

**Viðnámsmælingar til könnunar djúpstæðra
háhitakerfa. Framvinduskýrsla**

Knútur Árnason

Greinargerð KÁ-2002-01

2002-01-10

VIÐNÁMSMÆLINGAR TIL KÖNNUNAR DJÚPSTÆÐRA HÁHITAKERFA framvinduskýrsla

1. INNGANGUR

Markmið verkefnisins er að þróa og sannreyna viðnámsmæliaðferðir til að kanna tilvist og kortleggja jarðhitavirkni djúpt í jörðu, utan þekktra háhitasvæða. Þær viðnámsmæliaðferðir sem kannaðar eru í verkefninu eru MT-mælingar (Magneto-Telluric), CSMT-mælingar (Controlled-Source-Magneto-Telluric) og TEM-mælingar (Transient-Electro-Magnetic) með tvíþól uppsprettu. Verkefnið gengur út á að bera saman þessar mismunandi aðferðir, eða sambland aðferða, til að meta hvaða aðferðafræði hentar best til að kortleggja jarðhitavirkni neðan þess dýpis sem hefðbundnar viðnámsmælingar skynja, eða á 1-5 km dýpi.

Verkefnið er fjölþjóðlegt samvinnuverkefni en með frumkvæði Orkustofnunar og er íslenski hluti verkefnisins styrktur af Tæknisjóði Rannís, Orkuveitu Reykjavíkur, Hitaveitu Suðurnesja og Landsvirkjun. Erlendu samstarfsaðilar eru: Alþjóðlega Jarðhitastofnunin í Písa á Ítalíu, Háskólinn í Frankfurt, Edinborgarháskóli og Háskólinn í Uppsölum og Háskólinn í Köln.

Verkefnið er sett upp í þremur áföngum á jafnmörgum árum. Fyrsti áfanginn fólst í fræðilegri athugun og líkanreikningum til að kanna kosti og galla hinna mismunandi viðnámsmæliaðferða og næmni þeirra á dýptarbilinu 1-5 km. Sá verkhluti var unninn á tímabilinu frá júlí 1999 til september 2000 og niðurstöður birtar í skýrslu (Knútur Árnason o.fl., 2000a).

Í öðrum áfanga voru gerðar tilraunamælingar þar sem þær aðferðir, sem til skoðunar eru, voru reyndar í raunveruleikanum. Tilraunamælingarnar voru gerðar á um 12 km langri mæilínu meðfram Þrengslavegi, frá Svínahrauni í norðri og suður undir láglandið norðan Þorlákshafnar. Allir erlendu samstarfsaðilarnir lögðu til bæði tæki og mannskap til verksins. Mælingarnar fóru fram í september 2000 og hefur verið gerð grein fyrir framkvæmd og framvindu mælinganna í greinargerð (Knútur Árnason, 2000b).

Þriðji áfangi verkefnisins felst í úrvinnslu og túlkun mæligagnanna og mati á mismunandi aðferðum. Framlag Orkustofnunar til þessa verkþáttar felst einkum í úrvinnslu og túlkun TEM-mæligagna. Upphafleg áætlun gerði ráð fyrir að vinna við hann hæfist í september 2000 og lyki í desember 2001. Vegna óvenju mikilla og brýnna þjónustuverkefna fyrir orkufyrirtæki hefur ekki gefist eins mikill tími til að vinna að þriðja áfanga verkefnisins eins og gert var ráð fyrir og tímaáætlun hefur því ekki staðist að fullu. Allmikil vinna var þó lögð í verkefnið í lok ársins 2000 og byrjun árs 2001 og verulegum árangri og

áföngum náð. Í þessari greinargerð er gerð grein fyrir þeirri vinnu sem þegar hefur verið unnin innan verkefnisins og þeim áföngum sem náðst hafa.

2. FRÁGANGUR OG DREIFING MÆLIGAGNA

Í tilraunamælingunum var safnað miklu magni mæliganga, alls rúmlega 8Gb. Að mælingum loknum var gögnunum hlaðið inn á miðlægt tölvukerfi Orkustofnunar og öryggisfrit tekið. Þau voru síðan flokkuð eftir mælistöðvum (alls var mælt í 20 mælistöðvum), mæliaðferðum (MT, CSMT, TEM) og uppsprettu (tvær uppsprettur voru notaðar; önnur á Sandskeiði og hin við Litlaland). Þá var gengið frá gagnablaði fyrir hverja mælistöð með upplýsingum um staðsetningu og mæliuppsetningu ásamt öðrum nauðsynlegum upplýsingum fyrir úrvinnslu. Gögnin voru síðan skráð á geisladiska og hverjum þátttakanda í verkefninu sent afrit af öllum gögnum og mæliblöðum.

3. ÞRÓUN HUGBÚNAÐR

Að hluta til eru þau gögn sem safnað var í tilraunamælingunum "hefðbundin" rafsegulmæligögn og til er þróaður hugbúnaður til úrvinnslu og túlkunar þeirra. Þetta á einkum við um MT- og CSMT-gögnin. Öðru máli gegnir um TEM-gögnin. Þau skráningartæki sem notuð voru við tilraunamælingarnar (SPAM-tæki) hafa ekki áður verið notuð til skráningar á TEM-gögnum. Því þurfti að þróa nýjan hugbúnað til úrvinnslu gagnanna. Hér er gerður greinarmunur á úrvinnslu mæligagna annarsvegar og túlkun hinsvegar. Með úrvinnslu er átt við tölfræðilega meðferð á tímaröðum og endurteknum mælingum sem leiðir til úrunninna gagna sem síðan eru túlkuð með tilliti til eðlisviðnáms jarðar.

3.1 Hugbúnaður til úrvinnslu CSMT- og MT-mælinga

MT- og CSMT-mælingum hefur lítið sem ekki verið beitt í jarðhitarnsóknnum hér á landi til þessa og vandaður hugbúnaður til úrvinnslu og túlkunar þeirra ekki fyrir hendi á Orkustofnun. Úrvinnsla MT- og CSMT-mælinga er nokkuð flókin og á miklu veltur að notaður sé hugbúnaður sem skilar eins vönduðum niðurstöðum og mögulegt er. Allmikil vinna hefur því verið lögð í að setja upp og bera saman mismunandi hugbúnaðarpakka til úrvinnslu MT- og CSMT-mælinga. Þeirri vinnu er nú að mestu lokið og úrvinnsla gagna úr tilraunamælingunum mun því hefjast fljótlega.

3.2 Hugbúnaður til úrvinnslu tvíþól-TEM-mæligagna

Eins og áður sagði hafa SPAM-tækin, sem notuð voru í verkefninu, ekki verið notuð áður til að skrá TEM-gögn. Þau geta skráð mun lengri samfelldar tímaraðir en yfirleitt er gert. Þetta býður upp á ýmsa nýja möguleika í úrvinnslu gagnanna. Í TEM-mælingum með tvíþól uppsprettu er sent kassalaga straummerki í uppsprettutvíþólinn og hann látinn skipta um straumstefnu með vissu millibili (oftast u.þ.b. 2 s). Í hvert skipti sem skipt er um straumstefnu verður til "transient" rafsegulsvið sem hnignar með tíma. Í hefðbundinni skráningu er hver "transient" skráður sem sjálfstæð tímaröð, óháð öðrum, og margar slíkar tímaraðir stakkaðar saman til að minnka suð. Í tilraunamælingunum í þessu verkefni var skipt um straumstefnu á 2 s fresti en söfnunartækin lätin skrá samamfeldar tímaraðir (með 4096 Hz söfnunartíðni) í 32 s. Með þessu móti fékkst samfelld skráning á 16 "transientum" í einu. Í hverri mælistöð voru skráðar 56 slíkar tímaraðir, eða alls 896

transientar. Með því að skrá svo langar tímaraðir er hægt að sía lágtíðnitruflanir mun betur úr mæligögnum, en í hefðbundinni skráningu.

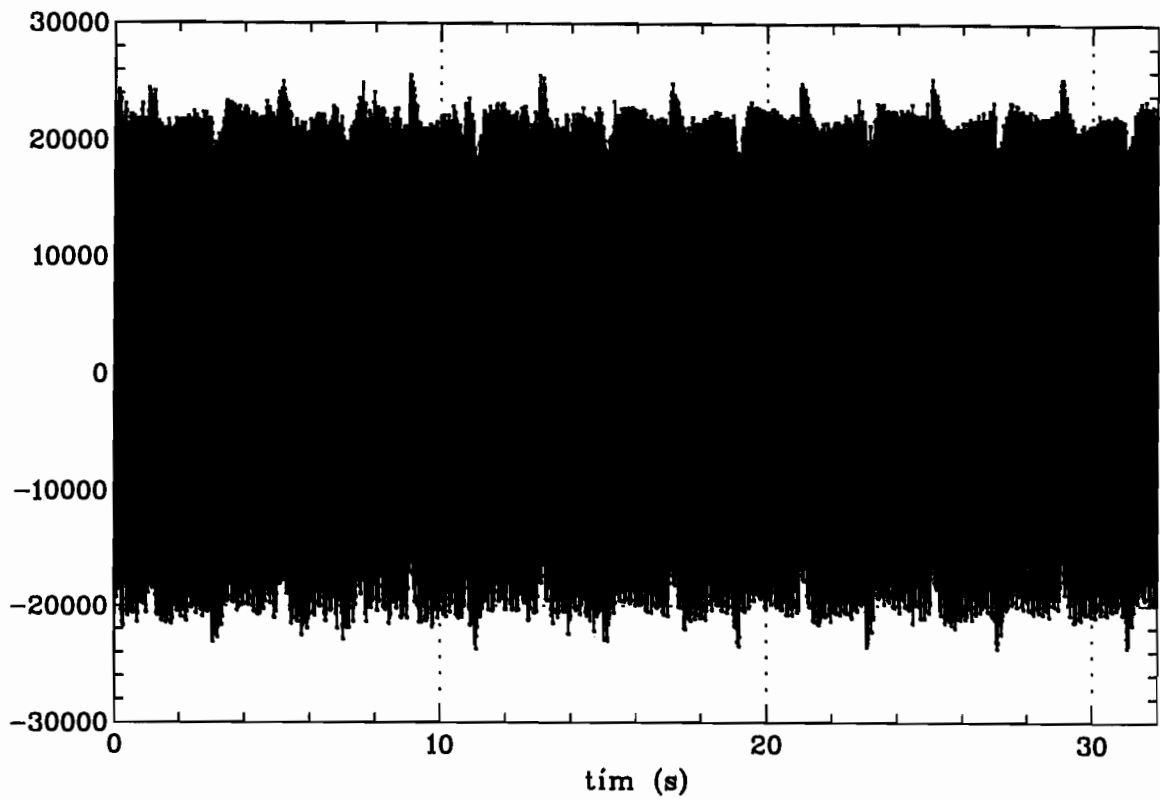
Þar sem SPAM-tækin höfðu ekki áður verið notuð til skráningar á TEM-gögnum þurfti að þróa nýan hugbúnað til lesturs og úrvinnslu gagnanna. Í smaráði við sérfræðinga við Háskólann í Köln var skilgreint ákveðið gagnasnið (format), sem hentar við meðhöndlun tímaráða með rafsegulgögnum. Skilgreindur var upplýsingalisti, sem alltaf er látinn er fylgja hverri tímaröð. Listinn inniheldur allar nauðsynlegar upplýsingar um gögnin og hvaða úrvinnslu hefur verið beitt á þau. Grunnhugsunin í úrvinnsluhugbúnaðinum er að hvert forrit geri afmarkaðar og einfaldar aðgerðir og að gögnin streymi í gegnum röð forrita sem skilgreind er í UNIX skeljaskrá. Mismunandi úrvinnsla fæst með því að bæta við, eða fella burt, einstök forrit í rununni. Þessi aðferðafræði gerir þróun hugbúnaðarins mun auðveldari og hann verður einfaldur og svegjanlegur í notkun. Þetta minnkar auk þess verulega þörf á að skrifa milliskrár, sem er mikill kostur því að gagnamagnið er mikið og allar milliskrár verða plássfrekar. Með þessari aðferð er hægt að lát gögnin streya úr frumgagnaskrá um breytilega úrvinnslulínu og að henni lokinni beint í skrá með fullúrunnum gögnum.

Meginþættirnir í úrvinnslunni eru:

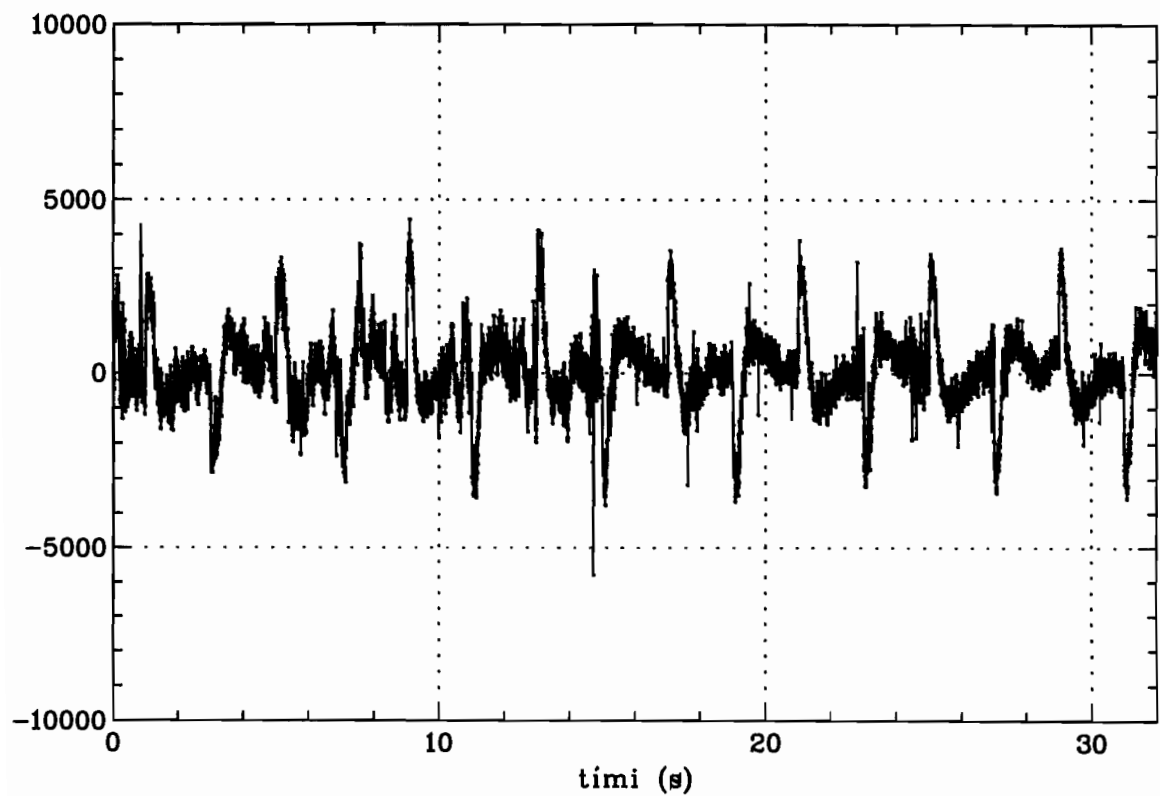
- 1 Lestur úr frumgagnaskrá, innsetning á upplýsingalista fyrir hverja tímaröð.
- 2 Síun til að eyða 50 Hz suði frá háspennulínunum og háhleypisíun til að eyða langtímasveiflum (með sveiflutíma lengri en 4 s).
- 3 Stökkun 56 tímaráða.
- 4 Skipting stakkaðrar tímaráðar upp í 16 "transienta" og stökkun.

Myndir 1, 2, 3 og 4 sýna dæmi um gögn á mismunandi úrvinnslustigum. Mynd 1 sýnir eina 32 s langa tímaröð af hrágögnum. Söfnunartíðni er 4096 Hz þannig að tímaröðin inniheldur 131072 mæligildi. Engar "analog" síur voru notaðar við upptökuna því að þær valda fasabjörgun í gögnunum, sem erfitt er að leiðrétta eftir. Hrágögnin virðast því, við fyrstu sýn, nánast eingögnu 50 Hz suð. Mynd 2 sýnir sömu tímaröð og á mynd 1, eftir að búið er að sía burt 50 Hz suð og lágtíðnisveiflur. Mynd 3 sýnir tímaröð sem fékkst við að stakka 56 tímaröðum eins og á mynd 2. Mynd 4 sýnir loks endanlegan "transient" sem fæst við að klippa tímaröðina á mynd 3 upp í 16 "transienta", formerkaskipti á öðrum hverjum "transien" og stökkun.

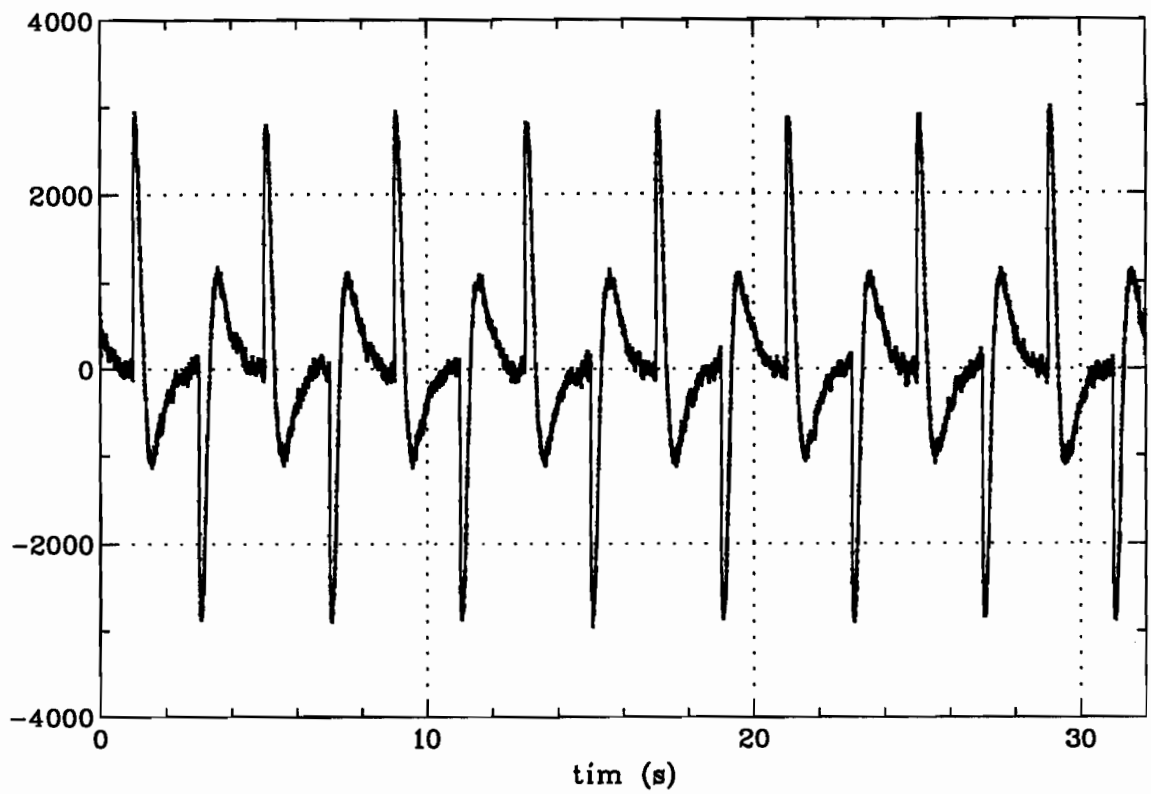
Þróun hugbúnaðar til úrvinnslu TEM-mæligagnanna er nánast lokið og mestum hluta gagnanna hefur verið rennt í gegnum úrvinnslu líkt og lýst er hér að framan. Nokkur frágangsvinna er þó eftir, einkum við að skrifa hugbúnaðarlýsingu. Því er þó lokið fyrir forritasafnið sem notað er við Fourier-greiningu og síun gagnanna og fylgir afrit með þessari greinargerrð.



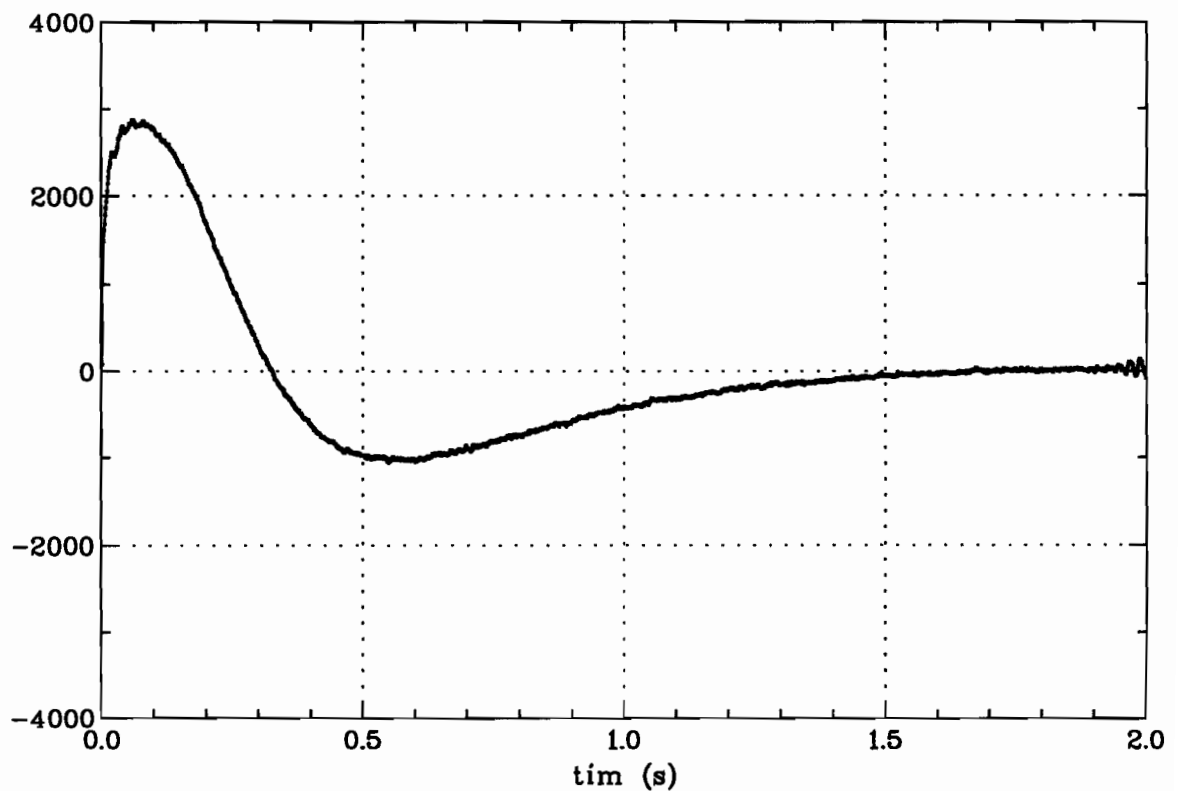
Mynd 1. Tímaröð með hrágögnum.



Mynd 2. Sama tímaröð á mynd 1 eftir að 50 Hz suð og lágtíðnisveiflur hafa verið síðar úr gögnum.



Mynd 3. Tímaröð fengin með því að stakka 56 röðum eins og á mynd 2.



Mynd 4. Loka "transient", fenginn með því að skipta tímaröð á mynd 3 upp í 16 "transienta" og stakka.

3.3 Hugbúnaður til einvíðrar túlkunar tvíþól-TEM-mæligagna

Sú úrvinnsla sem þegar hefur farið fram á TEM-mæligögnunum sýnir að þau verða ekki túlkuð, svo viðunandi sé, með lárétt lagskiptum líkönum (einvíðri túlkun). Við þessu var að búast því að mælsvæðið er í nágrenni við mikið jarðhitakefi undir Hengli og Hellisheiði og viðnámsskipanin er því verulega flókin. Þó að einvíð túlkun sé ekki fullnægjandi er hún nauðsynlegt fyrsta skref að umfangsmeiri túlkun.

Hugbúnaður til einvíðrar túlkunar tvíþól-TEM-mæligagna er ekki fáanlegur á almennum markaði. Ýmsar rannsóknarstofnanir og háskólar eiga slíkan hugbúnað, en hann er í flestum tilfellum sérhæfur og lagaður að sérþörfum. Því var ákveðið að skrifa almennan hugbúnað til einvíðrar túlkunar tvíþól-TEM-mæligagna. Sú vinna er vel á veg komin og mun hugbúnaðurinn geta túlkað hvern hinna 5 þátta rafsegulsviðsins (tvo lárétta þætti rafsviðs og þrjá hornréttu þætti segulsviðs) og einnig fleiri en einn, eða alla, samtímis.

Hugbúnaður er skrifaður það almennt að hann má í raun nota, beint eða með smávægilegum breytingum, til einvíðrar túlkunar á hverskins rafsegul-aðferðum með manngerðri uppsrettu (jarðtengdum tvíþól eða straumlykkju). Hann má því, auk TEM-mælinga, nota til einvíðrar túlkunar á jafnstraumsmælingum og einnig á SCMT-gögnum þar sem tekið er tillit til tvíþóluppsprettunnar. Í túlkun á CSMT-gögnum er yfirleitt gert ráð fyrir að nemar séu það langt frá uppsprettunni að endanleg stærð hennar skipti ekki máli. Þessi nálgun setur verulegar skorður á hversu nálægt uppsprettunni nemarnir meiga vera til að hún sé gild. Í forritinu sem verið er að skrifa, verður hinsvegar tekið fullt tillit til uppsprettunnar og nemar geta því verið eins nærri henni og verkast vill.

3.4 Hugbúnaður til þrívíðrar túlkunar TEM-mæligagna

Eins og áður segir hefur sú úrvinnsla sem farið hefur fram á TEM-mæligögnunum sýnt að ekki verður hægt að túlka gögnin, svo viðunandi sé, með einvíðri túlkun. Á Orkustofnun hefur um nokkurra ára skeið verið til hugbúnaður til þrívíðra líkanreikninga fyrir TEM-mæligögn (í þrívíðum líkönum getur viðnám breyst bæði með dýpi og í láréttar stefnur). Í upphaflegri áætlun fyrir verkefnið var gert ráð fyrir einfaldri þrívíðri túlkun mæligagna með líkanreikningum.

Á vormánuðum 2001 festi Orkustofnun, í samvinnu við Reiknistofu í Veðurfræði, kaup á "ofurtölvu", með 26 hraðvirkum reikniörgjörfum. Með tilkomu þessarar tölvu opnuðust nýir möguleikar á mjög reiknifrekri úrvinnslu mæligagna. Því var ákveðið að láta á það reyna hvort sjálfvirk þrívíð túlkun ("inversion") TEM-mæligagna væri raunhæf. Vinna var hafin við að skrifa 'inversion'-forrit ofan á líkanreikningahugbúnaðinn. Sú vinna gekk framur vonum og ekki er langt í land að nothæft þrívítt 'inversion'-forrit sé tilbúið til notkunar á raunveruleg mæligögn. Eftir því sem best er vitað, verður þetta fyrsta forrit sinnar tegundar í heiminum.

Forritið er byggt á svokölluðum PVM (Parallel Virtual Maschine) hugbúnaði, sem gerir kleyft að dreifa reikniverkefnum á marga örgjörva. PVM hugbúnaðurinn býður einnig upp á þann möguleika að raða nettengdum tölvum saman í sýndar-ofurtölvu. Það þýðir að reiknivinnan er ekki engögnu bundin við sérhannaðar ofurtölvur, heldur er hægt að nýta ónotað reikniafl í öðrum nettengdum tölvum.

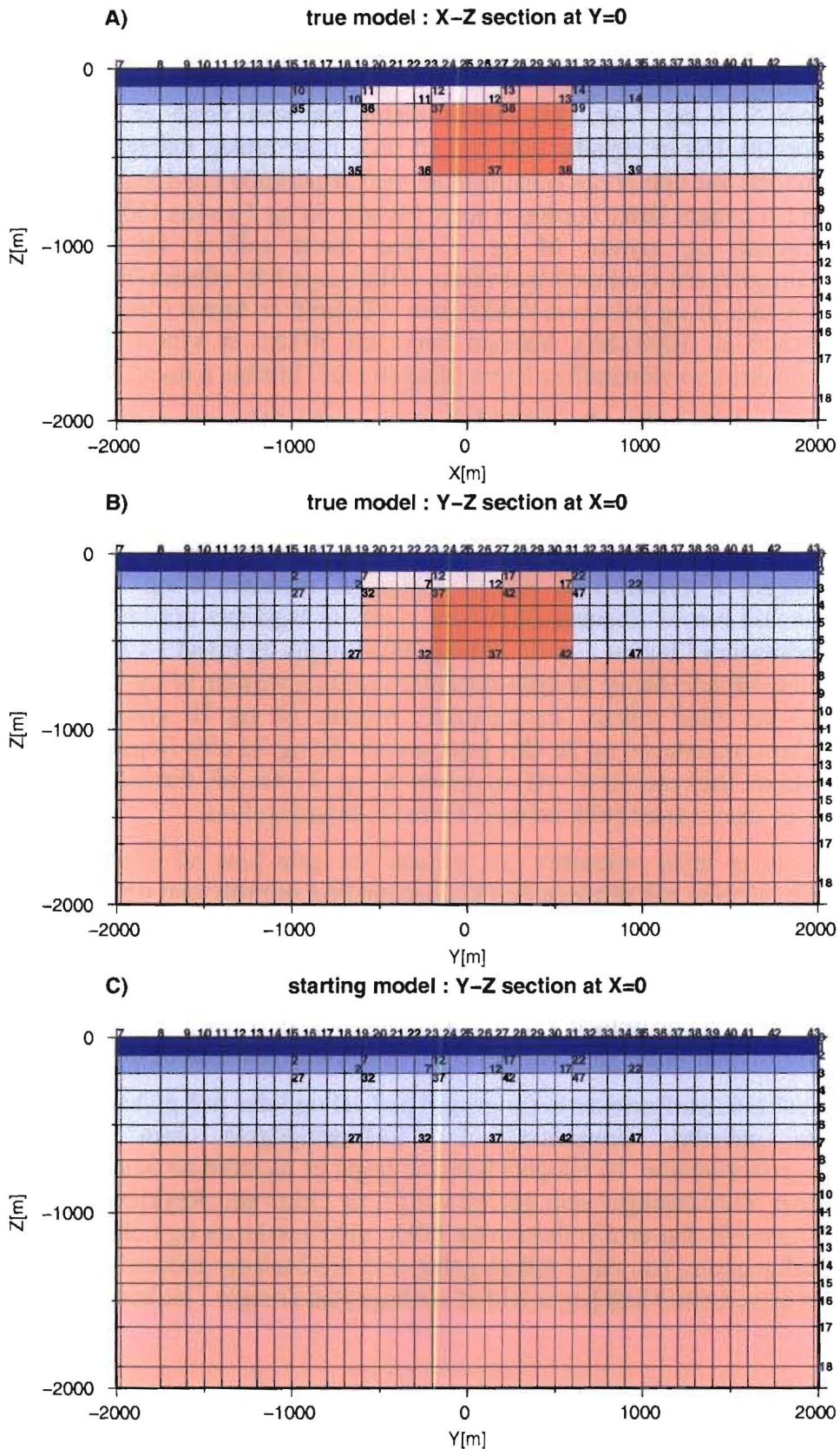
Þróunarvinna við sjálft 'inversion'-forritið er langt komin, en töluverð vinna er eftir við hugbúnað til að setja upp og halda utan um líkón í túlkuninni og einnig til framsetningar á niðurstöðum, en hún er mun flóknari en fyrir einvíða túlkun.

Á myndum 5, 6 og 7 er sýnt einfalt dæmi þar sem verið er að prófa þrívíða túlkunarforritið. Hér er reyndar ekki um að ræða raunveruleg mæligögn, heldur tilbúin prufugögn. Sett var upp þrívítt viðnamslíkan með afmörkuðu lágviðnámsfráviki á 100 til 600 m dýpi, í annars lárétt lagskiptri jörð. Myndir 5a og 5b sýna lóðrétt snið í gegnum viðnámsfrávikið og myndir 6f og 7f sýna lárétt snið á 150 og 350 m dýpi. Eðlisviðnámsgildi eru sýnd með litakvarða. Tiltölulega hátt viðnám (hærra en 30 Ω m) er sýnt með bláum lit og þeim mun dekkri sem viðnámið er hærra (dekksti blái liturinn á mynd 5 svarar til 1000 Ω m). Viðnám lægra en 30 Ω m er sýnt með rauðum lit og þeim mun dekkri sem viðnámið er lægra (dekksti rauði liturinn á mynd 5 svarar til 5 Ω m).

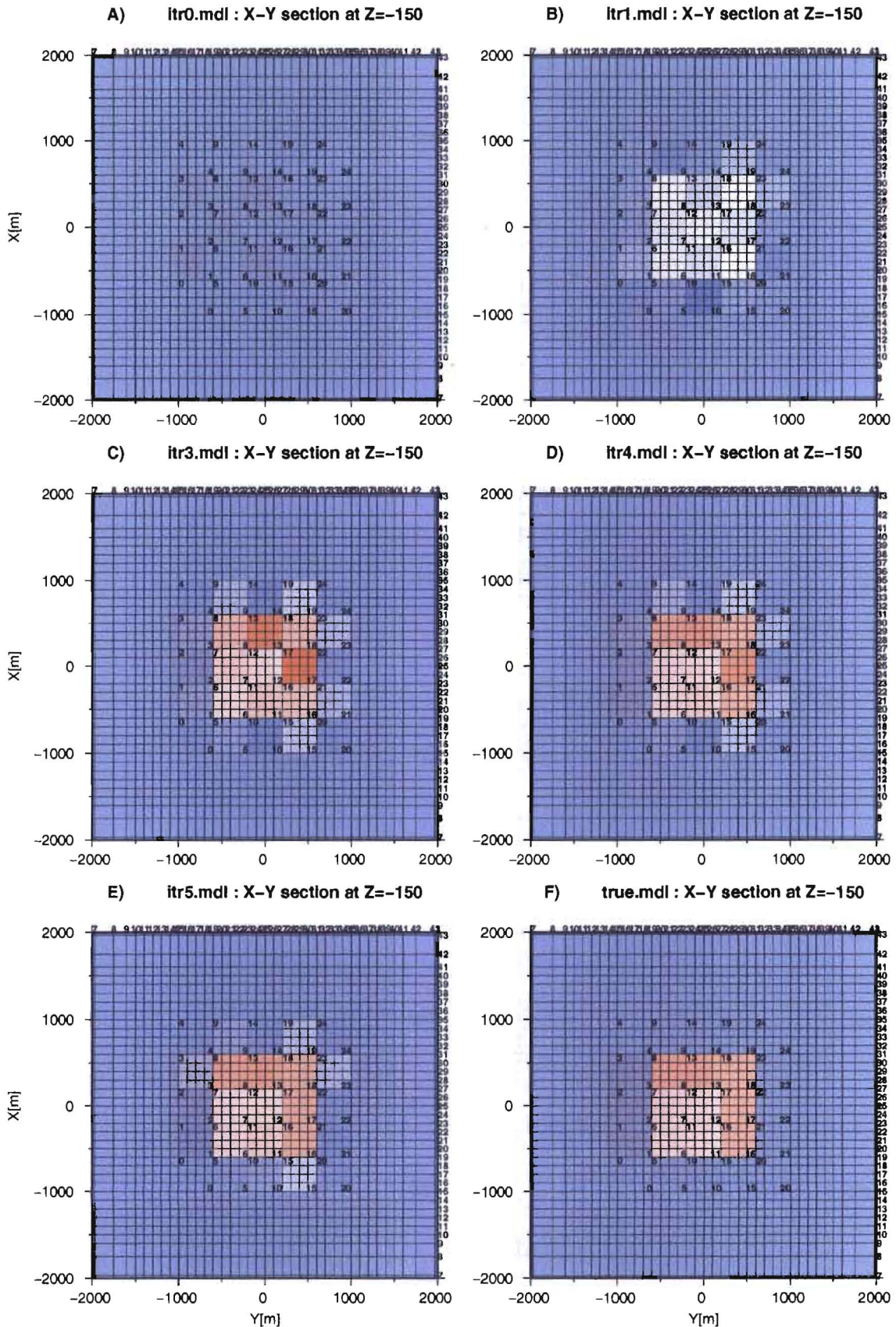
Reiknuð var svörun hefbundinna TEM-mælinga með lykkju-uppsprettu fyrir þetta líkan. Svörunin var reiknuð fyrir 12 mælingar jafndreifðar á yfirborði yfir frávikin (með x- og y-hnit á bilinu -1000 til 1000 m í hnitakerfi á myndum 6 og 7). Reiknuðu ferlarnir voru síðan notaðir sem "mæligögn" og túlkaðir þrívítt. Byrjunarlíkanið var lárétt lagskipt líkan eins og sýnt er á mynd 5c, og túlkunar forritið látið aðlaga viðnámsgildi í 50 kösum í tveimur lögum á dýptarbilinu 100 til 600 m. Á myndum 6 og 7 er sýnt hvernig túlkunarforritið breytir líkaninu skref fyrir skref frá lagskipta upphafslíkaninu. Mynd 6 sýnir viðnámsgildi í laginu á milli 100 og 200 m dýpis og mynd 7 í laginu milli 200 og 600 m dýpis. Myndir 6a og 7a sýna upphafslíkanið og myndir 6f og 7f þrívíða líkaninu sem notað var til að reikna "mæligögnin". Myndir 6b og 7b sýna líkanið eftir eitt ítrekunarskref, myndir 6c og 7c eftir þrjú, myndir 6d og 7d eftir fjögur og myndir 6e og 7e eftir fimm ítrekunarskref. Af myndum 6 og 7 sést að forritið nær að ákvarða raunverulegt líkan nánast fullkomlega í fimm ítrekunarskrefum.

Þrívíð túlkun er mjög reiknifrek. Til gamans má geta þess að hvert ítrekunarskref í dæminu hér að ofan tók rúmlega átta klukkustundir á ofurtölvunni og túlkunin sem sýnd er á myndum 6 og 7 tók því tæpa tvo sólarhringa í samfelldum reikningum. Tölvur geta unnið hvíldarlaust allan sólarhringinn, alla daga ársins, og þó að reiknitími í þrívíðri túlkun sé vissulega langur, er hann þó ekki orðinn lengri en svo að raunhæft er orðið að beita henni á viðnámsmælingar í jarðhitarannsóknnum. Þess má geta hér að ráðgert er að stækka ofurtölvuna verulega á næstunni (tvö til þrefalda reikniafl hennar).

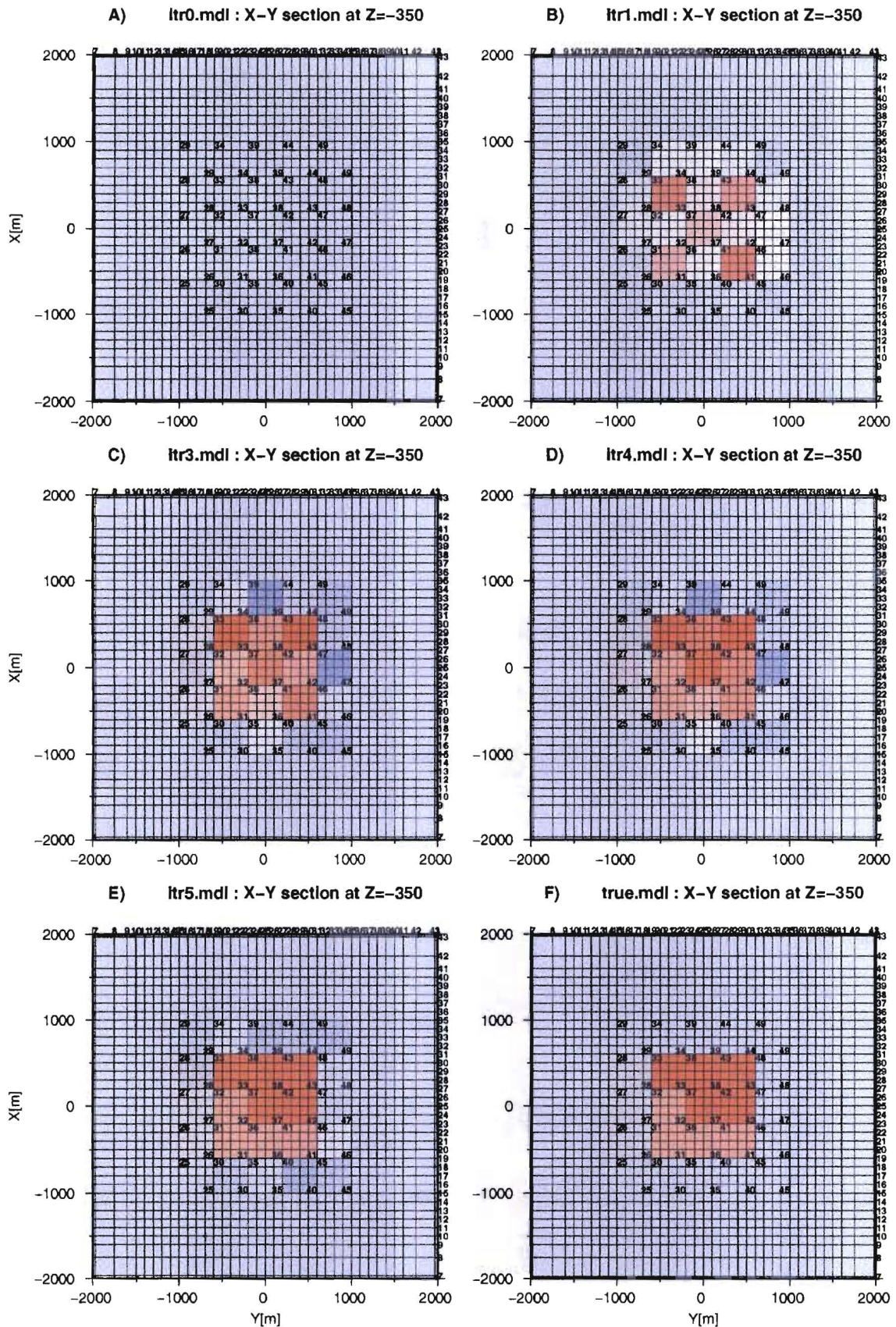
Þróun þrívíð túlkunarforritsins hefur gengið það vel og lofar það góðu að stefnt er að því að beita þrívíðri 'inversion' á TEM-mæligögnin sem safnað var í Djúpvíðnammsverkefninu. Þá má geta þess, að þegar er ákveðið að beita þrívíðri túlkun á hefbundnar TEM-mælingar sem gerðar voru fyrir Orkuveitu Reykjavíkur á Hengils og Hellisheiðarsvæði. Þar er á köflum mjög flókin viðnámsskipan og nokkuð augljós þrívíð áhrif í mæligögnum, þ.a. einví túlkun gefur ekki áreiðanlegar niðurstöður. Því má segja Djúpvíðnammsverkefnið hafi þegar leitt af sér hagnýtan árangur í jarðhitarannsóknnum.



Mynd 5. A) og B) lóðrétt þversnið í gegnum prufulíkan. C) lárétt lagskipt byrjunarlíkan í þrívíðri túlkun.



Mynd 6. Viðnám á 150 m dýpi, A) byrjunarlíkan, B) eftir eina, C) eftir þrjár, D) eftir fjórar og E) og eftir fimm ítrekanir; F) rétt þrúfulíkan.



Mynd 7. Viðnám á 350 m dýpi, A) byrjunarlíkan, B) eftir eina, C) eftir þrjár, D) eftir fjórar og E) og eftir fimm ítrekanir; F) rétt prufulíkan.

4. YFIRLIT UM VINNUFRAMLAG OG KOSTNAÐ

Vinnuframlag í þriðja áfanga verkefnisins (eftir að mælivinnu í öðrum áfanga lauk) er sundurliðuð í eftirfarandi töflu.

Sérfræðingar	stundir	m.mán.
Hjálmar Eysteinnsson	232	1.4
Knútur Árnason	685	4.0
Samt. sérfr	827	5.4

SAðstoðarfólk		
Mathías Lindmann	623	3.8
Tinna Jökulsdóttir	50	0.3
Samt. aðst.f.	673	4.1
Alls	1510	9.5

Í verkáætlun var vinna við þriðja áfanga áætluð 18 mannmánuðir, þ.a. vinna við verkefnið er orðin rúmlega helmingur af áætlun. Eins og fram kom í inngangi, varð verkefnið að víkja nokkuð á árinu 2001 fyrir aðkallandi þjónustuverkefnum fyrir viðskiptavinum Orkustofnunar og er það því nokkuð á eftir tímaáætlun. Stefnt er að því að vinna þá töf upp á fyrrihluta ársins 2002 og að verkefninu ljúki í september 2002.

Árangur og framvinda verkefnisins hefur verið fyllilega í samræmi við vinnuframlag og ekki er ástæða til annars en að gera ráð fyrir að því ljúki innan áætlaðs umfangs, þó að tímaáætlun hafi raskast nokkuð.

HEIMILDIR

Knútur Árnason, Anja Kreuzmann og Hjálmar Eysteinnsson, 2000a: *DEEP GEOTHERMAL PROSPECTING. Phase I, model calculations: Technical report.* Skýrsla Orkustofnunar, OS-2000/083, 74 s.

Knútur Árnason, 2000b: *DEEP GEOTHERMAL PROSPECTING. Phase II, test survey report.* Orkustofnun, greinargerð KÁ-2000/5, 17 s.