



ORKUSTOFNUN
Jarðhitadeild

**Áhrif lagskiptingar á
niðurstöður viðnámsmælinga**

Knútur Árnason

OS-95013/JHD-08 B

Mars 1995



ORKUSTOFNUN
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verknr. 530341

**Áhrif lagskiptingar á
niðurstöður viðnámsmælinga**

Knútur Árnason

OS-95013/JHD-08 B

Mars 1995

ÁGRIP

Samnaburður á niðurstöðum Schlumberger- og TEM-viðnámsmælinga sýnir að stundum gefa þessar aðferðir mismunandi niðurstöður. Munur kemur einkum fram utan gosbeltanna, þar sem jarðlög eru mjög lagskipt, en innan gosbeltanna ber aðferðunum yfirleitt nokkuð vel saman. Sýnt er fram á, að við aðstæður þar sem í jarðlögum eru syrpur af mörgum þunnum lögum með breytilegu eðlisviðnámi, gefa þessar aðferðir mismunandi þykkt og meðaleðlisviðnám syrpnanna. Ástæða þess er sú að þeir straumar sem framkallaðir eru í jörðinni hafa ólíka rúmfræðilega afstöðu til lagskiptingarinnar. Í Schlumbergermælingum fara straumarnir undir horni við lagskiptinguna, en í TEM-mælingum eru þeir samsíða lögnum. Þetta verður til þess að Schlumbergermælingar "sjá" hærra meðaleðlisviðnám og meiri þykkt á syrpinum heldur en TEM-mælingar. Settar eru fram jöfnur sem nota má til að reikna meðaleðlisviðnám og þykkir sem mæliaðferðirnar gefa, ef samsetning syrpnanna er þekkt. Gerðir eru líkanreikningar og niðurstöður túlkuar á reiknuðum ferlum bornar saman við fræðilegar niðurstöður. Mismunandi svörum Schlumberger- og TEM-mælinga fyrir lagskipta jörð má nota í jarðtæknirannsóknnum fyrir mannvirkjagerð til að sjá hvort jarðlög eru mjög lagskipt eða með þykkum einsleitum lögum.

EFNISYFIRLIT

ÁGRIP	2
1. INNGANGUR	4
2. ÁHRIF LÁRÉTTRAR LAGSKIPTINGAR	4
2.1 Schlumbergermælingar	5
2.2 TEM-mælingar	7
2.3 Töluleg staðfesting	8
3. NIÐURSTÖÐUR OG UMRÆÐA	12
4. HEIMILDIR	12

TÖFLUR

1. Samanburður á fræðilegum og túlkuðum niðurstöðum	10
---	----

MYNDIR

1. Straumdreifing í jörðu í Schlumbergermælingu	5
2. Straumdreifing í jörðu í TEM-mælingu	7
3. Reiknaður sýndarviðnámsferill Schlumbergermælingar fyrir marglagskipta syrpu milli þykkra einsleitra laga og einvíð túlkun hans með þriggja laga líkani	9
4. Reiknaður sýndarviðnámsferill TEM-mælingar fyrir marglagskipta syrpu milli þykkra einsleitra laga og einvíð túlkun hans með þriggja laga líkani	9
5. Reiknaður sýndarviðnámsferill Schlumbergermælingar fyrir marglagskipt hálfbrúm neðan einsleits yfirborðslags og einvíð túlkun hans	11
6. Reiknaður sýndarviðnámsferill TEM-mælingar fyrir marglagskipt hálfbrúm neðan einsleits yfirborðslags og einvíð túlkun hans	11

1. INNGANGUR

Þegar farið var að beita TEM-mælingum hérlendis kom í ljós að þær gáfu í sumum tilfellum nokkuð aðrar niðurstöður en Schlumbergermælingar. Þegar betur var að gáð sýndi samnaburður á þessum tveimur mæliaðferðum að þeim bar vel saman þegar um er að ræða mælingar innan gosbeltanna, en sumsstaðar utan þeirra virtist nokkur munur á niðurstöðum. Þessi munur virtist undantekningarlaust vera á þann veg að TEM-mælingar gáfu lægri eðlisviðnámsgildi en Schlumbergermælingar. Schlumbergermælingar hafa verið notaðar með góðum árangri hérlendis í bráðum fimm áratugi og öðlast mikla tiltrú. Þegar sýnt var að TEM-mælingar gefa á stundum aðrar niðurstöður varð mönnum ljóst að mæligögn þessara aðferða eru ekki alltaf sambærileg og efasemdir vöknudu um nota-gildi TEM-mælinga utan gosbeltanna. Það var því nauðsynlegt að kanna ástæður þessara mismunandi niðurstaðna og er það viðfangsefni þessara skrifna.

2. ÁHRIF LÁRÉTTRAR LAGSKIPTINGAR

Sú staðreynd að aðferðunum ber yfirleitt vel saman innan gosbeltanna, en að munur getur komið fram utan þeirra, benti eindregið til þess að ástæðunnar væri að leita í mismunandi jarðfræðilegum aðstæðum. Innan gosbeltanna eru jarðlög að verulegu leyti mynduð við gos undir jökli og innihalda þykkar goseiningar á meðan jarðlög utan þeirra eru mun meira lagskipt og er berggrunnurinn gjarnan samsettur úr mörgum þunnun hraunlögum með karga á milli. Það er einmitt við slíkar aðstæður sem munur kemur fram á niðurstöðum viðnámsmælinganna og því virðist liggja beint við að álykta sem svo að þessi mikla lagskipting sé ástæða munarins.

Mæliferlar viðnámsmælinganna eru yfirleitt túlkaðir með svokallaðri einvíðri túlkun. Þar er gert ráð fyrir að jörðinni megi skipta í lárétt viðnámslög og að hvert viðnámslag sé einsleitt (e. homogeneous) og stefnusnautt (e. isotropic). Túlkunin fer þannig fram að valið er, út frá mæliferlinum, hversu mörg viðnámslög nota á og þeim gefin ágiskun eðlisviðnámsgildi og þykkir. Tölvuforrit er síðan notað til að breyta eðlisviðnámsgildum og lagþykkum þannig að reiknaður ferill falli sem best að þeim mælda, en forritið breytir ekki fjölda viðnámslaganna. Ef jarðlög eru mjög þunn ná viðnámsmælingarnar ekki að greina sundur einstök lög. Ef jarðlagastafli er samsettur úr syrpum af þunnum viðnámslögum koma þær fram sem lög með ákveðnu meðaleðlisviðnámi.

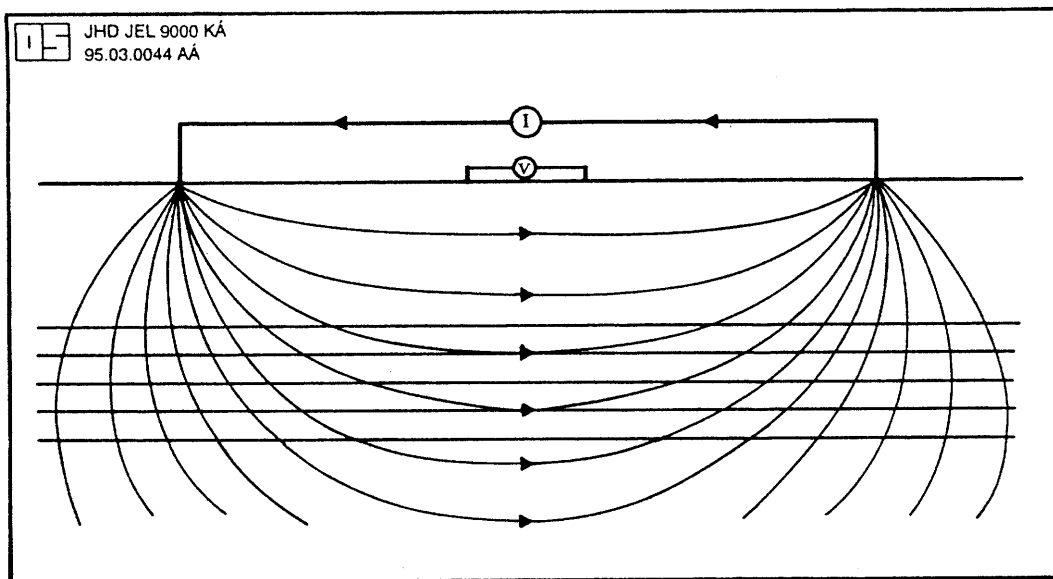
Í einvíðri túlkun er yfirleitt fylgt þeirri reglu að túlka mæliferla ekki með fleiri viðnámslögum en nauðsynlegt er til að fá viðunandi samræmi milli mælds og reiknaðs ferils. Þessi regla er sjálfsögð, því ef gert er ráð fyrir of mörgum viðnámslögum verður niðurstaðan ekki einhlýt og mæligögnin má túlka með mismunandi líkönum. Viðnámslíkön einvíðrar túlkunar eru því oft samsett ú lögum þar sem hvert lag hefur "meðaleiginleika" lagskipttrar syrpu. Sá munur sem sést á niðurstöðum TEM- og Schlumbergermælinga á rætur sínar að rekja til þess að þessar aðferðir "sjá" mismunandi "meðaleiginleika" í lagskiptum syrpum.

Til að skilja þennan mun á mæliaðferðunum verður að hyggja að grundvallaratriðum þeirra. Allar viðnámsmæliaðferðir byggja á því að rafstraumur hlaupi í jarðlögum og að mæla á yfirborði merki frá straumnum. Strumarnir í jörðinni geta verið af nátturuleg-

um uppruna, svo sem í MT-mælingum (Magneto Telluric), þar sem sveiflur í segulsviði jarðar spana strauma í jörðinni, eða af manna völdum eins og í TEM- og Schlumbergermælingum. Þegar betur er að gáð kemur í ljós að þeir "meðaleiginleikar" lagskiptrar jarðar sem hinar mismunandi aðferðir sýna fara eftir því hvernig sú straumdreyfing í jörðunni lítur út.

2.1 Schlumbergermælingar

Í Schlumbergermælingum er straumur framkallaður neðanjarðar með því að senda rafstraum til jarðar um tvö straumskaut í yfirborði. Straumurinn hleypur frá öðru skautinu að hinu. Á leið sinni milli skautanna dreifist hann um jörðina svipað og sýnt er á mynd 1. Upplýsingar um viðnámsdreifinguna neðanjarðar fást síðan með því mæla hversu mikill straumur hleypur í yfirborði og er það gert með því að mæla spennumun yfir litla fjarlægð milli straumskautanna (sjá mynd 1). Upplýsingar um eðlisviðnám sem fall af dýpi fást með því að mæla spennuna fyrir vaxandi fjarlægð milli straumskautanna. Ef jörðin er lárétt lagskipt eins og sýnt er á mynd 1 er augljóst að straumdreifingin neðanjarðar er ekki, nema í takmörkuðum hluta jarðarinnar, samsíða viðnámslögunum. Í meginhlutanum fer straumurinn undir horni við lagamótin.



Mynd 1. Straumdreifing í jörðu í Schlumbergermælingu.

Í syrpu þar sem skiptast á mörg þunn lög með miklum mun í eðlisviðnámi verður meðal-eðlisviðnám mjög mismunandi eftir því hvort straumurinn fer samsíða viðnámslögunum eða hornrétt á þau. Ef syrpan er samsett af N lögum með eðlisviðnámi ρ_i og þykktir d_i ($i=1, \dots, N$) er meðaleðlisviðnámið samsíða lögum gefið sem:

$$\rho_l = \frac{\sum d_i}{\sum d_i / \rho_i} \quad (1)$$

Meðaleðlisviðnámið hornrétt á lögina er hinsvegar gefið sem:

$$\rho_t = \frac{\sum d_i \cdot \rho_i}{\sum d_i} \quad (2)$$

Slíkar syrpur eru verulega misleitnar með tilliti til straums í láréttar stefnur annars vegar og lóðrétta hins vegar. Misleitnina má setja fram tölulega með svokölluðum misleitni-stuðuli:

$$\alpha = \sqrt{\rho_t / \rho_l} \quad (3)$$

Fyrir misleitnar syrpur eins og hér um ræðir er ennfremur oft unnið með stærðir sem kallaðar eru þverstætt viðnám, R_{tr} (e. transversal resistance), annarsvegar og langstæða leiðni, S_{long} (e. longitudinal conductance), hinsvegar. Þessar stærðir eru skilgreindar sem:

$$R_{tr} = d_r \cdot \rho_t \quad ; \quad S_{long} = d_r / \rho_l \quad (4)$$

þar sem $d_r = \sum d_i$ er raunverleg þykkt syrpu. Þverstæða viðnámið er jafnt viðnámi í lóðréttri súlu í gegnum syrpu, hornrétt á hana, og 1 m á kant í þverskurði, gegn rafstraumi þvert á viðnámslögin. Langstæða leiðnin er jöfn leiðninni í samskonar súlu fyrir rafstraum samsíða lögum.

Þar sem straumurinn í Schlumbergermælingum fer hvorki samsíða né hornrétt á laga-mótin, er við því að búast að þær sjái einhverskonar meðaleðlisviðnám, mitt á milli ρ_l og ρ_t . Í þykkum einsleitum og stefnusnaudum lögum er eðlisviðnámið hinsvegar það sama í hvaða stefnu sem straumurinn fer og slík lög koma farm í einvíðri túlkun með raunverulegu eðlisviðnámi sínu. Hér er reyndar nauðsynlegt að gera grein fyrir því hvað átt er við með þykkum og þunnum lögum, en það hugtak er hér afstætt með dýpi. Þykk eru þau lög kölluð sem hafa þykkt álíka eða meiri en dýpið niður á þau. Þunn lög eru hins vegar mun þynnri en sem nemur dýpinu niður á þau.

Fræðilega má sýna fram á (sjá t.d. Koefoed, 1979) að syrpa sem samsett er úr mörgum mjög þunnum viðnámslögum, er í Schlumbergermælingum (og öðrum jafnstraumsmælingum), jafngild viðnámslagi með eðlisviðnámið ρ_{sch} og þykktina d_{sch} sem gefin eru sem:

$$\rho_{sch} = \sqrt{\rho_l \cdot \rho_t} \quad ; \quad d_{sch} = d_r \cdot \alpha = d_r \sqrt{\rho_t / \rho_l} \quad (5)$$

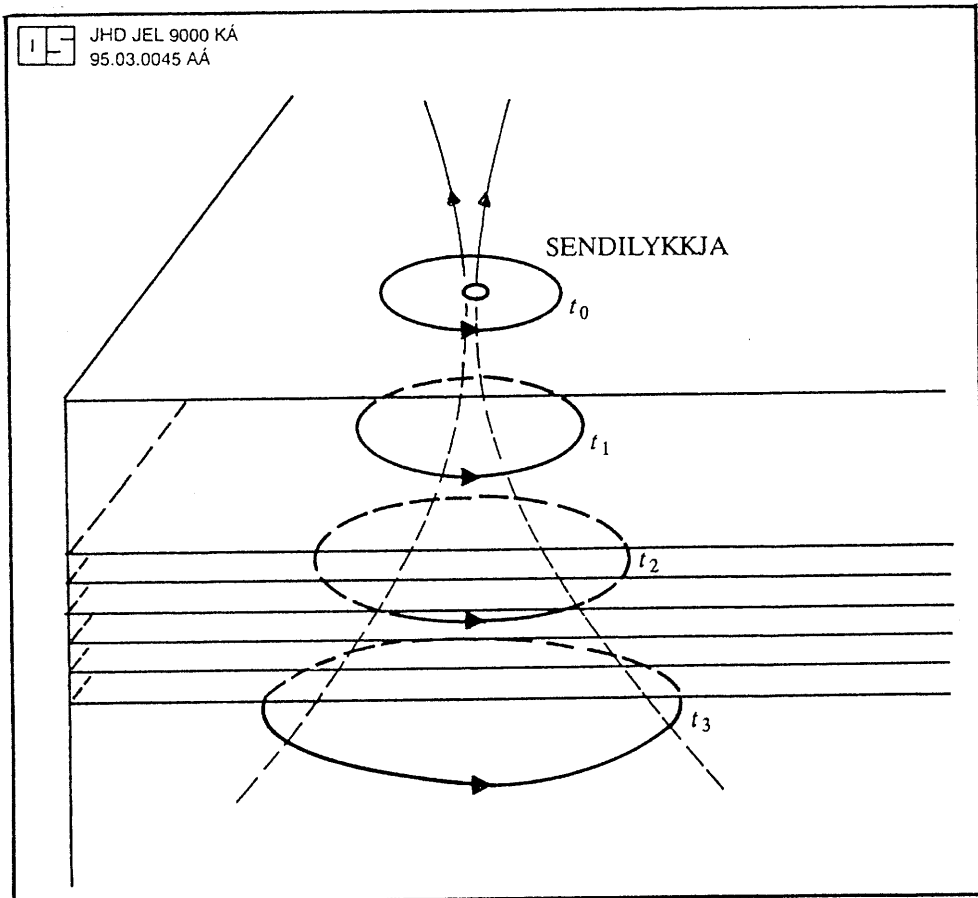
þar sem d_r er þykkt syrpu. Það er með öðrum orðum hægt að sýna fram á að vegna þess að straumurinn í Schlumbergermælingum fer undir horni við viðnámslögin, þá sjá þær lagskiptu syrpu sem lag með meðaleðlisviðnámi sem er geometríst meðaltal af eðlisviðnámi hornrétt og samsíða lögum. Af (4) og (5) sést að margfeldi þess eðlisviðnáms og þykktar sem Schlumbergermælingar "sjá" í syrpu er jafnt þverstæðu viðnámi hennar:

$$\rho_{sch} \cdot d_{sch} = R_{tr} \quad (6)$$

2.2 TEM-mælingar

Í TEM-mælingum er ekki sendur straumur beint til jarðar heldur notað rafsegulspan til að framkalla straum neðanjarðar. Vírlykkja er lögð á yfirborðið (sjá mynd 2) og í hana

er sendur rafstraumur, sem síðan er rofinn skyndilega. Þegar straumurinn er rofinn spanast straumur í yfirborðinu sem reynir að viðhalda segulsviðinu frá sendilykkjunni. Vegna viðnáms jarðar minnkar spanstraumurinn og þar með segulsviðið. Breytingin í segulsviðinu spanar aftur straum, aðeins minni og aðeins dýpra í jörðu. Rafsvið og segulsvið víxlverka þannig stöðugt eftir því sem tíminn líður og straumar spanast dýpra og dýpra í jörðu. Upplýsingar um eðlisviðnám á mismunandi dýpi fást með því að mæla hvernig segulsviðið á yfirborði, í miðju sendilykkjunnar, fellur með tíma.



Mynd 2 Straumdreifing í jörðu í TEM-mælingu.

Ef jörðin er lárétt lagskipt er, af samhverfuástæðum, augljóst að sendilykkja samsíða viðnámslögnum getur einungis spanað strauma samsíða lögnum. Hægt er að sýna fram á (Nabighian, 1979; Hoversten og Morrison, 1982) að straumarnir sem spanast í jörðinni eru til að byrja með sem næst eftirmynd af upphaflega straumnum í lykkjunni, en verða síðan sem "loðinn" straumhringur sem færir dýra í jörðu og stækkar eftir því sem tíminn líður. Aðalatriðið, í því samhengi sem hér um ræðir, er að straumdreyfingin er alltaf samsíða viðnámslögnum.

Þar sem spanstraumarnir eru samsíða viðnámslögnum munu TEM-mælingar sjá syrpur af þunnum lögum, eins og lýst er hér að framan, sem eitt lag með eðlisviðnámi ρ_{tem} sem

er jafnt meðaðlisviðnámi samsíða lögnum. TEM-mælingarnar sjá ennfremur þykkt lagsins d_{tem} sem raunverulega þykkt lagsins, þ.e.a.s.

$$\rho_{\text{tem}} = \rho_1 \quad ; \quad d_{\text{tem}} = d_r \quad (7)$$

Af þessu og (4) sést að ef aðlisviðnáminu sem TEM-mælingar sjá í syrpu er deilt upp í þykkina sem þær sjá, fæst út langstæð leiðni:

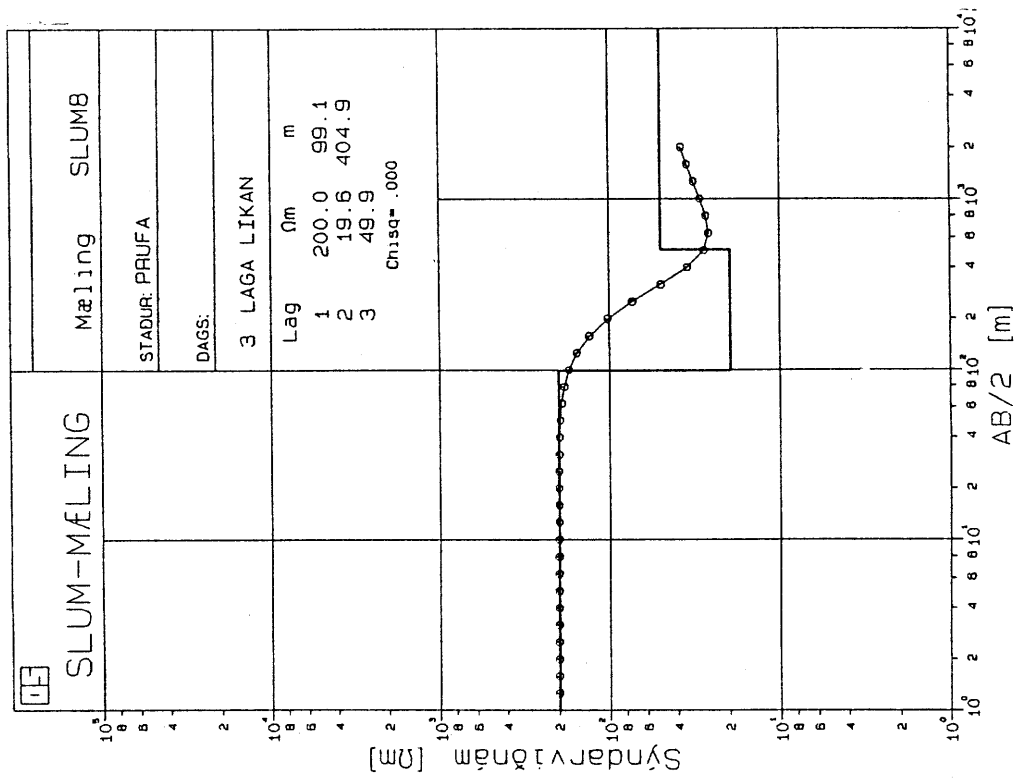
$$d_{\text{tem}}/\rho_{\text{tem}} = S_{\text{long}} \quad (8)$$

2.3 Töluleg staðfesting

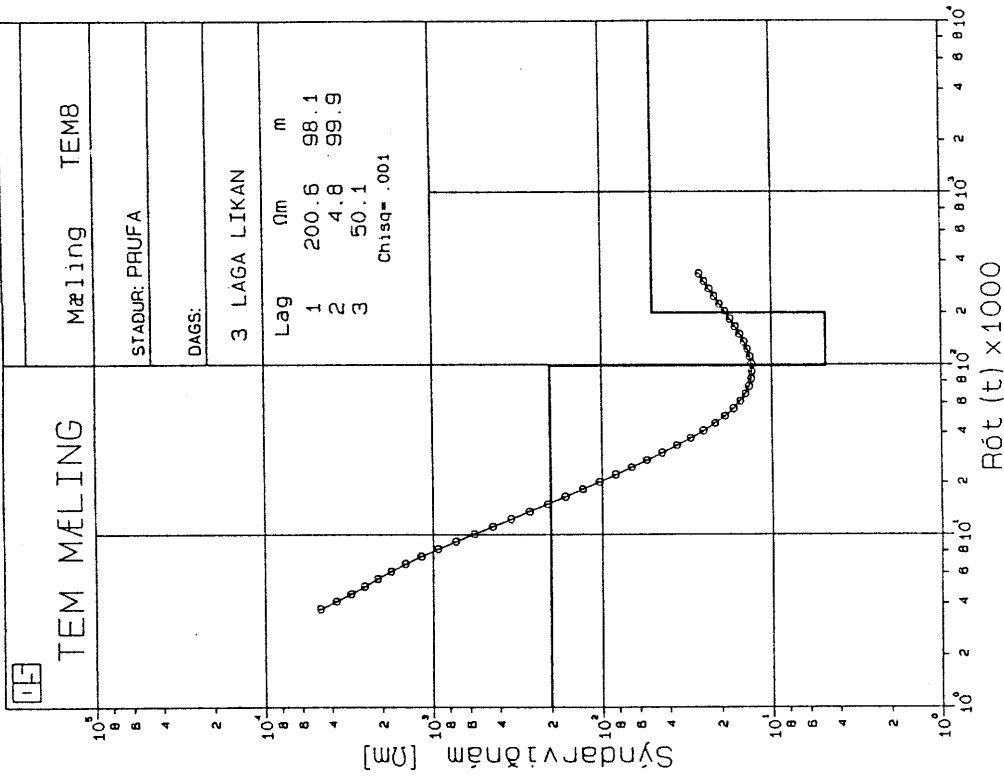
Til að fá tölulega staðfestingu á því sem rakið hefur verið hér að framan hafa verið gerðir einfaldir líkanreikningar. Fyrst var tekið líkan sem inniheldur syrpu af þunnum lögum með miklum mun í aðlisviðnámi. Líkanið hefur næst yfirborði 100 m þykkt lag með aðlisviðnáminu 200 Ωm . Þá tekur við 100 m þykk syrpa sem inniheldur 40 lög þar sem skiptast á 1 m þykk lög með aðlisviðnámi 1 Ωm og 4 m þykk lög með aðlisviðnámi 100 Ωm . Þar fyrir neðan er síðan óendanlegt hálfbrúm með aðlisviðnámi 50 Ωm . Forrit sem reikna sýndarviðnámsferla fyrir gefna lagskiptingu voru notuð til að reikna sýndarviðnámsferla fyrir bæði Schlumberger- og TEM-mælingar og eru þeir sýndir með hringjum á myndum 3 og 4.

Sýndarviðnámsferlarnir voru síðan túlkaðir með einvíðri túlkun og þriggja laga líkön-um. Einvíðu túlkunarforritin sem notuð voru eru alveg eins að öðru leyti en því að þau nota að sjálfsögðu hvort sína aðferð við að reikna sýndarviðnámsferla út frá gefnu líkani, en ítrekunaralgoritminn sem leitar að besta líkani er sá sami í báðum tilfellum. Þeim var ennfremur báðum gefið sama ágiskaða byrjunarlíkanið. Myndir 3 og 4 sýna niðurstöður túlkunarinnar. Heildregnu ferlarnir sýna sýndarviðnámsferlana svarandi til bestu þriggja laga líkananna og líkönin eru sýnd bæði tölulega, sem aðlisviðnám og þykktir laga, og með stöplariti. Stærðirnar "Chisq" gefa hlutfallsleg meðalfrávik milli "mældra" sýndarviðnámsgilda og reiknaðra gilda út frá líkaninu.

Á myndunum sést að ferlarnir fyrir þriggja laga líkönin falla nær fullkomlega að upphaflegu ferlunum. Í báðum tilfellum ákvarða túlkunarforritin aðlisviðnám og þykkt efsta lagsins svo og aðlisviðnám hálfbrúmsins undir með innan við 2% frávik. Þau gefa hins vegar verulega frábrugðin gildi á aðlisviðnámi og þykkt lagskiptu syrpunnar á milli. Schlumbergeraðferðin gefur hana sem lag með verulega hærra aðlisviðnámi og meiri þykkt en TEM-aðferðin. Tafla 1 sýnir samanburð á fræðilega útreiknuðum eiginleikum syrpunnar samkvæmt umræðunni hér að framan og niðurstöðum túlkunarinnar.



Mynd 3. Reiknaður sýndarvöðnámsferill Schlumbergermælingar fyrir marglagskipta syru milli þykkra einsleitra laga (hringir) og einvöð túlkun hans með þriggja laga líkani (heildreginn ferill).



Mynd 4 Reiknaður sýndarvöðnámsferill TEM-mælingar fyrir marglagskipta syru milli þykkra einsleitra laga (hringir) (líkanið er það sama og fyrir mynd 3) og einvöð túlkun hans með þriggja laga líkani (heildreginn ferill).

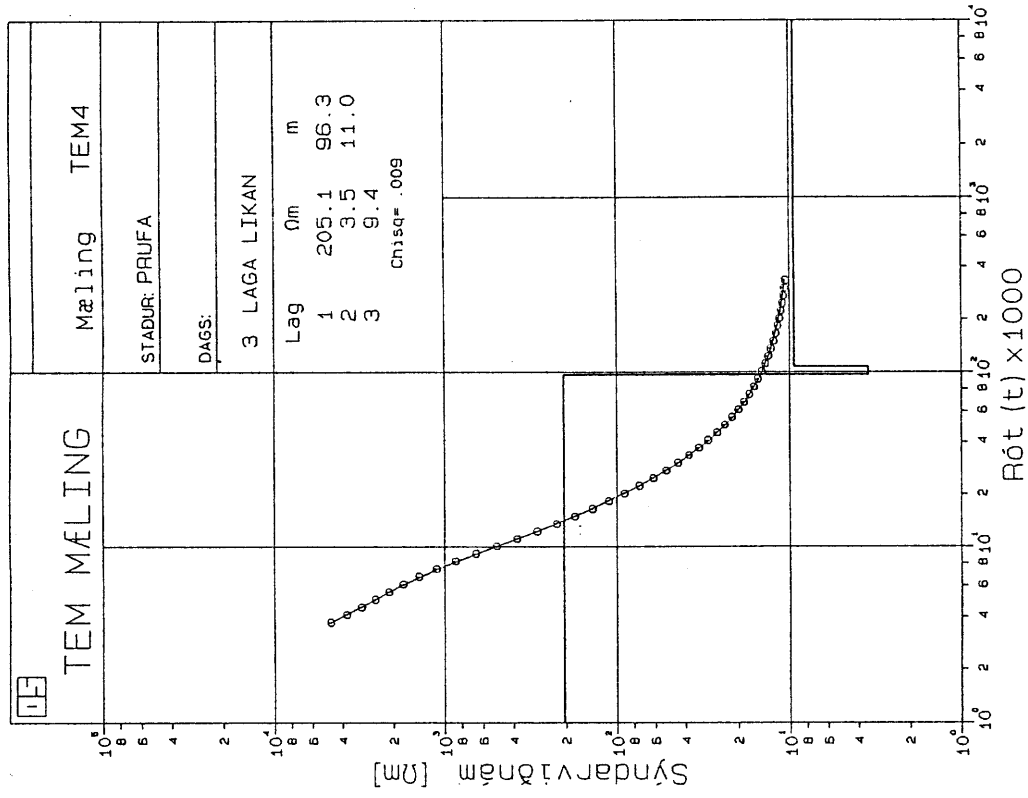
Tafla 1. Samanburður á fræðilegum og túlkuðum niðurstöðum.

		Fræðil.	Túlkað
$\rho_l = \rho_{tem}$	[Ωm]	4.8	4.8
ρ_t	[Ωm]	80.2	
$\sqrt{\rho_l \rho_t} = \rho_{sch}$	[Ωm]	19.6	19.6
$\alpha = \sqrt{\rho_t / \rho_l}$		4.1	
$d_r = d_{tem}$	[m]	100.0	99.9
$\alpha d_r = d_{sch}$	[m]	408.7	404.9

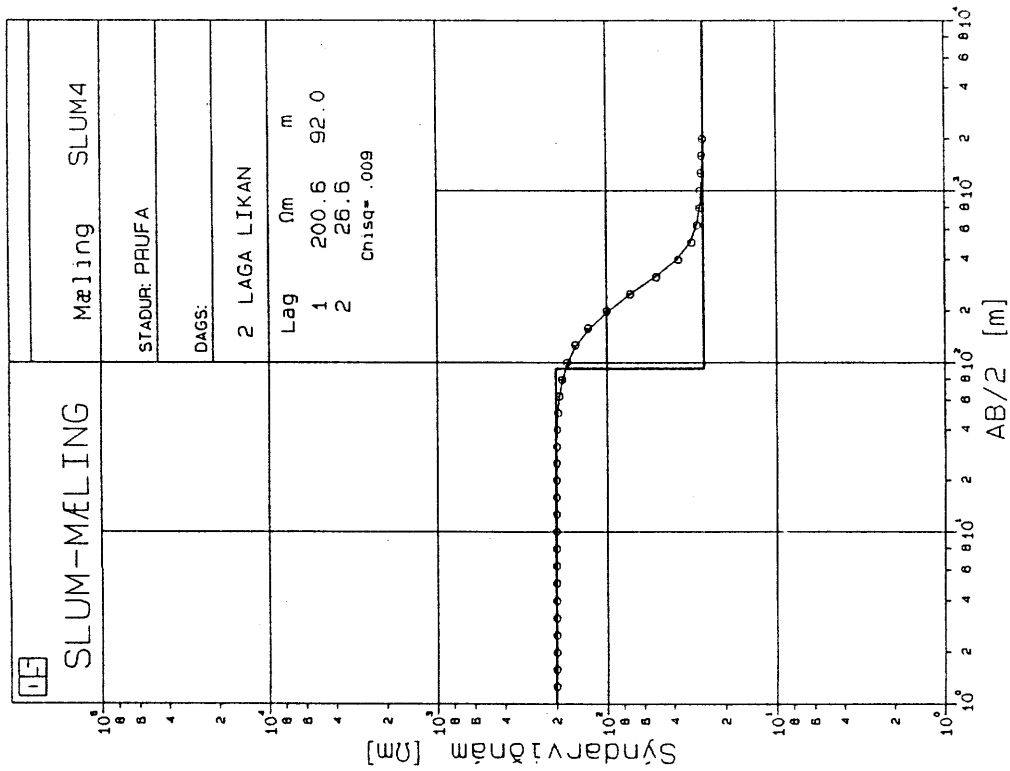
Þessi samanburður sýnir að túlkuðu gildin víkja hvergi meira en 1% frá fræðilegu gildunum og staðfestir því niðurstöðurnar hér að framan.

Myndir 5 og 6 sýna samskonar samanburð fyrir mjög þykka lagskipta syrpu. Líkanið sem notað var til að reikna "mæligögnin" hefur 100 m þykkt lag með eðlisviðnámi 200 Ωm næst yfirborði. Þar fyrir neðan er þykk syrpa þar sem skiptast á 10 m þykk lög með 2 Ωm og 40 m þykk lög með 100 Ωm . Meðaleðlisviðnámið samsíða lögnum er $\rho_l = 9,26 \Omega m$ en meðaleðlisviðnámið hornrétt á þau er $\rho_t = 80,4 \Omega m$. TEM-mælingarnar ættu því að sjá syrpu sem næst eitt lag með eðlisviðnáminu $\rho_{tem} = 9,26 \Omega m$, en Schlumbergermælingarnar með eðlisviðnáminu $\rho_{sch} = \sqrt{\rho_l \rho_t} = 27,3 \Omega m$.

Mynd 5 sýnir að reiknaða sýndarviðnámsferilinn fyrir Schlumbergermælingu má túlka nokkuð vel með tveggjalagalíkani þar sem neðra lagið hefur eðlisviðnám mjög nærri því sem sagt var fyrir. TEM-mælinguna var hinsvegar ekki hægt að túlka viðunandi með tveggjalagalíkani, heldur þurfti þrjú lög (sjá mynd 6). TEM-mælingin nær að greina efsta lágviðnámslagið í syrpu, en þar fyrir neðan sér hún einungis eitt lag með eðlisviðnámi mjög nærri reiknuðu gildi. Af þessu sést að TEM-mælingar hafa frekar möguleika á að greina lagskiptar syrpu upp í einstök lög, en Schlumbergermælingar.



Mynd 6. Reiknaður sýndarvindhnamferill TEM-mælingar fyrir marglagskipt hálfbrúm neðan einsleits yfirborðslags (hringir) (líkanið er það sama og fyrir mynd 5) og einvöð túlkun hans (heildreginn ferill).



Mynd 5. Reiknaður sýndarvindhnamferill Schlumbergermælingar fyrir marglagskipt hálfbrúm neðan einsleits yfirborðslags (hringir) og einvöð túlkun hans (heildreginn ferill).

3. NIÐURSTÖÐUR OG UMRÆÐA

Af því sem rakið hefur verið hér að framan þarf ekki að koma á óvart að Schlumberger- og TEM-mælingar geti gefið mismunandi niðurstöður. Slíks munar er að vænta við aðstæður þar sem jörðin er mjög lagskipt. Þetta er í samræmi við þá reynslu, að aðferðirnar gefa mismunandi niðurstöður utan gosbeltanna þar sem staflinn er mjög lagskiptur, en ber hinsvegar nokkuð vel saman innan gosbeltanna þar sem jarðlög eru að jafnaði þykkri.

Ekki má þó álykta sem svo, að alstaðar þar sem fram kemur munur á aðferðunum sé það vegna mikillar lagskiptingar í eðlisviðnámi. Áhrif viðnámsbreytinga í láréttar stefnur kringum mælistað (frávik frá láréttri lagskiptingu) haf mismunandi áhrif á aðferðirnar. Áhrif viðnámsbreytinga í lárétta stefnu hefur að öllum jafnaði minni áhrif á TEM-mælingar þó að það sé ekki einhlítt. Járnlagir í jörðu og girðingar á yfirborði hafa t.d. oft verulega meiri áhrif á TEM-mælingar en Schlumbergermælingar.

Mismun í svörun Schlumberger- og TEM-mælinga í lagskiptri jörð má vel hugsa sér að nota því oft getur verið áhugavert að fá upplýsingar um lagskiptingu jarðlaga. Það getur t.d. átt við í rannsóknum fyrir mannvirkjagerð s.s. vegna jarðganga eða stíflna. Þá liggur beint við að beita báðum viðnámsmæliaðferðunum á sömu stöðum og bera saman lík-
ön úr einvíðri túlkun. Þykk einsleit lög eiga að koma fram með sama eðlisviðnámi og þykkt í báðum aðferðum. Ef fram koma lög með verulega mismunandi eginleikum, og ekki er ástæða til að ætla að um sé að kenna láréttum viðnámsbreytingum, má álykta sem svo að um sé að ræða lagskiptar syrpur. TEM-mælingarnar eiga að gefa raunverulega þykkt syrpnanna og út frá muni í eðlisviðnámi sem aðferðirnar gefa má fá mat á hversu mikil lagskipting er í eðlisviðnámi þeirra. Ekki er hinsvegar hægt að fá upplýsingar um nánari samsetningu syrpnanna. Að sjálfsgöðu geta jarðlög verið lagskipt án þess að verulegur munur sé á eðlisviðnámi laganna. Merki þess munu ekki sjást í viðnámsmælingum. Hitt er þó öllu líklegra, að ef um verulega lagskiptingu í berggerð er að ræða, þá sé jafnframt lagskipting í eðlisviðnámi.

4. HEIMILDIR

Hoversten, G.M. og H.F. Morrison, 1982: Transient fields of a current loop source above a layered earth. *Geophysics*. Vol. 47. No. 7. 1068-1077.

Koefoed, O., 1979: *Geosounding Principles, 1; Resistivity Sounding Measurements. Methods in Geochemistry and Geophysics*. Elsevier Sci. Publ. Co.

Nabighian, M.N., 1979: Quasi-static transient response of a conducting half-space - An approximate representation. *Geophysics*. Vol. 44. No. 10. 1700-1705.