

Jarðfræðafélag Íslands

# HAUSTRÁÐSTEFNA 2000

Ágrip erinda og veggspjalda

Umsjón:  
Sigurður Sveinn Jónsson  
[ssjo@os.is](mailto:ssjo@os.is)

Reykjavík 23. nóvember 2000

## Tilvitnun í ritið

Grímur Björnsson, Kristján Sæmundsson og Ólafur G. Flóvenz: Vatnsborðsbreytingar í borholum í tengslum við Suðurlandsskjálftana. Haustráðstefna 2000. Ágrip erinda og veggspjalda. Jarðfræðafélag Íslands, bls. 4.  
Björnsson, G., Saemundsson, K. & Flovenz, Ó.: Earthquake induced water level fluctuations in boreholes in South Iceland (in Icelandic) Geoscience Society of Iceland, Autumn Meeting 2000, p.

# Dagskrá

13:00	<b>Setning:</b> <i>Helgi Torfason</i>
	<b>Fundarstjóri: Sigurður Sveinn Jónsson</b>
13:05	<i>Ragnar Stefánsson, Páll Halldórsson og Gunnar B. Guðmundsson: Jarðskjálftarnir 2000: Eðli, áhrif og spár í ljósi sögulegra heimilda og jarðskjálftamælinga.</i>
13:50	<i>Páll Einarsson og Amy E. Clifton: Suðurlandsskjálftar 2000: Tektóniskt umhverfi, sprungur og yfirborðsummerki.</i>
14:25	<i>Þóra Árnadóttir, Halldór Geirsson, Bergur H. Bergsson, Jósef Hólmjárn, Halldór Ólafsson, Rikke Pedersen, Erik Sturkell, Vala Hjörleifsdóttir, Páll Einarsson, Christof Völksen, Markus Rennen og Guðmundur Valsson: Jarðskorpuhreyfingar í kjölfar Suðurlandsskjálfta í júní, 2000.</i>
15:00	<b>Kaffi - Veggspjöld</b>
	<b>Fundarstjóri: Edda Lilja Sveinsdóttir</b>
15:35	<i>Rikke Pedersen og Freysteinn Sigmundsson: InSAR study of the June 17th, 2000 earthquake, SISZ, Iceland: Preliminary results.</i>
16:05	<i>Grímur Björnsson, Kristján Sæmundsson og Ólafur G. Flóvenz: Vatnsborðsbreytingar í borholum í tengslum við Suðurlandsskjálftana.</i>
16:40	<i>Esther Hlíðar Jensen: Grjóthrun í Suðurlandsskjálftum 2000.</i>
17:15	<i>Hafþór Jónsson: Viðbrögð og aðgerðir almannavarna.</i>
17:50	<b>Ráðstefnuslit og léttar veitingar</b>

## Veggspjöld:

*Amy E. Clifton and Páll Einarsson: Styles of Surface Rupture Accompanying the June 17 and 21, 2000 Earthquakes in the South Iceland Seismic Zone*



# Efnisyfirlit

Amy Clifton & Páll Einarsson Styles of Surface Rupture Accompanying the June 17 and 21, 2000 Earthquakes in the South Iceland Seismic Zone . . . . .	1
Esther Hlíðar Jensen Grjóthrun í Suðurlandsskjálftum 2000 . . . . .	2
Grímur Björnsson, Kristján Sæmundsson og Ólafur G. Flóvenz. Vatnsborðsbreytingar í tengslum við Suðurlandsskjálftana í júní 2000 . . . . .	3
Hafþór Jónasson Viðbrögð og aðgerðir almannavarna . . . . .	6
Páll Einarsson & Amy Clifton Suðurlandsskjálftar 2000: Tektóniskt umhverfi - sprungur og yfirborðsummerki . . . . .	7
Rikke Pedersen & Freysteinn Sigmundsson InSAR study of the June 17th, 2000 Earthquake, SISZ, Iceland: Preliminary Results . . . . .	9
Ragnar Stefánsson, Páll Halldórsson og Gunnar B. Guðmundsson Eðli, áhrif og spár í ljósi sögulegra heimilda og jarðskjálftamælinga . . . . .	11
Þóra Árnadóttir, Halldór Geirsson, Bergur H. Bergsson, Jósef Hólmjárn, Erik Sturkell, Halldór Ólafsson, Rikke Pedersen, Páll Einarsson, Vala Hjörleifsdóttir, Christof Völksen, Markus Rennen og Guðmundur Valsson Jarðskorpuhreyfingar í kjölfar Suðurlandsskjálfta í júní 2000 . . . . .	13

## **Styles of Surface Rupture Accompanying the June 17 and 21, 2000 Earthquakes in the South Iceland Seismic Zone**

Amy Clifton, Nordic Volcanological Institute  
Páll Einarsson, Science Institute, University of Iceland

Two large earthquakes, M 6.5 and M 6.6, occurred on the 17 and 21 of June, 2000 respectively in the South Iceland Seismic Zone. This transform-type plate boundary has been relatively quiet since 1912, but 37 earthquakes have caused destruction in this area since 1164 AD. The roughly E-W trending zone, slightly oblique to the direction of plate motion, is experiencing left-lateral shear. However, most known surface rupture has been along north-striking, right-lateral strike-slip faults. Rupture from the June 2000 events follows a similar pattern. Although the two earthquakes had similar magnitude, fault plane solutions, and overall rupture lengths of 15 to 20km, the pattern of rupture from each was notably different in character. The 17 June event affected an area of interglacial lavas with a thick soil cover which ruptured along a series of NNE-trending, left-stepping fault segments giving the fault as a whole almost due N-trend. A few hundred meters away from the main rupture, a fault most likely related to an earthquake in 1784 shows little or no evidence of reactivation. New rupture is relatively straight and continuous at the largest scale, but gaps of more than 1 km occur in topographic lowlands. At the smallest scale, rupture style seems to vary with small-scale topography and ground texture. The 21 June event affected an area of both inter- and post-glacial lavas, partly underlain by a thick sediment layer. Surface rupture here is more complex and can be divided into three discrete segments. To the north, deformation is distributed across a zone of left-stepping fractures along which widening and subsidence have occurred. Fractures are up to 1 m wide at the surface and 2 m deep, cutting thick soil cover and narrowing downward. The central segment consists of right-stepping fractures defining a 2 km long, ENE trending zone. At the smallest scale, right-stepping S-shaped gashes up to 2.3 m wide, at least 5 m deep and up to 40 m long, are separated by push-up structures in the turf. Sense of shear is clearly left-lateral strike-slip. The southern segment trends NNE and consists of opening-mode fractures and sink-holes which bound a 40 m wide pre-existing graben structure. Fresh gashes in thick soil have maximum dimensions of 2 m width and 4 m depth. In several places along the rupture zones of both earthquakes it can be verified that the ruptures occurred along pre-existing faults. The observed faulting structures are similar to those of earlier earthquakes in South Iceland, both with regard to style and spatial arrangement. However, our observations suggest that some of the historical earthquakes may have been larger than the June 2000 events.

## Grjóthrun í Suðurlandsskjálftum 2000

Esther Hlíðar Jensen, Veðurstofu Íslands

Að beiðni Árborgar gerði Veðurstofa Íslands úttekt á hættu af völdum grjóthruns í Árnessýslu er tengdust jarðskjálftunum sem urðu 17. og 21. júní árið 2000.

Upplýsingum um grjóthrun var safnað frá almenningu með því að senda eyðublöð á þær sem spurt var um afleiðingar skjálftanna og þær meðtalið grjóthrun. Einnig var haft samband við Halldór G. Pétursson á Náttúrufræðistofnun Íslands, sem sér um skráningu annáls og þær fengust upplýsingar um grjóthrunsstæði og samantekt úr fölmiðum. Haft var samband við sveitarstjóra og/eða hreppstjóra og þeir beðnir að segja frá því, hvar grjót hefði hrunið.

Eftir að tekinn hafði verið saman listi með upplýsingum kom í ljós að grjóthrun hafði orðið nálægt byggð á nokkrum stöðum. Þeir voru: Sumarbústaðabyggð í Hestlandi, bærinn Mosfell undir Mosfelli, bærinn Stöðulfell undir Stöðulfelli, Ingólfssfjall og Klif í Vestmannaeyjum.

Farið var að Hestlandi, Mosfelli og Stöðulfelli dagana 27.-28. júlí. Mæld voru úthlaups-horn og staðsetning grjóts undir hlíðunum. Til hlíðsjónar var höfð greinargerð eftir Kristján Sæmundsson sem gerð var vegna grjóthruns í Hestlandi eftir jarðskjálftana 17. og 21. júni.

Í skjálftanum 21.júní skoppuðu steinar úr sætum sínum á jafnsléttu, í landi Hests við Hestfjall, þær sem upptök seinni skjálftans voru. Þetta er merki um að skjálftinn hafi yfirunnið þyngdarhröðunina. Mælingar Aflfræðistofu, Verkfræðistofnar Háskólans bentu til að þetta hefði aðeins verið á takmörkuðu svæði. Vegna þessa var meira laust grjót í brúnni en annars hefði verið. Þar af leiðandi var ályktað að hætta af völdum grjóthruns hefði aukist en aðeins við upptök seinni skjálftans.

## Vatnsborðsbreytingar í tengslum við Suðurlandsskjálftana í júní 2000

Grímur Björnsson, Kristján Sæmundsson og Ólafur G. Flóvenz.  
Orkustofnun, Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

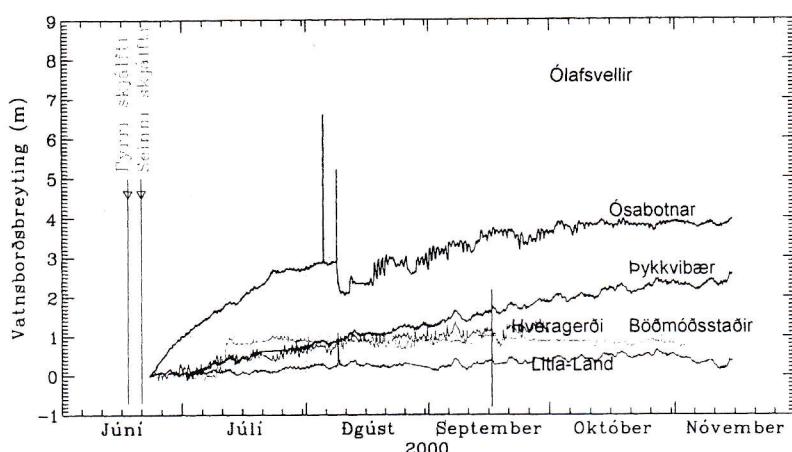
Strax á fyrstu klukkustundunum eftir að þjóðhátiðarjarðskjálftinn gekk yfir varð ljóst að verulegar breytingar hofðu orðið á þrýstingi í jarðhitakerfum víðs vegar um Suðurland. Strax að morgni 18. júní sendi Orkustofnun sveit manna til í könnunarleiðangur um Suðurland til að afla upplýsinga um þær breytingar sem urðu í kjölfar skjálftanna. Jafnframt voru sprungurnar sem mynduðust við jarðskjálftana kortlagðar í gráfum dráttum. Þetta var síðan endurtekið í kjölfar Hestfjallsskjálftans 21. júní.

Á Suðurlandi eru fjölmörg jarðhitasvæði, sem flest eru tengd ungum jarðskjálftasprungum. Þar eru hundruð borholna, flestar þó grunnar. Fjölmargar hitaveitur eru þarna, allt frá stórum veitum fyrir heil bæjar- eða sveitarfélög niður í veitum sem aðeins þjóna einum sveitabæ. Áhrif jarðskjálftanna á jarðhitakerfin urðu mjög misjöfn. Á mörgum stöðum féll þrýstingur og hitaveitur urðu vatnslausar en á öðrum stöðum jókst þrýstingur þannig að heitt vatn flæddi út um allt og olli skemmdum. Því miður voru óvíða til nákvæmar mælingar á vatnsborði fyrir skjálfana þannig að aðeins var unnt að leggja mat á það hvort þrýstingur hefði vaxið eða minnkað við skjálftana. Fljótlega kom í ljós að þrýstibreytingarnar sýndu ákveðið mynstur. Norðvestan og suðaustan við upptök skjálftanna jókst þrýstingur en norðaustan og suðvestan við upptökin féll þrýstingurinn. Út frá þrýstibreytingamynstrinu má draga tvö hornrétt plön sem skilgreina mörkin milli þrýstiaukningar og þrýstilækkunar. Annað planið liggur u.þ.b. norður-suður eftir heildarstefnu sprungnanna sem mynduðust á yfirborði en hitt liggur hornrétt þar á, þ.e. austur-vestur. Skurðpunktur þessara plana lendir nærrí upptakapunkti (episentrum) jarðskjálftanna samkvæmt staðsetningu Veðurstofunnar út frá jarðskjálftamælingum. Samkvæmt þessu má fá nákvæma staðsetningu á upptakapunkti stórra sniðgegnisskjálfta á Íslandi með mælingum á rennsli hvera og vatnsborði í borholum þar sem nóg er af þeim.

Jarðhitasvæðið á Flúðum er í beinu framhaldi af sprungunni sem myndaðist í skjálftanum 17. júní. Á borholum hitaveitunrar á Flúðum er mælibúnaður sem nemur þrýsting á borholum. Hann hefur verið í rekstri í um 5 ár. Gögnum er safnað sjálfvirkt með stuttu millibili inn í gagnasöfnunartæki þar sem þau eru geymd um stundarsakir áður en þau eru grisjuð verulega fyrir langtímageymslu. Við grisjunina tapast allar upplýsingar um stutta þrýstipúls. Í mælibúnaðinum er viðvörunarbúnaður sem sendir út aðvörun ef þrýstingur á borholum fellur niður fyrir tiltekið gildi. Þann 16. júní, um sólahring fyrir skjálftann, sendi kerfið á Flúðum frá sér viðvörun um þrýstifall, hið fyrsta frá upphafi að sögn heimamanna. Vegna fjarveru veitustjórans á Flúðum tókst ekki að ná gögnum í tæka tíð út úr tækinu áður en þau voru grisjuð þannig að við vitum ekki hvernig þessi þrýstipúls leit út. Ljóst er þó að hann kom og stóð stutt. Þarna gæti hafa verið um að ræða einhvers konar forboða þess sem í vændum var. Hvergi annars staðar á Suðurlandi var slík stöðug skráning í gangi nema á Selfossi þar sem mælingar eru verulega truflaðar af síbreytilegri vinnslu úr jarðhitakerfinu. Á Nesjavöllum, í Geldinganesi við Reykjavík og við Stykkishólm voru síritandi vatnsborðamælar í gangi þegar skjálftarnir riðu yfir. Glöggar þrýstibreytingar komu fram í holunum á Nesjavöllum og í Geldinganesi en sáust ekki í Stykkishólmi.

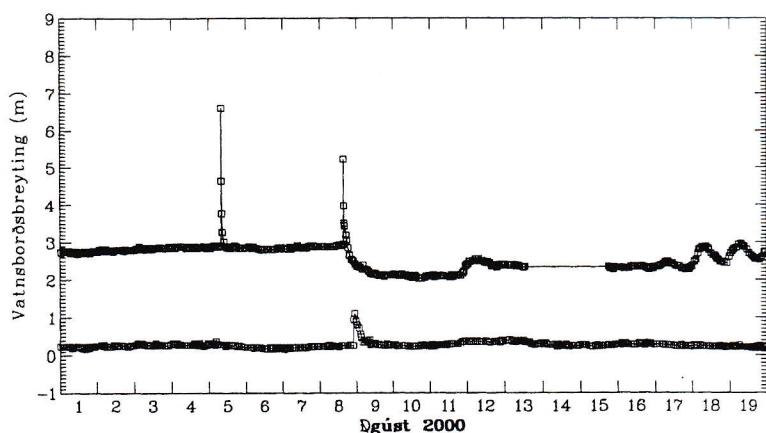
Dagana eftir jarðskjálftana mældi Orkustofnun vatnsborð og þrýsting í um 70 borholum á Suðurlandi. Þeim mælingum hefur verið haldið áfram síðan í völdum holum til að fylgjast með hvernig vatnsborðið nær jafnvægi að nýju.

Fyrir tilviljun voru 7 sjálfvirk gagnaskráningartæki til í fórum Orskustofnunar í lok júní. Þau höfðu verið keypt vegna verkefna fyrir viðskiptavini Orkustofnunar. Þessi tæki voru feginn að láni og sett upp í sjö borholum á Suðurlandi; í Þykkvabæ, Ólafsvöllum á Skeiðum, Böðmóðsstöðum í Biskupstungum, Ósabotnum norðan Selfoss, Ölfusdal ofan Hveragerðis, Litla-Landi í Ölfusi og í Krýsuvík. Tækin nema þrýsting í borholum á mínuðu fresti og senda gögnin símleiðis til Orkustofnunar þar sem þau eru birt á vefnum. Mynd 1 sýnir niðurstöður skráningar á þessum stöðum.



Mynd 1. Sískráð vatnsborð í völdum borholum á Suðurlandi

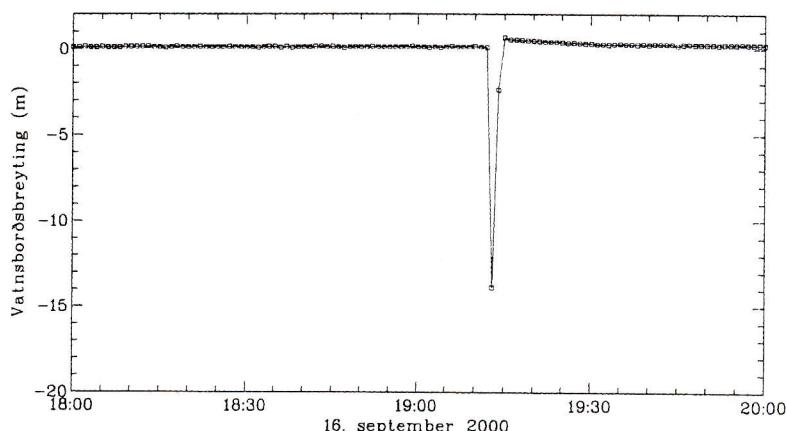
Sérstaka athygli vekja snarpir þrýstipúlsar í ágúst í Ósabotnum og á Litla-Landi í Ölfusi. Á mynd 2 hér fyrir neðan er búið að sérteikna vatnsborðsbreytinguna í þessum holum. Tvisvar rís vatnsborð mjög hratt í Ósabotnum (efri ferill) og 2 til 3 klukkustundum eftir síðari púlsinn hoppar vatnsborðið líka upp á Litla –Landi (neðri ferill). Svona breytingu er eðlilegast að skýra með einhvers konar spennutilfærslu í jarðskorpunni, tilfærslu sem verður án áberandi breytinga í skjálftavirkni eða í spennumælum Veðurstofunnar. Um sama leyti tóku grunnar hitastigulsholur á Laugarbökkum, vestan Ölfusár, að sjálfrenna.



Mynd 2. Þrýstipúlsar í jarðhitakerfunum í Ósabotnum (efri ferill) og Litla-Landi.

Mynd 3 sýnir síðan dæmi um verulegt þrýstifall í djúpri borholu í Þykkvabæ og síðan hraða jöfnun vatnsborðsins. Stendur viðburðurinn einungis í örfáar mínútum. Líklega er hér á ferðinni langmerkasta niðurstaða vatnsborðsskráninganna, fyrir þá sök að túlka má breytinguna sem merki um að berg var við það að brotna í næsta nágrenni holunnar þennan dag. Líklegt er að þrýstipúlsinn sem kom á Flúðum um kl 16:00 þann 16. júní, tæpum sólarhring áður en 17. júní skjálftinn dundi yfir, hafi verið þessu líkur.

Sem stendur er eftirfarandi hugmyndalíkan látið skýra svona breytingu. Skömmu áður (klukkustundum til dögum) áður en skjálfti verður er bergið í upptökum hans komið að þanmörkum og er að smábresta. Við það myndast nýtt porurúmmál sem gleypir vatn. Þrýstingur fellur snöggt við þetta og skilar þrýstibreytingin sér upp eftir lóðréttum sprungum í jarðhitakerfinu, sem fyrri skjálftar hafa myndað. Þar með fellur vatnsborðið í borholmum ofan við.



Þessar mælingar sýna jafnframt að ef pólitískur vilji er fyrir því að jarðvísindin skili jarðskjálftaspám, þá eru verulegar líkur á að fyrirboðar skjálfta komi fram í heitavatnsholum á Suðurlandi. Þar sem fyrirboðarnir sýnast mjög staðbundnir og snöggir, verður að setja upp talsvert margar mælistöðvar á Suðurlandi í þessum tilgangi. Stofnkostnaður hvers sírita er á bilinu 0,5 til 1 milljón og árlegur rekstrarkostnaður getur legið á bilinu 100 til 200 þúsund krónur.

## **Viðbrögð og aðgerðir almannavarna**

Hafþór Jónsson, aðalsviðsstjóri Almannavarna ríkisins

Skipulag og uppbyggingu almannavarna með áherslu á Suðurland. Þar verður sagt frá skipan, skyldum og ábyrgð almannavarnanefnda og Almannavarna ríkisins. Einnig verður útskýrð skipting Suðurlands í björgunarsvæði og staða og skipan vettvangsstjóra skýrð.

Næst ræði ég stuttlega um neyðaráætlanir almannavarna, bæði almennar áætlanir og einnig séráætlanir vegna jarðskjálfta og geri grein fyrir stigskiptingu aðgerða.

Að lokum fjalla ég um helstu aðgerðir og áherslur almannavarna í jarðskjálftunum

17. og 21.júní og reyni að draga upp mynd af heildarferli þeirrar atburðarásas sem fyrst og fremst miðar að því að upplýsa íbúa svæðisins, veita leiðbeiningar og ráð-leggingar, staðsetja skemmdir og veita lífsbjargandi aðstoð eftir þörfum.

Í erindi mínu styðst ég við lögum um almannavarnir, neyðar- og séráætlanir almannavarna, skipulag vettvangsstjórnar og drög að aðgerðaskýrslu um atburðarás jarðskjálftanna í júní s.l. Ég kem til með að nota glærur mér til stuðnings við flutning erindisins

## **Suðurlandsskjálftar 2000: Tektónískt umhverfi — sprungur og yfirborðsummerki**

Páll Einarsson, Raunvísindastofnun Háskólangs, Höfsvallagötu 53, 107 Reykjavík  
Amy Clifton, Norrænu eldfjallastöðinni, Grensásvegi 50, 108 Reykjavík

Jarðskjálftabeltið á Suðurlandi er hluti flekaskila Atlantshafsins sem liggja yfir landið. Flekaskilin greinast við Hengilsþrípunktinn og norðan hans á gliðnun sér stað um tvö samsíða gosbelti. Skjálftabeltið markar því flekaskil milli Evrasíuflekans og flekans milli gosbeltanna, Hreppaflekans. Afstæð hreyfing um þennan hluta flekaskilanna er ekki fullkomlega þekkt vegna óvissra og jafnvel breytilegra áhrifa vestra gosbeltisins. Flest bendir þó til þess að beltið hafi A-V stefnu og að hreyfingin um það sé vinstri skúfhreyfing. Einstakir skjálftar eiga hins vegar upptök á misgengjum með N-S strikstefnu og tengjast hægri-handar sniðgengishreyfingum. Hreyfifræðilegt líkan til að skýra þessa afstöðu sprungna og flekaskila hefur stundum verið kennt við bókahillu (Freysteinn Sigmundsson og Páll Einarsson, 1996).

Stórir jarðskjálftar á Suðurlandi hafa oft komið í runum eða hviðum þar sem upptökin dreifast um skjálftasvæðið. Auk hviðanna koma líka stakir skjálftar og hrinur með upptök við enda svæðisins, bæði austan- og vestanmegin. Helstu þekktu hviður á sögu-legum tíma eru 1294, 1339, 1389-91, 1630-33, 1732-34, 1784 og 1896 (Einarsson o.fl., 1981). Runur virðast oftast byrja austan til á svæðinu en síðan færist virknin vestar. Runur hafa staðið frá tveimur dögum og upp í þrjú ár. Stærstu skjálftar hafa verið í kringum 7 stig að stærð (Stefánsson and Halldórsson, 1988, Stefánsson o. fl., 1993). Bíist hefur verið við slíkri skjálftarunu á Suðurlandi nú um nokkurt skeið (Páll Einarsson, 1985, Stefánsson o. fl., 1993) á grundvelli þessarar forsögu.

Skjálftarunan 2000 hófst 17. júní með skjálfta að stærð 6,5. Upptökin voru í efri hluta Holta. Skjálftanum fylgdi skjálftavirkni vestur eftir flekaskilunum, allt vestur í Núpshlíðarháls á Reykjanesskaga. Annar megin-skjálfti varð 21. júní. Hann var álíka stór og sá fyrri og átti upptök um 20 km vestar, í Flóa og Grímsnesi. Brotlausnir beggja megin-skjálftanna sýna sniðgengishreyfingar og eftirskjálftar raða sér eindregið á N-S belt. Skjálftarnir tengjast því hægri handar sniðgengishreyfingum á N-S misgengjum og staðfesta þar með þá mynd sem fengist hefur við könnun á ummerkjum eftir fyrri skjálfta á svæðinu.

Sprungur komu víða fram á yfirborði í tengslum við jarðskjálftana. Stærstu sprungurnar voru á upptakasvæðunum tveimur og fer staðsetning þeirra vel saman við dreifingu eftirskjálfta. Sprungurnar mynda yfirleitt skástíg kerfi og gefa viðbendingu um sniðgengishreyfingar. Skástígnin kemur fram á mörgum lengdarskölum, allt frá sentimetrum til kílómetra. Sprunguhólar koma víða fram þar sem sprungur hliðrast innan skástígs kerfis. Langflest kerfin hafa norðlæga stefnu og sýna hægri handar færslu, en á nokkrum stöðum sést einnig vinstri handar færsla á vensluðum sniðgengjum. Vensluðu sniðgengin eru víðast tengd stöðum þar sem sprungustykki hliðrast til. Stærsta venslaða sniðgengið er við Skeiðavegamótin. Þar er um 2 km langt venslað misgengi með ANA strikstefnu sem fylgir þjóðvegi 1 og sker hann á nokkrum stöðum.

Þar sem hægt er að sjá misgengisfærsluna er hún á bilinu 0.1-1 m. Sums staðar má þó sjá gjár sem eru víðari en það. Erfitt er að meta heildarfærsluna yfir misgengið því hún er oft dreifð á nokkrar samsíða sprungur og svæðið milli þeirra.

Misgengishreyfing í báðum skjálftunum varð á gömlum misgengjum, þ.e. misgengjum sem höfðu áður haggast og verið kortlögð að hluta fyrir skjálftana. Þau voru ekki nýjustu misgengin á svæðinu. Misgengi í nágrenninu voru mun fersklegri. Skjálftinn 17. júní varð þannig á misgengi sem er innan við 1 km austan við misgengi sem líklega hrökk í stóra skjálftanum 1784.

Allvíða fundust ummerki um háa hröðun á yfirborði, svo sem steinar sem höfðu snúist við eða færst úr stað. Grjóthrun úr hlíðum varð á furðulega stóru svæði, allt vestur á Núpshlíðarháls. Viða varð umrót í lausum jarðlögum, einkum þar sem mýrar mæta klapparholtum. Ummerki eftir sandgos fundust á einum stað. Á Skeiðunum varð nokkurt umrót í sprungum sem voru virkar í jarðskjálftunum 1896. Jarðvegsfyllur hrundu ofan í sprungurnar en ekki fundust ummerki um hliðrun. Ef ummerki um skjálftana 2000 eru borin saman við ummerki eftir eldri skjálfta má álykta að sumir eldri skjálftanna, t. d. 1630, 1896 og 1912, hafi verið stærri en þeir sem nú urðu.

### Tilvitnanir:

Einarsson, Páll. Jarðskjálftaspár , Náttúrufræðingurinn, 55, 9-28, 1985.

Einarsson, Páll, Sveinbjörn Björnsson, G. Foulger, Ragnar Stefánsson and Þórunn Skaftadóttir. Seismicity pattern in the South Iceland seismic zone, in: Earthquake Prediction - An International Review (eds. D. Simpson and P. Richards). American Geophys. Union, Maurice Ewing Series 4, 141-151, 1981.

Sigmundsson, Freysteinn, og Páll Einarsson. Jarðskjálftabeltið á Suðurlandi: Jarðskorpuhreyfingar 1986 - 1992 ákvarðaðar með GPS landmælingum. Náttúrufræðingurinn, 66, 37-46, 1996.

Stefánsson.R., and P. Halldórsson. Strain release and strain build-up in the South Iceland seismic zone. Tectonophys., 155, 267-276, 1988.

Stefánsson, Ragnar, Reynir Böðvarsson, R. Slunga, Páll Einarsson, Steinunn Jakobsdóttir, H. Bungum, S. Gregersen, J. Havskov, J. Hjelme, H. Korhonen. Earthquake prediction research in the South Iceland seismic zone and the SIL project, Bull. Seismol. Soc. Am., 83, 696-716, 1993.

## InSAR study of the June 17<sup>th</sup>, 2000 Earthquake, SISZ, Iceland: Preliminary Results

Rikke Pedersen and Freysteinn Sigmundsson, Nordic Volcanological Institute  
rikke@norvol.hi.is, fs@norvol.hi.is

Interferometric analysis of Synthetic Aperture Radar images (InSAR) acquired by the ERS1 and ERS2 satellites has proven to be a valuable tool in studying deformation of the Earth's surface. Good results have been obtained within several areas of Iceland (Feigl et al., 2000; Massonnet and Sigmundsson, 2000; Sigmundsson et al., 1997; Vadon and Sigmundsson, 1997). Here we present the first InSAR observations of deformation due to a large earthquake in Iceland.

We have conducted an InSAR study of the southern part of the Eastern Volcanic Zone. A series of 18 interferograms (from 10 SAR images), from frame 2313 of track 52 of the ERS satellites, have been analysed. The images span the time interval 03/08/1993 to 29/09/2000. The frame covers a 110 km by 125 km area and includes the Eastern Volcanic Zone south of Vatnajökull. It also covers the easternmost part of the South Iceland Seismic Zone. The interferogram series holds both pre-seismic, co-seismic and post-seismic image-pairs. Several independent image pairs covers approximately the same time-intervals and allow consistency check of the observed results.

A significant deformation signal appears near the western margin of the frame, in an area eastnortheast of the Hella village, in interferograms covering the June earthquakes. The observed deformation fringes are located east of the June 17<sup>th</sup> rupture, but our interferograms do not cover the area west of the rupture. Modelling shows that the signal observed must be produced primarily by the June 17<sup>th</sup> earthquake, but not the June 21<sup>st</sup> earthquake. The signal covers an area measuring approximately 30 km NS and 15-20 km EW. At least six fringes are observed. Each fringe corresponds to a change in range from ground to satellite of 2.83 cm; six fringes amount to about 17 cm of range change. The interferograms provide only a measure of the range change, which equals the projection of a three-dimensional displacement vector on to the unit vector pointing in the direction from ground to satellite. In our interferograms the unit vector is [0.442, -0.116, 0.889] in east, north and up components. Displacement components perpendicular to the unit vector can not be measured with InSAR. As a result we poorly resolve north-south displacements that dominate the displacement field during a strike-slip earthquake on a north-south oriented fault. Our interferograms are most sensitive to the secondary east, and vertical, displacement components.

Forward search of a best-fitting model has been conducted. A rectangular fault patch, in an elastic half space has been assumed. Location of the center of the fault plane was in the modelling fixed to coincide with the earthquake epicenter (63.976N, 20.370W). The length of the fault plane was fixed to 16 km. The fault plane extends from the surface to a depth that was evaluated through the modelling. The modelling shows that the results are very sensitive to the depth extent of the rupture, and our preferred model has slip occurring to a depth of about 15 km. Our results also show that distributed slip, rather than uniform, is required to create the deformation pattern observed, with maximum slip near the centre of the fault, and less slip near its ends. A preliminary model for distribution of slip along the 16-km long model fault plane was provided by Kristján Ágústsson (personal communication, 2000), based on modelling of data from the network of borehole strainmeters in South Iceland. The model from strain data has 1.9

m of slip on a segment extending symmetrically along strike from the centre to 2.56 km distance, 0.9 m of slip from 2.56 km to 5.33 km distance, and 0.15 m of slip from 5.33 km to 8 km distance from the centre. This slip distribution fits well with our observations, but only if the depth of rupture extends to 15 km depth. Good constraints on the fault strike and vertical slip-component were difficult to obtain through the modelling, since a trade off exists between the two parameters.

Geometric moment (slip x fault area) for our preferred model is  $2.3 \times 10^8$  m<sup>3</sup>, giving a seismic moment,  $M_0 = 6.9 \times 10^{18}$  Nm, if Earth's shear modulus is assumed to equal 30 GPa. This corresponds to an earthquake moment magnitude,  $M_w = 6.5$ , assuming the relation  $M_w = (2/3) \times \log M_0 - 10.7$ , used by the USGS National Earthquake Information Center.  $M_0$  is here the scalar moment in dyne-cm. Our inferred model with rupture extending down to 15 km depth seems therefore consistent with the seismically estimated 6.5 moment magnitude for the earthquake.

Further work is required. Interferograms from the adjacent ERS-track (frame 2313, track 95) covering the whole of the SISZ (the area to the west of our interferograms) are anticipated to improve constraints on the deformation field. However, loss of signal coherence is anticipated over large areas of the SISZ, based on experience with interferograms in the area covering 1993-1999. If successful, the co-seismic interferograms from frame 2313, track 95 will be important in resolving well the strike of the June 17<sup>th</sup> fault, its vertical slip-component, and distribution of slip on the fault plane. These interferograms will also cover the area affected by the June 21<sup>st</sup> earthquake. Joint interpretation of InSAR, GPS and strain data has the potential to provide a very detailed image of the June 2000 earthquakes.

#### References:

- Feigl, K. L., J. Gasperi, F. Sigmundsson and A. Rigo, Crustal deformation near Hengill volcano, Iceland 1993-1998: coupling between magmatic activity and faulting inferred from elastic modeling of satellite radar interferograms, *J. Geophys. Res.*, 105, 25655-25670, 2000.
- Massonnet, D. and F. Sigmundsson, Remote sensing of volcano deformation by radar interferometry from various satellites, In: *Remote Sensing of Active Volcanism*, Editors: P. J. Mouginis-Mark, J.A. Crisp & J. H. Fink, *Geophysical Monograph*, 116, 207-222, 2000.
- Sigmundsson F., H. Vadon, and D. Massonnet, Readjustment of the Krafla spreading segment to crustal rifting measured by satellite radar interferometry, *Geophys. Res. Lett.*, 24, 1843-1846, 1997.
- Vadon H., and F. Sigmundsson, Crustal deformation from 1992-1995 at the Mid-Atlantic Ridge, SW Iceland, mapped by satellite radar interferometry, *Science*, 275, 193-197, 1997.

## Eðli, áhrif og spár í ljósi sögulegra heimilda og jarðskjálftamælinga

Ragnar Stefánsson, Páll Halldórsson og Gunnar B. Guðmundsson.

Í ljósi þess mikla tjóns sem þekkt er í Suðurlandsskjálftum á sögulegum tíma, má segja að jarðskjálftafræðingar og jarðfræðingar hafi gert þá kröfu til sjálfssín að geta í framtíðinni, og það sem fyrst, svarað eftirfarandi spurningum:

- 1) Hvernig verða áhrifin af næsta Suðurlandsskjálfta, hvað verða þau mikil?
- 2) Hvar á svæðinu verður næsti stóri skjálfti, og það nákvæmlega?
- 3) Hvenær verður hann, og þá fyrst og fremst með tilliti til þess að geta varað við þannig að komi að gagni, sem sagt með skömmum fyrivara?

Þau svör sem jarðvísindamenn hafa gefið við þessum spurningum hafa mörg, eins langt og þau ná, verið staðfest í jarðskjálftunum í sumar. En þessir jarðskjálftar hafa líka veitt upplýsingar um eðli Suðurlandsskjálftabeltisins sem eiga eftir að gera jarðvísindamönnum kleift að svara þeim miklu betur en áður.

Jarðskjálftinn 17. júní varð á norður suður sprungu, eins og búist var við, á stað þar sem margt benti til að næsti stóri skjálfti mundi verða. Samkvæmt mati á sögulegum heimildum um áhrif jarðskjálfta á Suðurlandi vantaði einmitt jarðskjálfta þarna. Það sama átti við um jarðskjálftann 21. júní, að hann varð á stað þar sem vantaði útlausn samkvæmt slíku mati.

Jarðskjálftarnir fólu báðir í sér hægri handar sniðgengi á norður suður sprungum, sem voru u.p.b. 15 km langar, og sprunguflöturinn náði frá yfirborði og niður á 10 km dýpi. Meðal sniðgengisfærslan eftir sprunguflótum skjálftanna var rúmlega metri. Neðarlega í skorpunni virðast sniðgengisfletirnir beinir. Efitrskjálftarnir benda þó til ójafnar hreyfingar um sprunguflétina.

Sprungur á yfirborði voru miklar og mynda í heild norður suður línur, sem eru talsvert lengri en misgengissprungurnar niðri í jarðskorpunni.

Mestu mæld yfirborðsáhrif á hröðunarmælum Aflfræðistofu Háskóla Íslands voru yfir 84% af þyngdarhröðun jarðar (lárétt hröðun), við við vesturstöpul á Þjórsárbrú (siðari skjálfti). Að Sólheimum í Grímsnesi mældist hröðun 71% af g og að Hellu 47% af g, svo þéttbýlisstaðir séu nefndir.

Ekkert af þessu kemur sérstaklega á óvart miðað við það sem menn höfðu gert ráð fyrir varðandi þessa skjálfta.

Samt sem áður geta rannsóknir og líkanagerð af þessum skjálftum og áhrifum þeirra haft gífurlega mikla þýðingu til að túlka á nýjan leik sögulegar heimildir og jarðskjálftamælingar, til að geta svarað ofannefndum spurningum betur en hingað til hefur verið unnt. Rannsóknir á skjálftunum er bara rétt að hefjast.

Jarðskjálftinn 17. júní kom án viðvrunar. Eftir á að hyggja komu samt í ljós ýmsar breytingar sem í framtíðinni geta orðið lykill að skammtímoviðvörunum, ef unnt verður að túlka þær rétt. Í þessu sambandi eru sérstaklega mikilvægir örsmáir jarðskjálftar, kringum 0 á Richterkvarða, sem röðuðu sér neðst á brotalínu stóra skjálftans vikurnar á undan. Ýmiss konar aðrar breytingar komu fram á stóru svæði á undan skjálftanum sem hugsanlegt er að tengja megi við hann, þótt það samhengi sé ekki enn þá vel skilið. Slíkt vekur bjartsýni um að skammtímoviðvörun verði möguleg í framtíðinni.

Það var hins vegar sagt fyrir um síðari skjálftann með þeim hætti að gagnlegt þótti. Einum sólarhring fyrir skjálftann var Almannavörnum ríkisins og í héraði sagt að miklar líkur væri á að bresta mundi á jarðskjálfti af svipaðri stærð og sá fyrsti eða minni, á norður suður línu, á þeim stað sem upptökin reyndust svo vera. Ekki var gefin upp tími, en Almannavarnir hvattar til að undirbúa sig undir að skjálfti gæti brostið á hvenær sem væri innan skamms tíma.

Eitt það merkilegasta við þessa skjálfta var að mikil skjálftavirkni hófst á svæði allt að 90 km til vesturs og norðurs frá skjálftanum 17 júní, starx í kjölfar hans. Það er því líkast sem á mörgum sprungum á þessu stóra svæði hafi spenna verið nálægt brotmörkum og hnik varð víða á þeim, eins og líka kom fram í vatnsbreytingum og mældum landbreytingum.

Vægi (móment) jarðskjálftanna tveggja er samanlagt um  $10\text{exp}19$  NM. Upphlaðið vægi á svæðinu út frá plótuhréyfingu mundi vera frá því um aldamótin 1900 4-5 sinnum  $10\text{exp}19$  NM. Út frá því virðist sem skjálftarnir í sumar hafi einungis leyst úr læðingi tæplega fjórðung upphlaðins vægis, enda taka þeir aðeins til lítils hluta svæðisins.

Verkefni jarðvísindamann eru margvísleg í kjölfar þessara skjálfta. Eitt það mikilvægasta er að kortleggja sprungur niðri í jarðskorpunni með smáskjálftamælingum með þeirri tækni sem við nú ráðum yfir í túlkun mælinga frá SIL kerfinu. Fram að skjálftunum í sumar var afar lítið um skjálfta á þessu svæði. Þeir voru að mestu við botninn á brotgjörnu skorpunni og náðu lítið sem ekkert upp í sprungur, þannig að unnt yrði að kortleggja þær. Í kjölfar skjálftanna varð hnik á fjölmögum sprungum sem nú er unnt að kortleggja. Þekking á þessum duldu sprungum hefur mikið að segja við val á byggingarstæðum, eins og önnur sprungukortlagning, þar sem skjálftaáhrifin eru langmest yfir sprungunum.

Annað verkefni sem mikil áhersla hefur verið lögð á er að nýta skjálftana í sumar og forvirkni þeirra til að freista þess að veita viðvörun fyrir hugsanlegan næsta skjálfta.

## Jarðskorpuhreyfingar í kjölfar Suðurlandsskjálfta í júní 2000

Póra Árnadóttir<sup>1,2</sup>, Halldór Geirsson<sup>1</sup>, Bergur H. Bergsson<sup>1</sup>, Jósef Hólmjárn<sup>1</sup>, Erik Sturkell<sup>2</sup>, Halldór Ólafsson<sup>2</sup>, Rikke Pedersen<sup>2</sup>, Páll Einarsson<sup>3</sup>, Vala Hjörleifsdóttir<sup>3</sup>, Christof Völksen<sup>4</sup>, Markus Rennen<sup>4</sup> og Guðmundur Valsson<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Veðurstofa Íslands, Bústaðavegi 9, 150 Reykjavík

<sup>2</sup> Norræna eldfjallastöðin, Grensásvegi 50, 108 Reykjavík

<sup>3</sup> Raunvísindastofnun Háskólags, Hofsvallagötu 53, 107 Reykjavík

<sup>4</sup> Landmælingar Íslands, Stillholti 16-18, 300 Akranesi

Samfelldar landmælingar með GPS tækni fara fram á vegum Veðurstofu Íslands. Mælanetið kallast ISGPS og hófust mælingar á Hengils- og Ölfussvæði vorið 1999 (Póra Árnadóttir o.fl., 2000). Í október 1999 voru settir upp tveir mælar sunnan við Mýrdalsjökul og í maí 2000 hófust samfelldar GPS mælingar sunnan Eyjafjallajökuls. Stöð í Vestmannaeyjum hóf mælingar í júlí 2000, og nýjasta stöðin var sett upp á Skrokköldu í október 2000. Stöðvarnar skrá merki frá GPS gervitunglum á 15 s fresti og nær tölva á Veðurstofu Íslands í gögnin frá stöðvunum einu sinni á sólarhring. Þar er unnið sjálfvirkt úr gögnunum með hugbúnaði frá háskólanum í Bern og frumniðurstöður eru birtar á vefnum nokkrum klukkustundum síðar. Vefsíðan er: <http://www.vedur.is/ja/gps.html>. Lokaúrvinnsla gagna fer fram u.p.b. 2 vikum síðar, þegar nákvæmar brautir gervitunglanna hafa verið reiknaðar af Center for Orbit Determination in Europe (CODE). Niðurstöður mælinganna eru sýndar sem færslur í þremur víddum miðað við fasta stöð í Reykjavík, sem fall af tíma. Stöðin í Reykjavík (REYK) er rekin af Þjóðverjum og er hluti af alþjóðlegu GPS neti.

ISGPS stöðvarnar eru tugi kílómetra frá upptökum stærstu skjálftanna á Suðurlandi í júní, 2000, en netið mældi engu að síður færslur sem rekja má til jarðskjálftanna. Þann 17. júní mældist stærsta færslan á Vogsósum (VOGS) við Selvog, en þann 21. júní varð mesta færslan á Ölkelduhálsi (OLKE).

Litlar færslur mældust í Hveragerði (HVER), sem er aðeins um 5 km SA við OLKE, og bendir það til að færsla á OLKE stafi af staðbundnum hreyfingum næri stöðinni. Allar þessar stöðvar eru vestan við upptök stærstu skjálftanna. Jarðskorpuhreyfingar mældust einnig á stöðvunum sunnan Eyjafjalla- og

Mýrdalsjökuls, en virðast vera annars eðlis en í netinu vestanverðu. Þessar stöðvar sýndu hraðar breytingar til vesturs og norðurs u.p.b. 10 dögum fyrir skjálftann 17. júní, en síðan hæga hreyfingu til austurs og suðurs næstu vikur á eftir.

Þann 17. júní, 2000, mældist færsla á VOGS, sem nemur 2 cm í austur og 1 cm í suður, á innan við sólarhring. Þetta er meiri færsla er mældist allt fyrsta árið á VOGS (Póra Árnadóttir o.fl., 2000).

Í kjölfar stærsta skjálftans 17. júní varð veruleg skjálftavirkni um allt Suðurland og vestur á Reykjanes. Líklegt er að færslan á VOGS stafi af hreyfingum á sprungu sem kortlöggð hefur verið norðan Vogsósa (Pálmi Erlendsson og Páll Einarsson, 1996). Skjálftavirkni jókst á svæðinu frá Vogsósum að norður-enda sprungunnar, en þar varð stærsti skjálftinn á þessu svæði, ML 3.4, aðfaranótt 18. júní. Staðsetningar skjálfta og tilfærsla VOGS benda því til að sprungan nái lengra í suður en hún hefur verið kortlöggð á yfirborði. Athyglisvert er að hreyfing VOGS í austur virðist hafa hægt á sér í ágúst 1999, en verða hraðari aftur eftir skjálftana í júní 2000.

Hafist var handa við GPS netmælingar á Suðurlandi í kjölfar skjálftanna. Hópur frá

Norrænu eldfjallastöðinni og Raunvísindastofnun Háskóla Íslands hóf mælingar 19. júní, og menn og tæki frá Landmælingum Íslands bættust í hópinn 22. júní. Sex stöðvar voru mældar á upptakasvæði skjálftans 17. júní fyrir seinni skjálftann, 21. júní. Þessar stöðvar voru mældar á ný eftir seinni skjálftann. GPS netið á Suðurlandi var áður mælt árið 1995 og aftur að hluta til árið 1999.

Úrvinnslu netmælinganna frá júní 2000 er nú að mestu lokið. Stöðvarnar sex, sem náðist að mæla fyrir seinni skjálftann, sýna allar færslu til suðurs miðað við Reykjavík, í tengslum við skjálftann. Þær eru allar austan við upptökin og færslustefnan því í samræmi við hægri handar sniðgengishreyfingu á N-S sprungu. Mat á færslu á punktum í GPS netinu á Suðurlandi fæst með samanburði við eldri mælingar. Vinna þarf á ný úr GPS gögnunum frá 1995 en því verki er ólokið. Búast má við að færslur á GPS netinu frá 1995 til 2000 séu flóknar þar sem um er að ræða merki frá tveimur stórum jarðskjálftum með stuttu millibili auk plötuhreyfinga á tímabilinu.

### Tilvitnanir:

Pálmi Erlendsson og Páll Einarsson, The Hvalhnúkur Fault, a strike-slip fault mapped within the Reykjanes Peninsula oblique rift, Iceland. In: Seismology in Europe (Ed. B. Thorkelsson et al.), European Seismological Commission, Reykjavík, p. 498-504, 1996.

Þóra Árnadóttir, Halldór Geirsson, Bergur H. Bergsson og Christof Völksen, The Icelandic continuous GPS network - ISGPS, March 18, 1999 - February 20, 2000, Rit Veðurstofu Íslands,

VÍ-R00002-JA02, Veðurstofa Íslands, Reykjavík, 2000.