



ORKUSTOFNUN
Jarðhitadeild

Áhrif girðinga á TEM-viðnámsmælingar

Knútur Árnason

OS-93004/JHD-02

Janúar 1993



ORKUSTOFNUN
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verknr. 530 341
/os/ka/protem/prufur/girding/girding.t

Áhrif girðinga á TEM-viðnámsmælingar

Knútur Árnason

OS-93004/JHD-02

Janúar 1993

ISBN 9979-827-15-7

ÁGRIP

Gerðar voru tilraunamælingar til að kanna áhrif truflandi leiðara á TEM-viðnámsmælingar. Með Schlumberger-mælivír (0.5 kvaðrat) voru búinir til truflandi leiðarar nálægt mæli-stað. Mæliniðurstöður sýndu að jarðtengdur vír nálægt sendilykkju hefur vart mælanleg áhrif til truflunar. Tengdar vírlykkjur til hliðar við sendilykkjuna ollu truflun á fyrstu 1 ms mælitímans en styrkur truflunarinnar minnkaði ört með vaxandi fjarlægð milli truflunar- og sendilykkju. Tengdar lykkjur sammiðja sendilykkjunni gáfu mikla truflun á fyrstu 1 ms mælitímans en fræðileg rök eru færð fyrir því að truflunin minnki ört þegar truflunarykkjan verður mikið stærri en sendilykkjan.

Sýnt er fram á að hægt er, að verulegu leyti a.m.k., að leiðréttta fyrir truflunum í túlkun mælinganna með því að láta túlkunarforritið líkja eftir spanstraumunum í truflunarleiðaranum. Ekki hefur verið sýnt fram á að slík leiðréttting sé í öllum tilfellum fullnægjandi og því ber að forðast truflanir með því að staðsetja mælingar ekki nærrí girðingum eða öðrum truflandi leiðurum.

EFNISYFIRLIT

ÁGRIP	2
1. INNGANGUR	4
2. FRAMKVÆMD PRÓFANA	6
3. ÓVISSUR Í MÆLINGUM	7
4. NIÐURSTÖÐUR	7
4.1 Mælingar í háviðnámsumhverfi, Geitafell	7
4.2 Mælingar í lágviðnámsumhverfi, Reykjanes	8
5. VANGAVELTUR	15
6. HUGSANLEG LEIÐRÉTTING FYRIR TRUFLUNUM	21
7. SAMANDREGNAR NIÐURSTÖÐUR	24
ENGLISH SUMMARY	25

MYNDASKRÁ

1. TEM-mæling við Geitafell ásamt einvöri túlkun	5
2. TE-mæling á jarðhitasvæðinu á Reykjanesi ásamt einvöri túlkun	5
3. Mismunandi truflunarleiðarar sem settir voru upp	6
4. Geitafell, mæld spenna með truflunarlykkju til hliðar við sendilykkju	9
5. Geitafell, hlutfall truflaðrar og ótruflaðrar spennu	9
6. Geitafell, mæld spenna með jarðtengdan tvíspól til hliðar við sendilykkju	10
7. Geitafell, mæld spenna með truflunarlykkjur sammiðja sendilykkju	10
8. Geitafell, hlutfall truflaðarar og ótruflaðar spennu	11
9. Geitafell, sýndarviðnámsferill fyrir truflunarlykkju innan sendilykkju	12
10. Geitafell, sýndarviðnámsferill fyrir truflunarlykkju utanum sendilykkju	12
11. Reykjanes, mæld spenna með truflunarlykkju til hliðar við sendilykkju	13
12. Reykjanes, hlutfall truflaðarar og ótruflaðar spennu	13
13. Reykjanes, mæld spenna með truflunarlykkju utanum sendilykkju	14
14. Reykjanes, hlutfall truflaðarar og ótruflaðar spennu	14
15. Dæmigerður straumur í truflunarleiðarar sem fall af tíma	19
16. Hámarksstraumur í truflunarlykkju til hliðar við sendilykkju	19
17. Straumur í sendilykkju (I), spenna (E) og spanstrumur (I_s) í 100 m truflunarlykkju	20
18. Hlutfallslegur sampastruðull og truflunarspenna í tómu rúmi	20
19. Ímyndaður straumferill í sendilykkju sem lskir eftir áhrifum fruflunarleiðara	21
20. Geitafell, túlkun á truflaðri mælingu	23
21. Geitafell, tilraun til túlkunar truflaðrar mælingar með viðbrögðum lárétt lagskiptrar jarðar	23

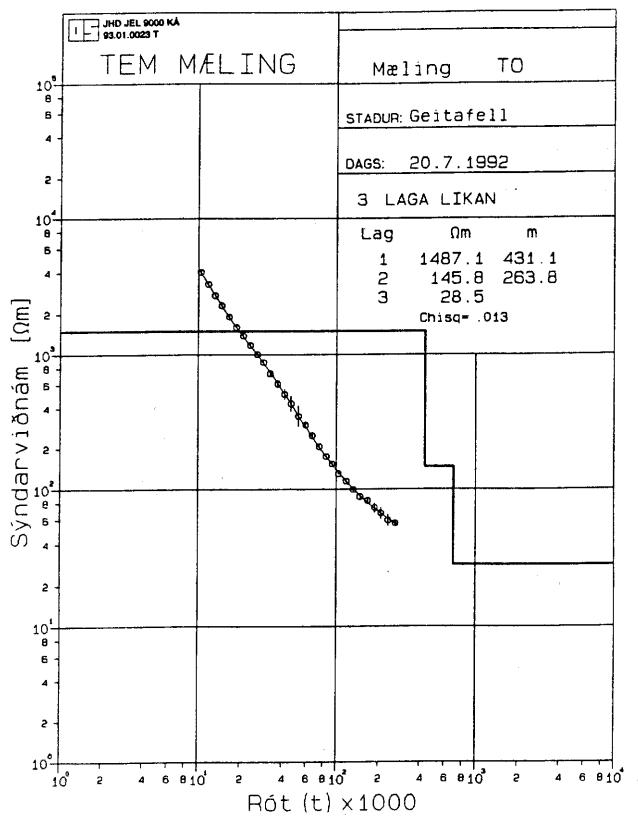
1. INNGANGUR

TEM-viðnámsmælingar byggja á því að láta tímaháð segulsvið frá straumlykkju á yfirborði spana strauma í jörðu og mæla hvernig segulsviðið frá spanstraumunum dofnar með tíma. Eðli máls samkvæmt spanar segulsviðið frá straumlykkjunni einnig strauma í girðingum og öðrum rafleiðurum af manna völdum í nágrenni mælistaðar. Slíkir spanstraumar valda truflunum í mælingunum.

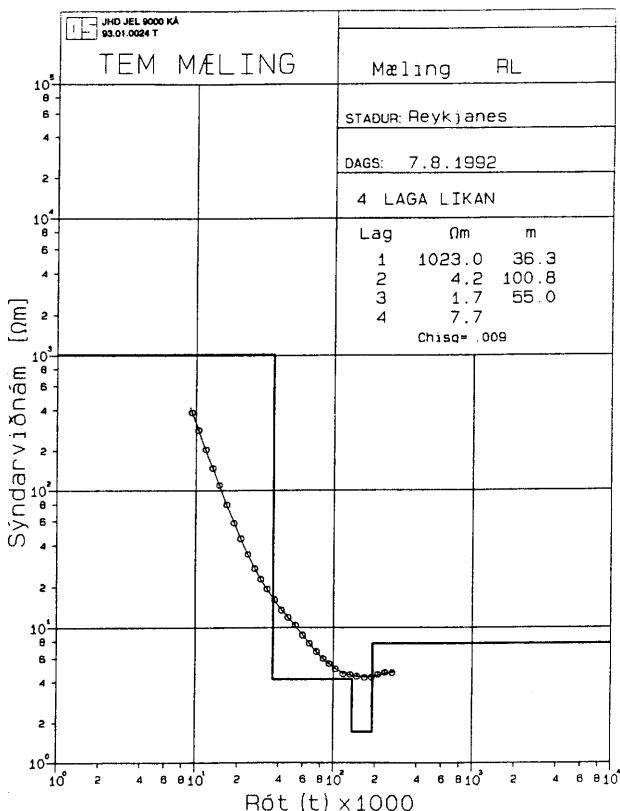
Það er fræðilega mjög flókið að reikna út áhrif slíkra truflandi leiðara á mælingarnar. Það er á hinn bóginn nauðsynlegt að gera sér grein fyrir því hversu alvarlegar þessar truflanir eru og læra að þekkja þær í mældum gögnum. Því var ákveðið að gera tilraunamælingar til að kanna slíkar truflanir.

Valdir voru tveir mælistaðir þar sem ekki eru truflandi leiðarar í næsta nágrenni, við Geitafell vestan Prengslavegar annars vegar og jarðhitasvæðið á Reykjanesi hins vegar. Þessir mælistaðir voru valdir vegna þess að á þeim er eðlisviðnám jarðar mjög ólíkt. Við Geitafell er eðlisviðnám jarðar hátt. Mynd 1 sýnir mældan sýndarviðnámsferil TEM-mælingar við Geitafell ásamt einvíðri túlkun hans. Þar sést að eðlisviðnámið er hærra en $1000 \Omega m$ niður á um $430 m$ dýpi, lækkar síðan í um $150 \Omega m$ sem nær niður á um $700 m$ dýpi þar sem við taka um $30 \Omega m$. Á jarðhitasvæðinu á Reykjanesi er eðlisviðnám jarðar mjög lágt. Mynd 2 sýnir mældan sýndarviðnámsferil á Reykjanesi ásamt einvíðri túlkun. Þar sést að neðan $36 m$ yfirborðslags er eðlisviðnámið um $4 \Omega m$ niður á um $137 m$ dýpi, lækkar síðan í um $1.7 \Omega m$ sem nær niður á tæplega $200 m$ dýpi þar sem við tekur um $8 \Omega m$ eðlisviðnám eins djúpt og mælingin skynjar.

Eftir því sem eðlisviðnám jarðar er lægra mælist sterkara merki frá spanstraumum í jörðinni. Á mælisviði þeirra tækja sem hér eru notuð er mælt merki í hlutfalli við $\rho^{-3/2}$ þar sem ρ er eðlisviðnám jarðar. Mælt merki er því mun hærra (10-100 sinnum) á Reykjanesi en við Geitafell. Af þeirri ástæðu var búist við hlutfallslega mun minni truflunaráhrifum frá leiðurum á yfirborði nálægt mælistað á Reykjanesi en við Geitafell og því voru þessir tveir staðir valdir til tilraunanna.



Mynd 1. TEM-mæling við Geitafell ásamt einvíðri túlkun.



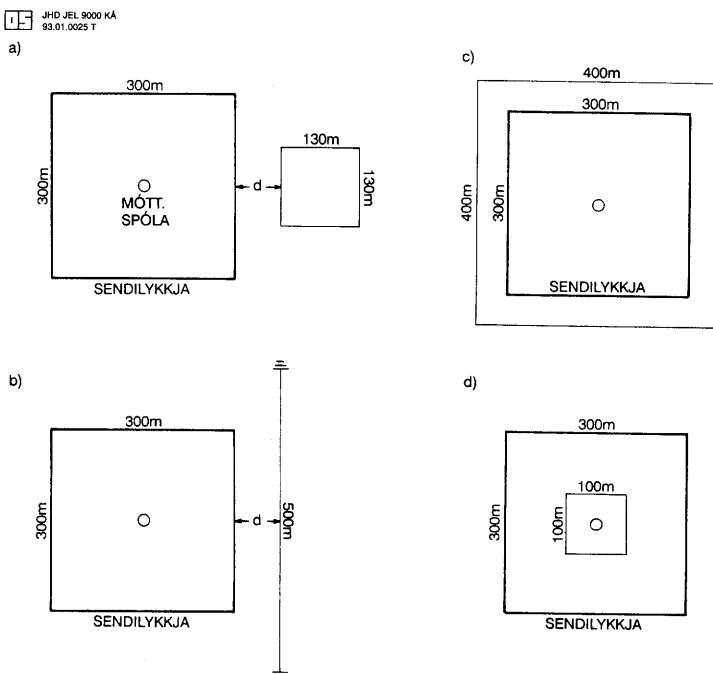
Mynd 2. TEM-mæling á jarðhitasvæðinu á Reykjanesi ásamt einvíðri túlkun.

2. FRAMKVÆMD PRÓFANA

Prófunarmælingarnar hófust á hvorum stað með því að leggja út ferningslagu sendilykkju 300 m á kant og gera viðmiðunarmælingu án ytri truflana. Síðan voru settir truflandi leiðarar nálægt mælistáð og mæliniðurstöður bornar saman við ótruflaða mælingu. Ekki er hægt að líkja eftir öllum hugsanlegum truflandi leiðurum, en settar voru upp þrennskonar truflanir og var til þess notaður 0.5 kvaðrata koparvír (venjulegur Schlumberger mælivír).

- Í fyrsta lagi var lögð út ferningslagu lykkja, 130 m á kant, til hliðar við sendilykkjuna eins og sýnt er á mynd 3a. Viðnám truflunarlykkjunnar var um 23Ω . Gerðar voru mælingar með truflunarlykkjuna í mismunandi fjarlægð d frá sendilykkju og var bæði mælt með lykkjuna opna og lokaða.
- Í öðru lagi var settur 500 m langur vír (tvípóll) samsíða einni hlið sendilykjunnar og í mismunandi fjarlægð d frá henni (sjá mynd 3b). Gerðar voru mælingar bæði með tvípólinn jarðtengdann og ótengdann.
- Í þriðja lagi voru settar truflunarlykkjur sammiðja sendilykkjunni. Annars vegar 400 m ferningur utan um sendilykkjuna (sjá mynd 3c) og hinns vegar 100 m ferningur innan sendilykkjunnar (sjá mynd 3d). Eins og áður var bæði mælt með truflunarlykkjurnar opnar og lokaðar.

Í lok hvers mælidags voru truflunarleiðarar fjarlægðir og framkvæmd mæling án truflana til að kanna hugsanlegar breytingar í niðurstöðum með tíma.



Mynd 3. Mismunandi truflunarleiðarar sem settir voru upp. a) ferningslagu lykkja til hliðar við sendilykkju, b) jarðtengdur tvípóll til hliðar við sendilykkju, c) ferningslagu lykkja utanum sendilykkju d) ferningslagu lykkja innan sendilykkju.

3. ÓVISSUR Í MÆLINGUM

Við endurteknar mælingar án truflana kom í ljós að rek í klukkum mælitækjanna var nokkurt. Á 4 kst seinkaði klukka í móttakaranum sér um $30 \mu s$ miðað við klukku í sendi, eða um $7.5 \mu s$ á kst . Móttakarinn mælir span í móttökuspólu í tímagluggum sem eru jafn-dreifðir í lógarithma, með 10 gildi á tug. Fyrsti tímaglugginn er $87\mu s$ eftir að straumurinn í sendilykkju hefur verið rofinn. Spanspennan í móttökuspólunni fellur mjög hratt með tíma (í megin-dráttum sem $t^{-5/2}$) þannig að rek í klukkum upp á nokkrar μs getur valdið verulegri óvissu í spennugildum í fyrstu tímagluggunum. Vegna reks varð að samhæfa klukkur sendis og móttakar fyrir hverja mælingu og reyna að ljúka hverri mælingu á sem skemmstum tíma (hver mæling tók um $1/2 kst$). Samt sem áður verður að gera ráð fyrir nokkurri óvissu á fyrstu tímagluggum vegna reks. Auk reks í klukkum koma til óvissur vegna breytilegs straums í sendilykkju, suðs í jarðsegulsviði og innra suðs í móttakara.

4. NIÐURSTÖÐUR

Fyrir allar þær þrjár gerðir truflunarleiðara sem settar voru upp kom í ljós að þegar leiðarinn myndaði ekki lokaða straumrás (þ.e. þegar lykkjur voru opnar og tvípólar ójarðtendir) voru áhrif þeirra innan óvissumarka mælinganna. Þetta á bæði við um mælingar í háviðnáms- og lágvíðnámsumhverfi. Ennfremur kom í ljós að áhrif truflunarleiðaranna voru einkum í fyrstu 10 tímagluggunum og voru ekki merkjanleg þegar um $1 ms$ var liðin frá því að straumurinn í sendilykkjunni var rofinn.

4.1 Mælingar í háviðnámsumhverfi, Geitafell

Við Geitafell voru gerðar mælingar með öllum þeim uppsetningum truflunarleiðara sem lýst er hér að framan. Mynd 4 sýnir mælda spennu í fyrstu 20 tímagluggunum (fyrsta glugganum er reyndar sleppt því hann sýndi óregluleg gildi af ókunnum orsökum) þ.e. frá 0.1 og upp í $7 ms$ eftir að straumurinn er rofinn í því tilfelli þegar $130 m$ truflunarlykkja er til hliðar og í mismunandi fjarlægð frá sendilykkju ásamt með ótruflaðri mælingu til viðmiðunar. Á myndinni sést að truflunarlykkjan hefur vel mælanleg áhrif þegar hún er alveg upp við sendilykkjuna en áhrifin fara minnkandi með tíma og eru nánast horfin í 10. tímaglugga (eftir $0.7 ms$). Áhrif truflunarlykkjunnar minnka verulega með aukinni fjarlægð og eru orðin innan óvissumarka þegar fjarlægðin milli lykkjanna er orðin $100 m$. Mynd 4 sýnir ennfremur mismun mældrar spennu með og án truflunar. Mynd 5 sýnir hlutfall mældrar spennu með truflunum og án truflana. Þar sést að mesta truflun er rúmlega 20 % og fer ört minnkandi bæði í tíma og með fjarlægð milli lykkjanna. Hlutfallið virðist nokkuð óstöðugt og er það vegna þess að nokkurt suð er í ótrufluðu mælingunni.

Mynd 6 sýnir mælda spennu í 20 fyrstu tímagluggunum þegar $500 m$ langur jarðtendur tvípóll er samsíða einni hlið sendilykkjunnar og í mismunandi fjarlægð frá henni ásamt ótruflaðri mælingu til viðmiðunar. Af myndinni sést að áhrif tvípólanna eru tæpast utan óvissumarka. Þó má greina að spennan í fyrstu tímagluggunum er aðeins hærri en ella

þegar tvípóllinn er alveg við hlið sendilykkjunnar.

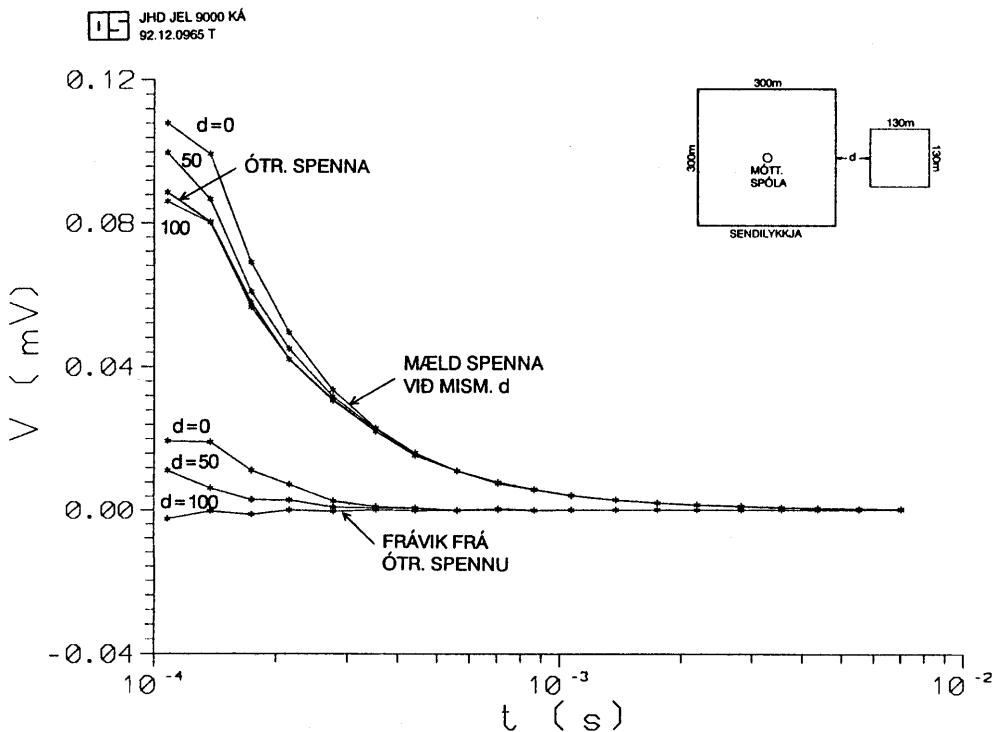
Mynd 7 sýnir mælda spennu í 20 fyrstu tímاغluggunum þegar höfð er truflunarlykkja sammiðja sendilykkjunni, annars vegar 100 m á kant (innan í sendilykkju) og hinsvegar 400 m á kant (utan um sendilykkju) ásamt með ótruflaðri mælingu. Myndin sýnir enn-fremur mismun mældrar spennu með og án truflunar. Áhrif truflunarlykkjanna eru mikil í fyrstu tímاغluggunum en dvína ört í tíma og eru að mestu horfin eftir 1 ms. 100 m lykkjan hefur u.b.b. tvöfalt meiri áhrif en 400 m lykkjan. Mynd 8 sýnir hlutfallsleg áhrif sammiðja truflunarlykkja og til samanburðar hlutfallsleg áhrif lykkja til hliðar við sendilykkjuna. Eins og sjá má eru truflunaráhrifin all að því 15 sinnum meiri en ótrufluð spenna. Myndir 9 og 10 sýna sýndarviðnámsferla með truflunum sammiðja lykkja og þar sést að truflunin er veruleg í fyrstu 10 tímاغluggunum.

4.2 Mælingar í lágvíðnámsumhverfi, Reykjanes

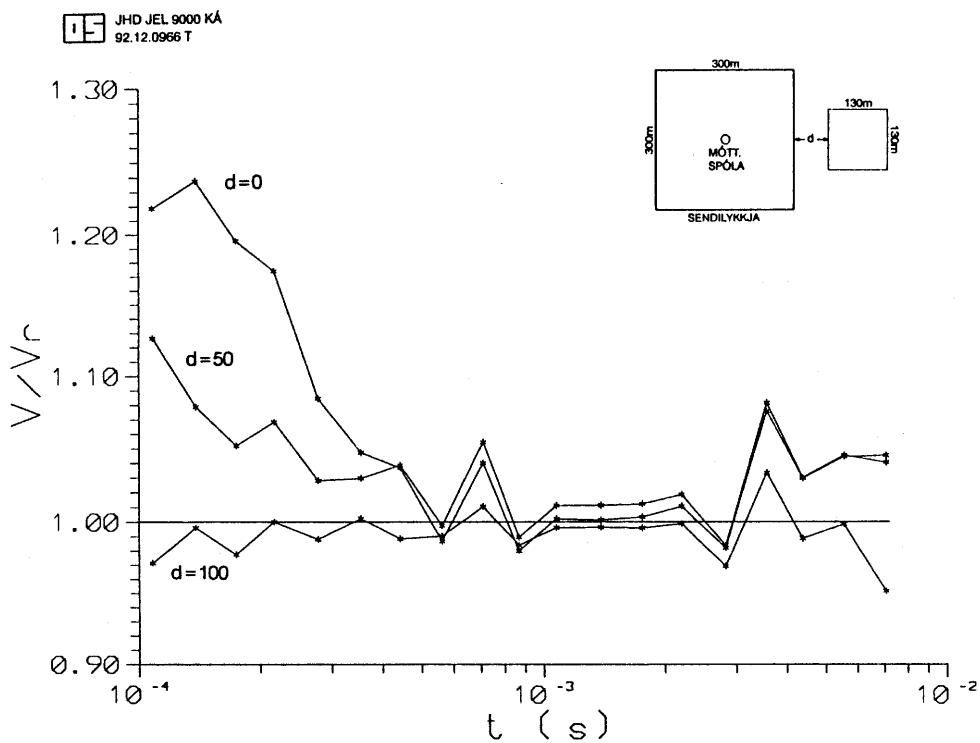
Eins og við var búist voru áhrif truflandi leiðara mun minni á jarðhitasvæðinu á Reykjanesi en við Geitafell, vegna þess að viðnám jarðar er þar margfalt lægra. Þess vegna var ekki talin ástæða til að gera mælingar með öllum þeim sömu truflunarleiðurum og við Geitafell. Gerðar voru mælingar með 130 m lykkjum, 0, 50 og 100 m til hliðar við sendilykkjuna, með 500 m jarðtengdum tvípól meðfram hlið sendilykkju og 400 m fernings-lykkju sammiðja sendilykkju. Sendilykkjan var í öllum tilvikum feringur 300 m á kant. Áhrif truflunarleiðaranna voru um eða innan við óvissumörk mælinganna (þær óvissur sem máli skipta hér eru vegna reks í klukkum og breytileika í útsendum straumi).

Mynd 11 sýnir mælda spennu í 20 fyrstu tímاغluggum með 130 m truflunarlykkju í mis-munandi fjarlægð frá sendilykkjunni ásamt með ótrulaðri mælingu. Myndin sýnir enn-fremur mismun truflaðra og ótrufllaðrar mælingar. Mynd 12 sýnir hlutfall truflaðra og ótrufllaðrar mælingar. Af myndunum sést að ef til vill er marktækur munur í fyrstu tímاغluggunum (upp á 1 - 2 %) þegar lykkjurnar eru hvor upp við aðra, en mesti munurinn er vegna breytileika í útsendum straum upp á 1 - 3 %. Áhrif 500 m jarðtengds tvípóls við hlið sendilykkjunnar voru vel innan óvissumarka mælinganna.

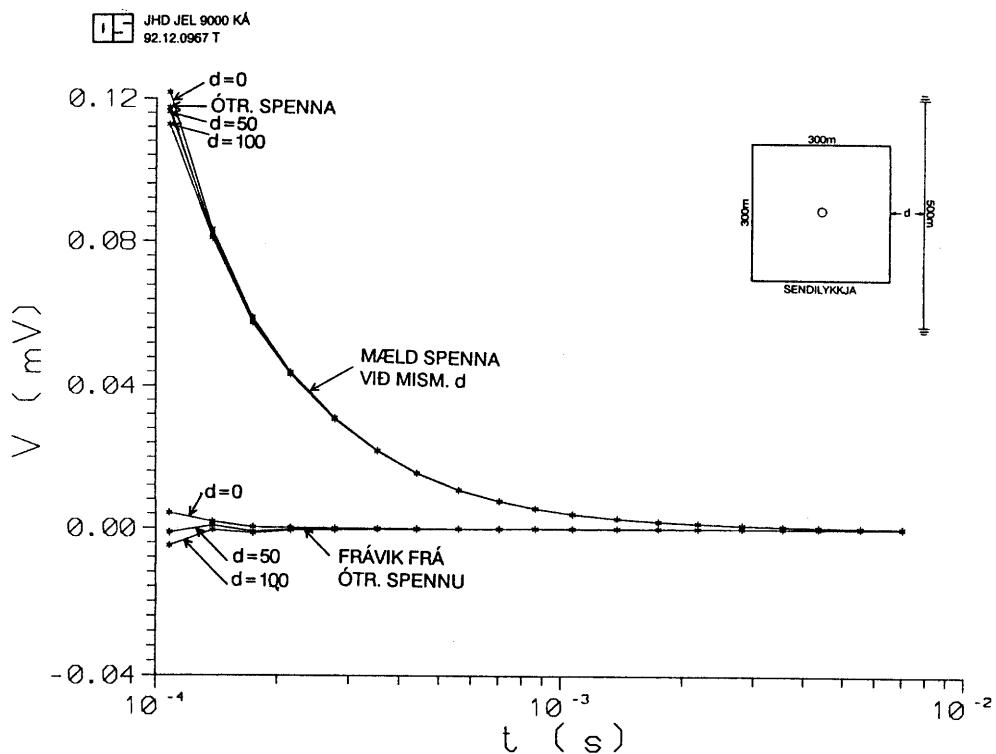
Mynd 13 sýnir mælda spennu í 20 fyrstu tímاغluggum þegar lykkja 400 m á kant er utan-um sendilykkjuna, ótruflaða spennu og mismun truflaðrar og ótrufllaðrar mælingar. Mynd 14 sýnir hlutfall truflaðrar og ótrufllaðrar mælingar. Á mynd 14 sést að þegar búið er að taka tillit til mismunar í straum upp á um 0.5 % sést frávik upp á um 1 % í fyrstu tímاغluggunum sem minnkar og er horfið við 0.7 ms. Eins og áður segir er þetta frávik í óvissumörkum og hefur ekki marktæk áhrif á sýndarviðnámsferilinn.



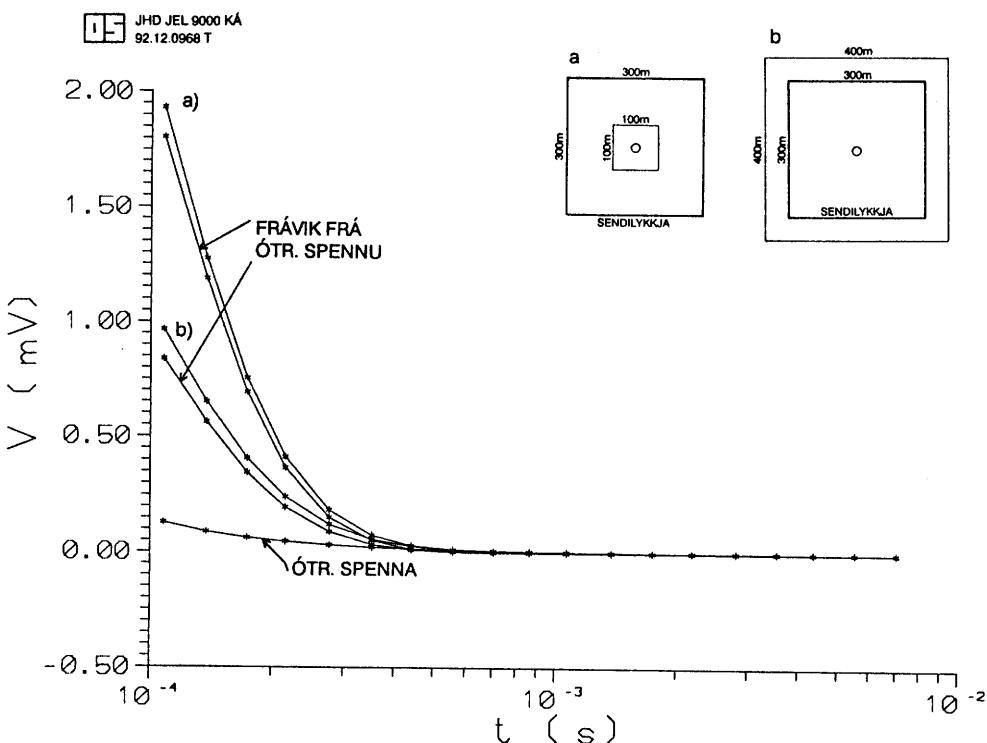
Mynd 4. Geitafell, mæld spenna með truflunarlykkju til hliðar við sendilykkju og mismunur truflaðrar og ótruflaðrar spennu.



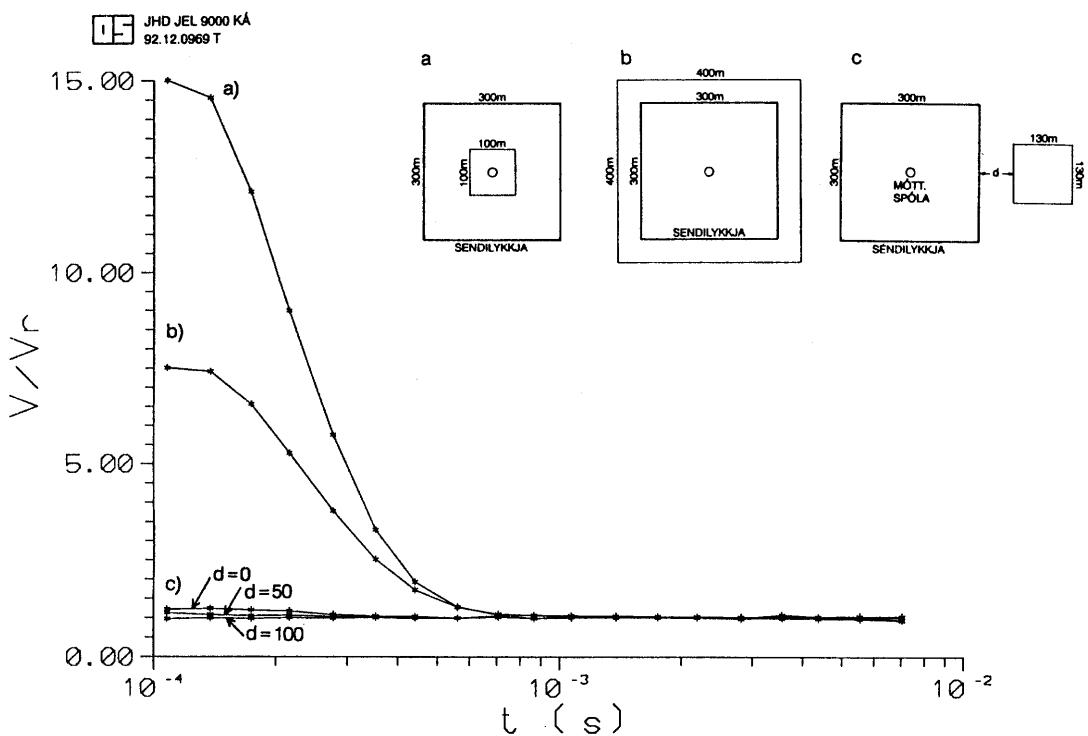
Mynd 5. Geitafell, hlutfall truflaðrar og ótruflaðrar spennu með truflunarlykkju til hliðar við sendilykkju.



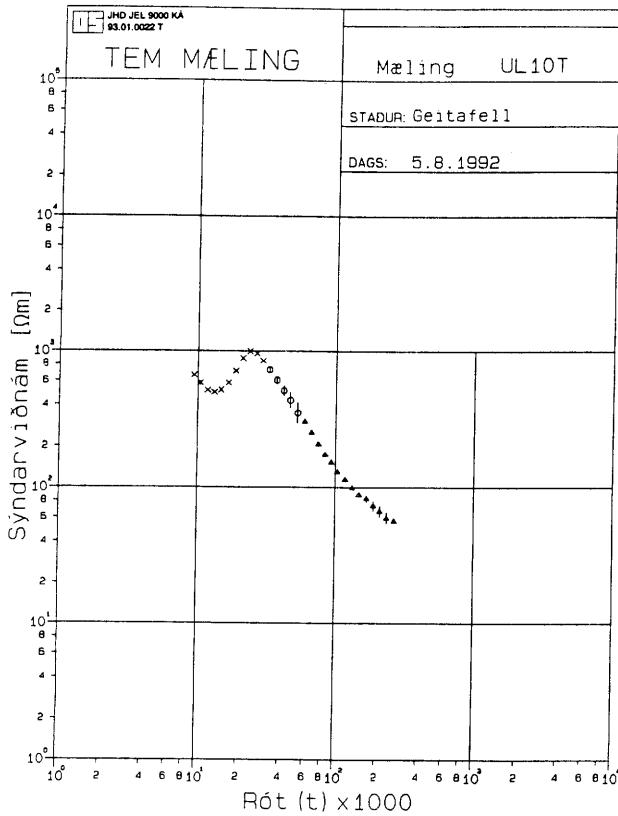
Mynd 6. Geitafell, mæld spenna með jarðtengdan tvípól til hliðar við sendilykkju og mismunur truflaðrar og ótruflaðrar spennu.



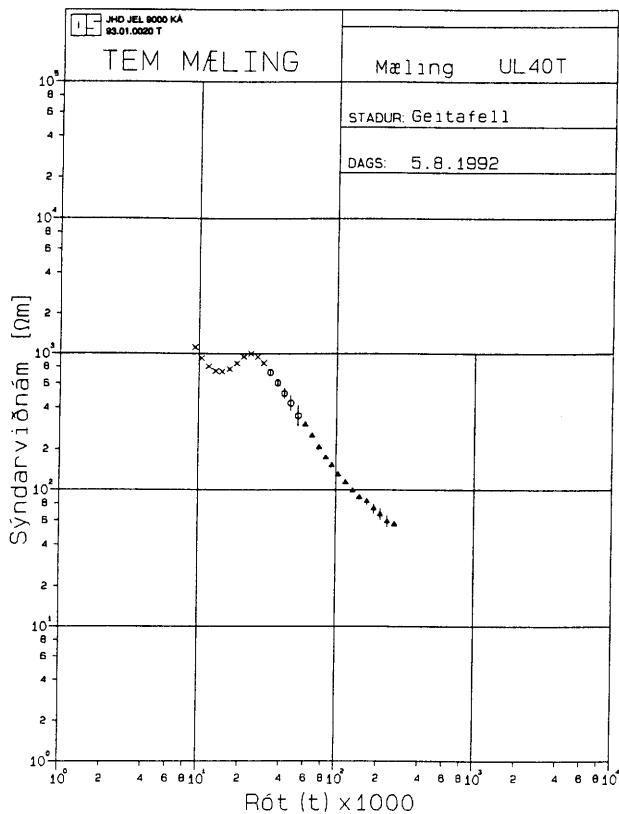
Mynd 7. Geitafell, mæld spenna með truflunarlykkjur sammiðja sendilykkju, a) innaní, b) utanum, ásamt fráviki frá ótruflaðri spennu.



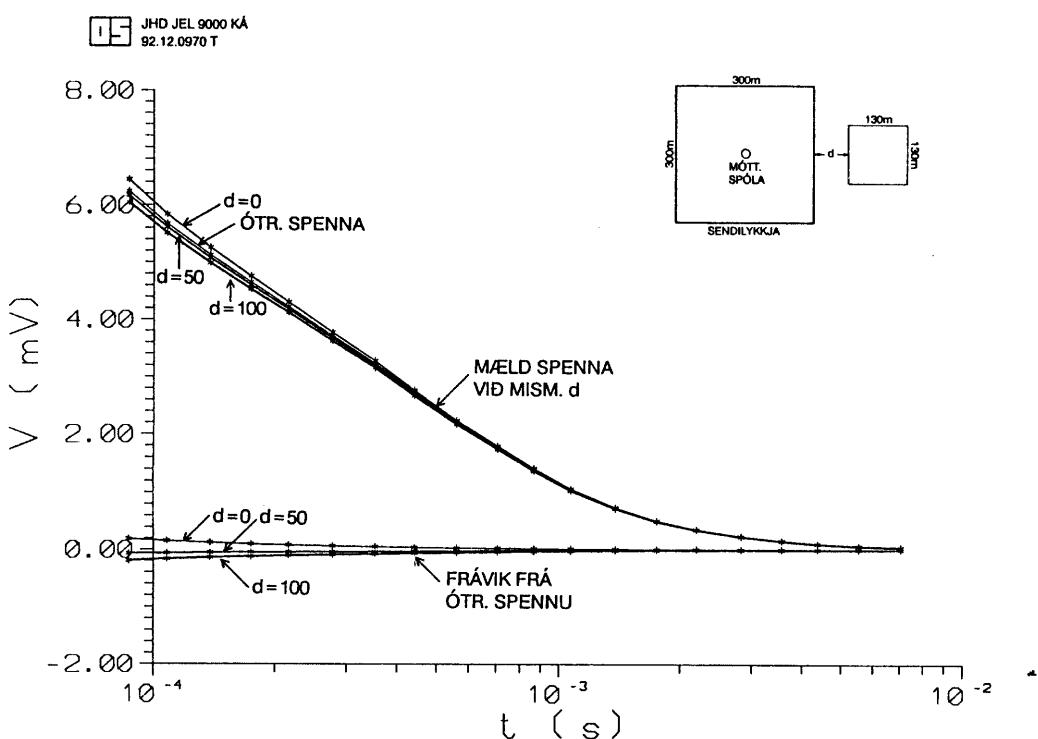
Mynd 8. Geitafell, hlutfall truflaðarar og ótruflaðrar spennu fyrir truflunarlykkjur a) innan í b) utanum og c) til hliðar við sendilykkju.



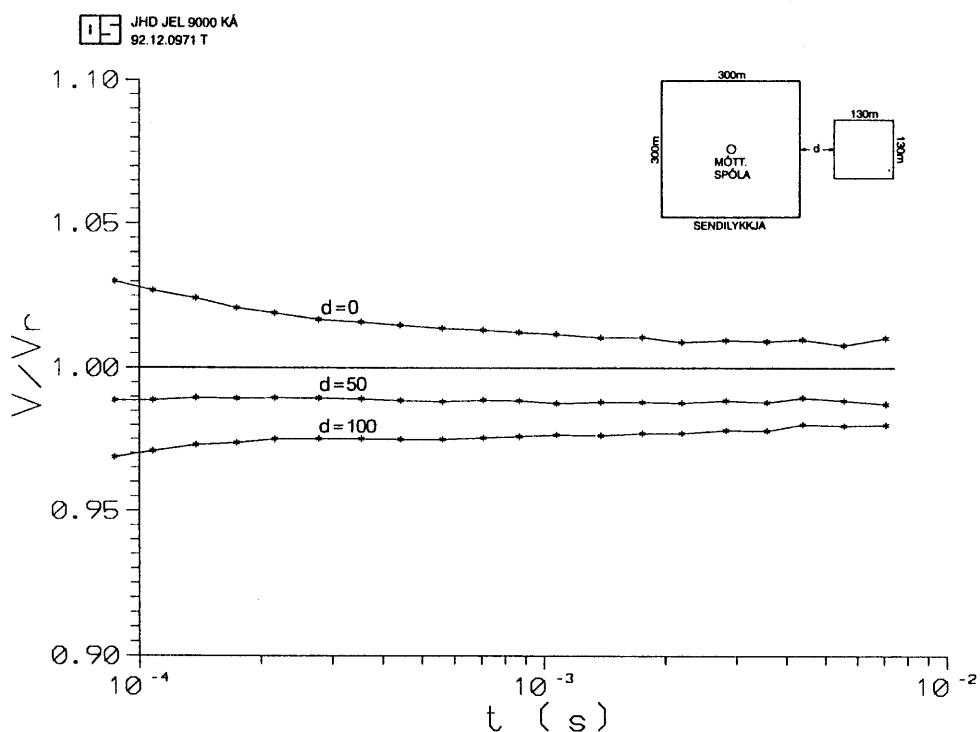
Mynd 9. Geitafell, sýndarviðnámsferill fyrir truflunarlykkju innan sendilykkju.



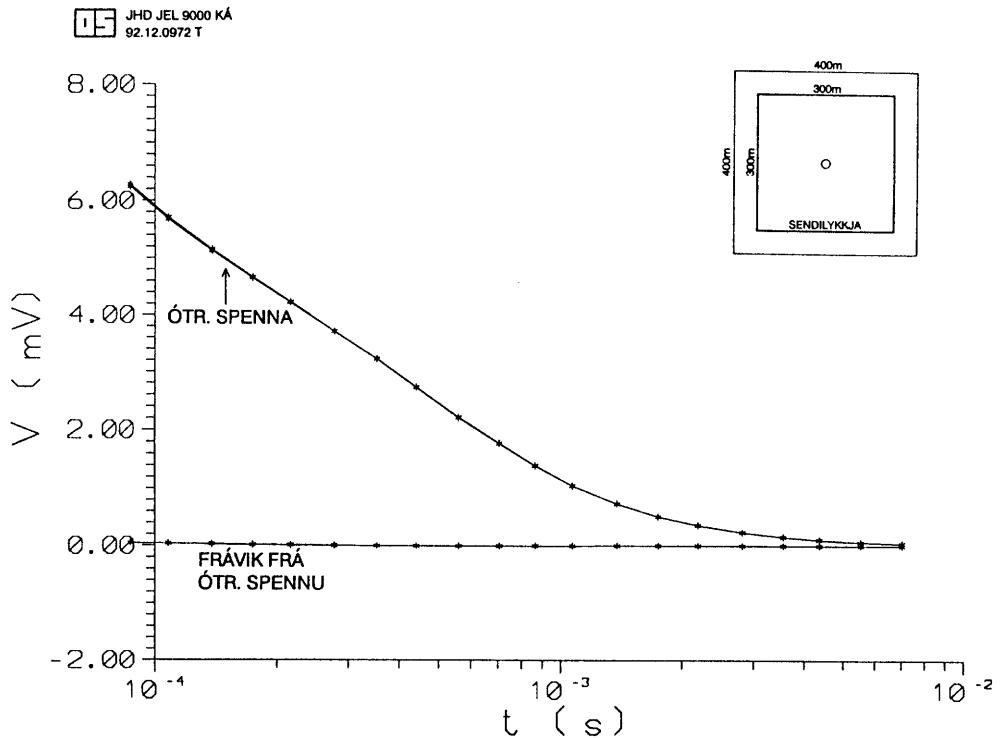
Mynd 10. Geitafell, sýndarviðnámsferill fyrir truflunarlykkju utanum sendilykkju.



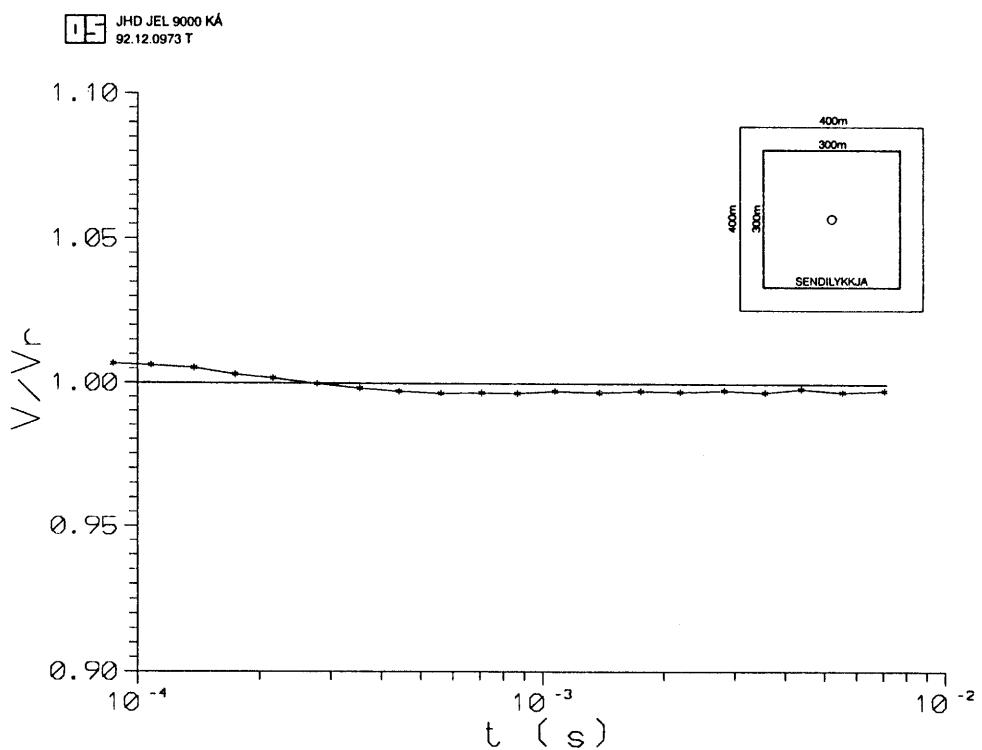
Mynd 11. Reykjanes, mæld spenna með truflunarlykkju til hliðar við sendilykkju og mismunur truflaðrar og ótruflaðrar spennu.



Mynd 12. Reykjanes, hlutfall truflaðrar og ótruflaðrar spennu með truflunarlykkju til hliðar við sendilykkju.



Mynd 13. Reykjanes, mæld spenna með truflunarlykkju utanum sendilykkju og frávik frá ótruflaðri spennu.



Mynd 14. Reykjanes, hlutfall truflaðrar og ótruflaðrar spennu með truflunarlykkju utanum sendilykkju.

5. VANGAVELTUR

Til þess að kanna spanstrauminn í truflunarleiðurunum var spenna mæld yfir 1Ω viðnám (1 mV spenna svarar til 1 mA straums) og merkið skoðað á sveiflusjá. Mynd 15 sýnir dæmigerðan straumferil sem fall af tíma. Straumurinn nær hámarki um 0.4 ms eftir að hann byrjar að rísa og hnígur síðan í megintráttum eftir veldislögmáli (e. exponentially) í tíma og er orðinn nánast enginn eftir um 2 ms (tímafasti veldishnignunarinnar er um 1 ms). Mynd 16 sýnir hámarkssrauminn í ferningslagu lykkju, 130 m á kant og í mismunandi fjarlægð frá sendilykkju við Geitafell. Straumurinn í sendilykkjunni er 23.4 A . Hámarksstraumurinn er um 200 mA þegar einn hlið truflunarlykkunnar er alveg við sendilykkju en minkar mjög ört með fjarlægð milli lykkjanna. Myndin sýnir enn fremur fræðilega reiknaða ferla fyrir lykkjur í tómu rúm (þ.e. ef jörðin væri ekki til staðar). Fræðilegu ferlarnir sýna einungis hlutfallslega breytingu spanstraumsins sem fall af fjarlægð truflunarlykkunnar frá sendilykkju og hafa verið skalaðir þannig að þeir falli að mældu gildi þegar fjarlægðin, d , milli lykkjanna er 50 m . Annars vegar er gert ráð fyrir því að líta megi á segulsviðið frá sendilykkjunni sem svið frá óandanlega löngum leiðara sem fellur saman við þá hlið sendilykkunnar sem næst er truflunarlykkjunni (hámarksstraumurinn er í hlutfalli við $\ln[(d+a)/d]$, brotin lína á mynd, a er hliðarlengd truflunarlykkju og d er fjarlægð milli lykkjanna). Þetta ætti að vera góð nálgun þegar truflunarlykkjan er miklu minni en sendilykkjan og fjarlægðin milli þeirra er miklu minni en hliðarlengd sendilykkju. Hins vegar er gert ráð fyrir því að lykkjurnar séu litlar miðað við fjarlægðina milli þeirra (hámarksstraumurinn er í hlutfalli við d^{-2} , punktalína á mynd). Á mynd 16 sést að mæld gildi falla vel að þessum fræðilegu ferlum.

Vegna víxlverkunar við spanstrauma í jörðinni er mjög flókið að reikna út í smáatriðum hversu mikill straumur spanast í truflunarlykkjunni á mismunandi tímum og verður það ekki reynt hér. Til að meta áhrif jarðarinnar er hins vegar fróðlegt að reikna út spanstrauminn í truflunarlykkju sammiðja sendilykkju ef jörðin væri ekki til staðar, þ.e.a.s. ef lykkjurnar væru í tómu rúmi. Til þess að reikna spanstrauminn í tómu rúmi þarf að reikna sjálfspanstuðul (e. self inductance) truflunarlykkunnar og samspanstuðul (e. mutual inductance) lykkjanna og það má gera á tiltölulega einfaldan hátt. Sjálfspanstuðull ferningslagu lykkju með hliðarlengdina b er gefin sem

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} b \left[2 \cdot \ln \left(\frac{b}{r} \right) + \ln \left(4 \frac{\sqrt{2} - 1}{\sqrt{2} + 1} \right) + 2 \cdot \sqrt{2} - 4 \right] \quad (1)$$

þar sem μ_0 er segulviðtaksstuðull tómarúms ($4\pi \cdot 10^{-7}$) og r er þverskurðarradius vírsins í lykkjunni. Viðbragðseiginleikar lykkunnar ráðast af tímastuðli hennar τ sem er hlutfall sjálfspanstuðulsins L og viðnámsins R þ.e.a.s:

$$\tau = L/R \quad ; \quad R = \rho_v \frac{4 \cdot b}{\pi r^2} \quad (2)$$

þar sem ρ_v er eðlisviðnám vírsins í lykkjunni. Af jöfnum (1) og (2) sést að

$$\tau = \frac{\mu_0 \cdot r^2}{4 \cdot \rho_v} \left[2 \cdot \ln \left(\frac{b}{r} \right) + \ln \left(4 \frac{\sqrt{2} - 1}{\sqrt{2} + 1} \right) + 2 \cdot \sqrt{2} - 4 \right] \quad (3)$$

Fyrir sammiðja ferningslagu lykkjur eins og sýndar eru á myndum 3c og 3d er samsíðullinn M gefin sem:

$$M = \frac{\mu_0}{\pi} \left[m \cdot \ln \left(\frac{\sqrt{p^2+m^2}+m}{\sqrt{p^2+m^2}-m} \cdot \frac{\sqrt{2}-1}{\sqrt{2}+1} \right) + p \cdot \ln \left(\frac{\sqrt{p^2+m^2}+p}{\sqrt{p^2+m^2}-p} \cdot \frac{\sqrt{2}-1}{\sqrt{2}+1} \right) \right] + \frac{\mu_0}{\pi} \left[2 \cdot \sqrt{2} \cdot (m+p) - 4 \cdot \sqrt{p^2+m^2} \right] \quad (4)$$

þar sem $p = (a+b)/2$, $m = (a-b)/2$ og a og b eru hliðarlengdir sendi- og truflunarlykkju. (Ath. jafna (1) fæst af (4) með því að setja $p = b$ og $m = r$ og nota að $b \gg r$).

Íspennan E (e. electromotive force) sem myndast í truflunarlykkjunni er gefin sem mínus tíma-afleiðan af segulflæðinu Φ í gegnum lykkjuna:

$$E = - \frac{d\Phi}{dt} = - M \cdot \frac{dI}{dt} \quad (5)$$

Straumsendirinn fellir strauminn línulega frá útsendu straumgildi I og niður í núll á roftímanum t_0 . Ef núllpunktur tímaássins er settur þegar straumurinn er orðinn 0, þá er til staðar föst íspenna á tímabilinu $-t_0$ til 0. Spanstraumurinn í truflunarlykkjunni er þá gefinn sem:

$$I_s(t) = \begin{cases} 0 & t < -t_0 \\ E/R \cdot \left[1 - e^{-(t_0+t)/\tau} \right] & -t_0 \leq t \leq 0 \\ E/R \cdot \left[1 - e^{-t_0/\tau} \right] \cdot e^{-t/\tau} & 0 < t \end{cases} \quad (6)$$

Á mynd 17 er sýnt tilvik þegar ferningslagu truflunarlykkja, 100 m á kant, er innan í sendilykkju sem er 300 m á kant eins og sýnt er á mynd 3d. Vírinn í truflunarlykkjunni er koparvír með þverskurðar-radíus $r = 4 \cdot 10^{-4}$ m (0.5 kvaðrat) og eðlisviðnámið $\rho_v = 2.2 \cdot 10^{-8}$ Ωm. Ef straumurinn í sendilykkjunni er $I = 23.1$ A og roftíminn $t_0 = 250$ μs, eins og þessi gildi mældust með þessari uppsetningu við Geitafell, þá fæst samkvæmt jöfnum (2) - (5) hér að ofan að:

$$\tau = 53 \text{ } \mu\text{s} ; R = 17.6 \Omega ; M = 3.96 \cdot 10^{-5} \text{ H} ; E = 3.65 \text{ V} ; \frac{E}{R} = 207 \text{ mA} \quad (7)$$

Á mynd 17 er sýndur reiknaður spanstraumur í truflunarlykkjunni í tómu rúmi (brotinn ferill) og mældur spanstraumur með sveiflusjá (heildreginn ferill). Mismunur ferlanna er vegna áhrifa jarðarinnar. Mesti mældur straumur í truflunarlykkjunni var um 90 mA við tíma upp á um 0.4 ms eftir að straumurinn byrjaði að rísa (þ.e. um 400 μs eftir að sendirinn byrjar að fella strauminn í sendilykkjunni).

Samsvarandi tölur fyrir 400 m ferningslagu lykkju utan um 300 m sendilykkju eru:

$$\tau = 59 \mu s ; R = 70.4 \Omega ; M = 35.1 \cdot 10^{-5} H ; E = 32.7 V ; \frac{E}{R} = 465 mA \quad (8)$$

Mesti mældur straumur í truflunarykkjunni á yfirborði jarðarinnar var um 200 mA, um 0.4 ms eftir að straumurinn byrjaði að rísa (þ.e. um 400 μs eftir að sendirinn byrjar að fella strauminn).

Í báðum tilfellum er mesti straumur í truflunarykkjunni rúmlega helmingi minni en í tómu rúmi og tíminn sem tekur að ná hámarki er um tvöfalt lengri. Þetta svarar til þess að vegna spanstrauma í jörðinni sjáí truflunarykkjan tvöfalt lengri roftíma en í tómu rúmi. Á mynd 17 sést ennfremur (lögun spanstraumsferilsins fyrir 400 m lykkju er svipuð) að sé hnignun spanstraumsins í truflunarleiðaranum nálguð með veldisfalli er tímafastinn τ_e um 10 - 20 sinnum stærri fyrir lykkju á yfirborði jarðar en í tómu rúmi.

Það má færa fyrir því nokkur rök að tímafastinn τ_e fyrir lykkju á yfirborði jarðar sé háður rúmfræðilegum eiginleikum truflunarykkjunnar á svipaðan hátt og lykkju í tómu rúmi. Samkvæmt jöfnu (2) hér að framan vex tímafasti ferningslagu lykkju í tómu rúmi eins og $ln(b)$ þegar hliðarlengin b er stór, sem þýðir að hann vex hægt með hliðarlengdinni. Samkvæmt þessu vex τ_e einnig hægt með stærð truflunarykkjunnar. Þetta er í samræmi við þær mælingar sem gerðar voru á spanstraumum í truflunarleiðurunum þ.e. að lifitími spanstraumanna var lítið háður rúmfræðilegri stærð leiðarans. Þetta er út af fyrir sig nokkuð mikilvæg niðurstaða því að samkvæmt þessu er ekki við því að búast að truflandi leiðarar hafi veruleg áhrif á mældu spennu lengur en 1 ms eftir að straumurinn í sendilykkjunni hefur verið rofinn.

Nauðsynlegt er að reyna að gera sér nokkra grein fyrir því hvernig rúmfræðileg afstaða mæliuppsetningar og truflunarleiðara hefur áhrif á styrkleika truflunarykkjunnar. Vegna víxl-verkunar truflunarleiðarans og spanstrauma í jörðinni er flókið að gera þetta í smáatriðum og hér verða því aðeins metin truflunaráhrif í tómu rúmi og ráð fyrir því gert að slíkt mat megi nota sem nálgun á hlutfallslegan styrk truflana á yfirborði jarðar. Styrkur truflunar ræðst af stærð straumsins sem spanast í truflunarleiðaranum og styrk segulsviðsins frá spanstrauminum við móttökuspóluna.

Stærð spanstraumsins ræðst af samspanstuðlinum og viðnámi í hringrás truflunarleiðarans. Samspanstuðullinn er háður rúmfræðilegri lögun leiðarans og fjarlægð frá sendilykkju. Viðnámið í hringrás leiðarans er fyrir lykkjur í megindráttum háð ummáli lykkjunnar, en fyrir jarðtenda tvípóla er það yfirgnæfandi háð því hversu vel þeir eru jarðtendir. Tilraunamælingarnar sem lýst er hér að framan benda eindregið til þess að í flestum tilfellum sé viðnám í hringrás jerðtengdra tvípóla það hátt að ekki nái að spanast straumar í þeim mæli að það hafi veruleg áhrif til truflunar. Segulflæði frá truflunarleiðaranum gegnum móttökuspóluna ræðst af spanstraumnum, rúmfræðilegri gerð leiðarans og fjarlægð frá móttökuspólu. Hér á eftir verður reynt að meta hlutfallslegan styrk, sem fall af fjarlægð (í tómu rúmi), fyrir þær þrjár gerðir truflunarleiðara sem reyndar voru, þ.e. ferningslagu lykkjur sammiðja sendilykkju, ferningslagu lykkjur til hliðar við sendilykkju og

langan jarðtengdan tvípól til hliðar við sendilykkju.

Mynd 18 sýnir hlutfallslegan samspanstuðul (brotin lína) og styrkleika truflunar í móttökuspólu (heildregin lína) fyrir ferningslagu truflunarlykkju með hliðarlengd b sammiðja sendilykkju með hliðarlengd a . Af myndinni sést að fyrir litlar truflunarlykkjur er styrkur truflunar verulegur en lítið háður stærð þeirra. Þegar stærð truflunarlykkjunnar nálgast stærð sendilykkju vex styrkur truflunar mjög örт. Þegar truflunarlykkjan er hins vegar orðin stærri en sendilykkjan minnkar styrkur truflunar örт. Sýna má fram á að þegar truflunarlykkjan er mun stærri en sendilykkjan, þá er styrkur truflaunarnar í hlutfalli við:

$$V_t = \frac{a}{b^2} \cdot \ln[1 + 2\sqrt{2} \cdot a/b] ; \quad b/a \gg 1 \quad (9)$$

Við Geitafell var mæld truflun af 100 og 400 m lykkju sammiðja 300 m sendilykkju. Hlutfall truflana af þessum lykkjum, í fyrstu tímagluggunum (sem er u.p.b. 2, sjá myndir 7 og 8), hefur verið fært inn á mynd 18 á þann hátt að truflun af 100 m lykkju ($b/a = 1/3$) er látin falla á reiknaða ferilinn. Af myndinni sést að við þetta fellur truflun af 400 m lykkju ($a/b = 4/3$) vel að reiknaða ferlinum.

Fyrir ferningslagu truflunarlykkju með hliðarlengd b til hliðar við sendilykkju með hliðarlengd a má sýna fram á einfalt samband þegar fjarlægðin d milli þeirra er annars vegar lítil og hins vegar mikil miðað við stærð lykkjanna. Þegar fjarlægðin milli lykkjanna er lítil fæst einfalt samband þegar truflunarlykkja er lítil miðað við sendilykkju. Þá er truflunarspennan í hlutfalli við:

$$V_t = \ln[1 + b/d] \cdot \frac{1}{a + b + 2d} ; \quad d \ll b \quad \text{og} \quad b \ll a \quad (10)$$

Þegar truflunarlykkjan er stór miðað við sendilykkju er truflun hins vegar í hlutfalli við:

$$V_t = \ln[1 + a/d] \cdot \frac{a}{b} \cdot \frac{1}{a + b + 2d} ; \quad d \ll a \quad \text{og} \quad a \ll b \quad (11)$$

Þegar fjarlægðin milli lykkjanna er miklu meiri en stærð þeirra er truflunarspennan í hlutfalli við:

$$V_t = \frac{a^2}{b} \cdot \frac{1}{d^4} ; \quad d \gg a \quad \text{og} \quad d \gg b \quad (12)$$

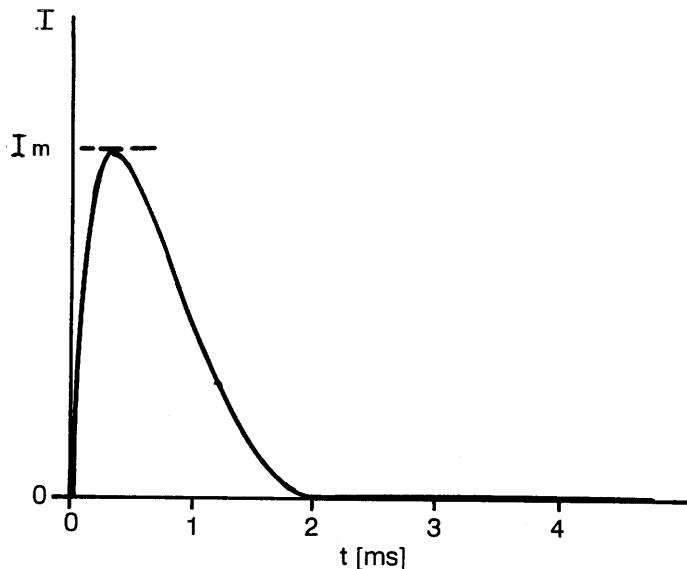
Mælingarnar við Geitafell og á Reykjanesi sýndu að í þessu tilfelli er truflunin hverfandi.

Fyrir jarðtengdan tvípól til hliðar við sendilykkju fæst einfalt samband ef lengd tvípólsins l er miklu meiri en hliðarlengd sendilykkjunnar. Í því tilfelli er truflunin í hlutfalli við:

$$V_t = \ln[1 + a/d] \cdot \frac{a}{a + 2d} ; \quad l \gg a \quad (13)$$

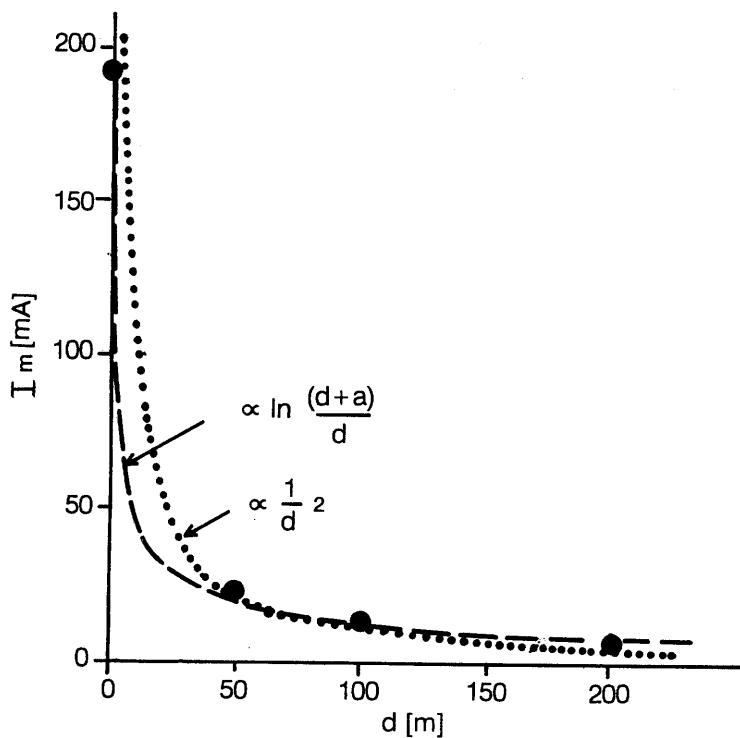
Þetta er nánast sama samband og fyrir stóra truflunarlykkju, en mælingarnar við Geitafell og á Reykjanesi sýndu að truflun frá tvípól er miklu minni vegna þess að viðnámið í hringrás truflunarleiðarans er miklu hærra en í lykkju, vegna hás viðnáms til jarðar.

JHD JEL 9000 KÁ
92.12.0978 AÁ

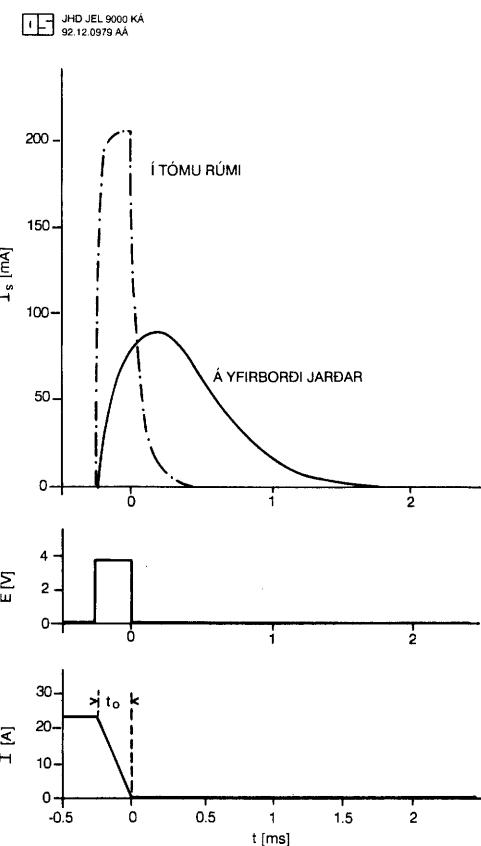


Mynd 15. Dæmigerður straumur í truflunarleiðara sem fall af tíma.

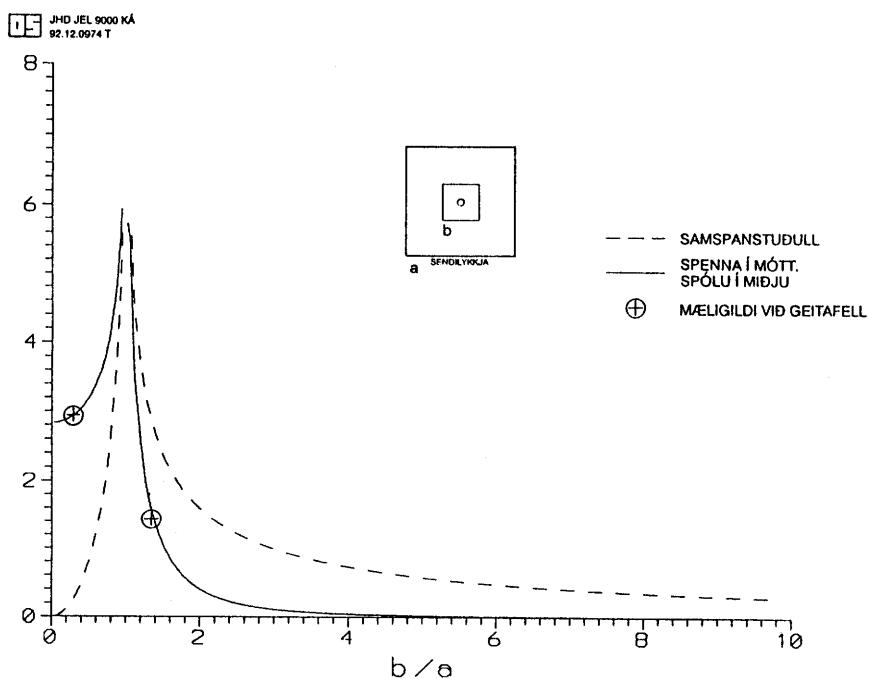
JHD JEL 9000 KÁ
92.12.0977 AÁ



Mynd 16. Hámarksstraumur í truflunarlykkju til hliðar við sendilykkju ásamt fræðilega reiknuðum ferlum.



Mynd 17. Straumur í sendilykkju (I), íspenna (E) og spanstrumur (I_s) í 100 m truflunarlykkju sammiðja sendilykkju.

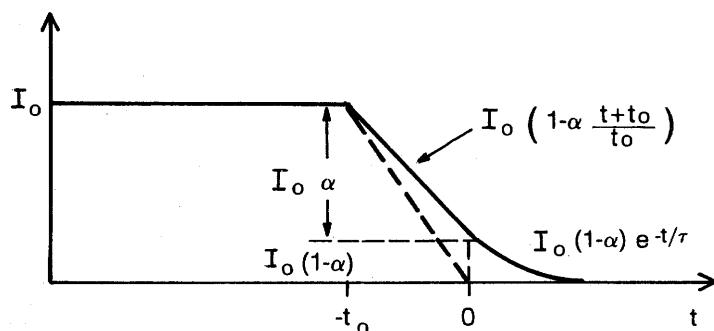


Mynd 18. Hlutfallslegur samspanstuðull og truflunarspenna í tómu rúmi fyrir truflunarlykkju með hliðarlengd b sammiðja sendilykkju með hliðarlengd a.

6. HUGSANLEG LEIÐRÉTTING FYRIR TRUFLUNUM

Eins og fram hefur komið í vangaveltunum hér að framan, þá hafa truflandi leiðarar áhrif vegna þess að hnignandi segulsvið frá sendilykkju spanar straum í leiðaranum og segulsviðið frá þeim straumi veldur umframspani í móttökuspólunni. Spanstruamurinn í leiðaranum leitast við að viðhalda upprunalegu segulsviði sendilykkjunnar. Áhrif hans eru því svipuð og ef straumurinn í sendilykkjuni væri ekki felldur línulega í núll á roftímanum t_0 heldur nokkuð hægar og að roftímanum loknum félli hann sem veldisfall. Á mynd 19 er sýnt hvernig má hugsa sér að straumferill í sendilykkju þyrfti að líta út til að gefa svipað span í móttökuspólunni og sendilykkjan og truflunarleiðarinn gefa. Meðan sendirinn fellir strauminn í sendilykkjuni línulega (brotinn ferill á mynd 19) spanast straumur í truflunarleiðaranum (sjá mynd 17), sem viðheldur segulsviðinu að hluta til þannig að við móttökuspólu lítur svo út sem straumurinn í sendilykkjuni sé ekki orðinn núll, heldur sé eftir hlutfallið $1-\alpha$ af upphaflega straumnum. Á mynd 19 er látið sem sýndarstraumurinn (heildreginn ferill) sé línulegur meðan á roftímanum stendur, sem er trúlega ekki alveg rétt en þokkaleg nálgun. Að loknum roftímanum fer spanstraumurinn í truflunarleiðaranum að hnígá að núlli samkvæmt veldislögmáli.

 JHD JEL 9000 KÁ
92.12.0980 AÁ



Mynd 19. Ímyndaður straumferill í sendilykkju sem líkir eftir áhrifum truflunarleiðara.

Við túlkun TEM-mælinga yfir í lárétt lagskipta viðnámsdreifingu undir mælistað þarf að líkja eftir því hvernig sendirinn fellir strauminn í sendilykkjuni. Sendirinn fellir strauminn línulega á roftímanum t_0 , sem mældur er með sendinum. Í hefðbundinni túlkun er gert ráð fyrir því að straumurinn sé orðinn núll að loknum roftímanum. Ef truflunarleiðarar eru nálægt mælistað má reyna að líkja eftir áhrifum þeirra með því að gera ráð fyrir því að í stað raunverulegs straums í sendilykkju sé sýndarstraumur eins og sýndur er á mynd 19. Á mynd 20 er sýnd túlkun á sýndarviðnámsferli mælingar við Geitafell þar sem 100 m ferningsлага truflunarlykkja er sammiðja 300 m sendilykkju. Við túlkunina var gert ráð fyrir straumferli eins og sýndur er á mynd 19. Þar sem hlutfallstalan α og tímafastinn τ í veldishnignuninni eftir roftíma voru ekki þekkt fyrirfram var litid á þær sem óþekktar stærðir og túlkunarforritið látið ákvarða bestu gildi þeirra ásamt þykktum

og viðnámsgildum jarðlaga. Af mynd 20 sést að reiknaður ferill fellur vel að mældum gögnum ef gert er ráð fyrir að hlutfallsstuðullin sé $\alpha = 0.94$ og tímafastinn í veldishnignuninni sé $\tau = 66.0 \mu s$. Á mynd 20 er sýnt líkanið sem fékkst við túlkunina og til samanburðar líkanið sem fékkst með hefðbundinni túlkun á ótruflaðri mælingu (mynd 1). Þessi líkön eru nánast eins þannig að það hefur verið góð nálgun að líkja eftir trufluninni með sýndarstraumferli eins og á mynd 19.

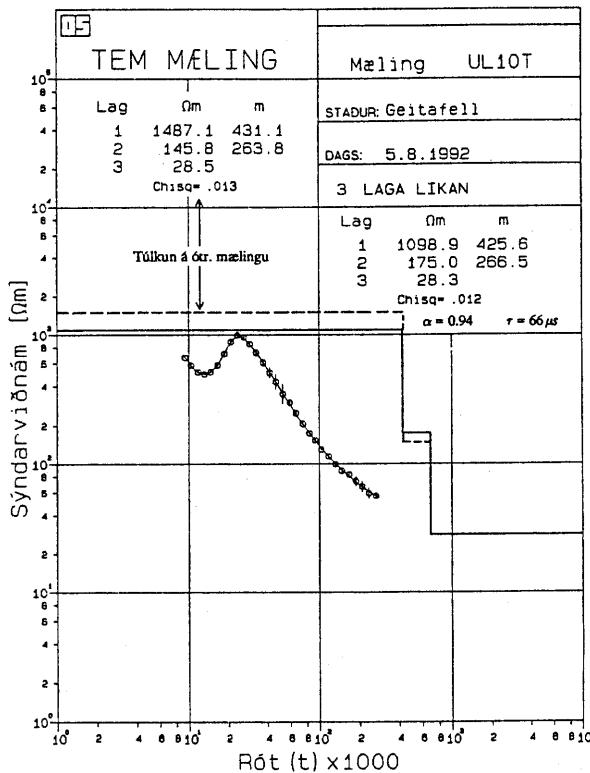
Samskonar túlkun var gerð á trufluðum mæliferli frá Geitafelli þar sem $400 m$ femingslykkja var sammiðja $300 m$ sendilykkju. Þar var truflunin heldur minni, en eins og áður náði túlkunin að líkja vel eftir mælda ferlinum með því að gera ráð fyrir hlutfallsstuðli $\alpha = 0.97$ og tímafastu $\tau = 75.3 \mu s$. Viðnámslíkanið sem fékkst var nánast það sama og fyrir ótruflaðra mælingu.

Á mynd 21 er sýnd tilraun til að túlka þessa mælingu með því að láta straummerkið vera eins og raunverulegur straumur í sendilykkjunni og líkja eftir trufluninni með viðbrögðum láréttlagskiptrar jarðar. Af myndinni sést að ekki tekst að líkja eftir trufluninni og skásta líkanið er í efstu $600 m$ víðsfjarri raunverulegri viðnámsdreifingu undir mælistað.

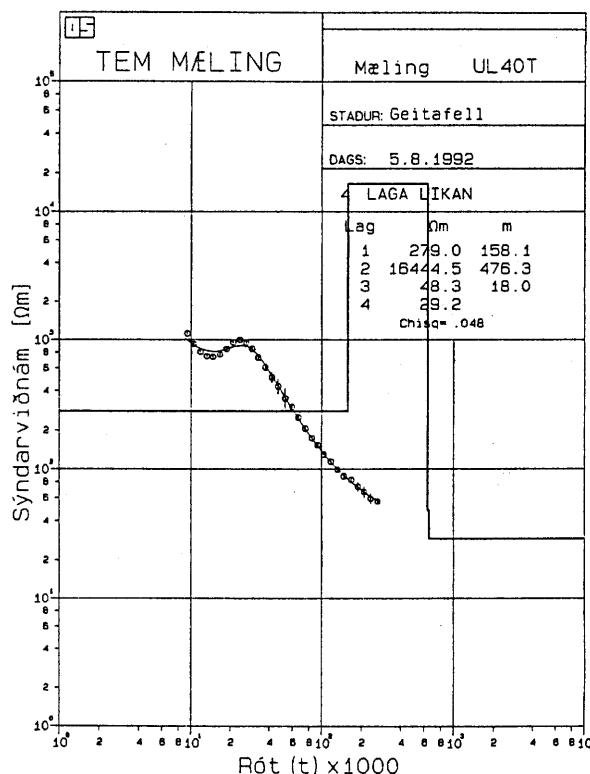
Til að kanna áreiðanleika ofangreindrar aðferðar við leiðréttigu truflana var gerð samskonar túlkun á ótruflaðri mælingu. Gert var ráð fyrir að straumurinn væri eins og á mynd 19 og túlkunarforritið látið ákvarða viðnámslíkan og stærðirmar α og τ . Túlkunin gaf sama viðnámslíkan og á mynd 1 og $\alpha = 1$ sem þýðir að mæligögnin svara til þess að strumurinn hafi fallið línulega að nálli á roftímanum þ.e.a.s. að engin truflun sé til staðar.

Af þessu má draga þá ályktun að í mörgum tilfellum megi leiðréttta, að hluta til að minnsta kosti, fyrir áhrifum truflandi leiðara nálagt mælistað. Þann fyrirvara verður að hafa að þó svo hægt sé að líkja eftir trufluninni að mestu leyti með því að breyta straummerkinu er við því að búast að eftir verði einhver áhrif sem gera viðnámsgildi og þykktir laga næst yfirborði óáreiðanleg, en þær stærðir eru reyndar ekki vel ákvarðaðar með þeim TEM-mælitækjum sem eru í eigu Orkustofnunar. Áhugi er fyrir því að festa kaup á TEM-mælitækjum sem mælt geta viðnám grunnt í jörðu. Slík tæki fella strauminn hraðar og mæla span fyrir tíma nær nálli en þau tæki sem Orkustofnun á nú. Þar sem truflun frá utanað komandi leiðurum kemur einkum fram við lítil tímagildi þarf við notkun slíkar tækja að hafa sérstaka gát á truflunum og kanna sérstaklega að hversu miklu leyti er hægt að leiðréttta fyrir þeim.

Það er eftirtektarvert að tímafastarnir fyrir veldishnignun straumsins eftir roftímann eru einungis lítið eitt hærri en reiknaðir tímafastar fyrir truflunarlykkjurnar í tómu rúmi. Stærðin á sýndarstraumnum sem eftir er að loknum roftímanum er gefin sem $I_0 \cdot (1-\alpha)$ þar sem I_0 er upphafssrauminn. Fyrir mælingarnar sem sýndar eru á myndum 20 og 21 var $I_0 = 23.1 A$, þannig að fyrir $400 m$ lykkjuna er sýndarstraumur við lok roftímans $693 mA$ en $1478 mA$ fyrir $100 m$ lykkjuna. Þessi straumur miðast við $300 m$ lykkju. Ekki er á einfaldan hátt hægt að umrekna þennan straum yfir í jafngildan straum í raunverulegum truflunarlykkjum því að á því tímabili sem truflunaráhrifin koma fram í mældu spennunni er mjög flókið samband milli spennunnar og stærðar straumlykkju.



Mynd 20. Geitafell, túlkun á truflaðri mælingu (100 m lykkja sammiðja 300 m sendilykkju). Straummerki eins og á mynd 19.



Mynd 21. Geitafell, tilraun til túlkunar truflaðrar mælingar (400 m lykkja sammiðja 300 m sendilykkju) með viðbrögðum lárétt lagskiptrar jarðar.

7. SAMANDREGNAR NIÐURSTÖÐUR

Tilraunamælingar sýndu að jarðtengdur tvípóll til hliðar við sendilykkju hefur lítil áhrif til truflunar í TEM-mælingum. Ef tvípóllinn er alveg upp við sendilykkjuna og eðlisvið-nám jarðar hátt má greina áhrif frá tvípólnum á fyrstu $200 \mu\text{s}$ eftir að straumurinn er rof-inn. Ástæða þess að jarðtengdur tvípóll hefur svo lítil áhrif er að viðnám til jarðar er að öllum jafnaði það hátt að ekki nær að spanast verulegur straumur í tvípólnum.

Fyrir vírlykkju til hliðar við sendilykkju sáust vel mælanleg áhrif þegar vírlykkjan er ná-lægt sendilykkjunni. Þau minnka örт þegar lykkjan fjarlægist sendilykkjuna og eru nánast horfin þegar fjarlægðin milli lykkjanna er orðin 100 m .

Vírlykkjur sammiðja sendilykkju gáfu verulega truflun. Lykkjur af svipaðri stærð eða minni en sendilykkjan gefa mikla truflun, en fræðileg rök hníga að því að truflunin minnki örт þegar vírlykkjan verður verulega stærri en sendilykkjan.

Í öllum tilfellum voru þær truflanir sem fram komu bundnar við fyrstu nokkur hundruð μs eftir að straumurinn var rofinn í sendilykkjunni og voru ekki greinanleg eftir 1 ms . Að því eru leidd rök að ekki sé við því að búast að girðingar og önnur leiðandi mannvirkni valdi truflunum sem vari lengur en 1 ms eftir að straumurinn er rofinn. Ennfremur kom í ljós, eins og við var búist, að truflanir eru hlutfallslega meiri þegar eðlisvinám jarðar er hátt.

Af þessum prófunum má draga þá ályktun að forðast beri að staðsetja TEM-mælingar þannig að sendilykkja sé nær girðingum og öðrum leiðandi mannvirkjum en 100 m . Sér-staklega ber að forðast að girðingar eða aðrar lagnir myndi leiðandi hringrás umhverfis móttökuspóluna. Almennt gildir sú regla að móttökuspóla/lykkja má ekki vera nálægt leiðandi hlutum.

Sýnt er fram á að, í sumum tilvikum a.m.k., má leiðréttta fyrir truflunum með því að gera ráð fyrir því í túlkunarforriti að straumur í sendilykkju falli ekki línlaga að nálli á rof-tíma heldur lifi nokkuð lengur og falli veldislega að nálli. Þó svo að möguleiki sé á slíkri leiðréttingu hefur ekki verið sýnt að hún sé í öllum tilfellum fullnægjandi. Meginreglan hlýtur því að vera sú að staðsetja mælingar þannig að sem minnst hætta sé á truflunum.

Við tilraunamælingarnar kom í ljós að nokkurt rek er í klukkum mælitækjanna. Á einni klukkustund seinkaði klukkan í móttakaranum sér um tæpar $8 \mu\text{s}$ miðað við klukku í sendi þrátt fyrir að klukkurnar hafi verið hitaðar í u.p.b. eina klukkustund. Þetta þarf að hafa í huga því að slík hliðrum hefur veruleg áhrif á mælda spennu í fyrstu rásum mælinganna. Ef mikillar nákvæmni er þörf á fyrstu rásunum, t.d. þegar verið er að kanna við-nám grunnt, getur þurft að samhæfa klukkurnar aftur áður en hátfönihluti mæliferilsins er mældur.

ENGLISH SUMMARY

Test measurements were made to investigate the influence on central-loop TEM-soundings due to disturbing conductors on the surface of the ground such as wire fences. A 0.5 quadrat, insulated copper wire was used to make conductors with different geometries and at variable distance from the square $300\text{ m} \times 300\text{ m}$ source loop.

The tests showed that a 500 m grounded dipole parallel to one side of the source loop has little influence. In resistive environment an influence was just detectable in the first $200\mu\text{s}$ after the current turn-off for a grounded dipole along one of the sides of the source loop but vanished as the dipole was moved away from the loop. The reason for the small influence of grounded dipoles is that the resistance in the grounding of the dipole is so high that very little current is induced.

A $130\text{ m} \times 130\text{ m}$ square loop to the side of the source loop had well detectable influence when placed close to the source loop. The influence decreases rather rapidly as the distance between the loops is increased and has practically disappeared when the loops are more than 100 m apart.

Loops concentric with the source loop can have grater influence on the recorded voltage. Loops of similar size or smaller than the source loop have grater influence but for larger loops the influence decreases rapidly with increasing size of the loop.

It was found, as expected, that the influence of disturbing conductors is much grater in resistive than in conductive environments. All the observed influences were found during the first few hundred μs after the current turn-off and had disappeared at 1 ms . Arguments, based on interaction of current loops in empty space, are put forward indicating that disturbances due to conductors at the surface are generally not expected to last more than 1 ms after the current turn-off.

From the tests the conclusion is drawn that TEM-sounding sites should be chosen such that the source loop is at least 100 m away from metallic fences and other conductors at the surface. It should in particular be avoided to locate soundings in such a way that conductors can make closed current loop around the sounding site. The receiver coil/loop must not, under any circumstances, be placed close to any conductor.

It is shown that distortions due to disturbing conductors can, in many cases, at least partially, be corrected for by letting the interpretation program simulate the influence of the induced current in the conductor. This can be done by assuming that during the turn-off time the current is reduced linearly but not all the way to zero and that the current remaining at the end of the turn-off time decays exponentially to zero. An 1-D inversion program was modified in such a way that it adjusts the amount of current remaining at the end of the turn-off time and the time constant of the exponential decay along with the model parameters of a layered earth. Applying this kind of inversion to distorted sounding curves resulted in practically the same layered model as normal inversion of undistorted data. Even though such corrections are possible it has not been shown that

they are in all cases sufficient and the general rule is therefore to avoid distortions.

During the tests it was found that the crystal clocks in the transmitter and the receiver drifted relative to each other. During one hour the clock in the receiver was delayed by some $8 \mu s$ relative to the clock in the transmitter. This must be kept in mind because such a drift can substantially influence the recorded voltage in the first time gates. If high accuracy is needed in the first time gates, such as in shallow depth exploration, the transmitter and receiver clocks must be synchronized just before measuring on the high frequency band.