

**Markmið með uppbyggingu
jarðskjálftamælitækni á íslenskum
jarðvísindastofnunum**

Kristín S. Vogfjörð

Greinargerð KSV-2000-01

Markmið með uppbygging^u jarðskjálftamælitækni á íslenskum jarðvísindastofnunum

Jarðskjálftarannsóknir hafa verið í örri þróun á undanförunum árum, bæði hvað varðar mælitækni og aðferðafræði. Nýlega hafa komið á markaðinn nemar með mikla bandvídd og skráningartæki sem geta safnað með hárrí söfnunartíðni og geymt mikið magn af stafrænum gögnum. Í aðferðafræði er ein athyglisverðasta nýjungin, geysileg aukning í nákvæmni við staðsetningar smáskjálfta, en hún gerir kleift að kortleggja sprungurnar sem skjálftarnir verða á, þ.e. ákvarða stríkstefnu þeirra og halla. Þessari aðferð, sem hefur bæði mikið fræðilegt og hagnýtt gildi, hefur verið beitt við kortlagningu sprungna á takmörkuðum svæðum á Íslandi; á brotabeltunum vegna rannsókna á spennuástandi í jarðskorpunni og á jarðhitasvæðum við leit að vatnsleiðandi sprungum til vinnslu. Takmarkanir þeirra mælaneta sem nú eru í rekstri ráða því hins vegar, að einungis hefur verið hægt að beita aðferðinni á fá svæði, en til að ná fullum og almennum afnotum af henni, þarf að fara fram markviss uppbygging í tækjabúnaði:

- Þetta þarf fastanet Veðurstofu Íslands, með því að bæta við mælistöðvum, og
- koma þarf á laggirnar færanlegum mælabanka, því hið litla safn færanlegra mælitækja sem til er í landinu er löngu orðið úrelt og þarfnast endurnýjunar.

Fjármögnun svo viðamiklar endurnýjunar er ekki á færi einnar stofnunar, því færanleg skráningartæki eru mjög dýr. Þess vegna þarf að koma til sameiginlegt átak allra jarðvísindastofnana sem þessa tækni munu nýta, ásamt stuðningi frá orkufyrirtækjum sem hag hefðu af þessari þróun. Einnig mun þurfa að leita liðsinnis Bygginga- og tækjasjóðs Rannsóknaráðs Íslands (RANNÍS) um fjármögnun á móti framlagi þeirra stofnana og fyrirtækja sem taka þátt í uppbyggingunni.

Hvað hefur áunnist: *Mælakerfi Raunvísindastofnunar Háskóla Íslands (RH)* er hliðrænt net 10 stöðva. Það er hluti eldra landsnets um 40 hliðrænna stöðva sem starfaði í fjölda ára. Netið skráir einungis lóðréttan þátt hreyfingar og er ekki stafrænt. Horntíðni skjálftanemanna er við 1–2 Hz, sem þýðir að kerfið er ónæmt fyrir lægri tíðnum. Með netinu er hægt að fá grófar staðsetningar og enn þá gegnir það mikilvægu hlutverki við eftirlit á hálendinu.

Stafrænt landsnet Veðurstofu Íslands (VÍ) hefur leyst eldra netið af hólmi í byggð. Netið, sem hefur byggst upp síðastliðin tíu ár, skráir alla þrjá þætti hreyfingar og nemar þess skynja breiðara tíðniband en RH netið. Upphaflegu nemarnir höfðu horntíðni við 1 Hz, en á seinni árum hefur eingöngu verið bætt við nemum með meiri bandvídd, eða 0.2 Hz horntíðni. Aukin bandvídd auðveldar vöktun og greiningu lágtíðni skjálftavirkni, eins og í Mýrdalsjökli og Vatnajökli, auk þess að ná betur yfir tíðnisvið gosóróa. Fimm breiðbandsnemar frá Háskólanum í Cambridge eru einnig hluti af netinu á Norðurlandi, en þeir hafa 0.01 Hz horntíðni. Netið byggðist aðallega upp umhverfis helstu jarðskjálftasvæði landsins, þ.e. Suðurlands og Tjörnes brotabeltin, en hefur einnig smátt og smátt verið að breiðast út og þéttast. Með gögnum úr netinu fást sjálfvirkar staðsetningar skjálfta með þokkalegri nákvæmni, sem má bæta í góða nákvæmni með gagnvirkri úrvinnslu.

Þetta á einkum við um skjálfta á brotabeltunum. Aftur á móti eru skjálftar á hálendinu, t.d. í Vatnajökli ekki nógu vel staðsettir með kerfinu, en unnið er að uppsetningu stöðva umhverfis Vatnajökul til að bæta úr því. Á öðrum svæðum, eins og við Hengil og á Reykjanesi, er netið þegar orðið nógu þétt til að hægt sé að beita nýjustu aðferðum við staðsetningar skjálfta og auka nákvæmni enn frekar.

Neti hröðunarmæla hefur einnig verið komið upp við Suðurlandsbrotabeltið, en markmið þess er að kanna álag jarðskjálfta á mannvirki. Netið, sem hefur starfað í nokkur ár er rekið af Verkfræðistofnun Háskóla Íslands. Það býður einnig hugsanlega upp á möguleika til notkunar við jarðvísindarannsóknir.

Hvert ber að stefna: 1) *Áframhaldandi útbreiðsla landsnetsins* er æskileg til þess að hægt sé að fylgjast með og skrá almenna skjálftavirkni á landinu. 2) *Þétting netsins umhverfis gosbeltin* er einnig nauðsynleg til að vakta þau svæði þar sem hætta er á náttúruhamförum, s.s. eldgosum og jökulhlaupum. Þétting netsins við háhitasvæði, sem einnig eru innan gosbeltanna, hefur ekki síður mikla hagnýta þýðingu fyrir könnun og vinnslu jarðhita, því jarðhitasvæðin hafa íðulega nokkra smáskjálftavirkni. Með því að beita nýjustu staðsetningaraðferðum á þessa skjálfta er hægt að kortleggja virkar sprungur undir yfirborði, og þar með innviði jarðhitakerfanna. 3) *Banki færanlegra skjálftamæla* er einnig veigamikill þáttur í uppbyggingu jarðskjálftamælitækni í landinu. Hann er mikilvægur sem stoð við fastanetið, við uppbyggingu, rekstur og viðhald þess, en þó aðallega sem sjálfstæð eining til fræðilegra og hagnýtra jarðskjálftarannsókna. Hans er þörf til tímabundinnar vöktunar á takmörkuðum svæðum vegna yfirvofandi jarðskjálfta eða eldsumbrota; við forkönnun órannsakaðra svæða, og nánari könnun annara, þar sem fastastöðvar duga ekki til (t.d. jarðhitasvæða vegna fyrirhugaðrar vinnslu); og við könnun á jarðlagaskipan vegna rannsókna eða mannvirkjagerðar. Ef undanskilin eru 16 u.þ.b. tíu ára gömul skráningartæki og nemar á RH, eru ekki til nein færanleg mælitæki á Íslandi sem hægt er að nota til slíkra rannsókna og þarf alltaf að fá þau lánuð erlendis frá. Þessi gömlu tæki eru með einungis 1–2 Mb minni og koma því að mjög takmörkuðum notum. Tæplega helmingur þeirra er í eigu RH og Norrænu Eldfjallastöðvarinnar (NE), afgangurinn er í eigu Columbia Háskóla í Bandaríkjunum.

1) *Almenn uppbygging landsnetsins* er á verksviði Veðurstofu Íslands og því er ekki fjallað um hana hér.

2) *Þétting landsnetsins og afstæðar staðsetningaraðferðir:* Eins og áður sagði er fastanet VÍ þegar orðið nógu þétt til að leyfa nákvæma staðsetningu skjálfta á Hengilssvæði og á Reykjanesi, en þá er beitt afstæðum staðsetningaraðferðum. Með þeim er mögulegt, þegar best gegnir, að ná fram nákvæmni í staðsetningum upp á nokkra metra eða nokkra tugi metra, og þar með hægt að kortleggja virkar sprungur undir yfirborði. Þessar sprungur geta stjórnað rennsli vökva í jarðhitakerfum og staðsetning þeirra er því lykillinn að skipulagðri vinnslu jarðhitasvæða. Kortlagning sprungukerfa háhitasvæða gæti því stuðlað að markvissari borunum og þar með sparað umtalsverða fjármuni. Fjöldi sprungna hafa þegar verið kortlagðar þannig á Hengilssvæði, þar sem verkefni á vegum Veðurstofu Íslands og Orkustofnunar hafa verið unnin fyrir Hitaveitu Reykjavíkur (sjá [1, 2, 3]). Með athyglisverðari niðurstöðum þessara verkefna er skjálftadreifin eftir endilöngum Nesjavalladal (sjá mynd 3b, [3]), en hún skilgreinir um 1500 m langt misgengi í grennd við margar gjöfular borholur svæðisins. Það er því líklegt að þar hafi tekist að kortleggja misgengi sem tengist lekt svæðisins. Verkefni taka einungis til hluta

gagnanna sem safnast hafa og nákvæmara sprungukorts er að vænta með viðtækari úrvinnslu. Þó ber að athuga að útfærsla aðferðarinnar er enn í þróun á VÍ og mun þurfa að bæta ýmislegt í hugbúnaðinum áður en viðtæk, kerfisbundin úrvinnsla mun eiga sér stað. Í gangi er samskonar kortlagningarverkefni í Grensdal, fyrir Sunnlenska Orku og undirbúningur er hafinn að öðru við Trölladyngju á Reykjanesi fyrir Jarðlind hf.

Hægt er að skapa grundvöll fyrir kortlagningu smáskjálftavirkni annara jarðhitasvæða með því að þetta landsnetið í kring um þau. Kortlagningin getur haft umtalsverða fjárhagslega þýðingu fyrir orkufyrirtækin sem vinna, eða hyggja á vinnslu þessara svæða, þannig að eðlilegt er að þau taki þátt í uppbyggingu landsnetsins, eins og þau hafa þegar gert við Hengil (Hitaveita Reykjavíkur) og á Reykjanesi (Hitaveita Suðurnesja). Á Orkustofnun hefur verið unnin tillaga að slíkri þéttingu netsins á Norðurlandi, með uppsetningu fimm mælistöðva (KNET), í kringum jarðhitasvæðin í Kröflu, Bjarnarflagi, á Þeistareykjum og í Öxarfirði (sjá [4]). Mælieiningar nets þessa verða að hluta til komnar úr neti Hitaveitu Akureyrar og Orkustofnunar, sem starfaði á Laugalandi í Eyjafirði, en hefur nú verður tekið niður. Farið var fram á það, við orkufyrirtækin sem að vinnslu jarðhitasvæðanna standa að þau fjármögnuðu það sem á vantar í nýja uppsetningu netsins.

3) Færanlegur banki 10–15 mæla býður upp á mikla möguleika til jarðskjálftarannsóknna umfram þá sem hægt er að nálgast með fastanetinu. Hann er nauðsynlegur fyrir allar alhliða jarðskjálftarannsóknir, hagnýtar jafnt sem fræðilegar, sem stundaðar eru á íslenskum jarðvísindastofnunum. Við staðsetningu fastastöðva gera færanlegir mælar kleift að forkanna bakgrunnssuð og truflanir á svæðinu, áður en lagt er í kostnaðarsama jarðvinnu, en hún er um þriðjungur stofnkostnaðar við hverja fastastöð. Einnig er færanlegra mæla þörf við ítarlegri skráningu en fastanetið framkvæmir á eftirskjálftum stórra skjálfta og einstökum skjálftahrinum, en þá þarf færanlegt net að vera aðgengilegt með engum fyrirvara. Sama á við um vöktun eldfjalla, þ.e. við nánari könnun á skjálftavirkni við og í eldfjöllum, og við skráningu á gosóróa í eldsumbrotum, til að meta gosefnamagn og miða út upptakastaðsetningu sprengivirkni. Með þessum fjölda færanlegra mæla er einnig hægt að stunda takmarkaðar bylgjubrots- og endurkastsmælingar til að kanna jarðlagaskipan afmarkaðra svæða, t.d. eins og innviði eldfjalla og jarðhitasvæða, eða vegna mannvirkjagerðar. Mælabankinn nýtist einnig vel við forkönnun á skjálftavirkni og suði jarðhitasvæða sem áhugaverð eru til vinnslu, og einnig við undirbúning staðsetninga fastastöðva við jarðhitasvæði þar sem kortleggja á skjálftavirknina ítarlega í leit að rennislisleiðum vatns í kerfinu. Færanlegir mælar, í láni frá Uppsala Háskóla, voru t.d. notaðir til að kanna smáskjálftavirkni og suð í Kröflu, í október 1997. Þegar hefur verið unnið úr helmingi gagnanna, sem sýna að virknin (um tveir skjálftar á dag) er meiri en landsnetið gefur til kynna og vísbendingar eru um að hún tengist kortlögðum misgengjum (sjá [5]). Í september á síðastliðnu ári var svo smáskjálftavirknin við Þeistareyki könnuð með sömu mælum, og jafnframt leitað góðra staðsetninga fyrir (KNET) mælistöðvarnar fimm. Úrvinnsla þeirra gagna stendur yfir [6]. Ekki hefur verið mikið gert af því að rannsaka suð á jarðhitasvæðum, þ.e. miða út upptök þess með færanlegu smáneti (array), eða kanna einkenni þess, eins og tíðnisvið og styrkleika. En mjög líklegt er að þannig athuganir geti gefið hagnýtar upplýsingar um stærð og staðsetningu suðusvæðis í jarðhitageyminum.

Engar af þessum rannsóknum, sem hér hafa verið taldar upp hefur verið hægt að stunda að neinu marki á Íslandi undanfarin ár, vegna skorts á færanlegum mælitækjum.

Hvorki RH né NE hafa haft bolmagn til að endurnýja gömlu skráningartækin sem keypt voru fyrir um tíu árum og er safnið nú orðið nær úrelt. Ný, fullkomnari tæki eru mun dýrari en þau gömlu og því er ljóst að engin ein stofnun getur fjármagnað og endurnýjað þann nauðsynlega fjölda mælitækja sem þarf til skipulagðra rannsókna og verður að koma til sameiginlegur mælabanki allra jarðvísindastofnana til að slíkt sé mögulegt. Hann mætti setja upp með líku fyrirkomulagi og í Bandaríkjunum, þar sem PASSCAL tækjabankinn, með yfir 400 mæla er í eigu IRIS, sem eru samtök bandarískra háskóla um jarðskjálftarannsóknir (www.iris.edu), og er fjármagnaður af bandaríska vísindasjóðnum (NSF). Íslendingar í samvinnu við Bandaríkjamenn hafa fengið þessa mæla hingað til lands, en eingöngu til fræðilegra rannsókna og í tengslum við bandarísk verkefni. Á meðan enginn færanlegur mælabanki er til á Íslandi er erfitt um athafnir ef stöðugt þarf að treysta á að fá mæla að láni erlendis frá. Til dæmis er ekki hægt að bregðast við skyndilegum uppákomum eins og skjálftahrinum og eldgosum og nær ómögulegt er að stunda hagnýtar rannsóknir, eins og t.d. könnun jarðhitasvæða. Orkustofnun hefur tekist að fá nokkra færanlega mæla að láni frá Uppsala háskóla, í gegnum samvinnu við Veðurstofu Íslands, en ekki er hægt að treysta á slíkt við framtíðarskipulag verkefna. Það er því mikilvægt að innlendum mælabanka verði komið á laggirnar. Hægt væri að fjármagna hann með sameiginlegu framlagi frá RANNÍS, OS, VÍ, RH og NE ásamt stuðningi frá íslenskum orkufyrirtækjum, en allar þessar stofnanir myndu njóta góðs af tilvist slíks mælabanka. Verið er að vinna að sameiginlegri umsókn frá öllum íslenskum jarðvísindastofnunum í Bygginga- og tækjasjóð RANNÍS, nú í janúar, þar sem sótt er um framlag til fjármögnunar á kaupum hluta mælanna. Farið verður fram á mótframlag frá íslenskum orkufyrirtækjum, þ.a. samanlagt verður til net 10 færanlegra mælistöðva, sem er sá lágmarksfjöldi sem þarf til að koma upp þokkalegum netum og smánetum (arrays). Til að koma í veg fyrir úreltingu þyrfti einnig að vera til staðar í upphafi, áætlun um fjármögnun á eðlilegri endurnýjun tækjanna með tíma. Viðhald ætti að geta farið fram á rannsóknastofnununum sjálfum, því þær reka flestar eigin rafeindastofur.

Áætlaður kostnaður við nauðsynlegan búnað á hverja færanlega stöð er á bilinu 0,9—1,3 milljónir, eftir því hvaða skráningartæki og nemar eru valdir, en kostnaður við einstaka þætti er eftirfarandi:

Skráningartæki, Earth Data, (RefTek-72A, Orion)	~800 þús.
Lennarz-5s þriggja þátta skjálftanemi	~500 þús.
Lennarz-1s þriggja þátta skjálftanemi	~280 þús.
SM-6/A4.5 þriggja þátta skjálftanemi	~100 þús.

Annar búnaður eins og fjarskiptatæki, sólarrafhlöður og vindmyllur, getur einnig verið mikilvægur, en kostnaður við hann er um 320 þús. Ágætis reynsla er af öllum þessum tækjum. SM-6/A4.5 nemarnir hafa verið í notkun í Laugalandsnétinu tvö síðastliðin ár, Lennarz nemarnir hafa verið í Landsneti VÍ í fjölda ára. RefTek skráningartækin hafa verið notuð í öllum PASSCAL verkefnum hér á landi og Orion skráningartæki hafa verið fengin að láni á VÍ og OS frá Uppsala háskóla. Til að byrja með er hægt að notast við gömlu nemana sem til eru á RH, en þeir eru Mark Products L22 stuttbylgjunemar (horntíðni við 2 Hz). Einnig má nota 4.5 Hz nemana úr Laugalandsnétinu, ef þeir verða ekki notaðir í nýrri uppsetningu netsins, en þeir eru að hluta samsettir á Íslandi. Það er því líklegt að á fyrsta stigi uppbyggingarinnar sé hægt að komast hjá því að kaupa nýja nema. Hins vegar mun verða nauðsynlegt að fjárfesta í einhverjum fjölda nema með

meiri bandvídd, t.d. Lennarz-5s (horntíðni við 0.2 Hz), en þeir eru t.d. betur fallnir til skráningar á gosóróa og lágtíðniskjálftum. Verð skráningartækjanna miðast við að keypt séu 7-10 tæki í einu og æskilegast er að byrja ekki með færri stöðvar, því erfitt er að byggja nógu stór og þétt net/smánet úr færri stöðvum. Einnig er vafasamt að byrja með of fá tæki og ætla að treysta á að fá viðbótartækin að láni annars staðar frá. Það kostar ómælda vinnu (og margar krónur) að samhæfa á milli mismunandi tækja frá mismunandi stöðum, og oft eru upplýsingar um svörun og mögnun lánstækjanna ekki viðunandi eða jafnvel rangar.

Sú tækjauppbygging sem hefur verið tíunduð hér að framan felur í sér umtalsverðan stofnkostnað, en mun í staðinn geta skilað miklum árangri á öllum sviðum jarðskjálftarannsóknna, því mikið magn nýrra hágæða smáskjálftagagna mun safnast fyrir; gagna sem á næstu árum geta skilað mikilvægum upplýsingum um skjálftavirkni, spennuástand, eldfjöll og eldvirkni, jarðhitasvæði og jarðlagaskipan. Það er því hagar allra umræddra stofnana að uppbygging fastanetsins og tilurð mælabankans verði að veruleika.

- Útbreiðsla og þétting fastanetsins auðveldar Veðurstofu Íslands að stunda hlutverk sitt um vöktun skjálftavirkni á brotabeltunum og í eldfjöllum, og færanlegir mælar geta komið í veg fyrir kostnaðarsöm mistök í staðsetningu stöðva.
- Þétting netsins og færanlegur mælabanki auðvelda Norrænu Eldfjallastöðinni og Raunvísindastofnun Háskólans að rannsaka innviði eldfjalla, en það er eitt helsta viðfangsefni þessara stofnana á sviði jarðskjálftafræði.
- Þétting netsins við jarðhitasvæði og færanlegur mælabanki skapa gögn og aðstöðu til jarðhitarannsóknna fyrir orkufyrirtækin sem nýta svæðin, en starf Rannsóknasviðs Orkustofnunar (ROS) byggir á slíkum verkefnum. Þróun nýrra og skilvirkra aðferða við jarðhitarannsóknir er mikilvæg fyrir ROS og jarðskjálftarannsóknir eru líklegar til að verða einn af vaxtarbroddunum í næstu framtíð.
- Auknar og nákvæmari hagnýtar upplýsingar um jarðvarmageymana leiða til markvissari nýtingar þeirra, sem getur áfram leitt til umtalsverðs sparnaðar fyrir orkufyrirtækin.

Heimildir

- [1] Sigurður Th. Rögnvaldsson, Kristján Ágústsson, Bergur H. Bergsson, og Grímur Björnsson, “Jarskjálftamælanet í nágrenni Reykjavíkur - lýsing á mælaneti og fyrstu niðurstöður,” Skýrsla VÍ-R98001-JA01, Veðurstofa Íslands, 1998.
- [2] Sigurður Th. Rögnvaldsson, Gunnar B. Guðmundsson, Kristján Ágústsson, Steinunn S. Jakobsdóttir, Ragnar Slunga, og Ragnar Stefánsson, “Overview of the 1993–1996 seismicity near Hengill,” Skýrsla VÍ-R98006-JA05, Veðurstofa Íslands, 1998.
- [3] Sigurður Th. Rögnvaldsson, Kristín S. Vogfjörð, og Ragnar Slunga, “Kortlagning brotflata á Hengilssvæði með smáskjálftum,” Skýrsla VÍ-R99002-JA01, Veðurstofa Íslands, 1999.
- [4] Kristín S. Vogfjörð, “KNET: tillögur að uppsetningu mælanets til skráningar smáskjálfta á háhitasvæðunum við Námafjall, Kröflu, Þeistareyki og í Öxarfirði,” 1999. Greinargerð á OS, maí 1999.

- [5] Kristín S. Vogfjörð, “Smáskjálftar í Kröflu í lok borunar holu KJ-31 í október 1997,” Skýrsla OS-99012, Orkustofnun, 1999.
- [6] Kristín S. Vogfjörð, “Forkönnun mælistaða fyrir skjálftamælanet í NA gosbeltinu,” 1999. Greinargerð á OS, nóv. 1999.