



ORKUSTOFNUN  
Jarðhitadeild

**Upptakagreining smáskjálfta á  
Nesjavöllum í ársbyrjun 1995**

Sigurður Th. Rögnvaldsson  
Grímur Björnsson

Unnið fyrir Hitaveitu Reykjavíkur

OS-95034/JHD-05      Reykjavík, júní 1995



**ORKUSTOFNUN**  
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verknr. 630 009  
/os/pi/jhd.os/skjalfiti/nesjav.t

## **Upptakagreining smáskjálfta á Nesjavöllum í ársbyrjun 1995**

Sigurður Th. Rögnvaldsson  
Grímur Björnsson

Unnið fyrir Hitaveitu Reykjavíkur

OS-95034/JHD-05      Reykjavík, júní 1995

ISBN 9979-827-59-9



## Ágrip

Í júní 1994 hófst mikil skjálftahrina á austanverðu Hengilssvæðinu, norður af Hvera-gerði, og stendur enn. Reglubundin úrvinnsla Veðurstofunnar sýnir að hluti skjálftanna á upptök sín í og nærri vinnslusvæði Hitaveitu Reykjavíkur á Nesjavöllum. Skoðun 91 skjálfta frá fyrstu þremur mánuðum ársins 1995 benti í fyrstu túlkun til þess að þeir ættu sér upptök á línu sem liggur frá Hagavíkurvöllum í suðaustri að holu NJ-16 í norð-vestri. Nákvæmir útreikningar á innbyrðis staðsetningu skjálftaupptaka leiða hins vegar í ljós að flestir skjálftarnir tilheyra þremur þyrpingum. Þær koma fram undir holu NJ-11 á Nesjavöllum, undir Hagavíkurvöllum og undir Stangarhálsi. Þyrpingin við holu NJ-11 er á um 7 km dýpi en hinar tvær á um 3 km dýpi. Stærsti skjálftinn á tímabilinu var af stærðinni 2,5 á Richter kvarða og tilheyrir þyrpingunni undir holu NJ-11. Almennast skjálftar á 2-4 km dýpi austan við Nesjavelli. Hins vegar dýpkar á skjálftana er kemur inn í virka gosbeltið og ná þeir allt niður á 9 km dýpi.

Hægt er að fella hallandi brotflöt gegnum skjálftaþyrpinguna undir Stangarhálsi og einnig gegnum þyrpinguna undir Hagavíkurvöllum. Brotfletirnir benda til þess að skjálftarnir hafi orðið við sniðgengishreyfingu á austlægu broti undir Hagavíkurvöllum og á norðlægu broti undir Stangarhálsi. Niðurstöðurnar eru ekki óyggjandi vegna lítillar dreifingar skjálftanna og óheppilegrar afstöðu skjálftamæla til Nesjavallasvæðisins. Ekki er hægt að ákvarða slíkt brotplan fyrir þyrpinguna undir holu NJ-11 en brotlausn stóra skjálftans sem varð þarna bendir til hreyfingar á siggengi sem hefur strik 20° og halla um 70° til austurs.

Nákvæm upptakagreining jarðskjálfta á Nesjavallasvæðinu sýnir að smávægilegar brota-hreyfingar hafa náð upp í jarðhitakerfið. Því má ætla að nákvæmar skjálftamælingar gagnist við eftirlit með innra ástandi svæðisins í framtíðinni. Hins vegar eru Nesjavellir í útjaðri núverandi skjálftanets Veðurstofunnar og torveldar það úrvinnslu skjálftagagna. Hægt er að auka til muna upptakanákvæmni skjálfta á svæðinu með því að bæta við skjálftamæli nærri Nesjavöllum.

## Efnisyfirlit

Ágrip . . . . .	3
Efnisyfirlit . . . . .	4
Myndaskrá . . . . .	4
1. Inngangur . . . . .	5
2. Staðsetning jarðskjálfta með innbyrðis og altækum aðferðum . . . . .	6
3. Skjálftar á Nesjavöllum . . . . .	6
4. Tölulegar upplýsingar um skjálftaupptök . . . . .	8
5. Brotahreyfingar í smáskjálftaþyrpingunum þremur . . . . .	10
6. Tenging smáskjálfta og jarðhita . . . . .	12
7. Niðurstöður og umræða . . . . .	15
Þakkir . . . . .	16
Heimildir . . . . .	16
English summary . . . . .	17

## Myndaskrá

1: Upptök skjálfta á Nesjavöllum fyrir og eftir nákvæma upptakagreiningu	7
2: N-S og A-V dýptarsnið skjálftanna á mynd 1B	8
3: Ýmsar tölulegar staðreyndir um skjálfta á Nesjavöllum í ársbyrjun 1995	9
4: Upptök skjálfta í þyrpingunni undir Hagavíkuvöllum	10
5: Upptök skjálfta í þyrpingunni undir Stangarhálsi	11
6: Staðsetning skjálfta á Nesjavöllum og áætlaðar sprunguhreyfingar	13

## 1. Inngangur

Undanfarin ár hefur ör þróun átt sér stað í tækni og aðferðum við að staðsetja jarðskjálfta hérlendis. Allmargar stafrænar mælistöðvar eru nú þegar í fullum rekstri og senda þær upplýsingar um skjálfta beint til móðurtölvu á Veðurstofu Íslands. Á Veðurstofunni fer fram sjálfvirk úrvinnsla mælinganna sem lýkur með fyrsta mati á upptökum, stærð og broteðli skjálfta sem verða innan mælanetsins. Niðurstöður sjálfvirku úrvinnslunnar eru síðan yfirfarnar og endurbættar af skjálftafræðingum Veðurstofunnar. Stafræna mælanetið er í daglegu tali nefnt SIL kerfið og er því lýst m.a. í greinum eftir Ragnar Stefánsson o.fl. (1993) og Reyni Böðvarsson o.fl. (1995). Eftir tilkomu kerfisins næst að mæla og staðsetja margfalt fleiri skjálfta en áður og fæst þannig aukin þekking á brotahreyfingum Suðurlandsundirlendisins.

Samhliða framförum í tækninni við að mæla skjálftahreyfingar hafa einnig orðið miklar framfarir í úrvinnslu mæligagna. Slíkt hefur leitt til mjög nákvæmrar ákvörðunar á innbyrðis staðsetningum skjálfta sem verða í hrinum á litlum svæðum. Þannig má ætla að innbyrðis nákvæmni í staðsetningu skjálfta sé oft innan við 10 m. Slík nákvæmni leiðir til þess að á stundum má fella plön gegnum skjálftaupptökin og ákvarða þannig stefnu og halla brotsins sem olli skjálftunum. Ætla má að slíkir brotflötir séu vatnsleiðandi. Því getur vitneskjan um tilurð þeirra haft þýðingu fyrir þá sem hyggja að vatnsvinnslu úr jörðu á skjálftasvæðunum.

Vinnslusvæði Hitaveitu Reykjavíkur á Hengilssvæðinu eru í vesturjaðri stafræna skjálfta-mælakerfisins. Í júní 1994 hófst mikil skjálftahrina suðaustan við vinnslusvæðin. Hrina þessi er venjulega kennd við Hveragerði. Þegar þetta er ritað er enn mikil virkni á svæðinu og er yfirstandandi hrina líklega sú mesta sem þar hefur orðið í nokkra áratugi. Skoðun skjálftaupptaka í fyrstu mánuðum hrinunnar sýnir að miðja brotahreyfinganna er skammt austan við Ölkelduháls, nærri Tjarnarhnjúk (Grímur Björnsson og Sigurður Th. Rögnvaldsson, 1995). Auk þess urðu skjálftar víða á Hengilssvæðinu, þar á meðal inni á Nesjavöllum.

Þessi skýrsla er unnin að beiðni Hitaveitu Reykjavíkur og er athyglinni beint að skjálftavirkni sem mældist inni á og nærri vinnslusvæði Hitaveitunnar á Nesjavöllum. Uppbygging skýrslunnar er þannig að fyrst er lýst algildri og innbyrðis staðsetningu skjálfta sem urðu á Nesjavöllum á tímabilinu janúar til mars 1995. Þá er lýst tölulegri dreifingu í dýpi og stærð skjálftanna auk þess sem skoðað er hvernig innbyrðis staðsetningartæknin færir skjálftana til frá eldri staðsetningunum. Einnig er skoðuð tímadreifing í upptökum skjálftanna. Í lokin eru svo skjálftaupptökin sýnd á korti ásamt helstu dráttum í jarðfræði svæðisins og legu brotflata sem ætla má að hafi hreyfst í skjálftunum.

## 2. Staðsetning jarðskjálfta með innbyrðis og altækum aðferðum

Í samvinnu Veðurstofunnar og Háskólans í Uppsölum hafa verið þróaðar aðferðir til að reikna samtímis algildar og afstæðar staðsetningar margra skjálfta af sama svæðinu. Prófanir benda til að með þessum aðferðum fái heldur betri algildar staðsetningar en með hefðbundnum aðferðum, auk þess að innbyrðis staðsetningar eru ákvarðaðar með innan við 10 m óvissu þegar best lætur. Aðferðunum hefur þegar verið beitt til að kortleggja misgengisfleti á nokkura kílómetra dýpi með mikilli nákvæmni (Slunga o.fl., 1995).

Þegar margir skjálftar verða á litlu svæði er algengt að bylgjuhreyfingin, sem mæld er með jarðskjálftamælum, sé næsta keimlík fyrir alla skjálftana. Fá má stærðfræðilegt mat á því hversu lík hreyfingin er með því að reikna víxlfylgni skjálftalínurita frá svipuðum skjálftum. Einnig er hægt að mæla mjög nákvæmlega mun í komutíma bylgna frá svipuðum skjálftum. Ef gert er ráð fyrir að tímamunurinn stafi eingöngu af mismikilli fjarlægð skjálftanna frá mælistöð er unnt að reikna innbyrðis staðsetningar skjálftaþyrpingarinnar með mun meiri nákvæmni en algildar staðsetningar einstakra skjálfta.

Hingað til hefur þessum aðferðum aðeins verið beitt á eina þyrpingu í einu, þ.e. eingöngu er unnið með eina "tegund" skjálfta hverju sinni og þá helst skjálfta sem orðið hafa með fárra klukkustunda millibili. Frekari þróun staðsetningaraðferðanna hefur hins vegar orðið til þess að skoða má saman skjálfta sem urðu bæði á stærra svæði og á lengra tímabili en áður. Aðferðin byggist á því að valinn er viðmiðunarskjálfti og síðan leitað að skjálftum sem orðið hafa nærri honum og þannig myndaður hópur 5-20 skjálfta. Reiknuð er víxlfylgni milli allra skjálfta innan hópsins og hann staðsettur með þeim aðferðum sem að ofan er lýst. Þegar þetta hefur verið gert fyrir alla skjálfta sem skoða á, er búið að staðsetja hvern skjálfta oftast en einu sinni. Vegið meðalgildi allra staðsetninga hvers skjálfta er svo tekið sem lokastaðsetning hans.

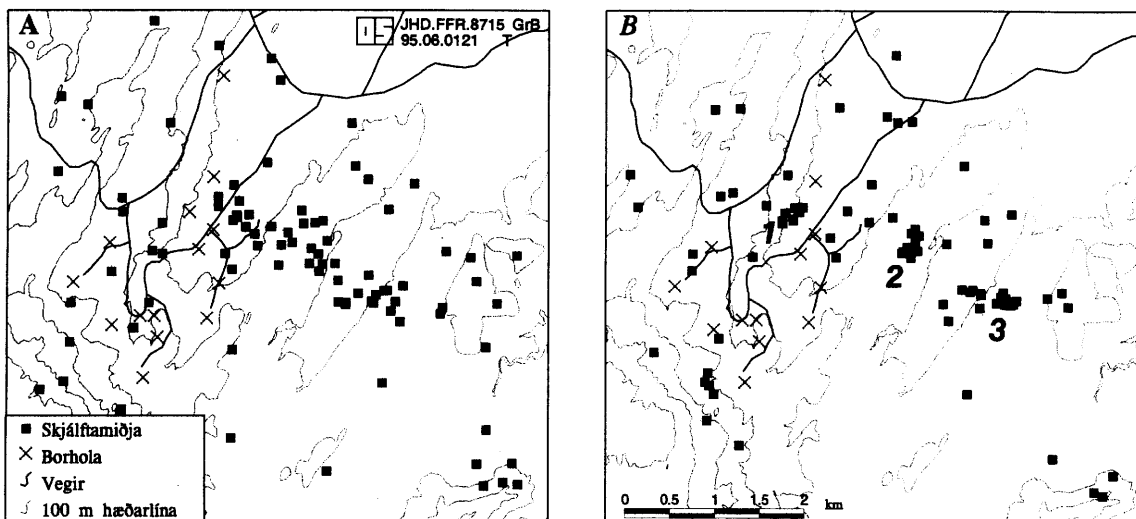
Í SIL-kerfinu eru brotlausnir reiknaðar fyrir alla jarðskjálfta sem netið staðsetur. Auk fyrstu hreyfistefnu P bylgna gefa sveifluviddir P og S bylgna upplýsingar um brotahreyfingar í skjálftaupptökunum og eru þær notaðar til að skorða brotlausnir frekar (Sigurður Th. Rögnvaldsson og Ragnar Slunga, 1993). Lokaskref úrvinnslunnar er því að endurreikna brotlausnir skjálfta út frá innbyrðis staðsetningunum og þannig ákvarða brotahreyfingar af meira öryggi en áður.

## 3. Skjálftar á Nesjavöllum

Mynd 1 sýnir upptök 91 skjálfta sem mældist á Nesjavöllum og í nágrenni á tímabilinu 1. janúar til 30. mars 1995. Valdir voru til athugunar allir skjálftar sem SIL kerfið skráði og eiga upptök sín innan svæðis með horn í (64,08°N, 21,32°V) og (64,13°N, 21,185°V). Myndin sýnir staðsetningar skjálftanna eins og þær eru unnar með hefðbundnum aðferðum, en einnig eru sýndar staðsetningar skjálftanna eftir nákvæma upptakagreiningu.

Upphafleg staðsetning skjálftanna benti til að nokkrir þeirra lögju á norðvestlægrí línu frá Hagavíkurvöllum og í átt að holusvæðinu (mynd 1A). Eftir að nákvæmari staðsetningar hafa verið reiknaðar greinist norðvestlægi sveimurinn í þrjár þyrpingar skjálfta,

nærri holu NJ-11, undir Stangarhálsi og sunnan við Hagavíkurvelli. Norðvestlæga stefnan er hins vegar vart greinanleg lengur. Þó er munurinn í láréttum staðsetningum fyrir og eftir nákvæmu upptakagreininguna sjaldan meiri en kílómetri.



Mynd 1: Upptök skjálfta á Nesjavöllum reiknuð A) með hefðbundnum aðferðum, og B) með innbyrðis og algildum aðferðum. Númerin á myndinni vísa til skjálftaþyrpinga undir 1) holu NJ-11 á Nesjavöllum, 2) undir Stangarhálsi og 3) undir Hagavíkurvöllum.

Minnstu skjálftarnir á svæðinu ( $M_L < 0,5$ ) greinast aðeins á fjórum stöðvum í SIL kerfinu, Heiðarbæ, Bjarnastöðum í Ölfusi, Sölvholti og Ásmúla. Það hefur sýnt sig að gögn frá stöðinni á Bjarnastöðum eru bjöguð, líklega vegna flókinnar jarðlagagerðar nærri stöðinni. Þetta getur valdið kerfisbundinni skekkju í sjálfvirkri staðsetningu skjálfta á svæðinu norðan Hveragerðis og þá líklega einnig á Nesjavöllum, en kemur ekki að sök í nákvæmu upptakagreiningunni.

Fyrsta hreyfistefna P bylgju frá skjálftunum á Nesjavöllum var aðeins greinanleg á einni stöð eða jafnvel alls ekki fyrir minnstu skjálftana ( $M_L=0,0-0,5$ ), en fyrir hina stærri á þremur til fjórum stöðvum. Sveifluvídd P og S bylgna er notuð þar sem suðhlutfall (e. signal/noise ratio) er stærra en einn, þ.e. á þremur til ellefu stöðvum fyrir þá skjálfta sem hér eru athugaðir. Þessar upplýsingar eru notaðar við útreikninga á brotlausnum skjálftanna.

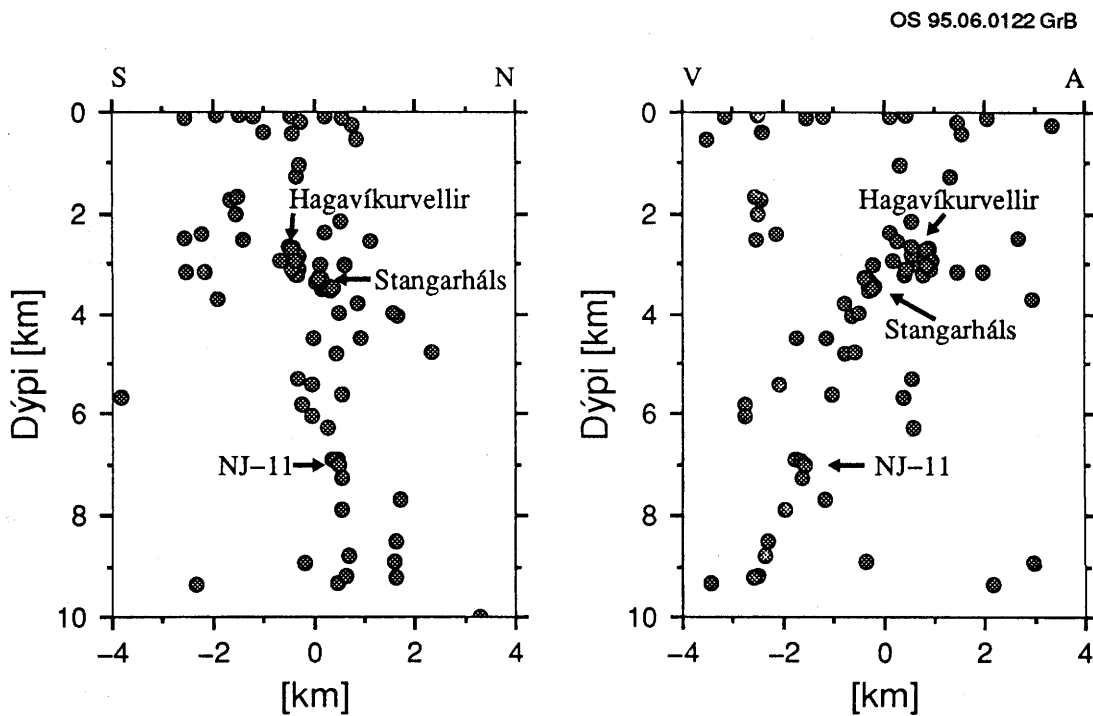
Stöðvar í stafræna skjálftamælanetinu eru fremur óheppilega staðsettar til að fylgjast með skjálftavirkni á Hengilssvæðinu, enda netið upphaflega einkum ætlað til eftirlits með brotabeltinu á Suðurlandi. Þær þrjár stöðvar sem næstar eru Henglinum eru allar í 10-15 km fjarlægð frá því svæði sem verið hefur virkast undanfarið. Þetta veldur því að erfitt er að ákvarða upptakadýpið og verður oft að festa dýpið til að unnt sé að staðsetja skjálftana með hefðbundnum aðferðum. Aðeins 15 af þeim 91 skjálfta sem athugaðir voru höfðu innan við 3 km óvissu í dýpi eftir venjulega meðferð. Með innbyrðis staðsetningunum verður áætluð óvissa mun minni, oftast innan við kílómetri og aldrei meiri en 3,2 km.



Besta matið á upptakadýpi fæst fyrir skjálfta í þyrpingunum þremur á mynd 1B, þar eð skjálftar innan hvernar þyrpingar eru næsta svipaðir og kemur því víxlfylgniaðferðin að mestum notum við staðsetningu þeirra. Fyrir skjálfta sem eiga sér fáa líka kemur aðferðin að minni notum og staðsetningar og dýptarákvarðanir batna lítið frá því sem áður var.

#### 4. Tölulegar upplýsingar um skjálftaupptök

Fróðlegt er að virða fyrir sér nokkrar tölulegar staðreyndir um skjálftana 91 sem urðu á Nesjavöllum í ársbyrjun 1995. Mynd 2 sýnir hvernig skjálftarnir raðast á N-S og V-A dýptarsnið. Sniðin skerast nærri Stangarhálsi. Skjálftaþyrpingarnar þrjár eru auðkenndar og sést þar að Hagavíkurvalla- og Stangarhálsþyrpingarnar eru báðar á um 3 km dýpi en þyrpingin nærri holu NJ-11 er mun dýpra, eða á um 7 km dýpi. Eins virðist sem mesta upptakadýpi skjálfta vaxi til vesturs. Þá má benda á að nokkrir skjálftar eru staðsettir á 0-1 km dýpi innan jarðhitasvæðisins á Nesjavöllum. Enda þótt dýpisóvissa þessara skjálfta sé 1-3 km er næsta öruggt að flestir þeirra eiga upptök sín í sjálfu jarðhitakerfinu.

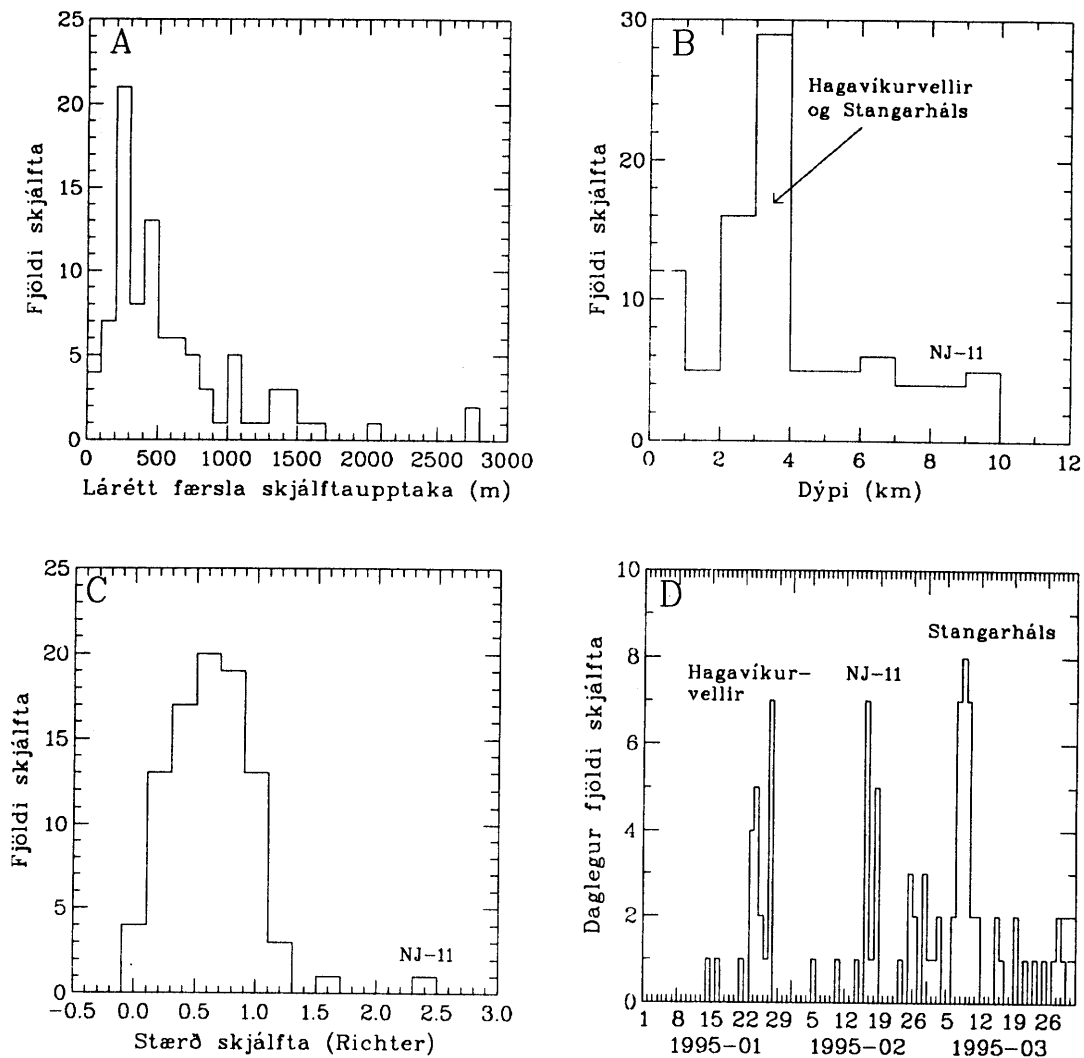


Mynd 2: S-N og V-A dýptarsnið skjálftanna á mynd 1B.

Borholur eru sýndar með lóðréttum strikum og er nafn þeirra ofan við.

Á mynd 3 er dregin upp töluleg dreifing í nokkrum eiginleikum skjálftanna sem urðu á Nesjavöllum í ársbyrjun 1995. Þannig sýnir mynd 3A hvernig upptök skjálftanna færðust frá því sem áætlað var með hefðbundinni staðsetningartækni að því sem áætlað er með algildu og innbyrðis staðsetningartækninni. Reyndist meðalfærslan í láréttum fleti 610 m og staðalfrávik 530 m.

JHD FFR 8715 GrB  
95.08.0123 T



Mynd 3: Ýmsar tölulegar staðreyndir um skjálfta á Nesjavöllum í ársbyrjun 1995.

Mynd 3B sýnir dýptardreifingu skjálftanna. Langflestir verða á 2-4 km dýpi og eru því sumir þeirra komnir upp að dýpstu holunum á Nesjavöllum. Óvissa í dýpi skjálfta í Hagavíkurvalla- og Stangarhálsþyrpingunum er áætluð 200-600 m. Óvissan í dýpi skjálfta í þyrpingunni undir NJ-11 er 800-1500 m, en þeir skjálftar verða það djúpt að ólíklegt er að áhrifa þeirra gæti í jarðhitakerfinu. Áætluð óvissa í upptakadýpi utan skjálftaþyrpinganna þriggja er 1-3 km fyrir grynstu skjálftanna en 2-3 km fyrir þá dýpstu. Grynnt er á skjálftana austan til á svæðinu en síðan dýpkar á þá eftir því sem vestar dregur og mælast dýpstu skjálftarnir undir Kýrdal (mynd 2).

Dýpi skjálftaupptakanna ber þokkalega saman við athuganir Gillian Foulger (1984) en samkvæmt niðurstöðum hennar er skjálftavirkni á Hengilssvæðinu aðallega á 2-6 km dýpi.

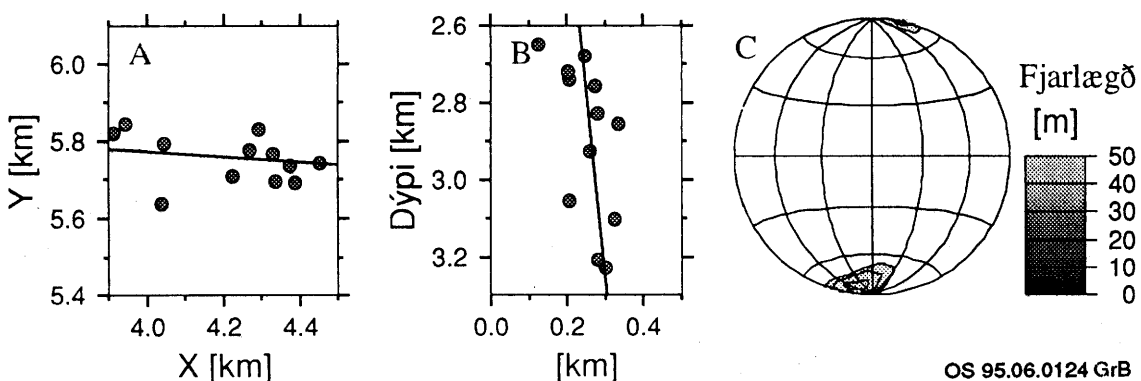
Mynd 3C sýnir dreifingu skjálftanna eftir stærð. Flestir eru þeir af stærðinni  $M_L=0,5-1,0$ . Minnstu skjálftar sem SIL kerfið getur staðsett á Hengilssvæðinu hafa stærðina 0 eða þar um bil. Stærsti skjálftinn á Nesjavöllum á athugunartímabilinu var 2,5 að stærð og tilheyrir þyrpingunni undir holu NJ-11.

Á mynd 3D er skjálftavirknin sýnd sem fall af tímanum og ber þar mest á hrinum sem tilheyra þyrpingunum þremur á mynd 1B. Hver þeirra samanstendur af skjálftum sem urðu á nokkurra daga tímabili. Hrinan undir Hagavíkurvöllum varð 23.-27. janúar, sú undir holu NJ-11 16.-18. febrúar og skjálftarnir undir Stangarhálsi urðu 6.-11. mars 1995.

## 5. Brotahreyfingar í smáskjálftaþyrpingunum þremur

Eins og áður hefur komið fram skila þyrpingar svipaðra smáskjálfta mestum upplýsingum um hvaða brotahreyfingar eru í gangi á skjálftasvæðum. Skulu nú talin upp þau atriði sem einkenna skjálftaþyrpingarnar þrjár á mynd 1B.

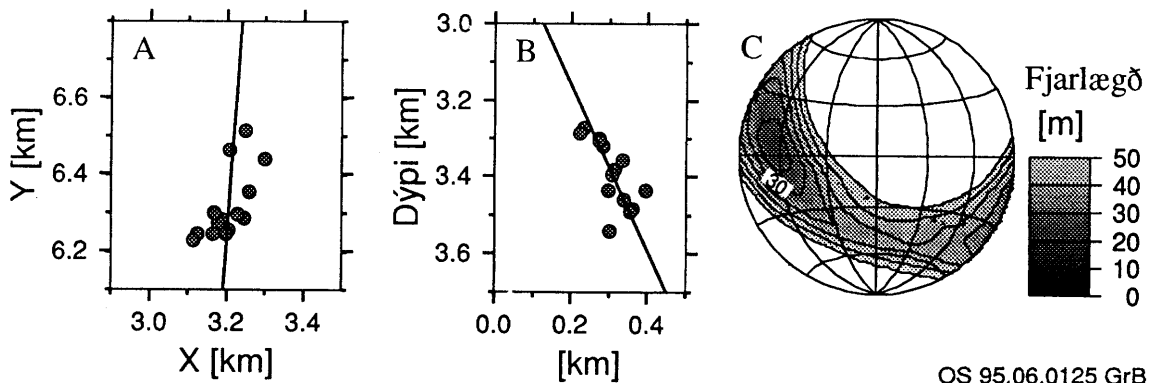
Mynd 4 sýnir dreifingu skjálftanna undir Hagavíkurvöllum ásamt mati á striki og halla plans sem fellt er gegnum þyrpinguna. Flestir skjálftanna við Hagavíkurvelli eru mjög litlir,  $M_L=0,0-0,5$  og er stærsti skjálftinn af stærðinni 1,5. Tólf skjálftanna voru staðsettir innbyrðis með innan við 5 m nákvæmni. Í láréttu sniði dreifast skjálftarnir á svæði sem er um 600 m frá austri til vesturs og um 200 m frá norðri til suðurs (mynd 4A). Ef gert er ráð fyrir að allir skjálftarnir hafi orðið á einu og sama misgenginu má reyna að meta halla og strik þess með því að fella plan gegnum skjálftaupptökin. Besta plan gegnum þyrpinguna reyndist hafa strik  $274^\circ$  og halla  $84^\circ$  til norðurs. Á mynd 4B er horft úr austri í strikstefnu plansins. Meðalfjarlægð skjálftanna tólf frá besta plani er um 40 m. Á mynd 4C eru sýndir á neðri hálfkúlu pólur þvervektora allra plana sem unnt er að fella gegnum þyrpinguna þ.a. meðalfjarlægð skjálftanna frá planinu sé innan við 50 m. Þessi plön hafa öll svipað strik og halla og besta plan gegnum þyrpinguna. Ef gengið er út frá því að allir skjálftarnir verði á þessu plani þá reynist vinstri handar sniðgengishreyfing með nokkrum siggengisþætti vera sú hreyfing sem best fellur að áætluðum brotlausnum einstakra skjálfta í þyrpingunni.



Mynd 4: Upptök skjálfta í þyrpingunni undir Hagavíkurvöllum. A) sýnir upptökin í láréttum fleti þar sem X-ás vex til austurs og Y-ás til norðurs. B) sýnir upptökin í lóðréttu sniði þvert á strikstefnu besta plans gegnum þyrpinguna (horft úr austri). C) sýnir póla þvervektora nokkurra plana gegnum skjálftaþyrpinguna ásamt meðalfjarlægð skjálftanna til plansins.

Ofangreind túlkun gefur sennilega of einfalda mynd af brotahreyfingum sem þarna urðu. Kemur þar einkum tvennt til. Hið fyrra er að fræðileg óvissa í innbyrðis staðsetningum skjálftanna tólf er áætluð innan við 5 m. Meðalfjarlægð skjálftanna frá besta plani er hins vegar töluvert meiri eða um 40 m. Þessi munur er þó ekki meiri en svo að vel megi ímynda sér að skjálftarnir verði á sama brotflatinum en að flöturinn sé ekki slétt plan heldur séu á honum misfellur og sveigjur. Hitt atriðið sem dregur úr áreiðanleika þessarar einföldu túlkunar er skoðun á brotlausnum skjálftanna. Þar sem skjálftarnir eru mjög litlir eru brotlausnir þeirra illa ákvarðaðar og útiloka ekki að skjálftarnir hafi orðið á einu austlægu plani. Brotlausnir tveggja stærstu skjálftanna ( $M_L=1,5$  og  $1,0$ ) benda þó fremur til siggengis á sprungum með norðlægari stefnu og styðja því ekki einföldu túlkunina, enda þótt þær útiloki hana ekki heldur.

Mynd 5A sýnir upptök þeirra fjórtán skjálfta í Stangarhálsþyrpingunni sem staðsettir voru með innan við 5 m óvissu innbyrðis. Í láréttum fleti dreifast skjálftarnir um svæði sem er u.þ.b. 200 m frá austri til vesturs og 300 m frá norðri til suðurs. Skjálftarnir urðu allir á ámóta dýpi, frá 3,3 til 3,6 km (mynd 5B). Besta plan gegnum þyrpinguna hefur strik  $4^\circ$  og halla  $65^\circ$  til austurs. Meðalfjarlægð skjálftanna frá planinu er um 21 m. Mynd 5C sýnir póla þvervektora þeirra plana sem unnt er að fella gegnum skjálftasafnið þ.a. meðalfjarlægðin sé innan við 50 m. Þar kemur berlega í ljós að stefna og halli slíkra flata getur verið ákaflega mismunandi. Er því ekki unnt að nota innbyrðis staðsetningar skjálftanna til að ákvarða strik og halla misgengisflatarins af neinu öryggi. Þetta stafar einfaldlega af því hve þétt þyrpingin er.



Mynd 5: *Upptök skjálfta í þyrpingunni undir Stangarhálsi. A) sýnir upptökin í láréttum fleti þar sem X-ás vex til austurs og Y-ás til norðurs. B) sýnir upptökin í lóðréttu sniði þvert á strikstefnu besta plans gegnum þyrpinguna (horft úr suðri). C) sýnir póla þvervektora nokkurra plana gegnum skjálftaþyrpinguna ásamt meðalfjarlægð skjálftanna til plansins.*

Stærsti skjálftinn undir Stangarhálsi er um 0,9 á Richter kvarða og flestir hinna innan við 0,5. Brotlausnir þeirra eru því illa skorðaðar og gefa ekki skýrar upplýsingar um brotahreyfingar. Ef gert er ráð fyrir að norður-suður planið sé sameiginlegur misgengisflötur allra skjálftanna þá er hægrihandar sniðgengi með nokkrum siggengisþætti sú hreyfing sem skást fellur að brotlausnunum. Þó benda brotlausnirnar fremur til þess að um flóknari brotahreyfingu sé að ræða en gögnin leyfa ekki nákvæmari túlkun.

Stærsti skjálftinn á athugunartímabilinu,  $M_L=2,5$ , varð 16. febrúar á um 7 km dýpi undir holu NJ-11. Á svipuðum slóðum urðu einnig fimm smærri skjálftar. Vegna þess hve fáir skjálftar eru í þessari þyrpingu var ekki reynt að nota innbyrðis staðsetningar þeirra til að ákvarða sameiginlegan brotflöt. Brotlausn stærsta skjálftans er þokkalega vel ákvörðuð og sýnir annað tveggja: siggengi á sprungu með stefnu um  $20^\circ$  og halla  $70^\circ$  til suðausturs, eða siggengi á sprungu með stefnu um  $140^\circ$  og halla  $45^\circ$  til suðvesturs. Fyrri tilgátan er talin sennilegri þar sem hún fellur að stefnu misgengja á Nesjavöllum.

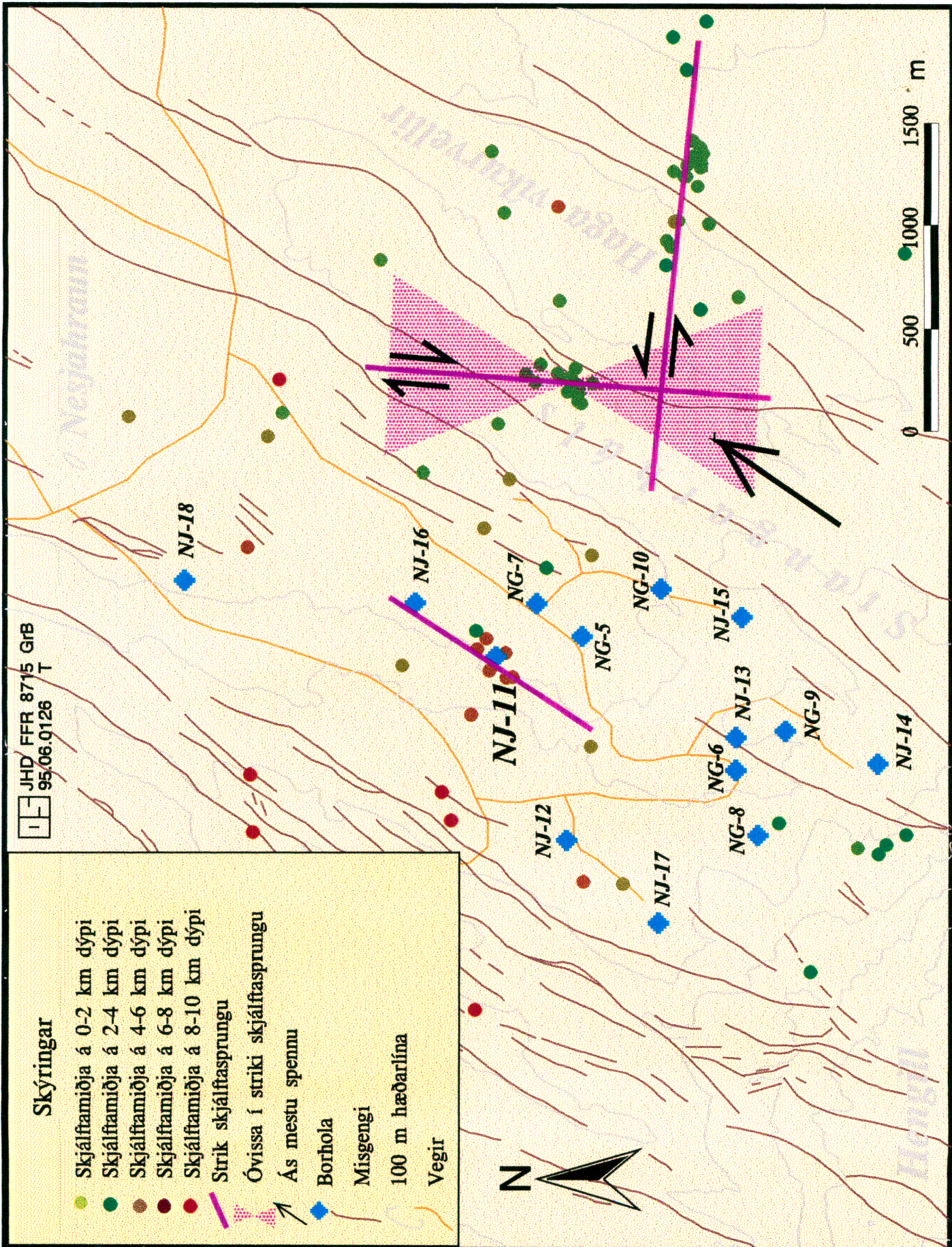
Nota má tíðniróf smáskjálftanna á Nesjavöllum til að meta stærð brotflatanna sem hreyfðust í skjálftunum. Lögum brotflata er nálgðuð með hringskífu. Þá áætlast þvermál þeirra á bilinu 100 til 300 m. Heildarskerhreyfing á brotflötum skjálftanna er 0,05-2,0 mm og verður því meiri sem skjálftinn er stærri. Rétt er að taka fram að þegar upptök jarðskjálfta eru ákvörðuð, þá er gert ráð fyrir að upptökin séu í punkti. Sá punktur er þá miðja eða meðalstaðsetning orkulosunar á brotflatinum.

Á mynd 6 eru dregnar saman niðurstöður skjálftamælinga á Nesjavöllum frá upphafi ársins 1995. Sýnd eru upptök skjálfta eins og þau eru talin best ákvörðuð með algildum og innbyrðis aðferðum. Dýpi til skjálftanna er sýnt með breytilegum lit punkta. Eins eru á myndinni brot og misgengi sem eru í ArcInfo þekju jarðfræðikorts af Hengilssvæðinu, vegir, hæðarlínur með 100 m bili og staðsetning og nöfn borholna. Inn á myndina eru færðar línur sem tákna líklegustu legu brotflata sem hreyfðust innan skjálftaþyrpinganna þriggja undir holu NJ-11, Stangarhálsi og Hagavíkurvöllum. Eins er sýnd líklegasta skerhreyfing um brotin og stefna mestu láréttu spennu. Tekið skal fram að línurnar eiga við á því dýpi þar sem skjálftarnir urðu, þ.e. á um 3 km dýpi fyrir eystri þyrpingamar tvær en á um 7 km dýpi fyrir þyrpinguna undir holu NJ-11.

## 6. Tenging smáskjálfta og jarðhita

Sú upptakagreining skjálfta sem hér er sýnd er nýjung og á sér því enga hefð í jarðhitarrannsóknnum. Eðlilegt er að spurt sé hvaða þýðingu skjálftamælingarnar hafi í rekstri jarðhitasvæðisins á Nesjavöllum. Við fyrstu sýn koma einkum þrjú atriði upp í hugann.

1. Skjálftamælingarnar greina brotahreyfingar í bergi á dýptarbili sem borholur ná til. Allar líkur eru á að þar sé þá einnig góð lekt. Hins vegar er óþekkt hvort slík svæði séu heitari eða kaldari en nágrennið.
2. Þá er vel hugsanlegt að skjálftanetið greini áhrif vinnslu. Er þá einkum hugsað til aðrennslis kalds vatns inn í jarðhitakerfið og niðurdælingar í borholur. Nauðsynlegt er að bæta við skjálftastöð nærri Nesjavöllum til að slíkt nákvæmniseftirlit sé mögulegt.
3. Skjálftanetið er almennt eftirlitstæki með skorpuhreyfingum og kvikuflæði í Hengilskerfinu og hefur þannig þýðingu fyrir eigendur mannvirkja inni á svæðinu.



Mynd 6: Upptök skjálfta á Nesjavöllum og áætluð lega sprungna sem hreyfðust í skjálftunum.



## 7. Niðurstöður og umræða

Helstu niðurstöður nákvæmrar upptakagreiningar jarðskjálfta sem urðu á Nesjavöllum í upphafi árs 1995 eru eftirfarandi:

1. Alls mældist 91 skjálfti á tímabilinu, flestir að stærð 0,0 til 1,0 á Richter kvarða.
2. Fyrsta túlkun benti til þess að skjálftarnir ættu upptök á norðvestlægri línu frá Hagavíkurvöllum og í átt að holu NJ-16. Eftir að nákvæmari staðsetningar voru reiknaðar greindist norðvestlægi sveimurinn upp í þrjár þyrpingar, kenndar við holu NJ-11, Stangarháls og Hagavíkurvelli.
3. Skjálftar innan ofangreindra þyrpinga eru staðsettir með um 500 m nákvæmni í algildri staðsetningu og innbyrðis með 5-10 m nákvæmni. Upptök skjálfta utan þyrpinganna eru hins vegar staðsett með einungis 1-3 km nákvæmni.
4. Flestir skjálftanna urðu á 2-4 km dýpi og ná þannig upp í vinnslusvæði Nesjavalla-virkjunar. Grynustu skjálftarnir urðu austan til á athugunarsvæðinu en síðan dýpkar á þá þegar kemur til vesturs inn í virka gosbeltið. Stærsti skjálftinn mældist  $M_L = 2,5$  og átti hann upptök sín á um 7 km dýpi undir holu NJ-11.
5. Þrátt fyrir að upptök skjálfta í þyrpingunum þremur séu ákvörðuð með góðri nákvæmni, er erfitt að skýra upptök þeirra með brotahreyfingum sem áttu sér stað á aðeins einum sameiginlegum fleti í hverri þyrpingu. Helst er þó talið að sniðgengishreyfing hafi orðið á austlægu broti undir Hagavíkurvöllum, að sniðgengishreyfing á norðlægu broti hafi orðið undir Stangarhálsi og að siggengishreyfing á NNA-lægu broti hafi orðið undir holu NJ-11. Talið er að skerhreyfingar við hvern skjálfta séu á bilinu 0,05-2 millimetrar og að flöturinn sem þá hreyfðist sé 100-300 m að þvermáli.
6. Allar líkur eru til þess að skjálftanet Veðurstofunnar gagnist til eftirlits með brotahreyfingum á Nesjavöllum. Einkum er það talið henta við leit að svæðum þar sem vænta má góðrar lektar. Eins er hugsanlegt að netið greini og staðsetji skjálfta sem verða við mannanna verk, t.d. vegna niðurdælingar kalds vatns í borholur.
7. Ef Hitaveitan hyggst nota skjálftanet Veðurstofunnar við vinnslueftirlit sýnist nauðsynlegt að bæta við skjálftamælistöð í nágrenni Nesjavalla. Þannig fengjust nánast samtímaupplýsingar um skjálftaupptök á svæðinu, staðsetningar yrðu nákvæmari en nú er og þess má vænta að mun fleiri skjálftar myndu mælast. Ný stöð nýttist einnig við áframhaldandi úrvinnslu þeirra gagna sem SIL kerfið hefur þegar safnað og eykur meira að segja notin sem hægt er að hafa af eldri skjálftagögnum.

Á Veðurstofu Íslands liggur nú fyrir gríðarlegt magn skjálftagagna af Hengilssvæðinu sem ekki hefur unnist tími til að fullvinna, hvað þá heldur túlka, vegna manneklu. Ítarleg útekt og úrvinnsla á þessum gögnum ætti að vera Hitaveitu Reykjavíkur áhugaefni. Einkum má í því sambandi benda á mörg þúsund skjálfta sem orðið hafa á Ölkelduháls-svæðinu.



## **Þakkir**

Starfsfólk jarðeðlissviðs Veðurstofu Íslands lét okkur í té skjálftagögn og frumúrvinnslu þeirra, auk aðgangs að hugbúnaði sem þróaður hefur verið í samvinnu Veðurstofunnar og Uppsala Háskóla.

## **Heimildir**

Foulger, Gillian R., 1984: *The Hengill geothermal area: Seismological studies 1978-1884*. Raunvísindastofnun Háskólans, Hitaveita Reykjavíkur og Orkustofnun, OS-84073/JHD-12 RH-07-84

Grímur Björnsson og Sigurður Th. Rögnvaldsson, 1995: *Upptök jarðskjálfta á Hengils-svæði árin 1992-1994*. Unnið fyrir Hitaveitu Reykjavíkur. Orkustofnun, greinargerð, GrB/SThR-95/01

Ragnar Stefánsson, Reynir Böðvarsson, Ragnar Slunga, Páll Einarsson, Steinunn J. Jakobsdóttir, Hilmar Bungum, Sören Gregersen, Jens Havskov, Jörgen Hjelme og Heikki Korhonen, 1993: *The SIL project, background and perspectives for earthquake prediction in the South Iceland Seismic Zone*. Bull. Seism. Soc. Am., 83, 696-716.

Reynir Böðvarsson, Sigurður Th. Rögnvaldsson, Steinunn J. Jakobsdóttir, Ragnar Slunga og Ragnar Stefánsson, 1995: *The SIL data acquisition and monitoring system*. Grein send til Seism. Res. Letters.

Sigurður Th. Rögnvaldsson og Ragnar Slunga, 1993: *Routine fault plane solutions for local and regional networks: A test with synthetic data*. Bull. Seism. Soc. Am., 83, 1232-1247.

Slunga, Ragnar, Sigurður Th. Rögnvaldsson og Reynir Böðvarsson, 1995: *Absolute and relative locations of similar events with application to microearthquakes in South Iceland*. Geophys. J. Int í prentun.

## English summary

From January 1st to March 30th 1995 the Icelandic digital seismic network (the SIL network) recorded 91 earthquakes located at or close to the Nesjavellir geothermal field. Joint hypocenter locations and accurate relative locations were determined simultaneously for all the events. After relocation fault plane solutions were estimated for each event using P wave polarities and spectral amplitudes of P and S waves.

Most of the earthquakes have local magnitudes between 0.0 and 1.0 but the largest event is a  $M_L = 2.5$  quake with epicenter close to well NJ-11. The earthquakes are distributed between 1 and 10 km in depth with most of the activity between 2 and 4 km. After relocation clusters of microearthquakes can be seen near Hagavíkurvellir, Stangarhás and well NJ-11. Fitting a plane through each of the Hagavíkurvellir and Stangarhás swarms suggests that faulting occurred on east-west and north-south striking faults, respectively. However, the poorly constrained fault plane solutions do not support this conclusively but rather indicate a more complex pattern of movement with different mechanisms within each cluster. The mechanism of the  $M_L = 2.5$  event is fairly well determined and shows normal faulting on a N20°E striking plane dipping 70° to the east.

Some of the earthquakes occur within the geothermal reservoir at Nesjavellir, which has been in commercial operation since 1990. The accurate location methods thus provide a tool for locating zones of weakness and possibly high permeability in the reservoir and may, therefore, become useful in planning future production strategies and drilling sites.