á móti má benda á að bæði á Hellisheiði og í Svartsengi, þar sem ekki eru grunnstæð kvikuhólf, teygjast jarðskjálftar vegna vinnslunnar fleiri kílómetra niður fyrir botn holnanna. Því er ekki ástæða til ætla annað en að dýptardreifing skjálftanna í Kröflu gefi mat á þykkt brotgjörnu skorpunnar þar.

### 3.3 Kvikuhólf

Páll Einarsson (1978) og Bryndís Brandsdóttir o.fl. (1997) hafa sýnt fram á að kvikuhólf er undir Kröfluöskjunni. Niðurstöður þeirra byggjast á því að jarðskjálftabylgjur, einkum S-bylgjur, deyfast eða hverfa þegar þær fara í gegnum tiltekið rúmmál undir Kröfluöskjunni. Þeir jarðskjálftar sem eiga upptök sín innan öskjunnar og mælast í núverandi mælineti í Kröflu liggja allir ofan 3 km dýpis og eru þar með ofan kviku-

hólfsins. Bylgjur frá þeim berast því beint upp til skjálftamælanna og fara því ekki í gegnum það rúmmál þar sem kvikuhólfið er talið vera. Þetta veldur því að ekki er unnt að skoða kvikuhólfið með þessum staðbundnu skjálftum. Skjálftar með upptök í meiri fjarlægð geta hins vegar sýnt það. Bylgjur frá þeim berast eftir sveigðri braut niður í neðri hluta jarðskorpunnar eða efsta hluta möttuls og koma þaðan bratt upp undir mælistöðvum ef fjarlægðin milli upptaka og skjálfta er orðin nokkrir tugir kílómetra. Dæmi um þetta er sýnt á mynd 7 sem sýnir skráningu á skjálfta í Tjörnesbrotabeltinu með upptök í um 85 km fjarlægð. Þar má sjá að á stöðvum næst upptökunum er skýr S- bylgja. Á stöðvum sem eru taldar vera yfir og sunnan við kvikuhólfið sjást varla S- bylgjur. Þetta sýnir glögglega að nota má fjarlæga skjálfta til að kortleggja hvar kvikuhólfið liggur. Ef við hefðum jarðskjálftabylgjur sem kæmu úr öllum áttum að Kröflu og ættu sér upptök hæfilega langt í burtu gætum við lagt mat á lárétta útbreiðslu hólfsins. Sá galli er þó á að náttúrulegra jarðskjálfta í hæfilegri fjarlægð er í aðalatriðum aðeins að vænta úr norðri eða suðri frá Kröflu vegna þess hvernig jarðskjálftavirkni dreifist á Íslandi. Úr því mætti bæta með því nota sprengingar sem sérstaklega væru gerðar til þessara nota. Þá þarf að hafa í huga að eftir því sem jarðskjálftabylgjur berast lengri leið tapa þær hátíðnihluta bylgjusviðsins. Það leiðir til þess að upplausn eða grein- ingarhæfni jarðskjálftabylggnanna minnkar eftir því sem upptök þeirra eru lengra í burtu.



**Mynd 7.** Skráning Kröflunetsins á jarðskjálfta í Tjörnesbrotabeltinu í um 85 km fjarlægð. Efstu stöðvarnar (SK21 og SK63) eru norðan við ætlað kvikuhólf en hinar þrjár (SK11, SK41 og SK52) eru yfir því og sunnan þess. Glögg S-bylgja sést á SK21 og SK63 (kl. 13:15:03) en hinar stöðvarnar sýna litla sem enga S-bylgju.

Væntingar um stórfellda nýtingu orku beint úr kviku í Kröflu, eða öllu heldur af mörkum fast bergs og kviku, krefjast nákvæmra upplýsinga um hvar kvikan sé og hversu útbreidd hún er. Þær upplýsingar fást aðeins með jarðeðlisfræðilegum mælingum og/eða borunum. Af því leiðir að þróun aðferða til að mæla kvikuhólf grunnt í skorpunni er afar mikilvægt tæki fyrir hagkvæma orkunýtingu á slíkum svæðum í framtíðinni.

### 3.4 Skjálftavirkni og niðurdæling

Áratugareynsla af niðurdælingu í jarðhitakerfi, einkum erlendis, hefur sýnt að jarðskjálftavirkni við niðurdælingu er mjög tengd breytingum í niðurdælingu, bæði hvað varðar magn og þrýsting. Einnig hefur komið í ljós við athuganir á Íslandi að ádælingarstuðull og skjálftavirkni við ádælingu er mjög háð hita þess vatns sem dælt er niður. Með því að tengja saman jarðskjálftavirkni og niðurdælingu í tíma fást greinargóðar upplýsingar um hvert vatnið sem dælt er niður fer. Slíkar upplýsingar eru mikilvægar fyrir rekstur jarðhitakerfisins þegar til lengdar lætur. Skráning jarðskjálfa í tíma er mjög nákvæm. Til að geta borið jarðskjálftavirknina saman við niðurdælingu eða vinnslu úr jarðhitakerfum og meta orsakasamhengi þar á milli þurfa því að liggja fyrir nákvæmar upplýsingar um niðurdælingu og vinnslu í einstökum holum. Þetta gildir um magn, hita, þrýsting og tíma. Því miður hefur slík skráning ekki verið sem skyldi í háhitavirkjunum á Íslandi, öndvert við það sem tíðkast hjá hitaveitum lágghitasvæðanna. Þetta takmarkar notagildi jarðskjálftamælinganna í háhitakerfunum. Þess vegna er verulegra úrbóta þörf á skráningu vinnslu og niðurdælingar, helst með sískráningarkerfum.

Hola KG-26 hefur verið notuð til niðurdælingar á frárennslisvatni frá Kröfluvirkjun frá árinu 2002. Frekar stopular upplýsingar virðast vera til um niðurdælinguna, þ.e. hversu miklu er dælt niður á hverjum tíma og hversu heitu vatni er dælt niður. Að meðaltali hefur niðurdælingin numið 90 L/s undanfarin ár. Einnig hefur verið dælt niður í holu KG-11 frá 2003. Magnið sem dælt er í hana er breytilegt, mest 38 L/s en oftast töluvert minna. Dæling í hana er ekki samfelld. Aðrar ádælingar sem við höfum upplýsingar um á árunum 2009 og 2010, sem þessi skýrsla fjallar um, eru í holu KJ-38 frá 2009–2010 með 15–25 L/s, KJ-35 á árinu 2009, en ekki eru til upplýsingar um magn, og loks IDDP-1 á árinu 2009.

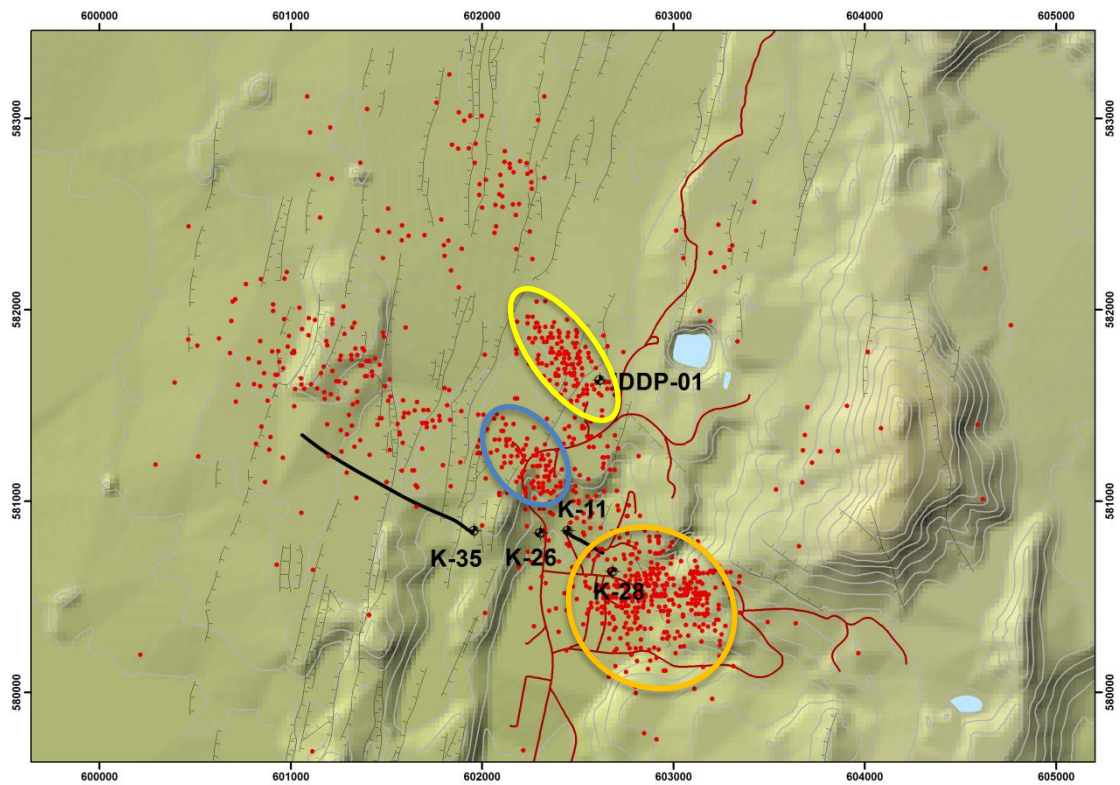
Á árunum 2009 og 2010 eru magntölur, sem ÍSOR hefur fengið frá dælingum í KG-26 og KG-11, meðalgildi mánaðar. Upplýsingar eru til um skoltap og dælingar í IDDP-1 holuna en þar er einnig að mestu um að ræða einhvers konar meðalgildi. Það liggur í hlutarins eðli að stökk og sveiflur jafnast út í meðaltalsreikningum. Það veikir því forsendur þess að tengja breytilega jarðskjálftavirkni við niðurdælingu og holuþrýsting og hita niðurdælingarvökva.

Á mynd 8 eru merkt svæði í Leirbotnum og Suðurhlíðum með þéttum þyrpingum jarðskjálfta. Athuguð voru tengsl skjálftanna og breytinga á niðurdælingu í KG-26 (mynd 9). Mynd 9a sýnir sambandið við heildarskjálftavirkni á svæðinu. Þar má sjá að algeng skjálftavirkni nemur 1–4 skjálftum á sólarhring en síðan koma nokkrar syrpur þegar skjálftafjöldinn fer upp í 5–10 á dag. Þar sem nánast engar breytingar virðast vera á holutoppþrýstingi við niðurdælinguna er ekkert hægt að álykta um samband

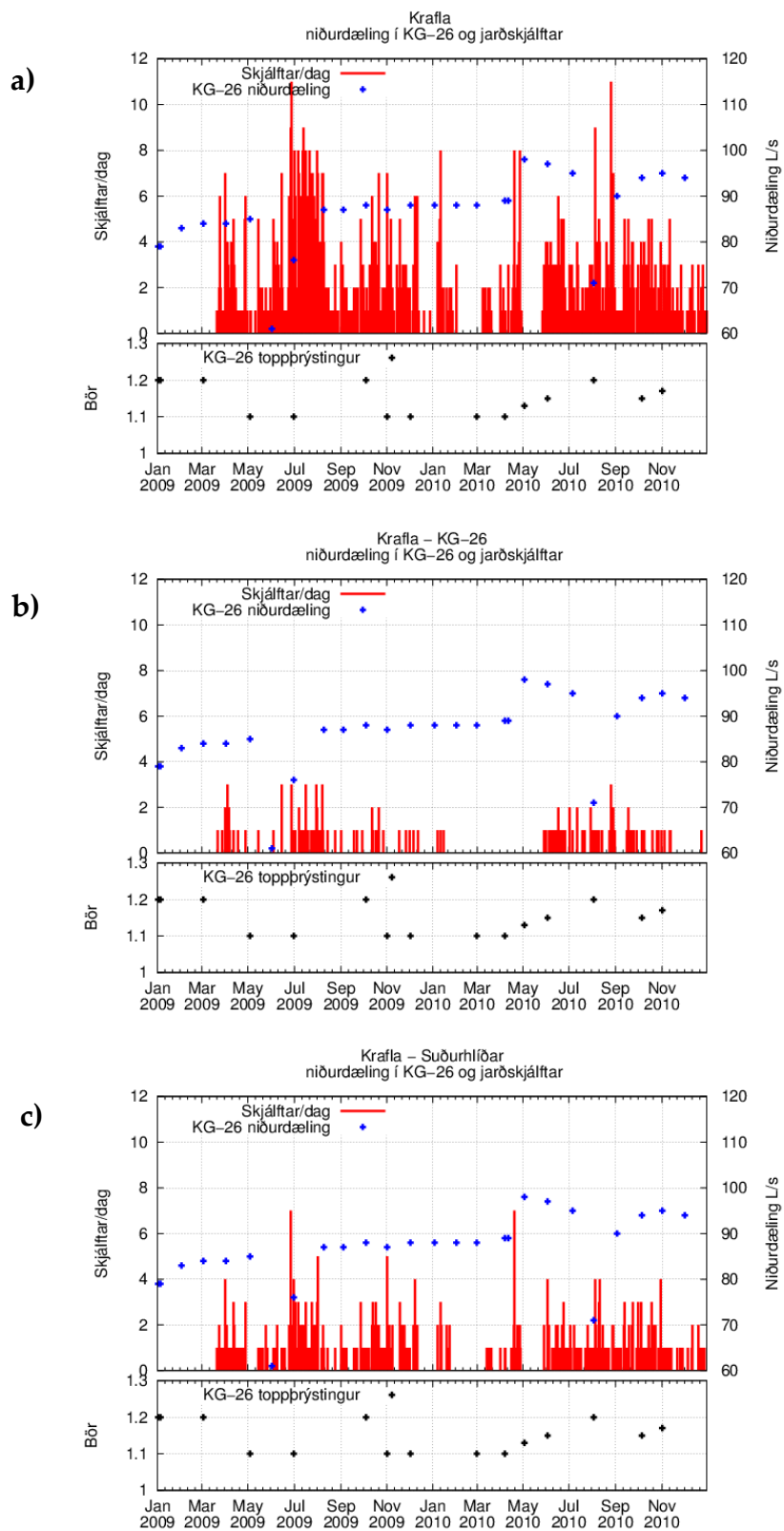
hans við skjálftavirknina. Athygli vekur að á tímabilinu hafa þrívægis orðið greinilegar breytingar í niðurdælingu í KG-26 sem koma fram í mánaðarmeðaltölunum og í öllum tilvikum sést aukning í fjölda skjálfta. Auk þess má greina 3–4 tilvik þar sem skjálftavirknin eykst marktækt en ekki sjást marktækar breytingar í mánaðarmeðaltölum niðurdælingar í holu KG-26. Það þýðir þó ekki að þessi aukning stafi ekki af niðurdælingu því bæði getur niðurdæling í aðrar holur komið við sögu og eins geta verið truflanir í niðurdælingu sem ekki standa það lengi að þær sjáist í mánaðarmeðaltölum. Þannig var umtalsverð niðurdæling í IDDP-1 sumarið 2009 og eru skjálftarnir þá að hluta tengdir henni. Gerð var grein fyrir sambandi jarðskjálfta og niðurdælingar (skoltaps) við borun holunnar í fyrri skýrslu (Kristján Ágústsson o.fl., 2011a).

Á mynd 9b er niðurdæling í KG-26 borin saman við jarðskjálfta í nágrenni holunnar sjálfrar. Ekki eru sýnileg nein tengsl milli breytinga í niðurdælingu samkvæmt mánaðarmeðaltölum og fjölda jarðskjálfta í grennd holunnar. Þessi niðurstaða kemur ekkert á óvart því reynsla af niðurdælingu sýnir almennt að skjálftavirknin færir fjær holunni eftir því sem hún stendur lengur. Á mynd 9c er niðurdælingin borin saman við skjálftavirkni í Suðurhlíðum. Þar má sjá að í tveimur tilvikum af þremur verður aukning í skjálftavirkni þar við umtalsverðar breytingar á niðurdælingu í KG-26. Það bendir til þess að skjálftavirknin vegna niðurdælingarinnar í KG-26 hafi færst í átt að Suðurhlíðum með tíma. Ferilprófanir sem gerðar voru af frönsku jarðfræðistofnuninni BRGM í samvinnu við ÍSOR benda til að niðurdælingarvökvi dreifist mjög hratt um vinnslusvæðið (Gadalia o.fl., 2010). Þótt mönnum hafi fundist þessar niðurstöður ótrúlegar væri rétt að endurtaka þessar ferilprófanir með hliðsjón af þessum vísbendingum úr skjálftamælingunum. Það mundi gefa mikilvægar upplýsingar um svæðið og eiginleika þess að gera þær ferilprófanir samhliða auknum, tímabundnum jarðskjálftamælingum. Það gæti einnig gefið upplýsingar um eðli brota, það er hvort um er að ræða skjálfta sem tengjast varmanámi eða útlausn á tektónískum spennum.

Vert er að benda á að með því að skoða rennislíðir vatnsins um jarðhitakerfin með jarðskjálftamælingum bætast við skorður til að setja inn í og bæta forðafræðilíkanið af Kröflu.



**Mynd 8.** Afmörkun þyrpinga í Sudurhlíðum (appelsínugul) og Leirbotnum (blá) til samanburðar við niðurdælingar. Einnig er afmörkuð skjálftaþyrping við IDDP-1 holuna (gul). Athuga skal að í megintexta eru holunúmer þau sömu og á mynd en tveir bókstafir eru í nafni.



**Mynd 9.** Niðurdæling og skjálftavirkni. a) Allir jarðskjálftar, b) jarðskjálftar í Leirbotnum, c) jarðskjálftar í Suðurhlíðum.

## 4 Samantekt og tillögur

Helstu niðurstöður þessarar skýrslu eru:

- Miklar tafir urðu á því að gagnasendingar í rauntíma frá mælistöðvum í Kröflu, um tölvukerfi LV til ÍSOR, kæmust á án mikilla truflana. Ástæðurnar reyndust vera tölvutæknilegs eðlis að hluta til og að hluta til vandamál tengd hugbúnaði í mælistöðvunum sjálfum. Kerfið hefur virkað undanfarna mánuði en ekki nógu lengi til að fullyrða að vandinn sé leystur.
- Vandamálin við að koma sjálfvirka kerfinu í gang hafa leitt til mikils umframkostnaðar og verulegra tafa á úrvinnslu. Sú vinna er mjög tímafrek sem felst í að sækja þarf gögnin handvirkt og vinna þau þannig áfram.
- Gert hefur verið nýtt hraðalíkan af jarðlögum í Kröflu sem er byggt á gömlu endurkastsmælingum ÍSOR (Jarðhitadeildar OS). Það gefur heldur betri niðurstöður en eldri líkөн sem hafa verið notuð og þar með nákvæmari dýptar-ákvörðun skjálfta.
- Bæta mætti líkanið enn frekar með beinum mælingum á hljóðhraða í borholum í Kröflu.
- Nýja hraðalíkanið sýnir upptök skjálfta á ívið meira dýpi en eldra líkan.
- Neðri mörk virkni eru skýr og benda til þess að mörk brotgjarnrar og deigrar skorpu við núverandi bjögunarhraða (e. strainrate) séu á minna en 3 km dýpi en þessi mörk eru við um  $750^{\circ}\pm 100^{\circ}\text{C}$  í basísku bergi. Mjög stutt getur verið frá þessum mörkum í bráðið berg fyrir neðan.
- Greinilegur S-bylgju skuggi fjarlæggra jarðskjálfta sýnir að kvika er undir öskjunni eins og fyrri athuganir hafa sýnt. Með tímanum gætu safnast nógu margir skjálftar úr mismunandi áttum til að leyfa betri afmörkun á legu hólfsins en nú er þekkt.
- Upptök skjálfta á mælisvæðinu sýna þrjár afmarkaðar þyrpingar þeirra; við vinnslusvæðið í Suðurhlíðum, umhverfis IDDP-holuna og umhverfis niðurdælingarholuna KG-26.
- Vinnslugögnum sem ÍSOR hefur fengið um niðurdælingu við Kröfluvirkjun er ábótavant. Það stafar líklega af allt of gisinni gagnasöfnun í tíma. Nauðsynlegt er að hafa sískráningu á magni, hita og þrýstingi niðurdælingar í hverja holu fyrir sig sem notuð er í því í skyni svo hafa megi full not af jarðskjálfta-upplýsingunum fyrir jarðhitakerfið.
- Samaburður á ádælingu í IDDP-holuna og jarðskjálftavirkni hefur áður sýnt að niðurdælingin hrindir af stað smáskjálftum sem skilgreina rennlisleiðir vatnsins í berginu og kortleggur lek misgengi.
- Samanburður á niðurdælingu í holu KG-26 sýnir að breytingar á niðurdælingunni kemur fram í skjálftavirkni, einkum í Suðurhlíðum. Það er eðlilegt að búast við að niðurdælingarskjálftar komi fram langt frá niðurdælingarstað þegar dælingin hefur staðið lengi. Þessi niðurstaða bendir til þess að niðurdælingarvökvinn skili sér í vinnsluholunnar eins og ætlast er til. Jafnframt er bent á að ferilefnaprófun, sem gerð var fyrir fáum árum, bendir til þess að ferðatími vökvans frá KG-26 að sé mjög stuttur.

- Þess má vænta að niðurstöður skjálftarannsóknna í tengslum við niðurdælingu hjálpi til við að setja skorður á og bæta forðafraeðilíkon af Kröflu.

Í ljósi þeirrar reynslu sem nú hefur fengist af rekstri skjálftanetsins í Kröflu er eftirfarandi lagt til:

- 1) Landsvirkjun bæti söfnun gagna er varða niðurdælinguna. Mælt er með að komið verði upp sískráningu á rennsli, hita og þrýstingi niðurdælingar í hverja niðurdælingaholu fyrir sig.
- 2) Gagnaflutningur virðist vera kominn í lag, í bili að minnsta kosti. Samt eru enn verulegar truflanir á sendingum frá einstökum stöðvum sem komast þarf fyrir. Lagt er til að Landsvirkjun fylgist vel með ástandi kerfisins, m.a. með því að koma upp skjá í Kröflu þar sem eftirlitsmenn geta litið daglega á hvort kerfi virki eðlilega og gripið fljótt til aðgerða ef úrbóta er þörf.
- 3) Landsvirkjun gangi frá mæli SK35 til frambúðar og reyni að komast fyrir truflanir eða bilun í mæli SK11.
- 4) Vegna kostnaðar við frágang á borholumælum leggjum við til að athugað sé hvort mikill ávinningur sé af slíkum frágangi miðað við yfirborðsmæla. Til þess þarf samanburðarmælingu, þ.e. mæla með færanlegum yfirborðsmæli við einhvern eða einhverja borholumæla í um tveggja mánaða skeið.
- 5) Þegar tækifæri gefst til verði mældur hljóðhraði í borholum í Kröflu til að stilla hraðalíkanið betur af.
- 6) Mælinetið verði rekið áfram enda er það að sýna sig að það gefur miklar upplýsingar um innviði jarðhitakerfisins. Lagt verði ofurkapp á að koma sjálfvirkninni í truflanalítið ástand til að spara rekstrarkostnað og kostnað við úrvinnslu.



## 5 Heimildir

- Bryndís Brandsdóttir, William Menke, Páll Einarsson, Robert S. White og Robert K. Staples (1997). Färoe-Iceland Ridge Experiment. 2. Crustal structure of the Krafla central volcano. *Journal of Geophysical research*, vol 102, no. B4, 7867–7886.
- Guðni Axelsson (2010). *Temperature condition modelling for well IDDP-1*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2010/051, Landsvirkjun, LV-2010/119.
- Kristján Ágústsson og Ólafur G. Flóvenz (2005). *The thickness of the seismogenic crust in Iceland and its implications for geothermal systems in Iceland*. Extended abstract, WGC 2005.
- Kristján Ágústsson, Egill Árni Guðnason, Sigríður Kristjánsdóttir og Anette K. Mortensen (2011a). *Skjálftaverkefnið í Kröflu. Staðan í janúar 2011*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2011/005, Landsvirkjun, LV-2011/026.
- Kristján Ágústsson, Egill Árni Guðnason, Karl Gunnarsson og Sigurveig Árnadóttir (2011b). *Skjálftaverkefnið í Kröflu, staðan í júní 2011*. Íslenskar orkurannsóknir, greinargerð, ÍSOR 11064.
- Páll Einarsson (1978). S-wave shadows in the Krafla caldera in NE-Iceland, Evidence for a Magma Chamber in the Crust. *Bull. Volcanol.*, Vol. 41–3, 1978.
- A. Gadalia, G. Braibant, S. Touzelet, B. Sanjuan, F. Jouin, R. Asmundsson, C. Massiot og C. Crouzet (2010). *Tracing tests using organic compounds in a very high temperature field, Krafla (Iceland)*. Study carried out within the HITI project. BRGM/RP-57661-FR. July, 2010.



Landsvirkjun

Háaleitisbraut 68  
103 Reykjavík  
landsvirkjun.is

landsvirkjun@lv.is  
Sími: 515 90 00

