

ORKUSTOFNUN
Jarðhitadeild

JARÐHITAKÖNNUN MED RAFAÐFERÐUM

Á ÍSLANDI.

Gunnar Böðvarsson

Júní, desember 1967

JARÐHITAKÖNNUN MED RAFADFRÐUM Á ÍSLANDI

Gunnar Böðvarsson

Corvallis, í júní 1967

(1) Inngangur

Eftirfarandi greinargerð um notkun rafaðferða við jarðhitaleit og jarðhitakönnun á Íslandi hefur verið takin saman fyrir beiðni Jarðhitadeildar raforkumálaskrifstofunnar. Í stuttu og mjög knöppu máli verður reynt að gera grein fyrir hugsanlegum möguleikum til notkunar rafaðferða við svæðis- og djúpkönnun, en þessar aðferðir hafa hingað til verið notaðar svo að segja eingöngu við staðbundnar og grunnar rannsóknir.

(2) Jarðhitaaðstæður á Íslandi

Til grundvallar þeim hugleiðingum, sem hér fara á eftir vill undirritaður minna á eftirfarandi atriði, sem hann hefur og sett fram í öðrum greinargerðum.

(a) Á Íslandi virðist mega greina grunnvatnskerfi í tvo flokka, þ.e. (1) yfirborðskerfi með köldu vatni og (2) djúpkkerfi með heitu vatni. Fyrirnefnd kerfi skipta hér svo að segja engu máli. Djúpkkerfin virðast vera í neðri lögum blágrættismyndunarinnar, þ.e. á 1.500 til 3.000 m dýpt. Meðaldýpt er væntanlega um 2.000 m. Þar streymir vatn á mörkum blágrættislaga, um innskotslög og ganga. Hiti er frá 100°C í a.m.k. 250°C allt eftir stað. Það er líklegt, að svokallað D-lag myndi botn djúpkkerfanna, enda þótti ekki sé full víska fyrir þessu.

(b) Jarðhitasvæði á yfirborði eru uppstreymissvæði frá djúpkerfum. Flatarmál uppstreymissvæðanna er breytilegt frá nokkrum km^2 í tugi km^2 .

(c) Ísótópaathuganir gefa til kynna, að djúpvatn streymir alllangar vegalengdir, og eru merki um 50 til 100 km a.m.k. Á suðvesturlandi eru þessir straumar frá NA til Sv, þ.e. eftir meginbrot- og höggflínum svæðisins.

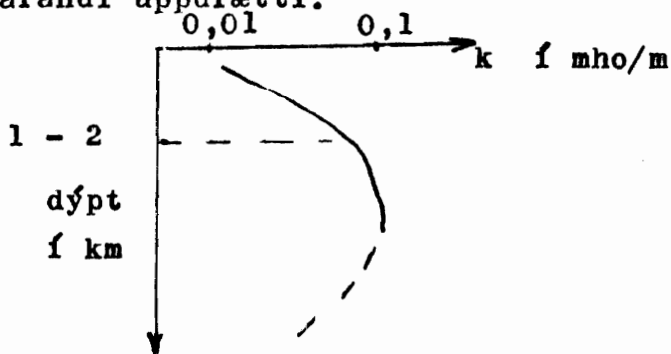
(d) Hitastigull utan uppstreymissvæða er frá 50 til 100 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$. Í neðri lögum blágrýtismyndunarinnar má því gera ráð fyrir tiltölulega háum hita. Láreftar hitabreytingar eru væntanlega mjög hægar, og skörp hitamörk ólíkleg.

(e) Við yfirborð er eðlisleiðni tertíers blágrýtis um 5×10^{-3} mho/m. Á 2 km dýpt mun hún á heitari svæðum hugsanlega komin upp í um 0,1 mho/m, og á háhitasvæðum er 0,1 til 1,0 mho/m ekki útilokað. Talið skal fram, að þessi djúpgildi eru hreinar ágizkanir.

Á háhitasvæðum má við yfirborð væntanlega finna stöði þar sem leiðnin er e.t.v. um 1 mho/m. Hér skipta efnabreytingar miklu máli, einkum þó sýrumyndun. Sömu aðstæður eru vart fyrir hendi í djúpbergi. Þar er umhverfi súrefnissnautt. Því er engan vegin öruggt, að eðlisleiðni á háhitasvæðum vaxi mjög með dýpt. Hún glti e.t.v. lækkað lítið eitt.

Engin gögn liggja fyrir um eðlisleiðni D-lagsins. Það er hugsanlegt, og jafnvel líklegt, að þetta lag sé frekar þurr, og vatnsinnihald þess minnki verulega með dýpt. Því er líklegt, að eðlisleiðnin minnki þegar niður í D-lagið kemur.

Aðstæður á Íslandi gætu því víða verið þannig eins og sýnt er á eftirfarandi uppdrætti.



Við útreikninga er oft hentugt að gera ráð fyrir því, að ~~MAX~~ eðlisleiðnin $k(z)$ vaxi með dýpt þannig, að $k(z) = Az^n$, en hér eru A og n fastatölur. Þetta gæti gilt innan blágrýtismyndunarinnar.

Meginatriðið er nú að ráð yfir aðferðum, sem geta með þolanlegri nákvæmni greint dýpt niður á tiltölulega háa leiðni, t.d. 0,1 mho/m. Eftirfarandi hugleiðingar skulu því miðaðar við það verkefni að finna slíka leiðni á 1 til 2 km dýpt.

(3) Hugsanlegar rafaðferðir

Sam kunnugt er, má skipta rafaðferðun þannig,

- (a) Rakstraumsaðferðir (D.C. conduction)
Wenner aðferð eða tvíþól aðferð.
- (b) Riðstraumsaðferðir (A.C. conduction)
Wenner aðferð eða tvíþól aðferð.
- (c) Riðsviðsaðferðir með gervisviði.
- (d) Riðsviðsaðferðir á grunvelli breytinga jarðsviðsins.

Rakstraumsaðferðir með Wenner fyrirkomulagi hafa þegar gefið góða raun við grunnar og staðbundnar kannanir. Við djúpmælingar koma þær vart til greina. Hér verður að nota tvíþól aðferðir.

Rækstraumbaðferðir með Wenner aðferð hafa þegar komið að góðum notum við grunnar og staðbundnar jarðhitaathuganir. En Wenner fyrirkomulagið er óhentugt við djúpathuganir og kemur því vart til greina. Tvíþól-aðferðir verða að koma í hennar stað.

(4) Rækstraumsaðferðir

Gerum ráð fyrir hálfrúmi þar sem $k(z) = Az^n$. Ef straumur I er tengdur við þúkt Q á yfirborði verður pótentialjafnan fyrir spennu í þúkti P ,

$$\text{div}(k(z)\text{grad } V) = 0, \quad (1)$$

þar sem $V(P)$ er spennan. Lausn þessarar jögnu er mjö einföld,

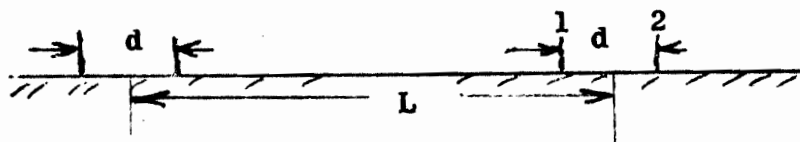
$$V(P) = I/2\sqrt[n]{AR^{n+1}}, \quad (2)$$

þar sem R er fjarlægðin PQ , eða m.ö.o.

$$V(P) = I/2\sqrt[k(R)]{R} \quad (3)$$

en hér er $k(R)$ eðlisleiðni á dýptinni $z = R$.

Ef notuð er tvíþóltilhögun eins og sýnt á eftirfarandi mynd,



verður spennunur á milli mælipóla

$$V_{12} = \frac{I}{2\sqrt[k(L)]{L}} \frac{d^2}{L^2}, \quad (4)$$

Þann hér er $f = (n+1)(n+2)$, þ.e. stubull, sem eingöngu er háður vexti $k(z)$. Gildi hans er væntanlega frá 3 til 6. Hins vegar er d^2/L^2 eingöngu háð legu mælipunkta.

Jafna (4) er mjög einföld meðferðar og gefur hugmynd um þann spennunum V_{12} , sem gera má ráð fyrir við þær aðstæður, sem reiknað er með. Við hverja könnun er L breytistærð, og þar sem gert er ráð fyrir að ná vel niður á 2 km dýpt verða mælingar að geta farið fram með L frá 5 km til 10 km. Að öðrum kosti verður dýptargreining léleg. Áætluð nú að samkvæmt $k(z) = Az^n$ sé $k(10\text{km}) = 0,25 \text{ mho/m}$ og $f = 6$ verður samkvæmt (4) og $L = 10 \text{ km}$ spennunurinn $V_{12} = 10^{-6} I$ Volt. Þar sem vart er hentugt að gera ráð fyrir meiri straumi en 10 amp verður $V_{12} = 10^{-5}$ Volt. Með $L = 5 \text{ km}$ verður $V_{12} = \text{h.u.b. } 10^{-4}$ Volt. Þar sem þetta er heildarspennunur verða tækin að geta greint vel 1/100 af þessum stærðum, þ.e. 10^{-7} Volt. Í raun og veru er æskilegt, að þau geti greint 10^{-8} Volt, en slíkt mun ver gerlegt tæknilega séð.

Eftir því sem undirritaður fær séð er nákvæmni þeirra tækja, sem Geoscience Inc. og Heinrichs Geoexploration bjóða ekki fullnægjandi ~~XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX~~. Hins vegar ræður DECO Electronics í Boulder, Colorado, yfir nægilega nákvæmun áhöldum.

En vandinn við viðnámsmælingar af þessu tagi áiggur í raun og veru ekki í spennumælingunni. Truflanir af völdum jarðstrauma eru ölli meiri vandamál. Orsakir þessara strauma eru tímabreytingar segulsviðsins og efnaskipti í jörðu. Vegna legu landsins í norðurljósbeltinu eru jarðstraumar af völdum breytinga segulsviðsins mjög magnadir á Íslandi. Einföld áætlun sýnir

að gera megj að jafnaði ráð fyrir truflunarveifum ~~XXIX~~ frá 1 til 10 mV/km með tíðni 0,01 til 1 ríð. Þessi jarðspenna er 10 til 1.000 sinnum stærri en umrædd mælistenna, og þá ber að hafa í huga, að hér hefur verið reiknað með $I = 10$ amp stjæmi, en ~~XXIX~~ víða er erfitt að tengja slíkan straum við jörðu, og þarf talsverðar aðgerir.

Þessi niðurstaða sýnir, að viðnámsmælingar af því tagi, sem hér hefur verið rætt um, eru hvergi auðveldar, og einkum erfitt að ná æskilegri dýptarverkan. Að vísu eru möguleikar að auka hlutfallið d/L, en ekki er það æskilegt. Segja má, að hætt sé við því, að mælistærðin drukni í truflunum, og getur þurft meiri háttar aðferðir til þess að greina hana. Þetta er aftur kostnaðarmál.

Að vísu skal tekið fram, að umræddar truflanir eru breytilegar í tíma, en undirritaður er í vafa um að nægilega truflanalítil tímabil séu fyrir hendi á Íslandi nema þá helzt við lágmark sölbletta. Slíkt tímabil var 1965-66 en er nú liðið hjá. Verður því að hafa þennan vanda fyllilega í huga.

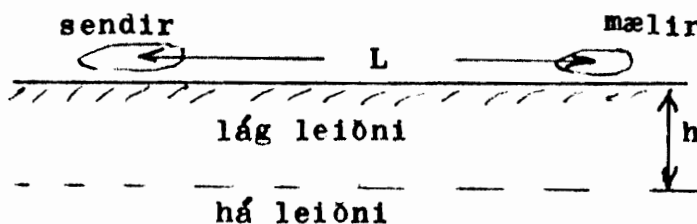
Í bili virðist því rétt að fara varlega, og leggja ekki að óreyndu stórfé til tækja af þessu tagi. En gagnsemi þeirra skal ekki útilokað, og kemur því helzt til greina að fá að láni hentug tæki, og ákveða ekki kaup fyrr en endanlega hefur verið gengið úr skugga um möguleika á þessu sviði.

(5) Riðstraumsaðferðir

Þessar aðferðir eru aðeins afbrigði rakstraumsaðfera, en hafa þann kost, að notkun riðstraums auðveldar útilokun truflana af völdum rakstraumsjarðstrauma. Önnur vandamál eru þau sömu.

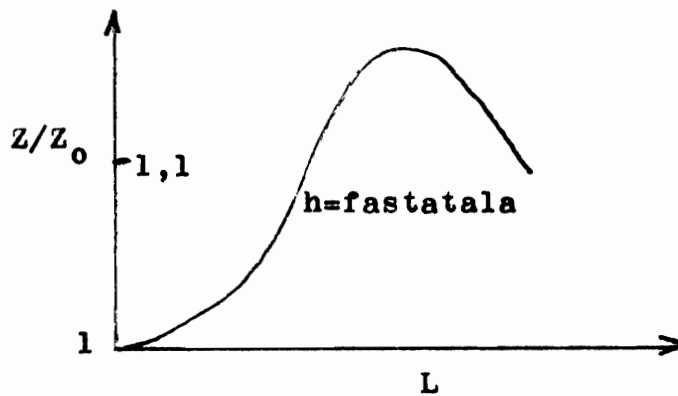
(6) Riðsviðsaðferðir með gerfisviði

Þmsir möguleikar eru fyrir hendi til notkunar riðsviðsaðferða. Einna helst kæmi þó til greina að bota tvo straumhringi, sem lagðir eru á yfirborði jarðar. Annar er sendir, en hinn mælir.



Sendirinn er rekinn með riðstraumi eða straumhöggi, og segulsvið í fjarlægð L er mælt með mælihringnum. Breytt er um L og mælingarnar framkvæmdar á líkan hátt og framangreindar tvíþólaaðferðir.

Til glöggvunar á aðstæðum má nota einfalt líkan, þ.e. gera ráð fyrir tveim jarðlögum. Efra lagið hafi þykkt h og tiltölulega lága leiðni, en neðra lagið hafi mikla þykkt og háa leiðni. Við þessar aðstæður gefa mælingar með breytilegu L eftirfarandi mynd, en þar er Z_0 gagnkvæmur impedans hringanna einna, en Z gagnkvæmur impedans þeirra á yfirborði jarðar.



Tíðni verður að velja svo, að skinnþýpt í efra lagi sé talsvert stærri en h . Þetta atriði takmarkar tíðnina upp á við. Ef reiknað er með eðlisleibni $0,01 \text{ mho/m}$ í efra lagi 1 km ~~XXXXXX~~ og þykkt þess/kemur fram, að tíðni má ekki vera hærri en 10 rið , og hentugra að nota talsvert lægra gildi.

Nánari athugun, sem ekki skal rakin hér sýnir að við þær aðstæður, að efra lagið sé 1 km þykkt hafi $k = 0,01 \text{ mho/m}$ en neðra lagið $k = 0,1 \text{ mho/m}$, mun hentugt að nota tíðni eitt rið. Hlutfallið Z/Z_0 er þá hæst við $L = 4 \text{ km}$, og mælingar þyrftu að ná til $L = 5 \text{ km a.m.k.}$ En í þeirri fjarlægð er mælisviðið mjög lítið. Gerum ráð fyrir, að sendirinn sé $500 \times 500 \text{ m}^2$ og notað sé $I = 10 \text{ amp}$ straumur í sendi verður segulsviðið í 5 km fjarlægð aðeins um 2×10^{-3} gamma.

Þar sem segulsviðsbreytingar á Íslandi hafa veif frá 1 til 10 gamma er augljóst, að truflunarvandamálið er hér jafnerfitt og með rakstraumsaðferðum. Einnig ber að hafa í huga, að þessi aðferð er tæknilega séð ekki hentug.

~~XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX~~

(7) Riðsviðsaðferðir með tímabreytingum jarðsviðsins

Framangreindar hugleiðingar bera með sér, að truflanir af völdum jarðsviðsins eru helztu örbugleikar við framkvæmd þeirra rakstraums- og riðsviðsaðferða, sem dregið hefur verið á. En þessu má snúa á annan veg, þ.e. hafa beint gagn af jarðsviðinu. Þetta svið veldur straumum í jörðu, einkum á stöðum með hárrí leiðni, og með því að mæla segulsvið þessara strauma má í grófum dráttum kanna mörk stórra háleiðnisvæða. Þessar aðferðir virðast frekar hentugar við könnun háhitasvæða. Hér skal í stuttu máli greint frá einföldustu atriðum í sambandi við grundvöll slíka mælinga.

Hinar stytta jöfnur Maxwells eru á venjulegu táknmáli,

$$\begin{aligned} \text{curl } B &= \mu_0 I, & I &= A/m^2 \\ \text{curl } E &= -\dot{B}, & E &= V/m \quad (5) \\ \text{div } B &= 0, & I &= kE. \end{aligned}$$

~~$E = \dots$~~
 $k = mho/m$

Reiknað er með því, að ~~KXX~~ eðlisleiðnin k sé breytileg, en $\mu = \mu_0$ allstáðar.

Auvelt er að losna við allar sviðsstærðir nema B og fæst þá,

$$\text{curl} \left(\frac{1}{k} \text{curl } B \right) = -\mu_0 \dot{B}, \quad (6)$$

og má segja, að þetta sé sú jafna, sem leggja beri til grundvallar þeim athugunum, sem hér um ræðir. Segulsviðið B er hin melda stærð, en k er hin óþekkta stærð. Segja má, að (6) sé afleiðu-
jafna fyrir k . Ef hægt væri að mæla $\overset{B}{k}$ allstáðar væri auðvelt að reikna k á grundvelli (6).

En raunverulega er ekki hægt að mæla B nema við eða fyrir ofan yfirborð. Gögn um B eru því ófullkomin, og almennt er því ekki hægt að finna einhlíta lausm á (6) fyrir k. Þetta er alþekkt vandamál við svo að segja alltaf jarðeðlisfræðilegar athuganir.

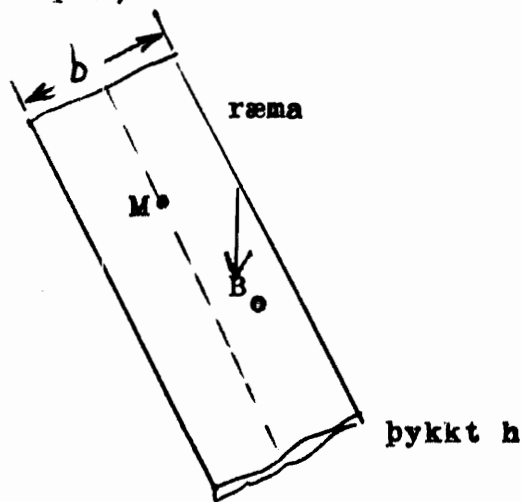
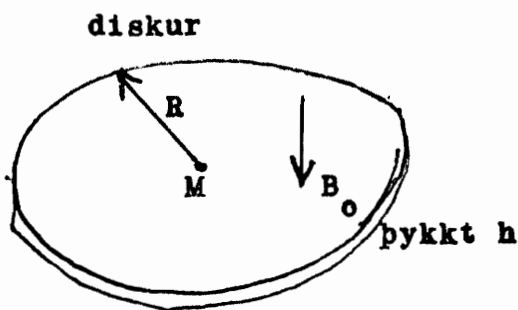
En á stórum háhitasvæðum virðist mega gera tvær nálganir, sem auðveldi mjög meðferð jöfnu (6). Eins og þegar hefur verið tekið fram er flatarmál þessara svæða yfirleitt mjög stórt, eða tugir ferkílómetrar. Eðlisleiðnin er væntanlega hæst í efstu 2 til 3 km, og getur verið 0,1 til 1,0 mho/m. Líklegt er, að leiðnin lækki fyrir neðan þessa dýpt sökum minnkandi vatnsmagns í bergi. Því er hugsanlegt, að svæðin komi fram sem tiltölulega þunnar plötur. Ein megintíðni jarðsviðstruflananna er 0,04 rið, og ef eðlisleiðni er áætluð 0,2 mho/m kemur fram, að skinndýpt er um 6 km, þ.e. talsvert meiri en áætluð þykkt plötunnar.

Ef reikna má með plötum af þessu tagi, og að segulsviðið sé sem næst lóðrétt, má gera tvær nálganir, þ.e. (1) segulsvið jarðstraumanna ~~XXX~~ í plötunni er sem næst lóðrétt, og þar sem hið lóðrétt segulsvið tekur ekki stökk við yfirborð hennar hefur það nokkrn veginn sama styrkleika rétt fyrir ofan plötuna eins og inni í henni. Ennfremur (2), þar sem skinndýpt er talsvert meiri en þykkt má sleppa eigin sviði plötunnar í hægri hlið jöfnu (6).

Með þessum tveim nálgunum verður jafna (6) viðráðanleg og gefur a.m.k. fræðilega séð, einhlíða lausn fyrir k. Að svo stöddu er erfitt að dæma um hagnýtt gildi hennar, en sem kunnugt er, eru fræðilegar niðurstöður oft tornýttar, og er það ekki síður í þessu tilfalli. Um þetta mætti rita allmikið, en hér skal ekki

Ástæða til slíks. Aðeins skal dregið á tvær mjög einfaldar niðurstöður, sem virðast hafa hagnýtt gildi.

Þau plötuform, sem mestu máli skipta, eru sívalur diskur og löng ræma,



Þykkt þeirra sé h , radíus disksins R og breidd ræmunnar b . Leiðni disksins $k(r)$ sé háð fjarlægð frá miðdepli, og leiðni ræmunnar $k(x)$ sé háð fjarlægð frá miðlínu.

Gerum ráð fyrir, að þessar plötur liggi í eingerðuð utanaðkomandi lóðréttu sviði með veif B_0 og hringtíðni ω . Ef lóðrétt svið mælt við yfirborð hefur veif $B(r)$, má sýna fram á, að jafna (6) gefur eftirfarandi gildi á k , $\sigma = \frac{k}{h}$

Dimension á $k(r)$?

diskur

$$\sigma(r) = \frac{2}{i\omega\mu_0 r h B_0} \frac{dB}{dr}$$

ræma

$$k(x) = \frac{1}{i\omega\mu_0 x h B_0} \frac{dB}{dx} \quad (7)$$

Þessar jöfnur gefa einhlítar lausnir fyrir k . En vert er að benda á þá staðreynd að taka verður afleiðu B til þess að finna k . Hér kemur fram eitt helzta vandamál við allar jarðeðlisfræðilegar athugningar af þessu tagi, þ.e. finna verður afleiður mældra sviðsstarða. Nákvæmni slíkra afleiðumælinga er næsta lítil.

σ er ekki eðlisleiðni í mho/m heldur mho/m^2

$k = \text{mho/m} = \text{eðlisleiðni}$

? h

~~...~~

~~...~~

$I = kE$

Á sama grundvelli má auðveldlega finna sviðið B_m í miðdepli disksins M og á miðlínu ræunnar, en þar eru áhrif jarðstraumanna mest. Ef gert er ráð fyrir því, að k sé fastatala verður

$B(R) = 0$

$\Rightarrow B_m = -\frac{i\omega\mu_0 h \sigma B_0 R^2}{4}$ $S = -\frac{\pi i \mu_0 \nu C}{2}, \quad C = h \sigma R^2 = k R^2$	diskur $s = B_m / B_0 = \sqrt{i} \mu_0 \nu C / 2,$	ræma $s = B_m / B_0 = i \mu_0 \nu C,$	(8)
---	---	--	-----

en hér er s endurvarpsstuðull í punkti M , ν tíðni sviðsins og $C = h k$ fyrir diskinn en $C = b h k$ fyrir ræmuna. Stærðina C má nefna þverskurðarleiddi og er hún mæld í mhom.

Jöfnur (8) sýna, að B_m er 90° úr fasa við B_0 . Nú er meðaltíðni svokallaðra míkroþulsationa $\nu = 0,04$ l/sek, og ef gert er ráð fyrir $R = 5$ km, $b = 10$ km, $h = 2$ km og eðlisleiðninni $k = 0,2$ mho/m kemur fram, að $s = 0,16$ fyrir diskinn en $s = 0,2$ fyrir ræmuna. Þessir endurvarpsstuðlar gefa fasafrávik upp á 9° fyrir diskinn en 11° fyrir ræmuna. Þetta er mismunur fasa við miðpunkt, eða miðlínu, og fasa í nokkurri fjarlægð frá plötunum. Slíkt frávik má mæla, ef hægt er að mæla veif með 10^{-2} gamma nákvæmni og tíma með 0,1 sek nákvæmni.

Diskurinn, sem hér hefur verið rætt um gæti samþvarað Hengilssvæðinu, en flatarmál þess er 50 til 100 km². Svo virðist sem mælingar af þessu tagi séu framkvæmanlegar, og standa því vonir til þess að greina megi stór háhitasvæði með þessum aðferðum. Vandamál er, að mælistærðin er lítil og hér þarf allnákvæm mælitæki. En nú má fá tæki, sem geta mælt betur en 0,01 gamma.

Framangreindar tölur eru miðaðar við $v = 0,04$ l/sek sem er megintíðni míkropúlsationa af svokallaðri Pc 3 gerð, en þær eru einna tíðastar allra púslationa, og því eðlilegt að byggja á þeim. En vegna þess, hve mælistærðin er lítil væri hentugra að nota öllu ~~XXXX~~ hærri tíðni. Slíkir möguleikar eru fyrir hendi því að segulsvið jarðar hefur mjög breytt tíðnirof. Talsvert er um sveiflur með tíðni 0,2 to 2 rib, þ.e. Pc 1 sveiflur. Þær eru ekki jafntíðar og Pc 3, en þó koma þær oft fram.

Ef hentugt væri mætti og fara enn hærra í tíðniþrepin og nota svokallað kc-band, sem er óreglulegar ~~XXXXXXXXXX~~ sveiflur er einkum koma fram í norðurljósabeltinu. Hér værbast því að miklir möguleikar til mælinga með hærri tíðni.

Þegar notuð er svo miklu hærri tíðni breytist reiknigrundvöllurinn nokkuð, en hér skal ekki á það dregið.

(8) Niðurstöður og tillögur

Undirritaður er þeirrar skoðunar, að framangreindar hugleiðingar gefi til kynna talsverð vandamál vegna truflana við framkvæmd rakstraums- og riðsviðsmælinga með gerfisviði við jarðhitakönnun á Íslandi. Að óreyndu virðist því rangt að leggja mikið fé til ~~XXXXXX~~ tækja til slíkra mælinga.

Riðsviðsaðferð með gerfisviði kemur vart til greina, a.m.k. ekki að svo stöddu. Hins vegar er hugsanlegt, að rakstraumsaðferðir með tvíþólttilhögun geti komið að nokrru gagni, og vill undirritaður gera það að tillögu sinni, að jarðhitadeildin fái slík tæki að láni, og prófi nytsemi þeirra. Slík tæki þyrftu að geta greint 10^{-8} Volt spennufall. Vitað er, að DECO Electronics í Boulder, Colorado, ræður yfir slíkum tækjum.

Riðsviðsaðferðir, sem byggja á notkun tímabreytinga jarðsviðsins virðsast gefa nokkra möguleika til grófrar könnunar hæðhitasvæða. Undirriatður er þeirrar skoðunar að leggja beri áherzlu á að ljúka smíðis þeirra tækja, sem nú er unnið að.

Síðan ber að taka til athugunar, hvort ekki væri rétt að gera sömu mælingar með hærri tíðni, en jarðsviðið hefur mjög breitt tíðnirof.

Cervallis í júní 1967

Gunnar Böðvarsson

JARÐHITAKÖNNUN MED RAFADFERÐUM Á ÍSLANDI

framhald greinargerðar frá júní 1967

Gunnar Böðvarsson

Corvallis í desember 1967

(1) Inngangur

Í júní 1967 gekk undirritaður frá greinargerð um notkun rafadferða við jarðhitaleit og jarðhitakönnun á Íslandi. Var þar rætt um rak- og riðstraumsadferðir, og drepib á nokkur vandamál, sem hafa verður í huga þegar gerðar eru áætlanir um slíkar athuganir.

Í grein (5) fyrri greinargerðar var með örfáum orðum drepib á leiðnimælingar með riðstraumi (lág tíðni), og bent á að þar mætti gera ráð fyrir líkum vandamálum og við notkun rakstraums. Var þá gert ráð fyrir því að notub væri svo lág tíðni, að sviðstruflanir (inductive effects) kæmu ekki fram. Á þessari málsmeðferð var sá galli að ekki var drepib á neinar áætlanir um hversu lág tíðnin þyrfti að vera. Undirritaður hefur athugað þetta betur, og kemur fram, að sviðstruflanir eru öllu meira vandamál en svo að afgreiða megi þær á þennan hátt. Hér skal um þetta rætt, og eftirfarandi mál er því næsta nauðsynleg viðbót við fyrri greinargerð.

Að miklu leyti sem undirrituðum er kunnugt sneiða rit um leiðnimælingar yfirleitt hjá A.C. eða "inductive effects" sem hér skal nefnt sviðstenging. Allar venjulegar formúlur eru byggðar á rakstraumsgrundvelli. Segja má, að þetta sé leyfilegt

við venjulegar aðstæður, ef notuð er tíðni um eða fyrir neðan eitt rið/sek. Leiðni í venjulegu bergi yfarleitt frá 10^{-5} til 10^{-2} mho/m, og sviðstenging kemur þá lítt að sök.

En á jarðhitasvæðum er leiðni verulega hærri, eða frá 10^{-1} til 1 mho/m, og jafnvel hærri. Þetta gerbreytir aðstæðum, þar sem skinndýpt er tiltölulega lítil við svo háa leiðni. Sviðstenging er því vandamál, sem sérstaklega varðar jarðhita-könnun með riðstraumsaðferðum.

(2) Fræðilegur grundvöllur

Eins og þegar drepib á er raunverulega ekkert um þessi mál að finna í ritum um jarðeðlisfræðilegar leiðnimælingar. Þenn hafa ekki gefið þessu gaum.

En þeir, sem fengizt hafa við rannsókn á útvarpsöldum við yfirborð jarðar hafa unnið mikið starf við könnun á þeim áhrifum, sem leiðni jarðar hefur á ölduútbreiðslu. Fyrstu, og að sumu leyti merkustu athuganir á þessu sviði voru gerðar af Sommerfeld þegar á fyrsta tug þessarar aldar. Þær aðferðir, sem hann tók til notkunar eru enn meginundirstaða allra rannsókna á þessu sviði. Hann reiknaði öldugang frá tvískautum við og fyrir ofan jörðu. Af eðlilegum ástæðum var megináhugamál hans, og einnig þeirra, sem síðar hafa stundað þetta, að kannafjar sviðin við tiltölulega há tíðni, þ.e. í fjarlægð, sem nærur mörgum öldulengdum.

En við riðstraumskönnun á jarðhitasvæðum skiptir fjar sviðin engu máli. Allar athuganir eru byggðar á mælingum í næsta nágrenni skautanna. Niðurstöður útvarpsmanna eru því

ekki beint nothæfar, og þyrfti að endurreikna sumar af útkomum þeirra. Auk þess vill svo einkennilega til að talsvert hefur verið um skekkjur í þessum athugun. Í fyrstu athugunum Sommerfelds frá 1909 var forteiknskekkja, og fundu menn hana ekki fyrr en 1935. Og undirritaður fær ekki annað séð, en að ýmsar aðrar ~~MAXWELLS~~ skekkjur hafi slæðzt inn í niðurstöður annarra höfundar Virðist því ekki álitlegt að nota þessar bókmenntir.

Eftir nokkra athugun ákvað undirritaður því að fara lítið eitt aðrar leiðir, sem betur virðast henta í því skyni, sem hér um ræðir. Niðurstöður fara hér á eftir, og er þar aðeins dregið á meginatriði. Ekki var talin ástæða til þess að rita niður millireikninga.

Þar sem tíðni er mjög lág verður byggt á hinum stytta jöfnum Maxwells, en þar eru á venjulegu tákamáli,

$$\begin{aligned}\text{curl } B &= \mu_0 I, \\ \text{curl } E &= -\dot{B}, \\ \text{div } B &= 0, \quad I = kE,\end{aligned}\tag{1}$$

en hér er gengið út frá því, að $\mu = \mu_0$ allstaðar. Af fyrstu jöfnu leiðir sem kunnugt er

$$\text{div } I = 0,\tag{2}$$

en þetta er einkenni hinna stytta jafna, þ.e. allar straumrásir eru lokaðar. Stærðin k er leiðni efnisins, og getur hún verið breytileg.

Þessum jöfnum má nú hagraða, og losna við E og I , og kemur þá ein vektor-jafna fyrir B ,

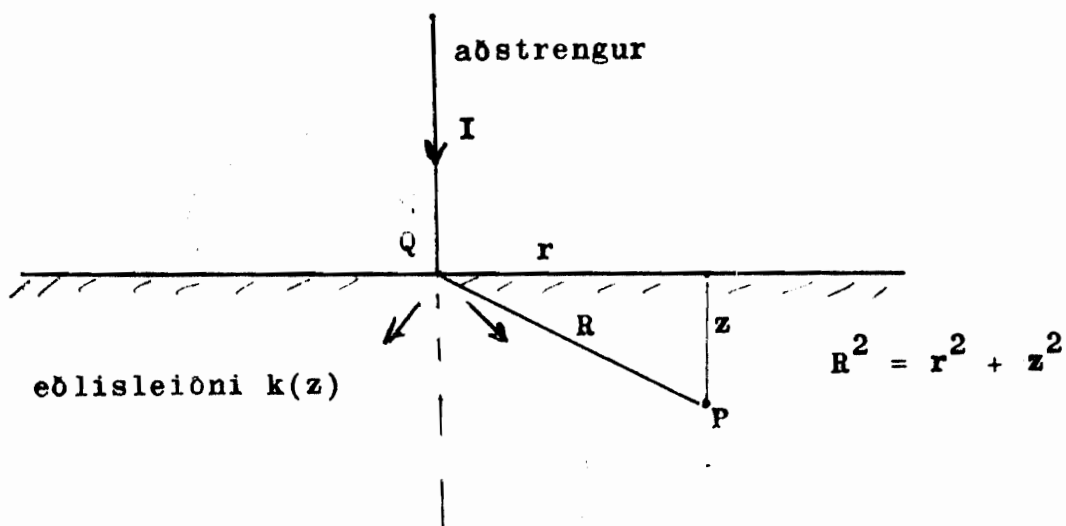
$$\text{curl}\left(\frac{1}{k}\text{curl } B\right) = -\mu_0 \mathring{B}, \quad (3)$$

og er hún grundvallarjafna þeirra athugana, sem hér fara á eftir.

(3) Grundvallarlíkan

Við djúpathuganir er yfárleitt hentugt að nota tvískautstengingar eins og sýnt er á mynd á bls. 4 í fyrri greinargerð. Rafsvið umhverfis slík margskaut má auðveldlega reikna ef einskautssvið er þekkt. Þetta gildir jafnt um raksem ríostnaum. Hér skiptir því máli að reikna svið einskauts.

Þar sem hér er aðeins leitast við að áætla sviðstengingu er óþarfi að gera mjög nákvæma útreikninga. Því ber að leita að hentugu líkani, sem uppfyllir næg skilyrði, og hefur mestu "symmetríu" til þess að gera reikninga einfalda. Kemur fram, að einfaldast líkan er sem hér fer á eftir, og er sýnt á eftirfarandi mynd,



Gert er ráð fyrir hálfrúmi, sem hefur eðlisleiðni k , og er hún fastatala. Aðstrengur kemur lóðrétt úr mikilli hæð, en hann flytur straum I , og er tengdur jörðu í punkti Q . Notaðir eru pólkóördinatar (r, φ, z) , en vegna sýmmetríu eru allar stærðir óháðar hringhorninu.

Þetta líkan er frábrugðið raunverulegum aðstæðum að því leyti, að aðstrengurinn er lóðréttur, en ekki láréttur eins og venjulega. Sýnamá fram á það, að þetta skiptir ekki verulegu máli við þær aðstæður, sem hér um ræðir. Framangreint líkan sýnir meginatriði.

Vegna sýmmetríu hefur B -sviðið aðeins einn hluta, þ.e. hringhlutann B_φ og skal hann einfaldlega nefndur B . Þá skal reiknað með harmónískum sveiflum með hringtíðni w , en $\exp(iwt)$ sleppt úr jöfnum eins og venjulega. Með þessu verður jafna (3)

$$\frac{\partial^2 B}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial B}{\partial r} + \frac{\partial^2 B}{\partial z^2} - \frac{1}{r^2} B - a^2 B = 0, \quad (4)$$

$a^2 = i\omega \mu_0 k$

og ber að leysa hana með randskilyrðinu

$$z = 0, \quad B = \mu_0 I / 2\pi r.$$

Lausnina má finna með venjulegum aðferðum og er hún

Kæri Guðmundur,

Ég þakka þér bréf þitt frá 23.2. s.l. Mér þykir vænt um að fréttu, að greinargerðin hefur komið að haldi. Ég var einmitt að taka saman bréf til þín út af greinargerðinni vegna leiðréttingar, sem ég þarf að koma við.

Þannig er, að ég kom auga á, að nálgunin í jöfnu (7) er ekki alveg eins og hún á að vera. Þar sem hér ~~MX~~ er um að ræða komplexar stærðir má ekki sleppa næsta lið. Sá liður hefur "realen" part, sem ekki má falla niður. Þetta er atriði, sem stundum fer fram hjá mönnum, og ég gleymdi þessu nú. Jafna (7) á að vera

$$E_r = \frac{I}{2\sqrt{kr^2}} \left(1 + i \frac{r^2}{d^2} + \frac{r^3}{3d^3} \right)$$

en þar er "imaginera" partinum af síðasta liðnum sleppt. Þetta hefur þau áhrif, að í fyrstu nálgun eykur sviðtengingin veifina um faktorinn

$$1 + r^3/3d^3$$

og þessi stærð á því að koma í stað kvaðratrótartarinnar í jöfnu (8) nebst á bls. 6. Viltu vera svo vænn að leiðrétta þetta.

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \left(\exp(-az) - \frac{z}{R} \exp(-aR) \right), \quad (5)$$

sem gildir fyrir $z \geq 0$.

Með fyrstu jöfnu í (1) má síðan finna rafsviðið E .
Hér skiptir einkum máli E_r við yfirborð, þ.e. E_r fyrir $z = 0$,
og er útkoman þar

$$z=0, \quad E_r = \frac{I}{2\pi kr} \left(a + \frac{1}{r} \exp(-ar) \right), \quad (6)$$

Finna má góða nálgun fyrir sviðið nálægt ~~XXXXXXXXXXXX~~
 Q , þ.e. fyrir nærsviðið, sem hér skiptir mestu máli, með því
að gera ráð fyrir því, að $ar < 1$, og rekja $\exp(\)$ í röð með
aðeins þrem liðum. Kemur þá út nálgun fyrir E_r ,

$$E_r = \frac{I}{2\pi kr^2} \left(1 + 1 \frac{r^2}{d^2} \right), \quad (7)$$

en hér er d skinndýptin, þ.e.

$$d^2 = 2/\mu_0 k$$

Jafna (7) er meginniðurstaðan. Fyrsti liðurinn er hreinlega
 E_r -svið við rakstraum, og seinni liðurinn er því sá hluti E_r -
sviðsins, sem kemur fram vegna sviðtengingar, þ.e. vegna
"induction effects". Eins og búast mátti við er það hlutfallið
 r/d , sem ræður.

Sviðtengingin eykur veif E_r -sviðsins um faktorinn

$$\sqrt{1 + \frac{r^2}{d^2}}$$

og veldur fasamun, sem er

$$\arctg (r^2/d^2),$$

Þar sem rafsvið við margskautatilhugun er einföld summa einskautasviða gilda þessar niðurstöður* almennt um margskautasvið, og þá sérstaklega fyrir þá tilhögun, rætt var um í fyrri greinargerð.

Til þess að fá hugmynd um sviðið þegar d er stærra en einn má rita jöfnu (6)

$$E_r = \frac{I}{2\pi kr^2} (ar + \exp(-ar)), \quad (9)$$

og þegar tekið er tillit til þess, að ~~XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX~~ $a = (1+i)/d$ verður augljóst, að áhrif seinni liðsins í (9) verða hverfandi þegar ar er verulega stærra en einn. Turflunarfaktorinn er þá ~~XXXX~~ $r\sqrt{2}/d$, þ.e. hið melda svið er margfeldi af rakstraumssviði, og þá algerlega rangt að vinna úr mældum gögnum með formúlum, sem byggðar eru á rakstraumstilhögun.

Ef f er tíðni sviðsins er hentugt að rita skinndýptina þannig

$$d = \frac{1}{2\sqrt{fk}} \quad \text{km}$$

og til sýnis má færa fram eftirfarandi gildi

$f =$	0,1	0,02	1/sek
$k = 0,1$ mho/m	$d = 5$ km	11 km	
1,0 "	1,6	3,5	

Þetta eru þær aðstæður, sem til athugunar koma á háhitasvæðum. Til þess að ná rakstraumaðstæðum niður á 2 til 3 km verður að hafa tíðni, sem er aðeins 0,02 1/sek. Þetta er að sjálfsögðu tæknilega framkvæmanlegt, en hér verður að hafa í huga, að truflanir af völdum jarðstrauma geta valdið vanda eins og þegar hefur verið tekið fram.

* hér er átt við fyrstu nálgun sviðtengingar

(4) Leiðni breytileg með dýpt

Hér hefur aðeins verið rætt um þær aðstæður, sem fram koma er leiðni er óháð dýpt í jörðu. Þegar leiðni er breytileg verða allar jöfnur mun flóknari og erfiðari viðfangs. Hentugt virðist að kanna aðstæður þegar $k(z) = Az^n$ þar sem A og n eru fastatölur. Undirritaður hefur gert nokkrar athuganir á þessu sviði, en að svo stöddu verður að segja að ekki hafi tekizt að leysa verkefnið á viðunandi hátt, enda er það allmikið verk. Þetta skal því ekki rætt frekar.

Hins vegar skal tekið fram að beita má öðrum nálgunum en hér hefur verið rætt um. Nota má integralform Maxwell-jafna til þess að gera grófar áætlanir. Á þennan hátt má færa rök fyrir því, að þegar $n = 1$, þ.e. $k(z) = Az$, muni jafna (7) nokkurn veginn halda gildi sínu, ef r/d er minna en einn, ^{en leiðnin k og} ~~og~~ _z skinndýptin d miðað við leiðni á dýpt $z = r$. Með þessu er átt við það, að truflunarliðurinn í (7) haldi gildi sínu fyrir tilfellið $n = 1$, ef d er túlkað á réttan hátt. Og ekki er grunlaust um, að þessi regla sé einnig nothæf fyrir önnur gildi á n, ef n er pósítíf stærð. Gróflega séð virðist jafna (7) því gilda við nokkuð almennar aðstæður ef k og d eru túlkuð á réttan hátt.

(5) Meginniðurstöður

Framangreinaðr hugleiðingar bera með sér að sviðtenging muni ekki valda verulegum truflunum, ef öllum skautfjarlægðum er haldið innan við skinndýpt, og við tvískautatilhögun ber þá, til þess að forðast sviðstengingu, að hafa fjarlægð milli yztu skauta minni en skinndýpt á þeirri dýpt, sem er jöfn

fjarlægðinni.

Að sjálfsögðu er á þessari góðu reglu sá stórgalli, að hún er ekki nothæf nema menn hafi hugmynd um þá stærð, sem mæla skal, þ.e. leiðnin sé að nokkru leyti kunn.

En hér skal tekið fram, að sviðtengingu má greina með því að nota breytilega tíðni, eða taka upp mælingar á fasamun milli straum- og mælitvískauta. Þetta er ekki erfitt og gæti komið að mjög góðu haldi.

Corvallis í desember 1967

Gunnar Böðvarsson