

Viðnámsmælingar í jarðhitarannsóknum á Íslandi

Knútur Árnason, Orkustofnun

INNGANGUR

Rafleiðni vatnsmettaðs bergs er verulega háð hitasigi. Ef hitastig er lægra en 240°C fer eðlisviðnámið lækkandi með hækkandi hita. Þar sem eðlisviðnám jarðlaga má ákvarða á tiltölulega auðveldan hátt með mælingum á yfirborði hafa viðnámsmælingar reynst mjög notadrjúgar í jarðhitarannsóknum. Þess vegna hafa þær verið notaðar héraendis og erlendis um áratuga skeið í jarðhitarannsóknum. Með nútíma rafeinda- og tölvutækni hefur þeim fleygt fram og eru orðnar að öfluguri og ódýrri aðferð til að finna og kortleggja jarðhitakerfi.

Auk framfara í mælitækni og úrvinnslu mæligagna hefur skilningur á sambandi eðlisviðnáms jarðlaga og hita aukist verulega og oft má, að vissum skilyrðum uppfylltum, túlka eðlisviðnámsdreifingu jarðarinnar yfir í hitadreifingu. Orkugæfni jarðhitakerfa ræðst einkum af stærð (rúmmáli) þeirra, hita og lekt. Kostnaður við að kortleggja stærð og áætla líklegt hitaástand dæmigerðs háhitasvæðis með viðnámsmælingum er núorðið einungis um einn tíundi til einn áttundi hluti af kostnaði við borun einnar vinnsluholu, þannig að hagkvæmni viðnámsmælinga er mjög mikil. Staðfesting á áætluðu hitastigi út frá viðnámsmælingum og upplýsingar um lekt og vinnslueiginleika jarðhitavökvans fæst hins vegar einungis með borunum.

Hér á eftir verður gefið stutt yfirlit yfir viðnámsmælingar, notkun þeirra hér á landi og þá þróun og þær framfarir sem orðið hafa. Athyglinni verður einkum beint að notkun þeirra í rannsóknum á háhita.

HELSTU VIÐNÁMSMÆLIADFERÐIR

Allar viðnámsmælingar byggja á því að framkalla rafstraum í jörðinni og mæla merki frá straumdreifingunni. Þeim má skipta í tvo meginflokkka: Jafnstraumsaðferðir og rafsegulaðferðir.

Eins og nafnið bendir til byggjast jafnstraumsaðferðir á því að senda jafnstraum ofan í jörðina og mæla samsvarandi spennufall í yfirborði. Af tæknilegum ástæðum er ekki notaður raunverulegur

jafnstraumur heldur er straumstefnunni snúið við lotubundið. Til eru allmörg afbrigði af jafnstraumsælingum. Það algengasta er svokölluð Schlumbergeraðferð þar sem mældur er spennunur yfir stutta fjarlægð mitt á milli straumskautanna. Með því að auka fjarlægðina milli straumskautanna fást upplýsingar um viðnám á meira dýpi. Á árum áður var nokkuð algengt að nota svokallaða Wenner uppsetningu, þar sem straum- og spennuskaut eru á beinni línu, líkt og

í Schlumbergermælingum, en öll með jöfnu millibili. Eins og í Schlumbergermælingum má fá upplýsingar um viðnám sem fall af dýpi með því að auka bilið milli straumskautanna.

Bæði Schlumberger- og Wennermælingar má einnig nota til að kortleggja viðnám á föstu dýpi, með því að halda skautbilum föstum, en færa öll skautin til á yfirborði, oftast eftir beinni línu, og er þá talað um viðnámsniðsmælingar. Endurbætt útfærsla af slíkum mælingum, svokölluð hálf-Schlumberger viðnámsniðsaðferð hefur verið notuð allmikið héraendis. Enn eitt algengt afbrigði er svokölluð tvíþól aðferð. Þar eru skautin ekki

endilega á beinni línu, heldur eru straumskautin (senditvípóllinn) á föstum stað, og spennunumur í yfirborði mældur með spennumælitvípól í mismunandi fjarlægð frá senditvípólnum.

Rafsegulaðferðir skiptast í aðferðir með náttúrulega uppsprettu rafstraums og manngerða. Í fyrri flokknum er hin svokallaða MT-aðferð (þ.e. Magneto- Telluric) algengust. Hún byggir á því að sveiflur í styrk jarðsegulsviðsins spana rafstrauma í jörðinni og eru þá mældar samtímis segulsviðs- og rafspennusveiflur í yfirborði jarðar.

Í seinni flokknum er búið til tímaháð segulsvið með því að senda breytilegan rafstraum í jarðtengdum tvípól eða stórrí lykkju á yfirborði. Segulsviðið frá uppsprettunni spanar strauma í jörðinni og er segulsviðið og/eða rafsviðið frá spanstraumunum mælt í yfirborði. Til þessa flokks teljast CSMT-mælingar (þ.e. Controlled Source MT), þar sem mæld er svörun við lotubundnum straum í uppsprettunni og með mismunandi tíðni. Til þessa flokks teljast einnig hinar svonefndu TEM-mælingar (þ.e. Transient-Electro-Magnetic). Í því tilfalli er gert ráð fyrir að sendur sé jafnstraumur sem er rofinn skyndilega og mælt hvernig segulsviðið og/eða rafsviðið deyr út með tíma. Í raun er sendur lotubundinn jafnstraumur með langri lotu þar sem skipt er um straumstefnu. Í algengasta afbrigði TEM-mælinga og því sem mest hefur verið notað hér á landi er straumur sendur í ferningslaga lykkju sem yfirleitt er um 300 m á kant. Í miðju sendilykkjunnar er mælt hvernig segulsviðið deyr út í tíma með því að mæla spanspennu í móttökuspólu.

SÖGULEGT YFIRLIT

Viðnámsmælingar voru fyrst gerðar hér á landi snemma árs 1947. Mælt var á nokkrum stöðum í Reykjavík og nágrenni (Gunnar Böðvarsson, 1947) og var þá beitt jafnstraumsmælingum með Wenner uppsetningu. Gunnar Böðvarsson, þá nýorðinn yfirverkfræðingur jarðborana og gufurannsóknar hjá Rafmagnseftirliti ríkisins, hafði kynnst þessari aðferð hjá Jarðhitastofnun Bandaríkjanna 1946 og festi kaup á viðnámsmælitækjum af gerðinni Gish-Rooney. Viðnámsmælingarnar sönnuðu strax gildi sitt við að staðsetja uppstreymissvæði jarðhitavatns úr berggrunni undir setlögum, t.d. við Áshildarvatn í Skagafirði og hjá Laugadælum í Flóa (Gunnar Böðvarsson, 1950).

Viðnámsmælingar voru á næstu árum notaðar allvíða um land, einkum við rannsóknir á lághitu. Þær voru einnig notaðar til að kanna og kortleggja jarðlög vegna mannvirkjagerðar og grunnvatnsstöðu. Þegar listi yfir skýrslur Raforkumálaskrifstofunnar er skoðaður, virðist þó sem að á árunum upp úr 1950 hafi verið nokkur lægð í notkun viðnámsmælinga. Einhvern tímann á árunum 1955 til 1957 voru keypt og tekin í notkun ný tæki frá Texas Instruments (Freysteinn Sigurðsson, pers. uppl.) og þá virðist notkun viðnámsmælinga aftur taka kipp. Mælingarnar voru ýmist notaðar til að kanna viðnám sem fall af dýpi eða til að kortleggja viðnám á föstu dýpi.

Árið 1960 fór Guðmundur Pálmason, þá orðinn starfsmaður Raforkumálaskrifstofunnar, til skammrar dvalar við Amt fur Bodenforschung í Þýskalandi. Þar kynntist hann Schlumbergeraðferðinni, sem þá var komin í notkun þar í landi (Guðmundur Pálmason, pers. uppl.). Sú aðferð hefur ýmsa kosti fram yfir Wenner aðferðina sem notuð hafði verið. Eftir að Guðmundur kom aftur heim var Schlumbergeraðferðin tekin í notkun hérlandis og átti hún eftir að vera helsta viðnámsmæliaðferðin fram til 1989. Eftir að Guðmundur kom frá Þýskalandi voru einnig keypt ný mælitæki frá ABEM í Svíþjóð en þau notuðu riðstraum, eins og eldri tækin.

Fyrstu rúmlega 20 árin, sem viðnámsmælingar voru í notkun hér á landi, voru þær ekki notaðar við háhitarrannsóknir. Ástæðan var sú, að þótt aðferðirnar sem beitt var væru í

eðli sínu jafnstraumsaðferðir, var notaður riðstraumur til að losna við sjálfspennur í spennumælingunni.

Straumurinn var af það hárrí tíðni að rafseguláhrif urðu ráðandi við langt straumskautabil, einkum ef eðlisviðnámið var mjög lágt, eins og yfirleitt er á háhitasvæðum. Gunnar Böðvarson gerði sér augljóslega grein fyrir þessari takmörkun strax í upphafi (Gunnar Böðvarsson, 1950). Þetta kom ekki eins að sök á lághitasvæðunum því þar er eðlisviðnám jarðlaganna mun hærra.

Viðnámsmælingar voru fyrst notaðar með árangri í rannsóknum á háhita árið 1969 á háhitasvæðinu á Reykjanesi (Sveinbjörn Björnsson o.fl., 1971). Til þessa verks voru smíðuð sérstök "jafnstraumstæki", þar sem sendur var lotubundinn jafnstraumur sem skipti um straumstefnu, en með mun lægri tíðni (lengri lotu) en notuð var í eldri tækjum. Þessi tæki eru fyrstu viðnámsmælitækin sem smíðuð voru hér á landi, en það gerði Björn Kristinsson hjá fyrirtækinu Rafagnatækni (Sveinbjörn Björnsson, pers. uppl.). Með þessum tækjum var hægt að gera viðnámsmælingar við mun lægra viðnám og lengra straumskautabil en hægt var með eldri tækjum, án þess að rafseguláhrif yrðu til бага.

Viðnámsmælingarnar á Reykjanesi skiluðu góðum árangri og upp frá því voru Schlumbergermælingar með "jafnstraumssendum" mikið notaðar, bæði við lághita- og háhitarannsóknir, allt fram til 1989. Á árunum um og upp úr hinni svokölluðu olíukreppu á fyrrihluta áttunda áratugarins, var lögð mikil áhersla á að afla heits vatns til húshitunar um allt land og einnig var farið vinna að virkjun háhita. Umsvif í jarðhitarannsóknum margfölduðust á þessum árum og um nokkurra ára skeið voru þrjú mæliflokkar stöðugt að störfum á sumrin við Schlumbergermælingar. Á þessum árum voru smíðuð ný og endurbætt viðnámsmælitæki á Jarðhitadeild Orkustofnunar.

Með bættum tækjabúnaði var hægt að auka straumskautabilið og þar með dýptarskynjun Schlumbergermælinga nokkuð. Af ýmsum mælitæknilegum ástæðum, og til að halda umfangi vinnu og tækja innan viðráðanlegra marka, var mesta straumskautabil yfirleitt ekki meira en 3-3,5km, sem gefur dýptarskynjun niður á um 800 til 1000m dýpi. Á árunum 1972 og

1973 voru gerðar tilraunir með notkun tvípólmælinga til að kanna viðnám á meira dýpi og voru notuð tæki sem fengin voru að láni frá Brownháskóla í Bandaríkjunum (Axel Björnsson, 1967). Í framhaldinu voru smíðuð mælitæki til slíkra mælinga og tvípólmælingar notaðar samhliða Schlumbergermælingum í nokkur ár. Þær reyndust þó ekki sem skyldi því að í tvípólmælingum er spennumælingatvípóllinn færður frá senditvípólnum og staðbundnar viðnámsóreglur valda því oft mikilli óreglu í mæligildum og erfitt var að túlka mæliferlana.

Eftir því sem reynsla fékkst af Schlumbergermælingum í rannsóknum lághita varð ljóst að þær hentuðu ekki sérlega vel við aðstæður þar sem jarðhitinn er tengdur nærri lóðréttum sprungum eða göngum. Þörf væri á mæliaðferð sem væri næm á lóðrétta "lágviðnámsveggi" samfara uppstreymisrásunum. Árið 1980 rak á fjórur sérfræðinga Orkustofnunar grein þar sem lýst var afbrigði af hefðbundnum viðnámsniðsmælingum. Þar er líkt eftir straum-einpól, með því að nota, auk venjubundinna skauta, mjög fjarlægð straumskaut. Þessi aðferð mun upphaflega hafa verið þróuð í Sovétríkjunum, en barst hingað til lands í grein eftir kínverskan jarðeðlisfræðing (Cheng, 1980) og voru slíkar mælingar í daglegu tali kallaðar "Kínámælingar".

Aðferðin var fyrst reynd í Glerárdal við Akureyri sumarið 1981 með góðum árangri (Ólafur G. Flóvenz, 1984). Fljótt kom í ljós að hér var um öfluga aðferð að ræða og á næstu árum var henni beitt víða í jarðhitarannsóknum og oft með mjög góðum árangri, þar

sem aðrar jarðeðlisfræðilegar aðferðir brugðust. Kínámælingar voru einnig notaðar lítillega við rannsóknir á háhitasvæðum, einkum til að kanna finni drætti og skarpar viðnámsbreytingar í láréttar stefnur. Meginfalli þessara mælinga er að þær eru tíma- og mannfrekur og þar með nokkuð dýrar. Með lækkingi verði á grönnum og grunnnum borholum hafa viðnámsniðmælingarnar að mestu vikið fyrir hitastigulsmælingum, sem í mörgum tilvikum gefa beinni og áreiðanlegri upplýsingar.

Árið 1986 var fyrst gerð tilraun hér á landi með TEM-mælingar þar sem notuð er sendilykkja og mældur er lóðréttur þáttur segulsviðsins í miðju lykkjunnar. Tilraunin var gerð á háhitasvæðinu við Nesjavelli, í samvinnu við Jarðfræðastofnun Bandaríkjanna í Denver (KnúturÁrnason o.fl., 1987). Áður höfðu verið gerðar þar ítarlegar Schlumberger- og viðnámsniðsmælingar þar sem beitt var tvívíðri túlkun á mæligögnin. Þar fékkst því samburður við bestu fánleg gögn frá jafnstraumsmælingum. TEM-mælingarnar reyndust fljótlegar og ódýrar í framkvæmd og túlkun þeirra með lagskiptum líkönum gaf í stórum dráttum sömu mynd og tvívíð túlkun jafnstraumsmælinganna, sem er mun umfangsmeiri.

Tveimur árum síðar tók Orkustofnun að sér að gera viðnámsmælingar á háhitasvæði í Djibouti í Austur Afríku. Aðstæður eru þar mjög erfiðar og nánast útilokað að nota jafnstraumsaferðir vegna þurrs og gróðulauss yfirborðs með ungum hraunum. Ákveðið var að nota TEM-mælingar og þar sem Orkustofnun átti, á þeim tíma, ekki tæki til slíkra mælinga, voru þau tekin á leigu. Mælingarnar gengu bæði hratt og vel og TEM-mælingarnar sönnuðu þar rækilega yfirburði sína yfir Schlumbergermælingar. Að fenginni þessari reynslu voru fest kaup á tækjum til TEM-mælinga og frá sumrinu 1989 hafa þær verið alsráðandi í viðnámsmælingum hér á landi.

Þær Schlumberger- og TEM-mælingar sem mest hafa verið notaðar hér á landi skyggjast einungis niður á um 800-1000 m dýpi. Við nýtingu háhita er einkum verið að vinna vökva á 1000-2000 m dýpi. Því hefur, í tímans rás, oft verið hugað að aðferðum sem séð geta niður á meira dýpi. Eins og áður er komið fram, voru tvíþólmælingar með jafnstraumsaðferð reyndar, en skiluðu ekki viðunandi árangri. Árið 1979 var, í samvinnu við Colorado School of Mines í Denver í Bandaríkjunum, gerð tilraun með TEM-mælingar með jarðtengdan tvíþól sem uppsprettu og mældur var lóðréttur þáttur segulsviðs (tvíþól-TEM-mælingar). Mælingarnar voru gerðar á Kröflusvæðinu (Helga Tulinius, 1980; Kaufman og Keller, 1983). Árið 1987 var aftur gerð tilraun með þessa aðferð á Nesjallasvæðinu, í samstarfi við sömu aðila. Hvorug tilraunin skilaði þeim árangri að talið væri fýsilegt að taka þessa aðferð í reglulega notkun að sinni. Hvort tveggja var að mælibúnaður var á þeim tíma nokkuð frumstæður og úrvinnslan erfið.

Lengi hefur verið vitað að MT-mælingar eru vel fallnar til að mæla viðnám djúpt í jörðu. Eftir því sem tíðni sveiflna í jarðsegulsviðinu er lægri ná spanstraumarnir niður á meira dýpi, en til að kanna viðnám nærri yfirborði þarf að mæla sveiflur með hárrí tíðni (1-1000 ríð). Styrkur í náttúrulegum sveiflum segulsviðsins hefur lágmark kringum eitt ríð, en vex bæði með hækkandi og lækkingi tíðni. Til viðbótar við minni styrk mælimerkisins gera mælingar, við háar tíðnir, mun meiri kröfur til mæli- og gagnasöfnunarbúnaðar, þar sem mæla þarf samtímis fjóra lárétta þætti rafsegulsviðsins. Af þessum sökum voru MT-mælingar, fram um 1980, einkum notaðar við lágar tíðnir til að kanna viðnám mjög djúpt í jörðu, frá nokkurra km og niður á nokkurra tuga km dýpi.

Fyrstu mælingar skyldar MT-mælingum voru gerðar hér á landi árið 1964, þegar bandarískir vísindamenn gerðu tilraunir með að bera saman sveiflur í jarðsegulsviði á Íslandi og Grænlandi (Garland og Ward, 1965). Eiginlegar MT-mælingar voru fyrst gerðar hér á landi árið 1967 af vísindamönnum við Brownháskóla í Bandaríkjunum (Hermance og

Garland, 1968a, 1968b) og var þeim rannsóknum haldið áfram til ársins 1973. Árið 1976 var tekin upp samvinna við Árórsaháskóla og upp úr því voru smíðuð á Orkustofnun tæki til lágtíðni MT-mælinga. Um það leyti hófst samstarf við háskólann í München og 1982 var aftur tekin upp samvinna við Brownháskóla, sem stóð fram til 1984.

Þó að MT-mælingum hafi verið beitt í nokkrum mæli hér á landi á árunum 1967 til 1984, var einungis um lágtíðnimælingar að ræða og gáfu þær einungis upplýsingar um viðnámsdreifingu djúpt í skorpunni. Þær sýndu að undir stórum hluta landsins er vel leiðandi lag á 10 til 30 km dýpi. Vegna innbyggðrar óvissu í lágtíðni MT-mælingum, sem stafar breytilegu viðnámi nærri yfirborði, er dýpi þessa lags hinsvegar mjög óviss. Með því að mæla við hærri tíðnir og tengja MT-mælingar við mælingar sem skoða grunnt (t.d. TEM-mælingar) má að miklu leyti eyða þessari óvissu. Árið 1986 var, í samvinnu við Uppsalaháskóla, gerð tilraun til að beita hátíðni MT-mælingum til að kanna viðnám á 1-5 km dýpi og einnig gerð tilraun með CSMT-aðferð. Vegna takmarkaðs mannafla og anna við "hefðbundnar" viðnámsmælingar var hins vegar ekki hægt að fylgja þeirri tilraun eftir sem skyldi.

Með tilkomu hefðbundinna TEM-mælinga og auknum skilningi á sambandi eðlisviðnáms og hitastigs í jarðhitakerfunum var komin ódýr og fljótleg aðferð til að rannsaka og kortleggja jarðhita, einkum háhita, og jókst mikilvægi og notkun viðnámsmælinga þar með verulega. TEM-mælingarnar sjá hins vegar að öllum jafnaði ekki nema niður á um 1 km dýpi og enn vantar skilvirkar og áreiðanlegar aðferðir til að kanna viðnám á meira dýpi. Með auknum rannsóknum og þekkingu á háhita og reynslu af nýtingu hans hefur sú hugmynd kviknað að ef til vill megi vinna háhitaorku mun víðar innan gosbeltanna, en talið hefur verið til þessa, en á meira dýpi. Slika möguleika á að vera hægt að kanna á tiltölulega ódýran hátt með viðnámsmælingum. Endanleg staðfesting fæst hins vegar ekki nema með djúpum borunum.

Árið 1999 var, að frumkvæði Orkustofnunar, hleypt af stokkunum fjölþjóðlegu samvinnuverkefni til að þróa og sannreyna heppilegar aðferðir til kanna viðnám á 1-5 km dýpi. Að verkefninu koma, auk Orkustofnunar, háskólarnir í Frankfurt og Köln í Þýskalandi, Uppsalaháskóli, Edinborgarháskóli og Alþjóðlega Jarðhitastofnunin í Pisa á Ítalíu. Verkefnið er ennfremur styrkt af Tæknisjóði Rannís, Hitaveitu Suðurnesja og Orkuveitu Reykjavíkur. Um er að ræða þriggja ára verkefni í þremur áföngum. Í fyrsta áfanga var beitt fræðilegum athugunum og líkanreikningum til að auka skilning á og kanna næmni mismunandi mæliaðferða. Í öðrum áfanga voru gerðar tilraunamælingar, þar sem beitt var samtímis mismunandi aðferðum á sama mælisvæði. Í lokaáfanganum verða niðurstöður hinna mismunandi aðferða túlkaðar og bornar saman þannig að meta megi hver, eða hvaða sambland aðferða, hentar best. Tilraunamælingarnar voru gerðar haustið 2000 á mælinu meðfram Þrengslaveginum og var beitt MT-mælingum, CSMT-mælinum og TEM-mælingum með tvíþóluþvipprettu (þau gögn má einnig túlka sem Jafnstraumstvíþólmæligögn). Mælisvæðið hafði áður verið kortlagt með hefðbundnum TEM-mælingum. Úrvinnsla gagnanna stendur nú yfir þannig að niðurstöður liggja ekki fyrir.

TÚLKUN VIÐNÁMSMÆLINGA

Niðurstöður viðnámsmælinga eru yfirleitt settar fram sem sýndarviðnám. Í MT- og CSMT-mælingum er sýndarviðnámið fall af tíðni og í TEM-mælingum er það fall af tíma eftir að straumurinn í uppsprettunni er rofinn. Þessar aðferðir kanna viðnám á mismunandi dýpi og kallast því dýptarmælingar. Í Schlumberger- og tvíþólmælingum, sem eru dýptarmælingar, fæst sýndarviðnám sem fall af skautabili en sem fall af staðsetningu á yfirborði í viðnáms-sniðsmælingum. Ef jörðin væri einsleit með sama eðlisviðnámi allstaðar, gæfi sýndarvið-

námið raunverulegt viðnám jarðarinnar. Við raunverulegar aðstæður gefur sýndarviðnámsferillinn hins vegar eins konar vegið meðaltal af viðnámi á mismunandi dýpi undir og í nágrenni mælistaðarins og hann þarf að túlka til fá upplýsingar um raunverulega viðnámsdreifingu.

Túlkun viðnámsmælinga má skipta í þrjá flokka, eftir nákvæmni og umfangi. Í *einviðri túlkun* er gert ráð fyrir því að viðnám breytist einungis með dýpi, en ekki í láréttar stefnur. Í einviðri túlkun er yfirleitt einnig gert ráð fyrir að jörðinni megi skipta upp í lárétt lög, sem hvert um sig hefur einsleitt og stefnusnautt eðlisviðnám og ákveðna þykkt. Fyrir hverja hinna mismunandi dýptarmæliaðferða svarar einn og aðeins einn sýndarviðnámsferill til hvers lagskipts líkans. Í einviðri túlkun er yfirleitt leitast við að finna það einfaldasta lagskipta líkan, sem gefur sýndarviðnámsferil sem fellur viðunandi að mældum ferli. Í seinni tíð er einnig farið að túlka TEM-mælingar með lagskiptum líkönum sem hafa mörg og tiltölulega þunn viðnámslög, þar sem leitast er eftir að viðnámsbreytingar séu sem minnstar milli laga. Í *tvívíðri túlkun* er gert ráð fyrir að eðlisviðnám geti breyst með dýpi og í eina lárétta stefnu, en að það breytist ekki í stefnu hornrétt á hana (strikstefnu). Fyrir tvívíð líkön er að sjálfsögðu ekki fyrir hendi einkvæm samasvörum milli líkans og sýndarviðnámsferils. Til að ákvarða tvívíða viðnámsdreifingu með nokkurri vissu þarf marga sýndarviðnámsferla á mælinínu í stefnu láréttra breytinga. Í *þrívíðri túlkun* er gert ráð fyrir að viðnám geti breyst með dýpi og í báðar lárétta stefnurnar. Til að beita þrívíðri túlkun þarf að hafa marga sýndarviðnámsferla fyrir mælingar dreifðar á yfirborði.

Einvið túlkun getur oft gefið góða nálgun á raunverulega viðnámsdreifingu, einkum grunnt í jörðu. Hver mæliferill er þá túlkaður með lagskiptu líkani og líkönum einstakra mælinga raðað saman í tvívítt eða þrívítt líkan. Oft eru mæliferlarnir þó þannig að þeir verða ekki nálgadir, svo viðunandi sé, með ferlum svarandi til lagskiptra líkana. Það liggur í eðli viðnámsmælinga að eftir því sem þær skynja dýpra, skynja þær einnig viðnámsbreytingar í meiri láréttar fjarlægðir. Jarðhitakerfi hafa takmarkaða lárétta útbreiðslu og hafa oft bratta jaðra með skörpum viðnámsbreytingum. Eftir því sem skyggst er dýpra fer endanleg stærð jarðhitakerfanna að hafa meiri áhrif og einvið túlkun verður því oft ófullnægjandi.

Í árdaga viðnámsmælinga voru sýndarviðnámsferlar túlkaðir með frumstæðri einviðri túlkun. Með mælitækjunum fylgdi safn sýndarviðnámsferla fyrir Wenner uppsetningu og einföld tveggja og þriggja laga lagskipt líkön. Mældir ferlar voru bornir saman við viðmiðunarferlana og viðnámsgildi og þykktir laga áætluð. Þegar Schlumbergermælingar voru teknar upp, upp úr 1960, voru fyrst notaðir þriggja laga viðmiðunarferlar sem útbúnir voru af Amt für Bodenforschung í Þýskalandi. Seinna komu til sögunnar endurbætt söfn þriggja laga viðmiðunarferla (Orellana og Mooney, 1966; van Dam og Meulenkamp, 1968).

Tölvuvæðing á túlkun viðnámsmælinga hófst um 1976, en þá eignaðist Orkustofnun borðtölvu og einfalt forrit sem reiknaði sýndarviðnámsferla Schlumbergermælinga fyrir gefin lagskipt líkön. Forritið var notað til að sannreyna handtúlkun mælinga með viðmiðunarferlum. Árið 1977 var fyrsta alvöru túlkunarforritið fyrir Schlumbergermælingar fengið frá Árósháskóla (H. K. Johansen, 1977). Forritið var svokallað einvítt "inversion"-forrit, þar sem gefinn er fjöldi laga í lárétt lagskiptu líkani og áætluð gildi fyrir viðnám og þykktir laganna. Forritið ítrekar síðan viðnámsgildi og þykktir að bestu gildum, þannig að reiknaður ferill falli sem best að þeim mælda. Með tilkomu þessa forrits fór túlkun Schlumbergermælinga að mestu fram með tölvum og varð um leið mun ítarlegri. Nokkur handavinna var þó við að búa mæliferlana til túlkunar. Árið 1983 þróðu Ragnar

Sigurðsson og Knútur Árnason nýtt einvítt túlkunarforrit þar sem túlkunaraðferðin var endurbætt og forvinna mæligagna var gerð sjálfvirk. Þetta forrit hefur síðan verið notað á Orkustofnun til einvíðrar túlkunar Schlumbergermælinga.

Fyrsta forritið sem reiknað gat mæliferla Schlumbergermælinga fyrir tvívíð líkön var sett upp árið 1980. Forritið var upphaflega skrifað af Dey og Morrison (1976) við háskólann í Berkeley í Bandaríkjunum og notaði aðferð endanlegra mismuna til að reikna rafspennu frá straumuppsprettu á yfirborði tvívíðs viðnámslíkans. Forritið var síðan endurbætt og þróað áfram af Halldóri Halldórssyni stærðfræðingi, þannig að einnig var hægt að reikna mæliferla fyrir viðnámsnniðsmælingar (Kínámælingar). Með tilkomu þessa hugbúnaðar var, auk einvíðrar túlkunar, einnig farið að beita tvívíðri túlkun sem var mikið framfaraspor, einkum við túlkun viðnámsnniðsmælinga. Hún var hins vegar ákafleg tímafrek og seinleg, því að bæði var, að tölvur voru á þeim tíma lengi að reikna svörum hvers líkans og líkaninu varð að breyta handvirk út frá sjónrænum samanburði mældra og reiknaðra ferla.

Árið 1986 skrifaði Ragnar Sigurðsson stærðfræðingur nýtt forrit til reikna svörum jafnstraumsmælinga fyrir tvívíð líkön. Forritið var mun hraðvirkara en eldra forrit og notaði auk þess aðferð endanlegra búta, sem bauð upp á mun meiri sveigjanleika í líkönum. Skömmu síðar, árið 1987, breytti Hjálmar Eysteinnsson forritinu í "inversion"-forrit sem gerði tvívíða túlkun mun fljótlegri og markvissari. Forrit Ragnars voru síðan mikið notuð allt til þess að TEM-mælingar leystu jafnstraumsmælingar að mestu af hólmi árið 1989. Þau eru reyndar enn notuð í þeim tilfellum þegar gripið er til jafnstraumsaðferða.

Niðurstöður fyrstu TEM-mælinga sem gerðar voru hér á landi árið 1986 voru túlkaðar með einvíðu forriti sem skrifað var við Jarðfræðastofnun Bandaríkjanna í Denver (Anderson, 1982). Það forrit var mjög hægvirkt og var einungis hægt að keyra á stórum tölvum. Útreikningur á svörum TEM-mælinga fyrir gefið líkan er reyndar mun umfangsmeiri en fyrir jafnstraumsaðferðir. Í tengslum við TEM-mælingaverkefni Orkustofnunar í Djibouti árið 1988, sem áður var nefnt, var lögð megináhersla á að hafa með í för túlkunarforrit fyrir mælingarnar, sem keyra mætti á PC tölvum, sem þá voru orðnar algengar. Því var skrifað frá grunni nýtt einvítt túlkunarforrit sem var mun einfaldara og hraðvirkara en bandaríska forritið (Knútur Árnason, 1989). Þetta forrit er, með minniháttar breytingum og endurbótum, enn í notkun.

Hefðbundnar TEM-mælingar með sendilykkju skyggnað í meira mæli beint niður frá mælistað en Schlumbergermælingar og verða því minna fyrir áhrifum viðnámsbreytinga í láréttar stefnur. Þrátt fyrir þetta fást nokkuð oft mæliferlar sem ekki er hægt að túlka á viðunandi hátt með einvíðum líkönum. Því kviknaði fljótlega áhugi á að komast yfir hugbúnað sem gæti reiknað svörum fyrir þrívíð líkön, en slíkir reikningar eru mjög flóknir og gera miklar kröfur til reikniafls. Um og upp úr 1990 fóru að koma fram, við erlenda háskóla, slík forrit, en þau voru til að byrja með frumstæð og lágu ekki á lausu.

Árið 1995 var, á Orkustofnun, ráðist í að skrifa forrit sem reiknað gæti svörum TEM-mælinga fyrir almenn þrívíð viðnámslíkön (Knútur Árnason, 1999). Forritið notar aðferð endanlegra mismuna til að leysa jöfnur Maxwells í leiðandi hálfrúmi. Forritið gerir miklar kröfur um reikniafl og hefur til þessa lítið verið notað við beina túlkun á mældum gögnum. Það hefur hins vegar verið notað til að kanna svörum mismunandi líkana til að læra að þekkja þrívíð áhrif í mæligögnum og hvernig þau geta leitt til villandi niðurstaðna í einvíðri túlkun (Knútur Árnason, 2001).

Með sífeldum framförum í tölvutækni hefur reikniafl aukist verulega á seinustu misserum og jafnframt lækkað í verði. Orkustofnun hefur nú aðgang að mjög öflugri margra örgjörva tölvu með margföld reikniafköst borið saman við eldri tölvur. Undanfarið

hefur verið unnið að því að byggja þrívítt "inversion"-forrit ofan á þrívíða forritið fyrir TEM-mælingar. Sú vinna er langt komin og gerð hefur verið þrívíð túlkun á reiknuðum gervigögnum, en enn er eftir nokkur vinna áður en hægt verður að beita slíkri túlkun á raunveruleg gögn. Hér um mjög umfangsmikla reiknivinnu að ræða og ennfremur þarf mikið af mæligögnum til að ákvarða þrívítt viðnámslíkan með einhverri vissu. Slík gögn eru til af nokkrum háhitasvæðum landsins og almenn þrívíð túlkun þeirra er rétt handan við hornið. Telja verður næsta víst að slík úrvinnsla muni gefa mun áreiðanlegri upplýsingar en eldri aðferðir. Þrívíð túlkun TEM-mælinga opnar einnig möguleika á að nota þær til að leita að vatnsleiðandi sprungum á lághitasvæðum, líkt og gert hefur verið með viðnámsssniðsmælingum. TEM-mælingarnar eru hins vegar mun fljótlegri og ódýrari í framkvæmd, en nákvæm túlkun á mæligögnum hefur til þessa verið flöskuháls.

SAMBAND EÐLISVIÐNÁMS JARÐLAGA OG JARÐHITAVIRKNI

Með aukinn notkun og reynslu af viðnámsmælingum hefur skilningur á sambandi eðlisviðnáms jarðlaga og jarðhita aukist verulega. Hér er oft um mjög flókið samband að ræða, sem ekki er að fullu skilið í smáatriðum og eru hugmyndir og þekking því í stöðugri þróun, eftir því sem ný gögn koma fram. Þeir þættir sem einkum hafa áhrif á eðlisviðnám vatnsmettaðs bergs eru þóruhluti bergsins, eðlisviðnám vatnsins, hiti og ummyndunarstig bergsins. Ofangreindir þættir spila oft saman á flókinn hátt og vantar allmikið á að það samspil sé skilið að fullu. Settar hafa verið fram reynslujöfnur sem lýsa áhrifum hinna einstöku þátta. Slíkar reynslujöfnur byggja yfirleitt á mælingum eðlisviðnáms mismunandi bergsýna við mismunandi aðstæður.

Ólafur Flóvenz o.fl. (1985) gerðu tilraun til að kanna samband ofantalinna frumþátta og eðlisviðnáms bergs í efsta kílómetra jarðskorpu Íslands utan gosbeltanna. Meginniðurstaðan var sú, að fyrir berg mettað vatni með litla seltu (eðlisviðnám við stofuhita hærra en u.þ.b. 1 Ohmm) er eðlisviðnám bergsins nánast óháð eðlisviðnámi vatnsins, en hins vegar háð þóruhluta og hitastigi. Rafleiðnin virtist tengd ummyndunarsteindum, en utan gosbeltanna eru leirsteindir og zeólítar ráðandi ummyndunarsteindir í efsta kílómetranum.

Skilningur á sambandi eðlisviðnáms og innri eðlisþátta háhitakerfa jókst verulega við umfangsmiklar rannsóknir sem gerðar voru á Nesjavallasvæði árin 1985 og 1986 (Knútur Árnason o.fl. 1986, 1987, 1987a). Þar voru gerðar umfangsmiklar viðnámsmælingar þar sem beitt var samtímis Schlumberger- og viðnámsssniðs- og tvíþólmælingum. Mæliniðurstöður voru túlkaðar sem eitt gagnasafn með tvívíðri túlkun. Með því fékkst allitarleg mynd af viðnámsskipan jarðhitakerfisins sem hægt var að bera saman við umfangsmikil gögn úr borholum. Sá samanburður leiddi í ljós góða fylgni milli hitastigs og ummyndunar annars vegar og eðlisviðnáms hins vegar.

Í jarðhitakerfinu á Nesjavöllum er víðast jafnvægi milli ummyndunar og hitastigs nema á vesturjaðri kerfisins þar sem kólnun hefur átt sér stað. Þar sem jafnvægi er milli ummyndunar og berghita kemur fram ákveðin beltaskipting í ríkjandi ummyndarsteindum (Hrefna Kristmannsdóttir 1979). Við hitastig frá 50-100 °C og upp að u.þ.b. 200 °C eru smektít og zeólítar ráðandi ummyndunarsteindir. Á bilinu 200 °C til 230 °C hverfa zeólítar að mestu og smektít þróast yfir í blandlagssteindir. Við 230 °C hafa blandlagssteindir þróast yfir í klórít um og ofanvið 250 °C verða klórít og epídót ráðandi ummyndunarsteindir. Samanburður á eðlisviðnámi við berghita og ummyndun í Nesjavallakerfinu sýndi að eðlisviðnámið er hátt í köldu og fersku bergi en lækkar mjög og er 1-5 Ohmm þegar kemur í smektít-zeólítabeltið við hitastig á bilinu 50 til 200 °C. Þegar kemur niður í klórít- og klórít-epídótbeltið og hitastig er komið yfir 230 °C hækkar viðnámið aftur og verður allt

að því stærðargráðu hærra en í smektít-zeólítabeltinu. Ekki sást afgerandi fylgni milli berggerðar (basalthrauna/móbergs) og eðlisviðnáms. Ekki verður þó af því dregin sú ályktun að viðnámið sé óháð poruhluta, heldur frekar hitt að áhrif ummyndunar yfirgnæfi áhrif poruhluta (í ummynduðu bergi er viðnám gjarnan lægra í móbergi en basalthraunum, en það er talið stafa af því að móberg ummyndast mun auðveldar en hraunlög). Reyndar er hugsanlegt að viðnámsþækkunin í klórítbeltinu sé að hluta til vegna minnkandi poruhluta.

Út frá mælingum á eðlisviðnámi jarðhitavatnsins í Nesjavallakerfinu og áætluðum poruhluta bergsins má, með reynslujöfnum um samband þessara þátta og eðlisviðnáms, meta hvert eðlisviðnám jarðlaga væri ef leiðni eftir poruvökva er ráðandi. Slíkir reikningar gefa mun hærra eðlisviðnám en mælist í smektít-zeólítabeltinu. Því er ljóst að rafleiðni í smektít-zeólítabeltinu er einkum af völdum ummyndunarsteinda en ekki vegna leiðni í poruvökva. Viðnámið í klórítbeltinu getur hins vegar svarað til þess að þar sé leiðni í poruvökva ráðandi. Þennan mismun í leiðni í ummyndunarbeltunum má skilja í ljósi mismunandi uppbyggingar smektít- og klórít steindanna. Smektít steindirnar hafa lausbundnar jónir og mikla jónaskiptaeiginleika en í klóríti eru þessar jónir fastbundnar í kristalgrind (Deer o.fl., 1962).

Viðnámsmælingar á öðrum háhitasvæðum hérlendis sýna að sú viðnámssskipan sem í ljós kom á Nesjavöllum virðist eiga almennt við um háhitakerfi með ósöltum jarðhitavökva í basalt slorpu. Neðan ferskra berglaga með háu viðnámi (hærra en 50 Ohm) er lágviðnámskápa með eðlisviðnám 1-10 Ohm sem endurspeglar smektít-zeólítabelti. Neðan hennar hækkar viðnám aftur þar sem klórítumyndun tekur við. Ef ummyndun er í jafnvægi við hitastig endurspeglar lágviðnámskápan hitastig á bilinu 50-200 °C en hækking viðnám þar fyrir neðan að hiti sé kominn um og yfir 230°C. Niðurstöður viðnámsmælinga á utanverðum Reykjanesskaga (Ragna Karlsdóttir, 1998) benda til þess að ummyndun sé einnig að verulegu leyti ráðandi um viðnámssskipan í sjávarmettuðum jarðhitakerfum, þó að fyrirfram hafi verið búist við að leiðni sjávarins væri yfirgnæfandi. Það samband sem hér er lýst á einkum við í basaltskorpu. Í súru bergi kemur fram svipað samband, en breyting á ummyndun frá leiðandi og yfir í einangrandi ummyndunarsteindir verður við nokkuð lægra hitastig.

Þessari túlkun á sambandi viðnáms og hitaástands háhitakerfa má þó ekki beita í blindni. Ekki er hægt að slá því föstu að ummyndun sé í jafnvægi við hitastig og úr því fæst ekki skorið svo óyggjandi sé nema með borunum. Ef jarðhitakerfið hefur t.d. kólnað nýlega er líklegt að gamla ummyndunin ráði mestu um eðlisviðnám bergsins því að það tekur nokkurn tíma að yfirprenta ummyndunina þannig að viðnámið fari að endurspeglar breytt hitaástand. Sömuleiðis má gera ráð fyrir því að það taki ummyndunarstig bergsins nokkurn tíma að bregðast við hækkingu hita. Hækking viðnám neðan lágviðnáms þarf ekki endilega að þýða að komið sé niður í klórítbelti. Hugsanlega er hitastig að lækka og ummyndun að minnka með dýpi t.d. ef um er að ræða lárétt rennsli í vel lekum jarðlögum grunnt í jörðu.

HEIMILDIR

Anderson, W.L., 1982: Nonlinear Least-Squares Inversion of Transient Soundings for a Central Induction Loop System (program NLSTCI). Open-File Report 82-1129, U.S. Geological Survey.

Axel Björnsson, 1967. Electrical Resistivity of Layer 3 in the Icelandic Crust. Vísindafélag Íslands, Greinar V, bls. 7-20.

Cheng, Y.M., 1980: Location of near surface faults in geothermal prospects by the "combined head-on profiling method". Ráðstefnurit frá "New Zealand geothermal workshop 1980", bls. 163-166.

Day, A. og F. Morrison, 1976: Resistivity Modelling for Arbitrary Shaped Two Dimensional Structures. Lawrence Berkeley Laboratory report, LBL-5223, UC-66a, TID-3500-R65.

Garland, G.D. og J Ward, 1965: Magnetic variation measurements in Iceland. Nature, 205, bls 269-270.

- Gunnar Böðvarsson, 1947. Jarðviðnámsmælingar. Mosfelladalur, Flugvöllurinn í Reykjavík, Korpúlfsstaðir, Blikastaðir og Laugarnar í Reykjavík. Skýrsla Raforkumálaskrifstofunnar, 7s.
- Gunnar Böðvarsson, 1950. Gefysiske metoder ved varmvandsprospektering i Island. Tímarit V.F.Í., 5. hefti, bls. 49-59.
- Helga Tulinius, 1980: TIME-DOMAIN ELECTROMAGNETIC SURVEY IN KRAFLA, ICELAND. Masters ritgerð við Colorado School of Mines, Colorado, Bandaríkjunum, 73 bls.
- Hermance, J.F. og G.D. Garland, 1968a: Deep electrical structure under Iceland. Journal of Geophys. Res., 73, bls 2397-3800.
- Hermance, J.F. og G.D. Garland, 1968b: Magnetotelluric deepsounding experiments in Iceland. Earth Planet Sci. Lett., 4, bls. 469-474.
- Hrefna Kristmannsdóttir, 1979: Alteration of basaltic rocks by hydrothermal activity at 100-300°C. International Clay conference 1978. Ritsstj. Mortland og Farmer. Elsevier Sci. Publ. Company, Amsterdam 1979, 277-288.
- Johansen H.K., 1977: A Man/Computer Interpretation System for Resistivity Soundings over a Horizontally Stratified Earth. Geophysical Prospecting 25, 667-691.
- Kaufman A. A. og G.V. Keller, 1983: FREQUENCY AND TRANSIENT SOUNDINGS. Elsevier Science Publications, ELSEVIER, 685 bls.
- Knútur Árnason, Guðmundur Ingi Haraldsson, Gunnar V. Johnsen, Gunnar Þorbergsson, Gylfi Páll Hersir, Kristján Sæmundsson, Lúðvík S. Georgsson og Snorri Páll Snorrason, 1986: NESJAVELLIR. Jarðfræði-og jarðeðlisfræðileg könnun 1985. Orkustofnun, OS-86017/JHD-02, 125 s.
- Knútur Árnason, Guðmundur Ingi Haraldsson, Gunnar V. Johnsen, Gunnar Þorbergsson, Gylfi Páll Hersir, Kristján Sæmundsson, Lúðvík S. Georgsson, Sigurður Th. Rögnvaldsson og Snorri Páll Snorrason, 1987: NESJAVELLIR - ÖLKELDUHÁLS. Yfirborðsrannsóknir 1986. Orkustofnun, OS-87018/JHD-02, 112 s.
- Knútur Árnason, Ólafur G. Flóvenz, Lúðvík S. Georgsson og Gylfi Páll Hersir, 1987a: Resistivity Structure of High-Temperature Geothermal Systems in Iceland. International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) XIX General Assembly, Vancouver, Kanada, 9.-22. ágúst. Abstracts V.2: 447.
- Knútur Árnason, 1989: CENTRAL LOOP TRANSIENT ELECTRO-MAGNETIC SOUNDINGS OVER A HORIZONTALLY LAYERED EARTH. Skýrsla Orkustofnunar, OS-89032/JHD-06, 128 bls.
- Knútur Árnason, 1999: Consistent Discretization of Electromagnetic Fields and Transient Modelling. Í ritinu: Three-dimensional Electromagnetics: Ritsstj. Michael Oristaglio og Brian Spies, Geophysical developments, Nr. 7, 103-118.
- Knútur Árnason, 2001: On Non-1D Effects in Central-loop TEM-Soundings. Skýrsla Orkustofnunar, í útgáfu.
- Orellana, E. og Mooney, W.W., 1966: Master tables and curves for vertical electrical sounding over layered structures. Interciencia, Madrid.
- Ólafur G. Flóvenz, Sigmundur Einarsson, Ásgrímur Guðmundsson, Þorsteinn Thorsteinsson og Hrefna Kristmannsdóttir, 1984: JARÐHITARANNSÓKNIR Á GLERÁRDAL 1980-1983. Skýrsla Orkustofnunar, OS-84075/JHD-13, 89 bls.
- Ólafur G. Flóvenz, Lúðvík S. Georgsson og Knútur Árnason 1985: Resistivity Structure of the Upper Crust in Iceland. J. Geophys. Res. Vol. 90, No. B12, 10136-10150.
- Ragna Karlsdóttir, 1998: TEM-viðnámsmælingar í Svartsengi 1997. Skýrsla Orkustofnunar, OS-98025, 43 bls.
- Sveinbjörn Björnsson, Birna Ólafsdóttir, Jens Tómasson, Jón Jónson, Stefán Arnórsson og Stefán G. Sigurmundsson, 1971: Reykjanes. Heildarskýrsla um rannsókn jarðhitasvæðisins. Skýrsla Orkustofnunar, 122 bls.
- van Dam, J.C. og Muelenkamp, J.J., 1968: Standard graphs for resistivity prospecting.