



ORKUSTOFNUN
Jarðhitadeild

**TEM-viðnámsmælingar
á Hofsjökli**

Knútur Árnason

OS-95014/JHD-09 B

Mars 1995



ORKUSTOFNUN
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verknr. 540925

**TEM-viðnámsmælingar
á Hofsjökli**

Knútur Árnason

OS-95014/JHD-09 B

Mars 1995

ÁGRIP

Í september 1994 voru gerðar tilraunir með TEM-mælingar á Hofsjökli. Tilgangurinn var tvíþættur. Í fyrsta lagi skyldi kanna hvort eðlisviðnám gæfi vísbendingar um jarðhitavirkni undir jöklinum. Í öðru lagi, sem var reyndar megintilgangur mælinganna, var gerð tilraun til að mæla ákomu snævar síðasta árs, með því að mæla svörun vírlykkju sem lögð hafði verið á yfirborð jökulsins ári áður.

Gerðar voru þrjár hefðbundnar TEM-mælingar, tvær á jöklinum og ein skammt norðan hans. Mælingarnar sýndu frekar lágt viðnám í jarðlögum, en ekki það afgerandi lágt að það benti til verulegrar jarðhitavirkni. Líklegast er talið að hið tiltölulega lága viðnám endurspegli móberg, hugsanlega nokkuð ummyndað.

Tilraunin með mælingar yfir vírlykkjunni í jöklinum sýndi að hún svaraði vel þegar sendilykkja var beint yfir henni, en svörunin dofnaði ört, eins og við var búist, með fjarlægð frá henni. Þetta sýnir að tiltölulega auðvelt er að staðsetja lykkjur í jöklinum ef dýpið á þær er ekki of mikið. Út frá styrkleika svörunar beint yfir lykkjunni má reikna dýpið niður á hana og gáfu mælingarnar dýpið um 7,7 m. Til samanburðar var borað niður á snjólagið sem lykkjan var lögð á og gaf sú mæling áætlað dýpi um 7 m. TEM-mælingin virðist því geta ákvarðað dýpið með um 10% nákvæmni, sé það ekki of mikið. Fræðilega er sýnt fram á að nákvæmnin í ákvörðun dýpisins minnkar með dýpinu niður á lykkjuna. Til að hægt sé að ákvarða dýpið með viðunandi nákvæmni má það ekki vera mikið meira en þvermál lykkjunnar.

EFNISYFIRLIT

ÁGRIP	2
EFNISYFIRLIT	3
1. INNGANGUR	4
2. HEFÐBUNÐNAR TEM-MÆLINGAR	4
3. MÆLINGAR Á ÞYKKT SNJÓÞEKJU SÍÐASTA ÁRS	6
3.1 Vangaveltur	10
4. HEIMILDIR	10

TÖFLUR

1. Staðsetning mælinga og stærð sendilykkju	4
2. Kennistærðir lykkju í jökli	6
3. Mældar of afleiddar stærðir til ákvörðunar á dýpi	8

MYNDIR

1. Staðsetning TEM-mælinga	11
2. Túlkaður sýndarviðnámsferill mælingar HJ-01	12
3. Túlkaður sýndarviðnámsferill mælingar HJ-02	12
4. Túlkaður sýndarviðnámsferill mælingar HJ-11	12
5. Jökulþykkt og staðsetning mælinga	13
6. Mælt íspan sem fall af tíma	14
7. Ákvörðun á dýpi út frá sambandi samspanstuðla og mældra stærða fyrir $10 \times 10 \text{ m}^2$ sendilykkju	14
8. Ákvörðun á dýpi út frá sambandi samspanstuðla og mældra stærða fyrir $20 \times 20 \text{ m}^2$ sendilykkju	15
9. Mælt íspan sem fall af tíma í mismunandi fjarlægð frá ás lykkju	15
10. Samspanstuðlar sem fall af dýpi fyrir $50 \times 50 \text{ m}^2$ og misstórar lykkjur í jökli (radíus 5, 10, 20 og 40 m)	16

1. INNGANGUR

Dagana 15. til 21. september 1994 var farin hefðbundin jöklamælingaferð á Hofsjökul undir stjórn Odds Sigurðssonar. Að þessu sinni voru tekin með TEM-viðnámsmælitæki Orkustofnunar til að gera tilraunir með slíkar mælingar á jöklinum. Tilgangur tilraunarinnar var tvíþættur: Í fyrsta lagi að kanna lauslega viðnám jarðlaga undir jöklinum og sjá hvort fram kæmi viðnámsfrávik á stað þar sem grunur leikur á að jarðhita sé að finna undir jöklinum. Í öðru lagi átti að gera tilraun til að mæla þykkt snjóþekjunnar frá síðasta ári á hábungu jökulsins með rafsegulaðferðum með því að mæla dýpi á vírlykkju sem lögð var á yfirborðið haustið 1993. Hér er greint frá niðurstöðum þessarar tilrauna.

2. HEFÐBUNDNAR TEM-MÆLINGAR

Gerðar voru þrjár hefðbundnar TEM-mælingar í leiðangrinum. Tvær þeirra voru á jöklinum, HJ-01 og HJ-02, og ein, HJ-11, á flugvellinum NV við Ingólfsskála, norðan Hofsjökuls. Staðsetningar mælinganna eru gefnar í töflu 1 og sýndar á mynd 1. Mæling HJ-01 var gerð á stað þar sem Oddur taldi ólíklegt að jarðhitavirkni væri undir jöklinum, en HJ-02 aftur á móti þar sem grunur leikur á að jarðhiti sé undir. Þriðja mælingin, HJ-11, var gerð nokkuð norðan jökulsins, til samanburðar við hinar.

Tafla 1. Staðsetning mælinga og stærð sendilykkju.

Mæling	Staðsetning ($^{\circ}$ B $^{\circ}$ L)	Hæð (m y.s.)	Sendilykkja (m^2)
HJ-01	64,8385 18,7083	1475	400x400
HJ-02	64,8750 18,8597	1425	400x400
HJ-11	65,0148 18,9148	815	300x300

Myndir 2, 3 og 4 sýna sýndarviðnámsferla mælinganna ásamt með einvíðri túlkun þeirra þar sem gert er ráð fyrir að eðlisviðnámsdreifingunni undir mælistað megi lýsa með láréttum viðnámslögum. Mynd 2 sýnir sýndarviðnámsferil fyrir mælingu HJ-01 ásamt túlkun með 4-laga líkani. Líkanið gerir ráð fyrir að efst sé um 630 m þykkt lag með mjög háu viðnámi. Þar fyrir neðan gerir líkanið ráð fyrir tveimur lögum með þykkt um 90 m og viðnám annars vegar um 28 Ω m og 9 Ω m hins vegar og að síðustu óendanlega þykku lagi með viðnám um 20 Ω m. Efsta lagið í líkaninu endurspeglar jökulsinn, en lögin þar fyrir neðan bergið undir jöklinum. Viðnámsgildi efsta lagsins (um $3 \cdot 10^4 \Omega$ m) er að vísu allmiklu lægra en eðlisviðnám íss (um $10^6 \Omega$ m) og er ástæða þess sú að þau TEM-mælitæki sem hér eru notuð ákvarða illa viðnámsgildi háviðnámslags næst yfirborði.

Á mynd 2 sést að reiknaði ferillinn samkvæmt líkaninu nær ekki að líkja eftir neðri enda mælda sýndarviðnámsferilsins. Reynt var að túlka mælinguna með líkönum með fleiri lögum án þess að betra samræmi fengist milli mældar og reiknaðra ferla. Ástæða

Þess að ekki tekst að fella reiknaðan feril fyrir einvítt líkan að mælda ferlinum er sú að viðnámsdreifingin undir mælingunni er mun flóknari en svo að hana megi nálga með láréttum viðnámslögum. Þegar staðsetning mælingarinnar var færð inn á kort sem sýnir þykkt jökulsins, samkvæmt mælingum Helga Björnssonar (1988), kom í ljós að á mælistaðnum er mikið landslag undir jöklinum (sjá mynd 5). Mælingin er nokkurn veginn beint yfir um 100 m háu fjalli, eða fjallsrana sem gengur til norðurs í mikla lægð undir jöklinum norðan við mælistaðinn. Viðnámsmunur jökulsins og bergsins undir er mjög mikill (um 4 til 5 stærðargráður) og því má búast við að þetta landslag hafi þrívíð áhrif á sýndarviðnámsferilinn. Á mynd 5 sést að þykkt jökulsins er mjög breytileg umhverfis mælistaðinn eða frá því að vera rúmlega 350 m beint undir mælingunni upp í um og yfir 550 m um 2 km norðar. Það er því ekki við því að búast að einvíð túlkun mælingarinnar gefi áreiðanlegar upplýsingar um þykkt jökulsins og áhrif hins flókna landslags undir mælistað verða trúlega til þess að einvíð túlkun mælingarinnar ofmetur þykkt jökulsins verulega.

Til að kanna hvort þrívíðu áhrifin í mælingu HJ-01 mætti skýra með landslagi undir jöklinum voru gerðir nokkrir þrívíðir líkanreikningar þar sem líkt var eftir landslaginu í grófum dráttum. Niðurstaða þeirra reikninga var sú að landslagið undir mælingunni væri á of miklu dýpi til að geta geta skýrt að fullu þau þrívíðu áhrif sem fram koma í sýndarviðnámsferlinum. Landslagið virðist geta skýrt það að mælingin sýni meiri þykkt jökulsins, en auk þess virðist þurfa að gera ráð fyrir staðbundnu lágviðnámsvæði undir jöklinum undir mælingu HJ-01.

Mynd 3 sýnir mældan sýndarviðnámsferil ásamt einvíðri túlkun fyrir mælingu HJ-02. Mælingin er túlkuð með fjögurra laga líkani og reiknaður ferill fellur vel að þeim mælda. Efsta lagið er með mjög háu viðnámi og um 350 m þykkt. Þar fyrir neðan eru mjög ákveðin viðnámskil þar sem við tekur rúmlega 290 m þykkt lag með um 150 Ω m viðnámi. Undir því kemur síðan um 450 m þykkt lag með um 70 Ω m viðnám og loks óendanlegt hálfkrúm með um 13 Ω m viðnámi. Efsta lagið endurspeglar jökulísinn en lögin þar fyrir neðan bergið undir. Viðnámið í efsta laginu er eins og áður verulega lægra en raunverulegt viðnám í ís, en eins og áður segir er viðnámsgildi efsta lagsins mjög illa ákvarðað. Á mynd 5 sést að mæling HJ-02 er á stað þar sem jökullinn er tæplega 350 m þykkur, þ.a. nokkuð gott samræmi er milli þykktar efsta lagsins í líkaninu á mynd 3 og jökulþykktarinnar.

Mynd 4 sýnir mældan sýndarviðnámsferil ásamt einvíðri túlkun fyrir mælingu HJ-11, sem er á flugvellinum skammt NV við Ingólfsskála, norðan Hofsjökuls. Mælingin er túlkuð með þremur viðnámslögum. Efst er um 440 m þykkt lag með um 350 Ω m viðnámi. Þar fyrir neðan er um 60 m þykkt lag með um 250 Ω m viðnámi og um 12 Ω m viðnám þar fyrir neðan.

Það er sameiginlegt öllum þessum mælingum að þær "sjá" til þess að gera lágt viðnám í jarðlögum; eða niður undir 10 Ω m. Viðnám af þessari stærðargráðu bendir til gropins og/eða ummyndaðs bergs. Viðnámið er þó ekki það lágt að það bendi til háhitavirkni. Líklegast er að hið tiltölulega lága viðnám sé að finna í ummynduðu móbergi og endurspegli þar með jarðhitavirkni sem verið hefur til staðar á einhverju tímasteiði en er nú að mestu kulnuð. Ef tekið er tillit til hæðar mælistaða yfir sjó kemur í ljós að þetta lága viðnám rís hæst, á þeim stöðum sem mælingar voru gerðar, undir HJ-01 þar sem

efri mörk þess virðast vera í um 750 m hæð yfir sjó og skammt undir jökulísnum. Í mælingu HJ-02 eru um 750 m þykk jarðlög undir ísnum með tiltölulega háu viðnámi og lágt viðnám kemur ekki fram fyrr en í um 370 m hæð yfir sjó. Undir flugvellinum kemur lágt viðnám fram í um 130 m hæð yfir sjó.

3. MÆLINGAR Á ÞYKKT SNJÓÞEKJU SÍÐASTA ÁRS

Í september 1993 var lögð vírlykkja á yfirborðið á hábungu Hofsjökuls. Tilgangurinn var að reyna með rafsegulaðferðum að finna lykkjuna að ári og mæla dýpi á hana frá yfirborði. Lykkjan var höfð hringlaga og helstu kennistærðir hennar eru gefnar í töflu 2.

Tafla 2. Kennistærðir lykkju í jökli.

Staðsetning (°B °L)	64,8092 18,8702
Gerð vírs	35q koparvír
Radius	4,77 m
Ummál	30 m
Viðnám vírs (við 0° C)	$1,48 \cdot 10^{-2} \Omega$

Mælingarnar fóru þannig fram að lögð var vírlykkja, sendilykkja, af þekktri stærð á yfirborðið og sendur jafnstraumur, I_0 í sendilykkjuna. Straumurinn er síðan felldur línulega frá upphafsgildinu I_0 á mjög skömmum tíma t_0 sem kallaður er roftími. Við það að straumurinn í sendilykkjunni er rofinn breytist segulflæðið í gegnum lykkjuna í jöklinum og spanar í henni íspennu, E_t (e. electromotive force), og varir íspennan meðan straumurinn fellur að núlli. Íspennan verður til þess að straumur fer að renna um lykkjuna. Vegna vináms í lykkjunni fellur þessi straumur veldislega (e. exponentially) sem fall af tíma. Hinn breytilegi straumur í lykkjunni veldur síðan íspennu í móttökuspólu á yfirborði og er sú íspenna mæld sem fall af tíma eftir að straumurinn í sendilykkjunni hefur verið að fullu rofinn.

Því sem hér hefur verið lýst í orðum má lýsa stærðfræðilega á mjög einfaldan hátt ef gert er ráð fyrir því að líta megi burt frá spanstraumum í snjónum umhverfis lykkjuna. Eðlisviðnámið í snjónum er af stærðargráðunni $10^6 \Omega\text{m}$ á meðan eðlisviðnám koparsins í vírnum er um $1,7 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ þannig að hlutfall eðlisviðnáms í snjó og kopar er um $10^{18} \Omega\text{m}$ sem þýðir að líta má framhjá spanstraumum í snjónum og líta svo á sem lykkjurnar séu í tómu rúmi með enga leiðni.

Þegar straumurinn I_s í sendilykkjunni breytist með tíma verður íspennan E_t sem myndast í lykkjunni í snjónum gefin sem mínus tímaafleiðan af segulflæðinu Φ_t í gegnum lykkjuna:

$$E_t = -\frac{d\Phi_t}{dt} = -M_{st} \cdot \frac{dI_s}{dt} \quad (1)$$

þar sem M_{st} er samspanstuðull sendilykkjunnar og lykkjunnar í snjónum. Straumsendirinn fellir strauminn línulega frá gildinu I_0 og niður í núll á roftímanum t_0 .

Ef núllpunktur tímaássins er settur þar sem straumurinn er orðinn 0, þá er til staðar föst íspenna á tímabilinu - t_0 til 0 sem er gefin sem

$$E_t = -M_{st} \cdot \frac{I_0}{t_0} \quad (2)$$

Fyrir $t < -t_0$ og $t > 0$ er íspennan 0. Spanstraumurinn í truflunarlykkjunni er þá gefinn sem:

$$I_t(t) = \begin{cases} 0 & t < -t_0 \\ E_t/R \cdot [1 - e^{-(t_0+t)/\tau}] & -t_0 \leq t \leq 0 \\ E_t/R \cdot [1 - e^{-t_0/\tau}] \cdot e^{-t/\tau} & t > 0 \end{cases} \quad (3)$$

þar sem R er viðnámið í lykkjunni í snjónum og τ er tímafasti lykkjunnar sem er gefinn sem $\tau = L/R$ þar sem L er sjálfspanstuðull lykkjunnar (e. self inductance).

Straumurinn í lykkjunni í snjónum fellur veldislega með tíma og þar með segulflæðið frá honum í gegnum móttökuspóluna. Íspennuna E_r , sem við þetta spanast í móttökuspólunni, má á sama hátt og í jöfnu (1) rita sem:

$$E_r = -M_{tr} \cdot \frac{dI_t}{dt} \quad (4)$$

þar sem M_{tr} er samspanstuðullinn milli lykkjunnar í snjónum og móttökuspólunnar. Með því að taka tímaafleiðuna af (3) fyrir $t > 0$ og stinga inn í (4) ásamt með að nota (2) fæst íspanið í móttökuspólunni:

$$E_r(t) = -M_{st} \cdot M_{tr} \cdot \frac{I_0}{R t_0 \tau} \cdot [1 - e^{-t_0/\tau}] \cdot e^{-t/\tau} \quad (5)$$

Af þessu sést að íspennan í móttökuspólunni fellur veldislega í tíma eftir að straumurinn hefur verið rofinn í sendilykkjunni. Ef lógaritminn af mældri spennu í móttökuspólunni er teiknaður sem fall af tíma eiga mæligögnin því að raða sér á beina línu. Hallatala línunnar er $1/\tau$, þar sem τ er tímafasti lykkjunnar í snjónum og skurðpunkturinn við y-ás gefur spennuna við $t = 0$ sem er gefin sem:

$$E_0 = M_{st} \cdot M_{tr} \cdot \frac{I_0}{R t_0 \tau} \cdot [1 - e^{-t_0/\tau}] \quad (6)$$

Straumsendirinn mælir strauminn I_0 sem sendur er í lykkjuna og roftímann t_0 . Við nám lykkjunnar í jöklinum R er þekkt og af ferlum, sem sýna lógaritmann af íspennunni sem fall af tíma, fæst tímafastinn τ og spennan E_0 við $t = 0$. Þetta þýðir að allar stærðir í jöfnu (6) eru þekktar nema samspanstuðlarnir og hana má því nota til að ákvarða margfeldi samspanstuðlanna:

$$M_{st} \cdot M_{tr} = E_0 \cdot C \quad (7)$$

þar sem

$$C = \frac{Rt_0\tau}{I_0} \cdot \left[1 - e^{-t_0/\tau} \right]^{-1} \quad (8)$$

Eins og fram kemur hér á eftir er tímafasti lykkjunnar í jöklinum, τ , um 100 sinnum lengri en roftíminn, t_0 , þannig að jöfnu (8) má með fyrstu gráðu Taylor nálgun fyrir $e^{-t_0/\tau}$, skrifa með góðri nákvæmni sem:

$$C = \frac{R\tau^2}{I_0} \quad (9)$$

Samspanstuðlarnir M_{st} og M_{tr} eru háðir rúmfræðilegri afstöðu lykkjunnar í jöklinum, sendilykkjunnar og móttökuspólunnar. Þar sem sendilykkjan og móttökuspólan eru á nokkurn veginn lárétta yfirborði jökulsins og lykkjan í jöklinum var í upphafi lögð á yfirborðið má gera ráð fyrir að þær liggja í samsíða plönum. Staðsetning lykkjunnar í jöklinum var nokkurn veginn þekkt fyrir fram (með óvissu upp á um ± 5 m) og því er gert ráð fyrir að sendi- og móttökulykkjunnar séu beint yfir henni. Lykkjurnar eru því allar samása og samsíða. Ef gert er ráð fyrir því að leiðni í snjónum sé núll (hverfandi miðað við leiðni í lykkjunum) og að segulviðtaksstuðull snævarins sé sá sami og í lofti ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$) sem er mjög góð nálgun, má með einfaldri tölulegri heildun reikna samspanstuðlana M_{st} og M_{tr} og þar með margfeldi þeirra. Sé það gert fyrir mismunandi gildi á dýpinu h niður á lykkjuna í jöklinum og margfeldið teiknað sem fall af h , má út frá gefnu C og E_0 á hægri hlið jöfnu (7) lesa af dýpið á lykkjuna.

Til ákvörðunar á dýpi niður á lykkjuna voru gerðar mælingar með tveimur stærðum af sendilykkjum; annarsvegar 10×10 m² ferningur og hinsvegar 20×20 m² ferningur. Mynd 6 sýnir lógaritmann (með grunntölu 10) af mældu íspani í móttökuspólunni sem fall af tíma (í millisekúndum) eftir að straumurinn var rofinn í sendilykkjunni. Á mynd 6 sést að burt séð frá allra fyrstu mælipunktunum er greinilegt línulegt samband milli lógaritmans af íspennunni og tíma sem þýðir að íspennan fellur veldislega með tíma eins og jafna (5) segir fyrir um. Ennfremur sést að í báðum tilfellum kemur fram lína með sömu hallatölu. Hallatala línanna ræðst af tímafastanum τ fyrir lykkjuna í snjónum. Hallatala línanna á mynd 6 svarar til $\tau = 3,33 \cdot 10^{-3}$ s. Af myndinni má ennfremur lesa upphafsíspennuna E_0 (við $t = 0$). Út frá tímafastanum τ , viðnámi lykkjunnar í jöklinum R (sjá töflu 2), útsendum straum I_0 og roftímanum t_0 má síðan reikna út stærðina C samkvæmt jöfnu (8) eða (9) hér að framan. Þessar stærðir eru hér dregnar saman í töflu:

Tafla 3. Mældar og afleiddar stærðir til ákvörðunar á dýpi.

Sendilykkja	10x10 m ²	20x20 m ²
Sendur straumur I_0 [A]	16,6	17,9
Roftími t_0 [s]	$2,3 \cdot 10^{-5}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$
Tímafasti τ [s]	$3,33 \cdot 10^{-3}$	$3,33 \cdot 10^{-3}$
Upphafsíspenna E_0 [V]	$2,45 \cdot 10^{-4}$	$4,47 \cdot 10^{-4}$
Stuðull C samkv. (9) [$\Omega s^2/A$]	$9,92 \cdot 10^{-9}$	$9,21 \cdot 10^{-9}$
$E_0 \cdot C$ [$\Omega s^2 V/A$]	$2,43 \cdot 10^{-12}$	$4,12 \cdot 10^{-12}$

Myndir 7 og 8 sýna reiknað margfeldi samspanstuðlanna $M_{st} \cdot M_{tr}$ fyrir mismunandi dýpi á lykkjuna í jöklinum. Í þeim reikningum er reyndar gerð sú nálgun að reiknað er með því að sendilykkjan sé hringlaga með sama flatarmál og raunveruleg sendilykkja. Í reikningunum er jafnframt tekið tillit til raunverulegrar stærðar og fjölda vafninga í móttökuspólunni.

Mynd 7 sýnir margfeldi samspanstuðlanna fyrir $10 \times 10 \text{ m}^2$ sendilykkju, sem fall af dýpinu h niður á lykkjuna í jöklinum. Inn á myndina hefur verið fært margfeldið $E_0 \cdot C$ samkvæmt töflu 3, en samkvæmt jöfnu (7) hér að framan á það að vera jafnt margfeldi samspanstuðlanna. Af myndinni sést að hið mælda gildi svarar til þess að dýpið á lykkjuna sé 7,75 m. Mynd 8 sýnir samskonar samanburð fyrir $20 \times 20 \text{ m}^2$ sendilykkju og samkvæmt þeirri mælingu er dýpið á lykkjuna 7,70 m. Þessum tveimur mælingum ber því saman um að dýpið á lykkjuna sé um 7,7 m.

Dýpið var til samanburðar einnig mælt á annan hátt. Það var gert þannig að þegar lykkjan var lög á yfirborðið í september 1993 var dreift sagi á snjóinn innan lykkjunnar. Á sama tíma og mælingarnar fóru fram var borað með snjóbor og fannst sagið á um 6,6 m dýpi. Þetta er rúmlega metra minna dýpi en samkvæmt rafsegulmælingunum. Þess ber þó að gæta að þegar lykkjan var lögð í snjóinn var gerð rás fyrir hana, um 20-30 cm djúp, þannig að hún liggur eitthvað dýpra en sagið. Ennfremur er hugsanlegt að lykkjan hafi brætt sig eitthvað niður eftir að hún var lögð því að nokkurt sólfar var fyrst eftir að hún var lögð. Það virðist því meiga gera ráð fyrir að dýpið á lykkjuna sé nokkru meira en á sagið eða um eða rétt yfir 7 m. Það verður þó að teljast harla ólíklegt að lykkjan sé meira en metra dýpra en sagið þannig að rafsegulmælingarnar virðast ofmeta dýpið og þar kemur einkum þrennt til greina sem getur valdið því.

Í fyrsta lagi veldur sú nálgun að engin leiðni sé í snjónum, sem gerð er í reikningunum hér að ofan, því að dýpið er eitthvað ofmetið. Það er hins vegar ekki alveg einfalt að meta tölulega hversu mikilli skekkju þetta veldur. Í öðru lagi er það næsta víst að viðnámið í lykkjunni í jöklinum, sem gefið er upp í töflu 2, er of lágt. Viðnámsgildið sem þar er gefið er miðað við heilan vír af þeirri gerð og lengd sem upp er gefin í töflunni. Þegar viðnám vírsins er orðið jafn lítið og hér um ræðir fer að skipta miklu máli upp á heildarviðnámið í hringtengdri lykkju hvernig vírinn er tengdur saman. Það er ljóst að viðnám lykkjunnar er meira en gert er ráð fyrir í reikningunum hér að ofan, en hversu miklu er ekki vitað. Af jöfnum (7) og (9) sést að ef gert er ráð fyrir hærra gildi á R fæst stuðullinn C stærri og þar með margfeldið $E_0 \cdot C$, sem gefur minna dýpi eins og sjá má af myndum 7 og 8. Í þriðja lagi getur verið að sendilykkjan og móttökuspólan hafi ekki verið beint yfir miðju lykkjunnar. Ef sendilykkja og móttökuspóla eru verulega til hliðar við ás lykkjunnar í snjónum (meira en u.þ.b. hálf dýpið niður á hana) minnkar margfeldi samspanstuðlanna og íspennan sem mælist verður minni (sjá umræðu hér á eftir). Sé þetta tilfellið þá sýna ferlarnir á myndum 7 og 8 of háa samspanstuðla. Af myndunum er augljóst að ferlar með lægri samspanstuðlum munu gefa minna dýpi á lykkjuna.

Auk þess að reyna að mæla dýpið á lykkjuna í jöklinum var gerð lausleg tilraun til að sjá hvernig nota mætti rafsegulaðferðir til að staðsetja hana. Þetta var gert með því að mæla svörun hennar fyrir mismunandi staðsetningu sendilykkju og móttökuspólu. Notuð var $10 \times 10 \text{ m}^2$ sendilykkja og móttökuspólan var höfð í miðju hennar. Auk mælingar

beint yfir miðju lykkjunnar, sem áður hefur verið frá sagt, voru gerðar tvær mælingar með móttökuspólu og miðju sendilykkjunnar annarsvegar 5 m og hinsvegar 10 m frá ási lykkjunnar. Mynd 9 sýnir lógaritmann af mældri íspennu í móttökuspólunni sem fall af tíma fyrir þessar þrjár staðsetningar ($d = 0, 5, 10$ m). Myndin sýnir að íspennan fellur til þess að gera lítið meðan fjarlægð mælimiðju frá ási lykkjunnar er ekki meiri en dýpið niður á lykkjuna, en fellur hinsvegar mikið þegar fjarlægðin eykst umfram það og á mynd 9 sést að hún hefur fallið um tvær stærðargráður við $d = 10$ m.

3.1 Vangaveltur

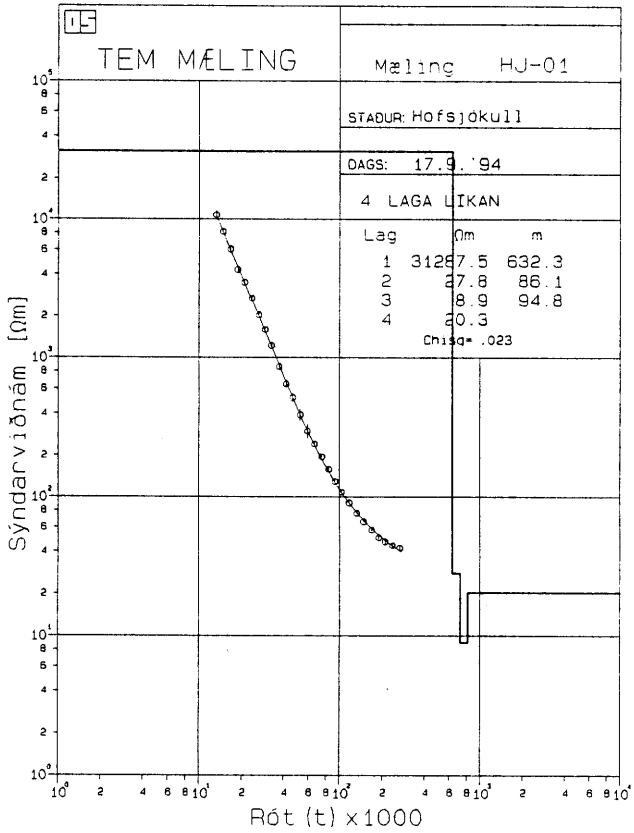
Niðurstaðan af þessari tilraun virðist vera sú að nota megi rafsegulaðferðir til að staðsetja nokkuð nákvæmlega lykkjur, sem grafist hafa í jökulinn. Ennfremur virðist mega ákvarða dýpið á þær með um eða innan við 10% nákvæmni.

Hversu djúpt hægt er að nema og mæla dýpi á lykkju í jöklinum fer eftir stærð sendilykkju og þó einkum stærð lykkjunnar í jöklinum. Á mynd 10 er sýnt margfeldi samspanstuðlanna $M_{st} \cdot M_{tr}$ sem fall af dýpi h niður á misstórar lykkjur. Reiknaðir voru ferlar fyrir lykkjur með radius 5, 10, 20 og 40 m, en sendilykkjan er í öllum tilfellum 50×50 m². Til þess að hægt sé að mæla dýpið með nokkurri nákvæmni þarf snertillinn (afleiðan) við samspanstuðlaferilinn að hafa umtalsverðan halla. Af mynd 10 sést að til þess þessu skilyrði sé fullnægt má dýpið á lykkjuna ekki vera meira en þvermál hennar.

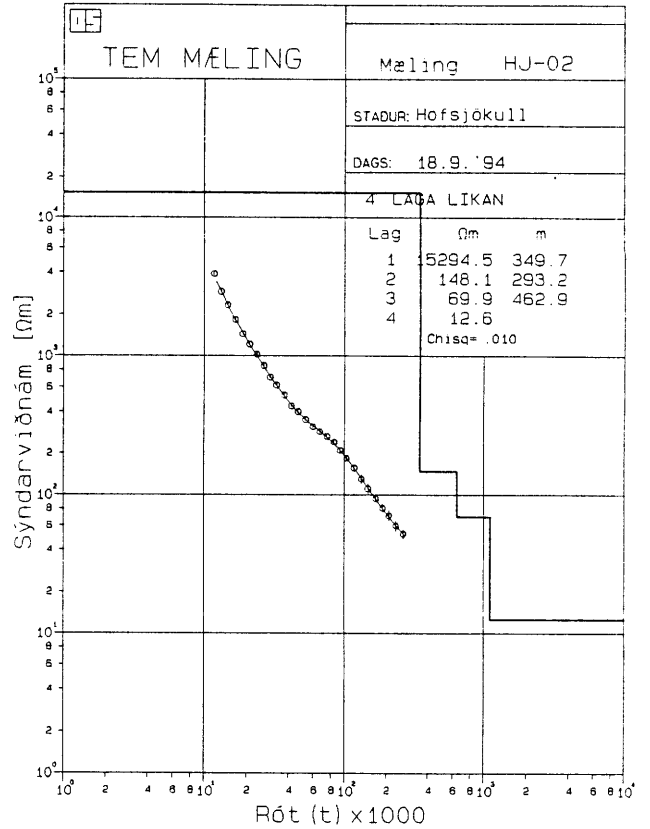
Með því að leggja út nokkuð stórar lykkjur má mæla uppsafnaða ákomu í einhver ár; hversu mörg fer eftir því hversu árleg ákoma er mikil og þar með hve lengi lykkjan er að komast niður fyrir þau mörk að ekki er lengur hægt að ákvarða dýpið með viðunandi nákvæmni. Af ofangreindu er ljóst að ekki er hentugt að nota þessa aðferð til að fylgjast með massaflutningi jökla langt ofan jafnvægislínu. Hins vegar má hugsa sér að nota hana til að fylgjast með ferli ísmassans kringum jafnvægislínu.

4. HEIMILDIR

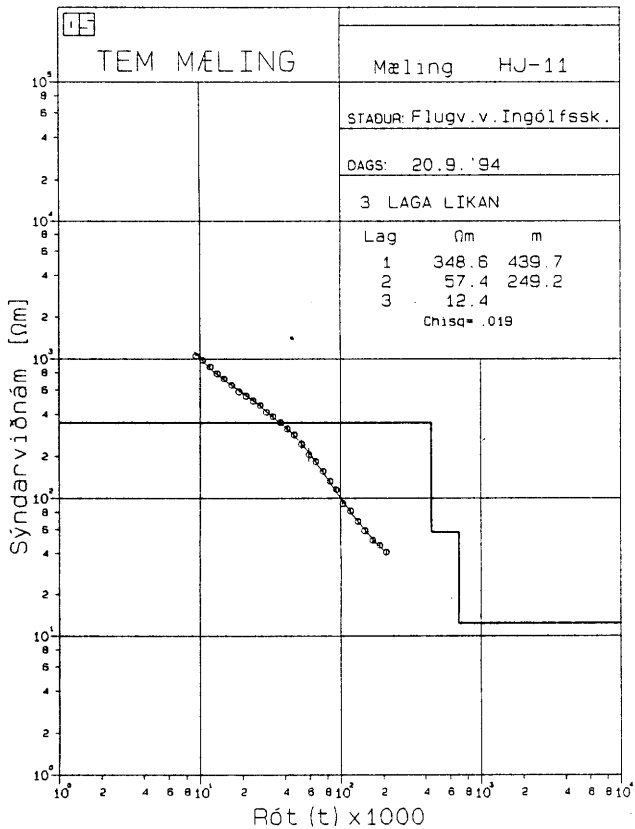
Helgi Björnsson, 1988: Hydrology of ice caps in volcanic regions. Vísindafélag Íslandinga. Rit XLV. Reykjavík.



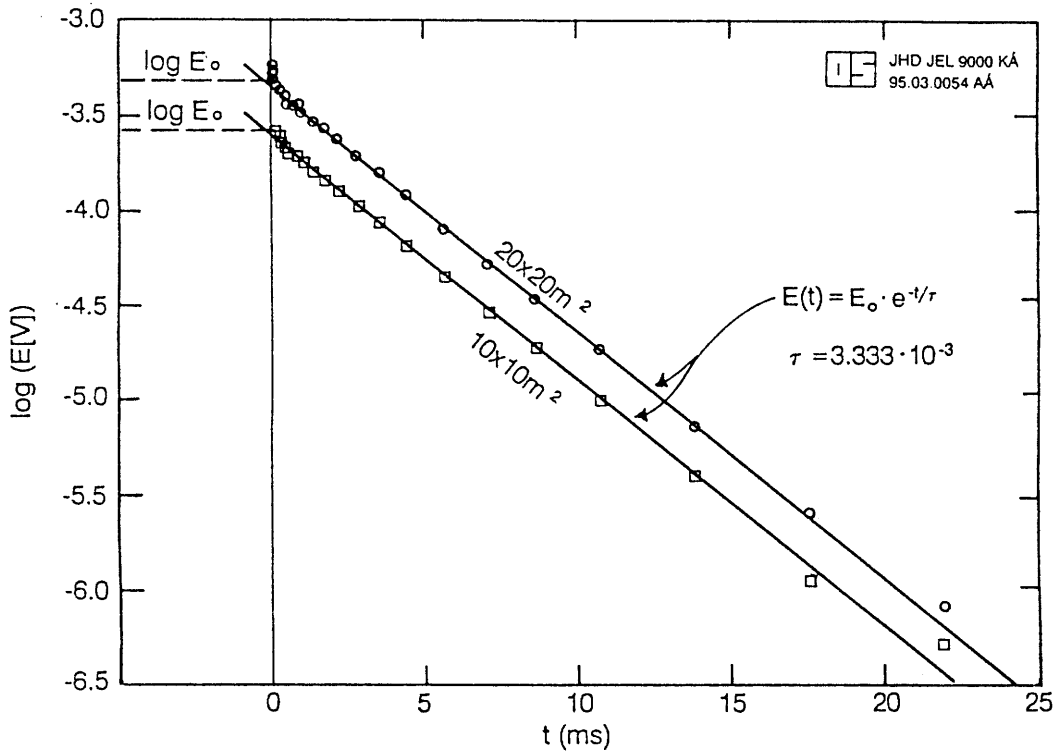
Mynd 2. Túlkaður sýndarviðnámsferill mælingar HJ-01.



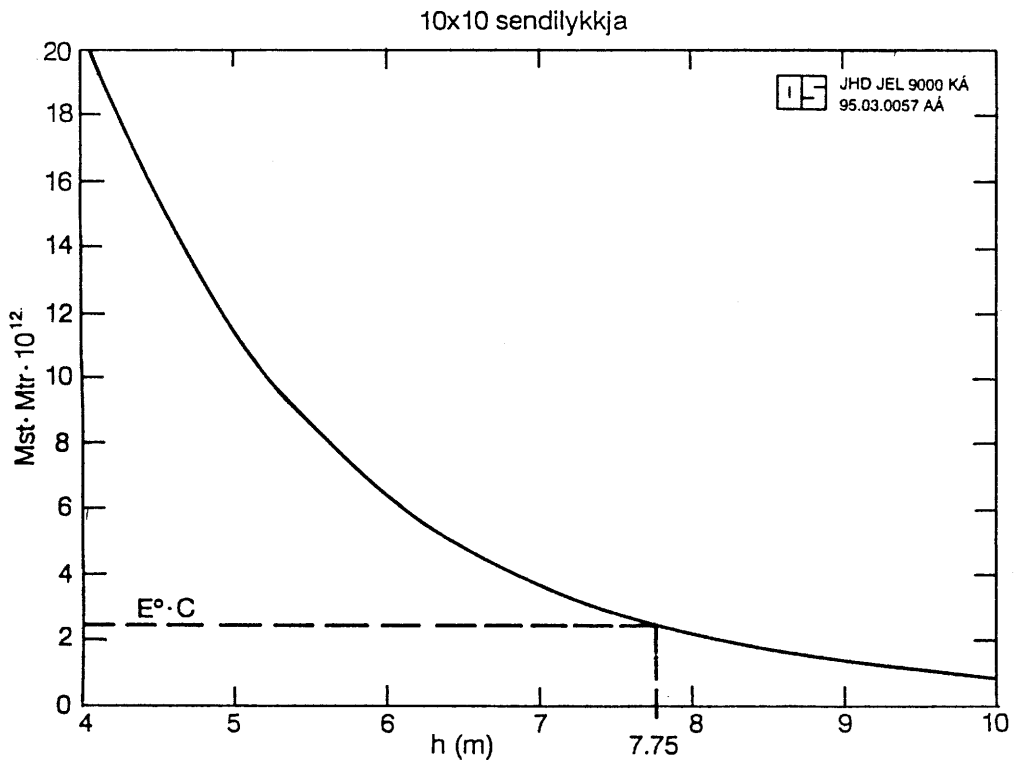
Mynd 3. Túlkaður sýndarviðnámsferill mælingar HJ-02.



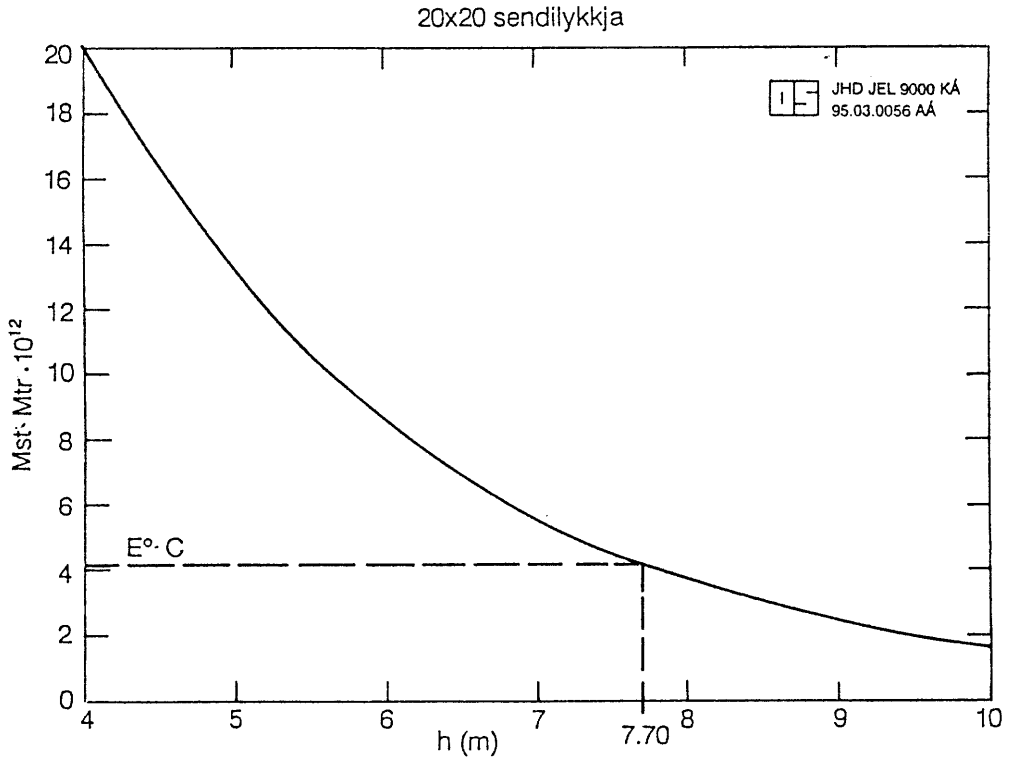
Mynd 4. Túlkaður sýndarviðnámsferill mælingar HJ-11.



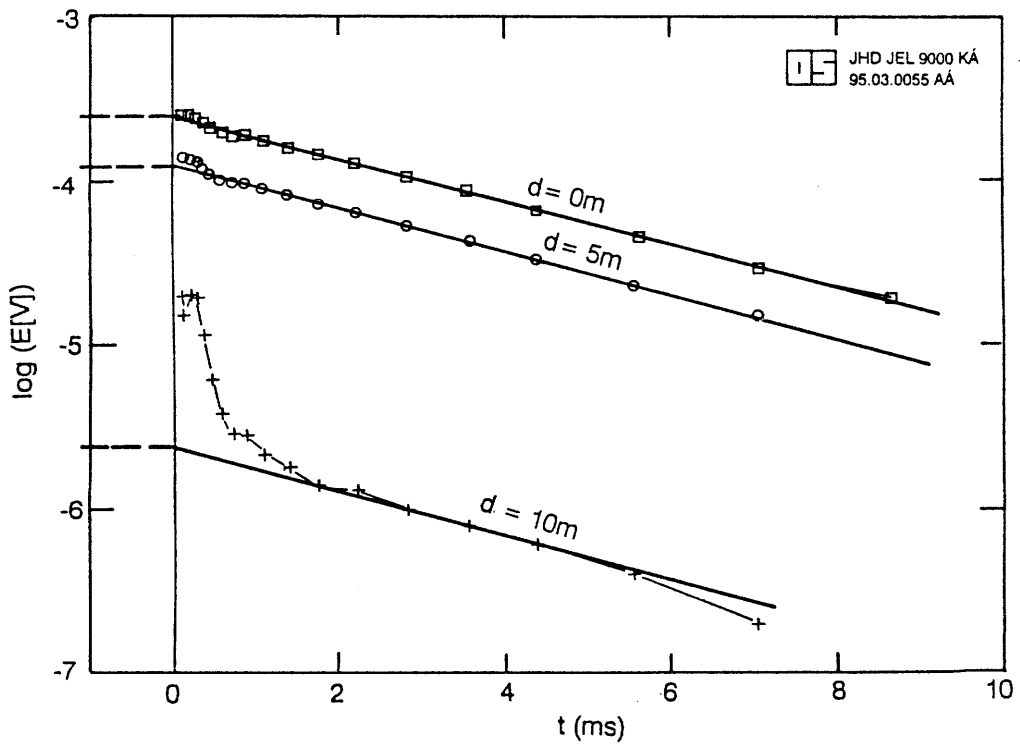
Mynd 6. Mælt íspan sem fall af tíma.



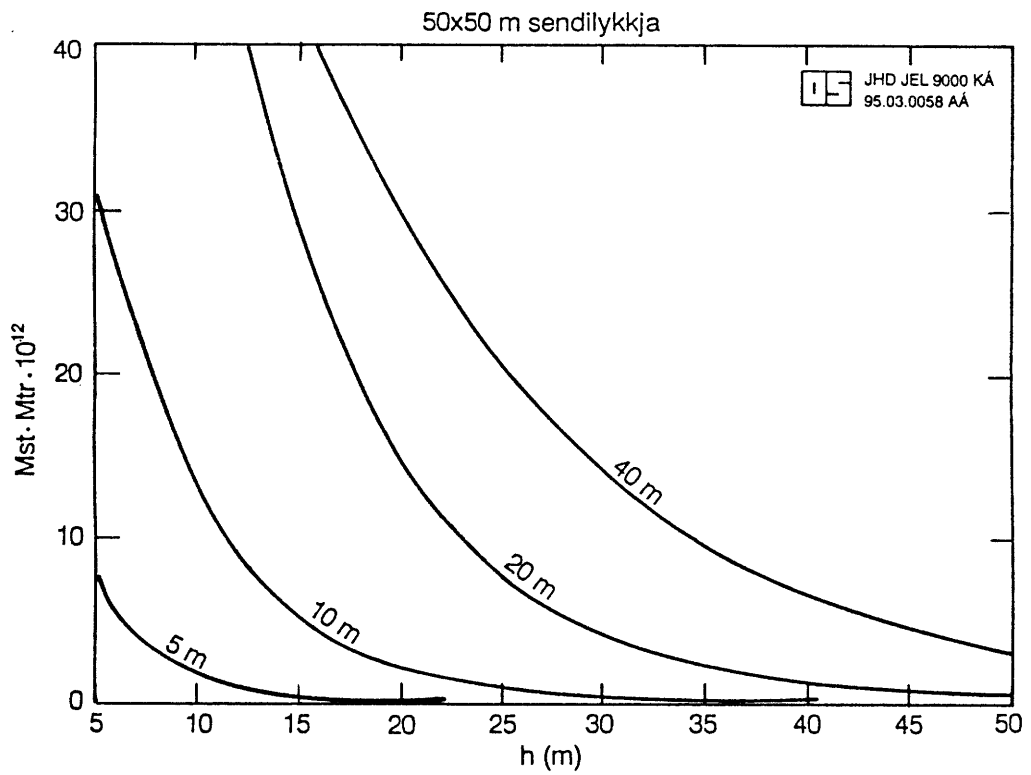
Mynd 7. Ákvörðun á dýpi út frá sambandi samspanstuðla og mældra stærða fyrir $10 \times 10 \text{ m}^2$ sendilykkju.



Mynd 8. Ákvörðun á dýpi út frá sambandi samspanstuðla og mældra stærða fyrir 20x20 m² sendilykkju.



Mynd 9. Mælt íspan sem fall af tíma í mismunandi fjarlægð frá ás lykkju.



Mynd 10. Samspanstuðlar sem fall af dýpi fyrir 50x50 m² og misstórar lykkjur í jökli (rádius 5, 10, 20 og 40 m).