

GEOLOGINEN TUTKIMUSLAITOS
GEOLOGICAL SURVEY OF FINLAND

TUTKIMUSRAPORTTI N:o 25
REPORT OF INVESTIGATION No. 25

Erkki Lanne

Vuotoksen ja Kittilän alueiden geofysikaalisten tietojen tulkinnasta

Summary: On the interpretation of
geophysical data from the Vuotos and
Kittilä areas, northern Finland



Espoo 1979

GEOLOGINEN TUTKIMUSLAITOS
Tutkimusraportti n:o 25

Erkki Lanne

**VUOTOKSEN JA KITILÄN ALUEIDEN GEOFYSIKAALISTEN
TIETOJEN TULKINNASTA**

**Summary: On the interpretation of geophysical data from the
Vuotos and Kittilä areas, northern Finland**

Espoo 1979

Lanne, E. 1979. Vuotoksen ja Kittilän alueiden geofysikaalisten tietojen tulkinnasta. Summary: On the interpretation of geophysical data from the Vuotos and Kittilä areas, northern Finland. *Geologinen tutkimuslaitos, Tutkimusraportti n:o 25*. 38 pages, 22 figures and 2 tables.

The aim of the geophysical interpretation project of Northern Finland has been to obtain geological information from geophysical data by interpretation methods based on ADP, as well as to develop methods on interpretation and to collect petrophysical data. The areas investigated, the Vuotos district in the parish of Pelkosenniemi (c. 500 km²) and the Kittilä greenstone complex (c. 5000 km²) belong to the Central Lapland schist area. The main research material consists of gravity and aeromagnetic observations. The processing methods have involved the compilation of derivative maps, spectrum analysis and model interpretation.

According to the spectrum analysis, the rapid variations in the gravity field (wave length below 250 m) seem to be caused mainly by the underground rock topography. The gravity data were processed by 2nd derivative and residual anomaly operations, too. A comparison with seismic refraction sounding results shows that the calculated anomalies agree well with the surface part of the bedrock. The structure of the upper part of the bedrock was studied by the interpretation of aeromagnetic anomalies, whereas the interpretation of the gravity data was applied mainly to the depth determination of geological units. The main volcanic unit in the Vuotos district is about 1 km thick, which coincides with the results of magnetotelluric soundings. Gravity interpretation shows the Kittilä greenstone complex to be a horizontal plate. It is thickest, measuring over 5 km, in the western part, becoming thinner to the east. The contacts with the surroundings are steep on the western and southern sides.

For gravity and magnetic interpretation the program package developed uses a thick, inclined plate or prism as a basic model. Because the actual interpretation model consists of several basic models the parameters of which are automatically optimized, the package is especially suitable to complicated interpretation problems.

SISÄLLYS

	sivu
Johdanto	5
ATK-toiminta	5
Havaintojen käsittelysystemi	6
Vuotoksen alueen painovoimahavaintojen ATK-systeemin yleispiirteet	6
Tulkintamenetelmistä	7
Hjeltin ja Heiskasen magneettisten ja gravimetristen havaintojen tulkintaohjelmisto .	7
Aeromagneettisten havaintojen tulkinta (yleispiirteet)	10
Painovoimahavaintojen tulkinta (yleispiirteet)	11
Vuotoksen alueen tutkimukset	12
Painovoimahavaintojen spektrianalyysi	12
Jäännösanomaliakarttojen ja 2. vertikaaliderivaattakarttojen vertailu	16
Aeromagneettisten havaintojen tulkinta	22
Painovoimatulkinnat	23
Magnetotelluuriset luotaukset Jauratsin alueella	23
Kittilän vihreäkivialueen tutkimukset	26
Magneettiset tulkinnat	26
Aeromagneettisten anomalioiden tulkinta magneettisten malmien etsimisessä	26
Petrofysikaalisten suureiden määrittäminen	30
Kittilän alueen painovoimatulkinta	32
Suosittelavia jatkotutkimuksia	34
Summary: On the interpretation of geophysical data from the Vuotos and Kittilä	
areas, northern Finland	36
Kirjallisuus – References	38

JOHDANTO

Pohjois-Suomen geofysikaalisen tulkintaprojektin tehtävänä on ollut Pohjois-Suomesta käytettävissä olevien geofysikaalisten tietojen tulkinta. Tutkimusalueina ovat olleet Vuotoksen suunniteltu allasalue ympäristöineen Pelkosenniellä ja Kittilän vihreäkivi-alue. Tulkinnan tavoitteena oli geologisten yksiköiden kolmiulotteisuuden selvittäminen käyttäen pääasiassa painovoimahavaintoja ja magneettisia havaintoja. Tulkinnan yhteydessä tuli kehittää ja soveltaa ATK-pohjaisia tulkintamenetelmiä.

Projektin toimipaikka oli Oulun yliopiston geofysiikan laitos. Projektin on rahoittanut kauppa- ja teollisuusministeriö ja se on toiminut Pohjois-Suomen malmigeologisen toimikunnan alaisena huhtikuusta 1974 lähtien vuoden 1976 loppuun. Projektin johtajana on ollut professori M.T. Porkka ja tutkimuksista vastaavana geofyysikkona FK Erkki Lanne. Osan toiminta-ajasta on geofyysikkona toiminut DI Voitto Heiskanen ja geologisena asiantuntijana FT Juhani Paakkola. Lisäksi projektilla on ollut palveluksessaan tutkimusapulainen sekä kesäapulaisia.

Vuotoksen alueella oli Rautaruukki Oy suorittanut painovoimamittauksia, joista piti laatia johdannaiskarttoja ja mallikappaletulkintoja. Sitä varten havainnot muutettiin ATK-kelpoiseen muotoon sekä kehitettiin havainnoille sopiva interpolointimenetelmä. Havaintojen muutostyö osoittautui erittäin työlääksi niissä esiintyneiden virheiden ja aineiston epäyhtenäisyyden vuoksi. Työtä vaikeutti myös ATK-laitteiden epävarma toiminta vuoden 1974 lopulla. Varsinainen johdannaiskarttojen laatiminen ja mallikappaletulkinta tapahtui pääasiassa vuoden 1975 aikana.

Muita Vuotoksen alueeseen liittyviä tutkimuksia olivat aeromagneettisten matalalentomittausten tulkinta ja magnetotelluuriset luotaukset. Aeromagneettisten havaintojen tulkinnalla testattiin tulkintaohjelmistoa sekä hankittiin rakennegeologista tietoa alueilta, joilta ei ollut paljastumia. Magnetotelluurisilla luotauksilla tarkistettiin painovoimatulkinnalla saatua vulkaniittiyksikön paksuutta.

Kittilän vihreäkivialueelta ja sen ympäristöstä kerättiin kesällä 1974 petrofysikaalisia näytteitä n. 400 kpl, joista määrättiin tiheys ja susceptibiliteetti. Osa kivilajimäärittämisestä tehtiin mikroskooppisesti. Varsinaiset magneettiset ja painovoimatulkinnat suoritettiin vuoden 1976 aikana. Tulkintojen perustana olivat Geologisen tutkimuslaitoksen aeromagneettiset korkealentomittaukset ja Geodeettisen laitoksen painovoimahavainnot. Tulkintojen pääasiällisin tavoite on ollut rakennegeologisen tiedon lisääminen. Erityisesti tuli selvittää vihreäkivilajiyksikön syvyysulottuvuutta ja muotoa.

Alunperin S.E. Hjeltin kehittämällä magneettisten ja painovoimahavaintojen tulkintaohjelmistolla suoritettiin pääosa projektin tulkinnoista (Hjelt ja Heiskanen, valmis-teilla). Alkuperäisessä muodossa siinä oli tietokonekohtaisia rajoituksia, jotka poistettiin. Lisäksi ohjelmiston käyttövaihtoehtoja monipuolistettiin.

ATK-TOIMINTA

Atk-toiminnassa voidaan erottaa kolme päävaihetta: (1) Havaintojen muuttaminen Atk-kelpoisiksi ja niiden esikäsittely tulkintaa varten. (2) Tulkintamenetelmien laatiminen ja testaus. (3) Tuotantoajot. Koska tulkintamenetelmien ja tuotantoajojen tavoite ei ollut ensisijaisesti tietojenkäsittelyllinen, niitä kuvataan erikseen ao. luvussa.

Havaintojen käsittelysystemi

Petrofysikaalisten havaintojen ATK suunniteltiin alunperin tehtäväksi Koillismaa-projektin kehittämällä systeemillä. Muutostyöt olisivat kuitenkin vaatineet liikaa voimavaroja, joten petrofysikaaliset tiedot on käsitelty ainoastaan manuaalisesti. Tiedot ovat kuitenkin Koillismaa-projektin ATK-kelpoisilla kartoituslomakkeilla.

Magneettiset profiilit poimittiin manuaalisesti kartoilta, ja ne on taltioitu reikäkorteille. Kukin profiilitiedosto sisältää anomalia-arvojen lisäksi välttämättömät paikantamiseen tarvittavat tiedot.

Vuotoksen painovoimahavainnoille laadittiin oma tietosysteemi. Koska tätä ATK-systeemiä voidaan soveltaa myös muiden samankaltaisten tietojen käsittelyyn, esitetään systeemin rakenne yksityiskohtaisemmin.

Vuotoksen alueen painovoimahavaintojen ATK-systeemin yleispiirteet

ATK-systeemi koostuu kahdestapäävaiheesta: (1) Alkuperäisten havaintojen saattaminen ATK:lle ja niiden tarkistus. (2) Havaintojen jatkokäsittely varsinaista tulkintaa varten.

Rautaruukki Oy:n kenttähavainnot on tehty profiileittain siten, että joukko profiileja on yhdensuuntaisia, mutta profiilien suunnat vaihtelevat osa-alueittain. Profiilien etäisyydet ovat 200 – 400 m. Pisteväli profiililla on vakio 40 tai 50 m. Pisteiden kokonaismäärä on n. 32000 kpl.

ATK-systeemin suunnittelussa periaatteena pidettiin, että kaikki käyttökelpoinen havaintoaineisto olisi muuttumattomana käytettävissä. Perustiedoiksi valittiin Bouguer-anomalian arvo ja mittauspisteen korkeus. Havaintojen paikantamiseksi määrättiin profiilien alku- ja loppukoordinaatit. Häiritsevänä tekijänä oli, että profiileilta paikoin puuttui havaintopisteitä tai niissä oli selvästi virheellisiä arvoja ja profiileissa oli usein mutkia. Nämä seikat taltioitiin profiilikohtaiseen tietueeseen. Periaatteessa pisteiden paikantaminen on mahdollista 5 m:n tarkkuudella. Käytännössä tämä kuitenkin riippuu pisteiden paikantamistarkkuudesta maastossa.

Havaintojen koodaaminen ATK:lle ja virheiden etsiminen osoittautui aikaavieväksi, koska havaintolomakkeissa ei ollut riittävästi tietoja linjojen paikantamiseksi. Tästä syystä lävistystä ei voitu tehdä suoraan havaintolomakkeelta.

Havainnoissa esiintyviä karkeita virheitä tarkistettiin sekä visuaalisesti että numeerisesti. Piirrettyä profiilissa satunnaiset virheet näkyivät selvinä piikkeinä. Numeerisesti tarkistettaessa kahden peräkkäisen havainnon erotuksen tuli olla asetettua kynnysarvoa pienempi; muussa tapauksessa tuli virheilmoitus. Korjauksen jälkeen suoritettiin uusintatarkastus. Myös koordinaattien ja muiden tietojen tarkistamiseksi laadittiin erilaisia testejä.

Kokemuksena kannattaa mainita, että manuaalisia käsittelyvaiheita läpikäyneen havaintoaineiston ATK-systeemin suunnittelussa erityistä huomiota tulee kiinnittää virheiden tarkistukseen. Virhetestejä varten havaintoihin taas tulisi sisällyttää ylimääräistä tietoa. Esimerkiksi profiilitiedoissa voisi olla sekä pisteväli että pisteiden määrä ja profiilin pituus.

Ennen varsinaista tulkintaa oli suoritettava tasavälisen profiilin tai neliösilmaisen hilan interpolointi. Profiileja tarvittiin kvantitatiivista tulkintaa varten ja hilapisteistöjä johdannaiskarttojen laatimista varten. Molempien tapausten interpolointiongelmat ovat analogisia. Keskeisinä ongelmina interpoloinnissa olivat havaintojen suuri määrä, niiden epätasainen jakauma (ts. linjojen suunnassa oli jopa kymmenen kertaa enemmän ha-

vainoja kuin poikkisuunnassa) ja havaintoihin liittyvien satunnaisvirheiden vaikutus interpoloituihin arvoihin. Haittoja vähennettiin alkuperäisten havaintojen kontrolloidulla suodatuksella ja suodatettujen havaintojen harventamisella.

Suodatuksen suunnittelussa käytettiin hyväksi spektrianalyysia. Spektrin perusteella arvioitiin satunnaisvirheiden osuutta alkuperäisissä havainnoissa (Lanne, 1976b). Suodatus tapahtui ns. rekursiivista suodatusta hyväksikäyttäen. Normaali taajuussuodatus tapahtuu tavallisesti liukuvaa painotettua keskiarvoa käyttäen. Jotta suodattimen vaikutus olisi riittävän tehokas, painokertoimia tarvitaan useita kymmeniä. Suuri osa aineistosta olisi suodatuksessa joutunut hukkaan, koska havaintopisteitä oli profiileilla vain kymmenistä muutamiin satoihin. Rekursiivinen suodatus käyttää hyväksi alkuperäisten havaintojen lisäksi myös suodatettuja havaintoja, jolloin suodatin käsittää vain muutamia kertoimia. Painovoimahavainnot käsiteltiin suodattimilla, joissa oli vain viisi kerrointa. Profiilien päädyistä tulevien hukka-alueiden pienenemisen lisäksi suodatus on monta kertaa nopeampaa kuin normaalia konvoluutiotekniikkaa käyttäen. Nopeutensa vuoksi menetelmää kannattaisi kokeilla myös muihin suuriin havaintomateriaaleihin, esim. aerogeofysikaalisiin mittauksiin.

Interpolointimenetelmän tuli perustua hajapisteverkostoon, koska linjasto alueella ei ole yhtenäinen. Menetelmäksi valittiin painotettu keskiarvo suhteellisen hyvän luotettavuutensa vuoksi. Interpolointiohjelmistoa laadittaessa kiinnitettiin huomiota sen soveltamiseen sellaisenaan Geodeettisen laitoksen havaintojen käsittelyyn.

Varsinainen ohjelmisto koostui joukosta itsenäisiä tietokoneohjelmia, jotka on sijoitettu UNIVAC-1108 koneeseen. Niiden käyttö edellyttää koneen ohjauskielen tuntemista, sillä tietyn tehtävän suorittamiseksi tarvitaan yleensä useita ohjelmia, joiden toimintaa valvotaan ohjauskielen avulla.

TULKINTAMENETELMISTÄ

Geofysikaalisten havaintojen fysikaalis-matemaattisella tulkinnalla tarkoitetaan toimenpiteitä, joilla etsitään sellaiset fysikaaliset ja geometriset ominaisuudet omaava malli, jonka aiheuttama fysikaalinen ilmiö (esim. magneettikenttä, näennäisvastus tms.) vastaa havaintoja. Vaikeutena on, että tietyt havainnot voivat selittyä usealla toisistaan poikkeavalla mallilla. Vaihtoehtoisten mallien määrää voidaan rajoittaa käyttämällä kyseisen probleeman kannalta mielekkäitä perusmalleja sekä käyttämällä myös muita havaintomenetelmiä.

Hjeltin ja Heiskasen ohjelmisto painovoimahavaintojen ja magneettisten havaintojen tulkintaa varten oli keskeisin projektin tulkintamenetelmien kehitystyössä. Koska tällä ohjelmistolla saatiin pääosa projektin tulkintatuloksista, käsitellään sen ominaisuuksia ja käyttösovellutuksia yksityiskohtaisemmin.

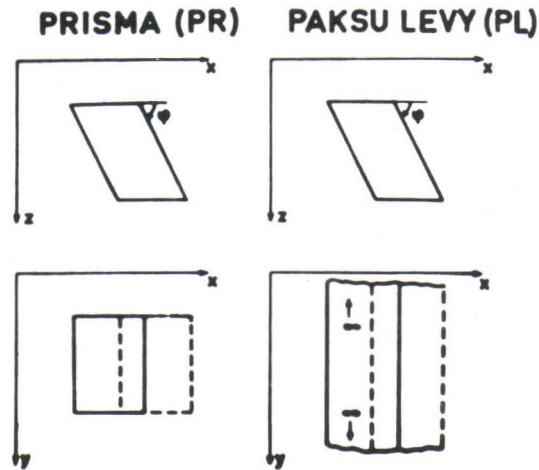
Muita käytettyjä menetelmiä, joita ovat esim. spektrianalyysi, johdannaiskarttojen laatiminen ja magnetotelluuristen luotausten tulkinta, esitetään asianomaisissa raporteissa yksityiskohtaisemmin.

Hjeltin ja Heiskasen magneettisten ja gravimetrinen havaintojen tulkintaohjelmisto

Tulkintaohjelmistoa käytetään painovoimahavaintojen ja magneettisten havaintojen tulkintaan (Hjelt & Heiskanen, valmisteilla). Yksinkertaisten kappaleiden aiheuttamat anomaliat on yleensä helppo tulkita. Jos profiili taas koostuu useasta toisiinsa sulautu-

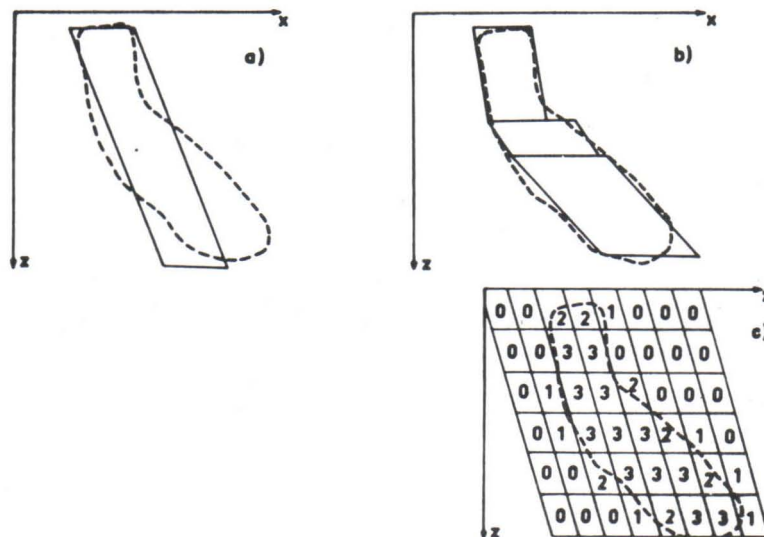
neesta anomaliasta, tulkinta on vaikeampaa. Useimmat todelliset anomaliat ovat juuri tällaisia monen kappaleen yhteisvaikutuksia. Ohjelmiston suunnittelussa eräänä tavoitteena on ollut tällaisten toisiinsa sulautuneiden anomalioiden tulkinta.

Perusmallina käytetään vinoa paksua levyä tai vinoa prismaa (kuva 1). Varsinainen tulkintamalli muodostuu perusmallin kombinaatioista. Kuvassa 2a katkoviivoilla merkitty



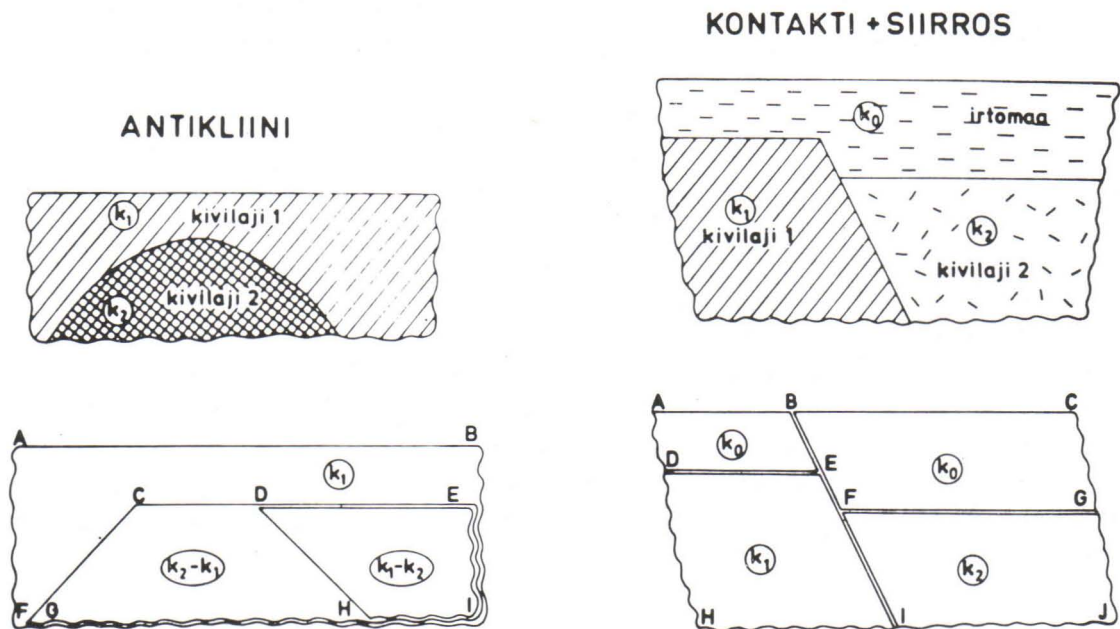
Kuva 1. Perusmallit tulkinnassa: vino prisma ja vino paksu levy.

Fig. 1. Basic interpretation models: inclined prism and inclined, thick plate.



Kuva 2. Geologinen rakenne ja vaihtoehtoisia tulkintamalleja: a) karkea malli b) yksityiskohtainen malli c) materiaalivakion vaihtelua kuvaava malli.

Fig. 2. Geological structure and alternative interpretation models: a) rough model b) detailed model c) model describing material constant distribution.



Kuva 3. Antikliinia kuvaava malli.
Fig. 3. Model describing anticline.

Kuva 4. Siirrosta ja kontaktia kuvaava malli.
Fig. 4. Model describing fault and contact.

anomalian aiheuttaja on kuvattu yhdellä perusmallilla, kuvassa 2b malli on yksityiskohtaisempi ja kuvassa 2c malli koostuu joukosta samanmuotoisia perusmalleja, joiden materiaalivakio vaihtelee. Jos perusmallikappaleet menevät päällekkäin, on tulos tulkittava kappaleeksi, jossa materiaalivakio on molempien mallikappaleiden materiaalivakioiden summa. Magneettisessa tulkinnassa riippuvuus ei tosin ole aivan tarkka. Kuvassa 3 ja 4 on esimerkkejä tyypillisistä geologisista rakenteista, jotka on kuvattu perusmallin yhdistelminä.

Ohjelmisto on laadittu FORTRAN V-kielellä siten, että siinä on mahdollisimman vähän konekohtaisia rajoituksia. Tietokoneen tulee olla kuitenkin melko iso, sillä ohjelmistoon kuuluu pääohjelman lisäksi 21 aliohjelmaa. Havaintojen määrä voi olla korkeintaan 1000 kpl ja ne voivat sijaita yhdellä tai useammalla samansuuntaisella linjalla. Ohjelmistolla on kolme vaihtoehtoista käyttötappaa: 1. anomalian laskeminen, 2. lineaarinen materiaalivakiosovitus ja 3. epälineaarinen optimointi.

Anomalian laskeminen: Ohjelmisto laskee pelkän anomalian annettujen malliparametrien perusteella. Laskettua anomaliaa voidaan tarvita esim. teoreettisessa tutkimuksessa. Tulkinnassa anomalia voidaan laskea tulkintamallin tunnetusta tai vakiona pidettävästä osasta. Tällöin laskettu anomalia vähennetään havainnoista ja varsinainen automaattinen tulkinta tehdään anomalian jäännökseen.

Lineaarinen optimointi: Linearisessa optimoinnissa ratkaistaan kappaleiden materiaalivakio lineaarisen yhtälöryhmän avulla. Mallikappaleiden muoto ja sijainti voidaan valita vapaasti (erimuotoiset kappaleet), jolloin kappaleiden määrä voi olla korkeintaan 20. Toisena vaihtoehtona ovat samanmuotoiset kappaleet, jolloin niiden vaakaulottuvuudet määrää piste- ja linjaväli. Käyttäjä voi valita vain perusmallin ylä- ja alapinnan sijainnin sekä kaateen. Jälkimmäisen vaihtoehdon pääkäyttötapa on horisontaalisen materiaalivakiojakauman selvittäminen.

Epälineaarinen optimointi: Epälineaarinen optimointi on ohjelmiston monipuolisin käyttövaihtoehto. Tulkintamalli koostuu yhdestä tai useammasta (kuitenkin enintään 20:stä) perusmallista, joiden parametrejä muuttelemalla pyritään mahdollisimman hyvään mitatun ja lasketun anomalian yhteensopivuuteen. Yhteensopivuusmittana käytetään em. anomalioiden erotusten neliösummaa, joka minimoidaan. Levymallin parametreista seuraavia voidaan optimoida: Mallin vaaka- ja pystysijainti, mallikappaleen leveys ja korkeus sekä kaade. Edelleen optimoitavia parametreja ovat materiaalivakio (suskeptibiliteetti tai tiheys) ja vakionollataso. Prismamallia varten tarvitaan lisäksi toinen sijainnin vaakakoodinaatti sekä prisman pituus.

Optimointia varten malli tarvitsee parametrien alkuarvot, jotka käyttäjä antaa. Magneettisessa levymallitulkinnessa ohjelmisto voi hakea myös itse osan mallin alkuarvoista.

Mallin anomalian laskemiseksi ohjelma tarvitsee lisäksi seuraavia tietoja: maan magneettikentän suunnan ja voimakkuuden sekä demagnetointikertoimen.

Optimoivien parametrien arvoja voidaan rajoittaa antamalla niille ala- ja ylärajat. Parametri voidaan pitää myös vakiona tulkinnan aikana esimerkiksi silloin, kun sen arvo tunnetaan.

Aeromagneettisten havaintojen tulkinta (yleispiirteet)

Aeromagneettisia havaintoja on tulkittu käyttäen mainittua Hjeltin-Heiskasen ohjelmopakettia. Tulkinnan tavoitteita ovat geologisen tiedon lisääminen, magneettisten anomalioiden malmikriittisyyden määrittely, tulkintaohjelmiston testaus ja aeromagneettisten havaintojen käyttö tulkinnessa.

Geologisen tiedon lisääminen on päätavoite. Mikäli mahdolliselle fysikaalis-matemaattiselle tulokselle löytyy geologinen vastine, on tavoite saavutettu. Saavutettava tieto on pääasiassa rakennegeologista tietoa. Tulkinnan avulla voidaan päätellä tarkemmin kuin pelkän anomalian perusteella magnetoituneiden yksiköiden leveyttä, yläpinnan syvyyttä, magnetoitumisen voimakkuutta sekä suotuisissa oloissa yksikön kaadetta ja syvyysulottuvuutta.

Magneettisten anomalioiden malmikriittisyyden määrittely: Osoittautui, että automaattisen tulkinnan tuloksena tuli kompakteja, voimakkaasti magnetoituneita kappaleita. Korvaamalla kappaleet sellaisilla malleilla, jotka ovat malmikriittisiä ja suorittamalla uusintatulkinta, voidaan tutkia, mitkä magneettiset anomaliat voisivat olla suoranaisesti magneettisten malmien aiheuttamia.

Tulkintaohjelmiston testaus: Tulkinnan pitkälle menevä automatisointi edellyttää ohjelmaan sisältyvien päätösten, testien yms. kokeellista kontrollointia. Osa tulkinnoista koski alueita, joilta oli kenttähavaintoja. Vertaamalla niitä keskenään, voitiin todeta ohjelman löytämien ratkaisujen mielekkäys.

Aeromagneettisten havaintojen käyttö tulkinnessa: Aeromagneettiset havainnot peittävät koko Suomen alueen. Mikäli havainnot soveltuvat tulkittaviksi, voidaan melko vähin kustannuksin saada uutta tietoa jo suoritetuista mittauksista.

Tulkintaohjelman annettiin toimia yleensä mahdollisimman vapaasti, ts. ohjelma etsi itse alkuarvot ja kaikkia parametreja optimoitiin. Jos tulokset näyttivät hyvin sekavilta tai todettiin selviä ristiriitaisuuksia kenttähavaintojen kanssa, korjattiin mallin parametreja.

Tulkinnan tuloksena saaduista parametreista yläpinnan vaakasijainti ja leveys ovat melko luotettavia. Suskeptibiliteetti riippuu levyn paksuudesta ja kaateesta. Ilmeisesti

levyn kohtisuuraa paksuuden ja susceptibiliteettia vastaavan magnetiittipitoisuuden välinen tulo vastaa myös melko hyvin todellisuutta. Koska remanenssia ei tunnettu, se jouduttiin jättämään huomiotta. Vakavia virheitä remanenssin huomiottajättäminen aiheuttaa, jos se on voimakas ja sen suunta poikkeaa sopivasti maankentästä.

Suureet joihin tulee suhtautua suurimmalla varovaisuudella ovat kaade ja alapinnan syvyys. Mikäli levyt ovat pahoin »ristissä», se osoittaa yleensä mallin sopimattomuutta. Esimerkiksi kiinteäksi valittu yläpinnan syvyys saattaa aiheuttaa virhetulkinnan. Mikäli tulkinta vaikuttaa muuten järkevältä, mutta kappaleet menevät päällekkäin, se osoittaa että päällekkäin menneellä alueella on suurempi susceptibiliteetti kuin muualla. Päällekkäin oleva osa voidaan tulkita kappaleeksi, jonka susceptibiliteetti on molempien levyjen susceptibiliteettien summa. (Relaatio ei ole aivan tarkka, mutta antaa kvalitatiivisen kuvan).

Alapinnan syvyys on ehkä epämääräisin tulkintasuure. Mikäli alapinnan syvyydeksi on saatu tuhansia metrejä, ei numeroarvolla ole käytännön merkitystä.

Hyvin leveät tulkintakappaleet aiheutuvat yleensä gradientista, jonka taas aiheuttaa joko kahden alueen välinen kontakti tai profiilin ulkopuolella olevien kappaleiden aiheuttamat anomaliat (jälkimmäistä tilannetta on profiileja valittaessa pyritty varomaan). Gradientti voi myös generoida sinänsä yhtenäiseen ja luotettavalta näyttävään tulkintaan kappaleita, jotka täysin poikkeavat kokonaiskuvasta. Tulkinnan luotettavuutta kuvaa myös mitatun ja lasketun anomalian yhteensopivuus.

Tulkinnan tarkkuuden absoluuttisia arvoja oli vaikea arvioida riittävän tarkkojen kenttähavaintojen puutteen vuoksi. Jonkinlainen käsitys 150 m:n korkeudelta mitattujen havaintojen tulkinnan tarkkuudesta saatiin vertaamalla tuloksia matalalentomittauksista (lentokorkeus 30 m) saatuihin tuloksiin. Muutamien kokeilujen perusteella saatiin seuraavia tuloksia. Jos anomalia selittyy yhdellä ainoalla levyllä, yläpinnan sijainnissa ja leveydessä oli harvoin suurempaa kuin 20 – 50 metrin eroja. Jos anomalian aiheuttaja koostui useammasta kappaleesta, magnetoituneiden alueiden leveydet harvoin poikkesivat toisistaan yli 100 m. Silmämääräisesti maksimigradientin perusteella tulkittuna anomalian aiheuttajien rajat poikkesivat 50 – 300 m kvantitatiivisen tulkinnan tuloksista.

Laskettaessa tulkintatuloksista anomalian aiheuttajien magnetiittimääriä erot korkeaja matalalentomittausten välillä olivat 10 %:n suuruusluokkaa.

Vaikka kaade on vaikea tulkita kvantitatiivisestikin, sen suunta silmämääräisesti määritettynä monimutakisesta anomaliasta epäonnistuu likimain yhtä usein kuin onnistuu.

Vaikein pelkän anomalian perusteella pääteltävä ominaisuus on anomalian aiheuttajan luonne. Tällaisia ominaisuuksia ovat mm. lähteen voimakas tai heikko magnetoituminen ja lähteen sisällä olevat magnetoitumisen vaihtelut. Sen sijaan kvantitatiivinen tulkinta yleensä epäonnistui, jos yritettiin soveltaa liian yksinkertaisia malleja.

Edellä esitettyjen arviointien ylimalkaisuudesta huolimatta voinee niiden perusteella kuitenkin päätellä, milloin aeromagneettisten havaintojen kvantitatiivisellä tulkinnalla saavutetaan sellaista tietoa, jota suoraan anomaliasta on vaikea nähdä.

Painovoimahavaintojen tulkinta (yleispiirteet)

Painovoimahavaintojen mallikappaletulkinnalla on selvitetty pääasiassa geologisten yksiköiden vertikaalisuuntaista muotoa. Koska molemmilla tutkimusalueilla anomalian aiheuttajat ovat suhteellisen laaja-alaisia verrattuna paksuuteen, tulkinnan tarkkuus riippuu pääasiassa tiheyserojen ja nollatason tuntemisesta. Molemmat suureet liittyvät toisiinsa

ja niiden määrääminen on tulkinnanvaraista. Hjeltin ja Heiskasen ohjelmapaketti voi tosin optimoida sekä nollatasoa että tiheyseroja, mutta koska molemmat suuret korreloivat voimakkaasti keskenään, yksikäsitteisen ratkaisun löytäminen on käytännössä mahdotonta. Molemmilta tutkimusalueilta oli kuitenkin melko hyvät tiedot kivilajien tiheyksistä. Myöskään nollatason määrittämisessä ei ollut kohtuuttomia vaikeuksia (esim. gradientti, askelmainen tasonmuutos tms.).

Tulkintavaiheessa kokeiltiin aluksi ohjelman mahdollisimman vapaata toimintaa, mutta siten saadut ratkaisut osoittautuivat ilmeisen virheellisiksi. Parhaisiin tuloksiin päästiin yleensä siten, että optimoitiin kerrallaan vain yhtä tai kahta parametria muiden ollessa vakioita. Koska vakioina pidettävät parametrit edustavat tulkitsijan käsityksiä, saattaa joitakin vaihtoehtoisia, mutta geologisesti mahdollisia ratkaisuja jäädä kuitenkin löytymättä.

VUOTOKSEN ALUEEN TUTKIMUKSET

Vuotoksen alue sijaitsee Pelkosenniemellä Kemijoen itäpuolella. Tutkimusalueen koko pinta-ala oli noin 500 km². Alue on heikosti paljastunutta ja geologinen yleiskuva perustuu paljolti kairauksista ja geofysikaalisista tutkimuksista saatuihin tietoihin. Alue kuuluu Keski-Lapin liuskejakson kaakkoispäähän ja sitä luonnehtivat sedimenttiset ja vulkaaniset kivet ovat kvartsiitteja, konglomeraatteja, karbonaattikiviä, kiilleliuskeita, fylliittejä ja mustaliuskeita sekä emäksisiä ja ultraemäksisiä vulkaniitteja. Liuskeita lävistävinä kivilajeina tavataan gabroja ja diabaaseja.

Alueella on voimakas positiivinen painovoima-anomalia, johon liittyy emäksinen-ultraemäksinen vulkaniittikompleksi. Vulkaniittikompleksi on taloudellisesti mielenkiintoinen, koska siihen liittyy malmiesiintymiä.

Tähän raporttiin esimerkkialueeksi valittiin karttalehti 3642 11, koska se edustaa monipuolisesti koko aluetta. Karttalehden alueen geologinen yleiskuva on esitetty kuvassa 5. Siihen on merkitty vulkaniitti- ja liuskelohkojen lisäksi pääasiassa geofysikaalisten tietojen perusteella tulkittuja ruhjeita. Karttaan on lisäksi merkitty refraktioseismisten profiilien sijainti, koska seismisillä tuloksilla oli keskeinen merkitys painovoimahavaintojen vertailuaineena.

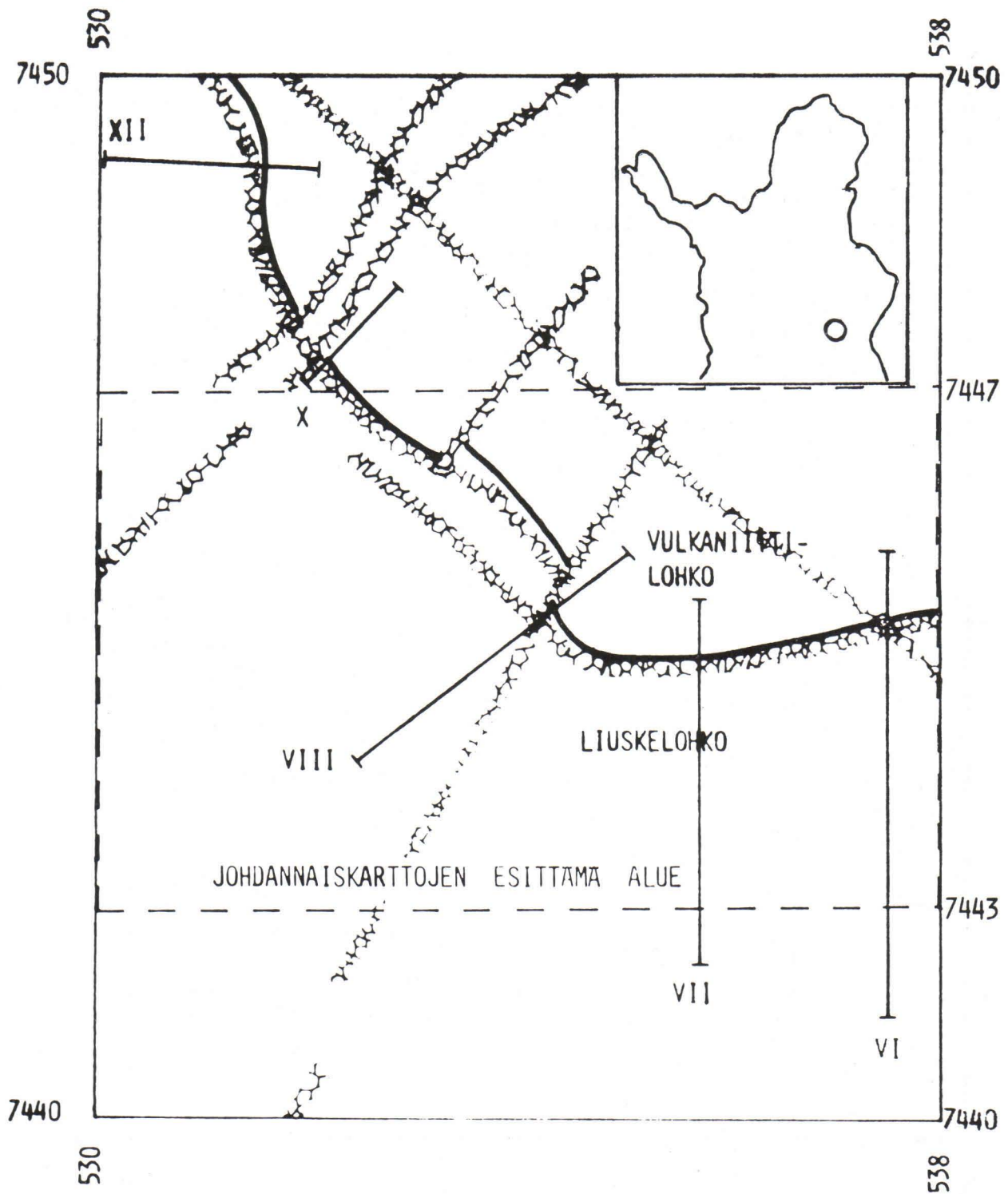
Kuvassa 6 on esitetty alueen painovoimakartta hiukan yksinkertaistettuna. Vulkaniittikompleksin ja painovoimakentän liittyminen toisiinsa on ilmeistä.

Vuotoksen alueeseen liittyvät seuraavat tutkimukset: painovoimahavaintojen spektrianalyysi, johdannaiskarttojen laatiminen, aeromagneettisten ja painovoimahavaintojen mallikappaletulkinta sekä magnetotelluurinen luotaus. Seuraavassa tarkastellaan tutkimuksia yksityiskohtaisemmin.

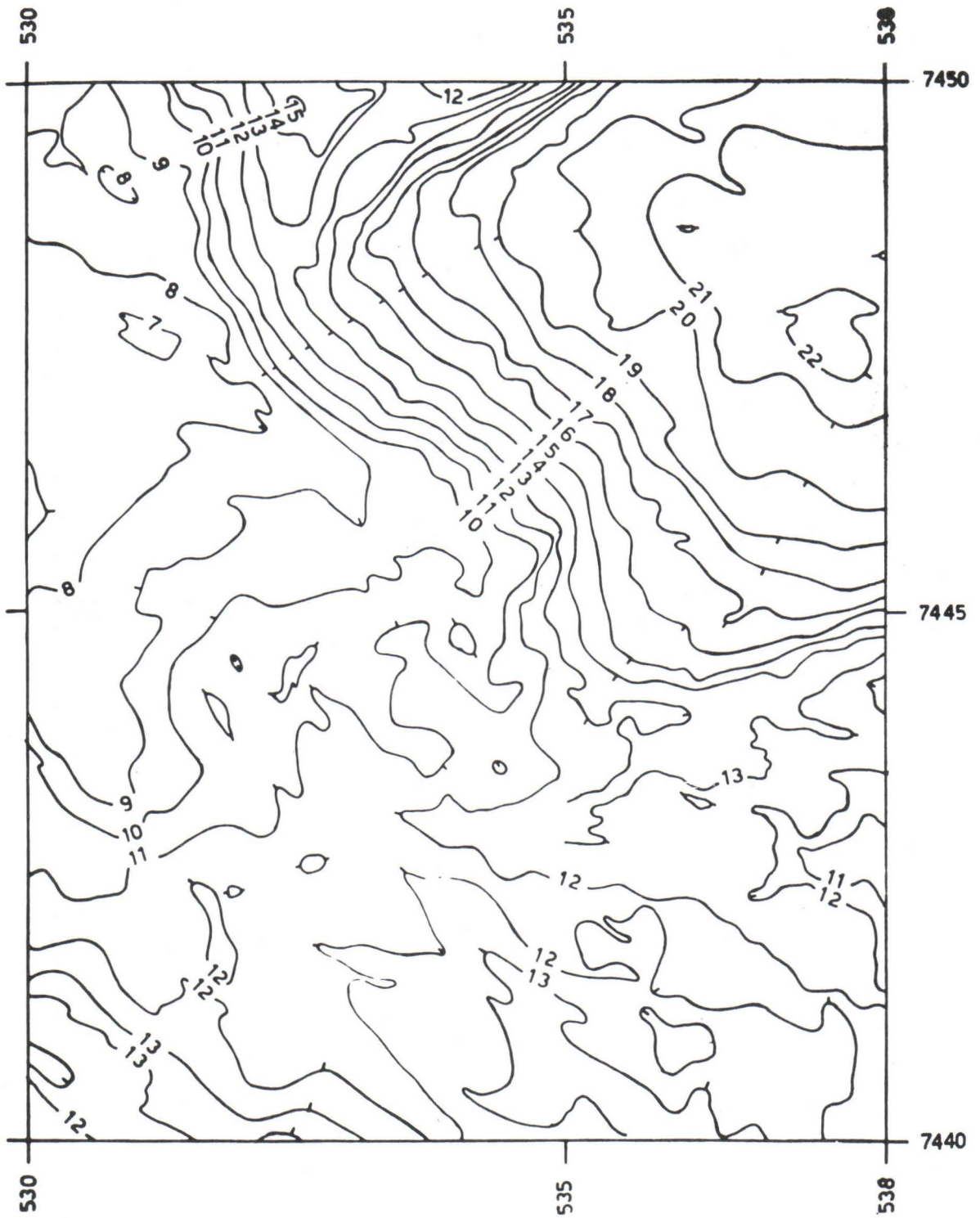
Painovoimahavaintojen spektrianalyysi

Projektin suorittamat painovoimahavaintojen spektrianalyysi-tutkimukset on käsitelty erillisraportissa (Lanne, 1976a). Spektrianalyysin matemaattinen teoria perustuu Fourier'n integraalimuunnokseen. Alkuperäinen funktio esitetään eri aallonpituuden ja amplitudin omaavien harmonisten funktioitten lineaarisena yhdistelmänä. Funktion spektri muodostuu harmonisten funktioitten amplitudista, jotka esitetään aallonpituuden käänteisluvun eli aaltoluvun (tai taajuuden) funktiona.

Todelliset painovoima-anomaliat sisältävät tavallisesti sekä syvällä että lähellä olevien lähteiden aiheuttamia anomaliaita. Lisäksi havainnot sisältävät aivan maanpinnasta



Kuva 5. Testialueen geologinen yleiskuva (Vuotos, Pelkosenniemi).
 Fig. 5. Generalized geology of test area (Vuotos, Pelkosenniemi).

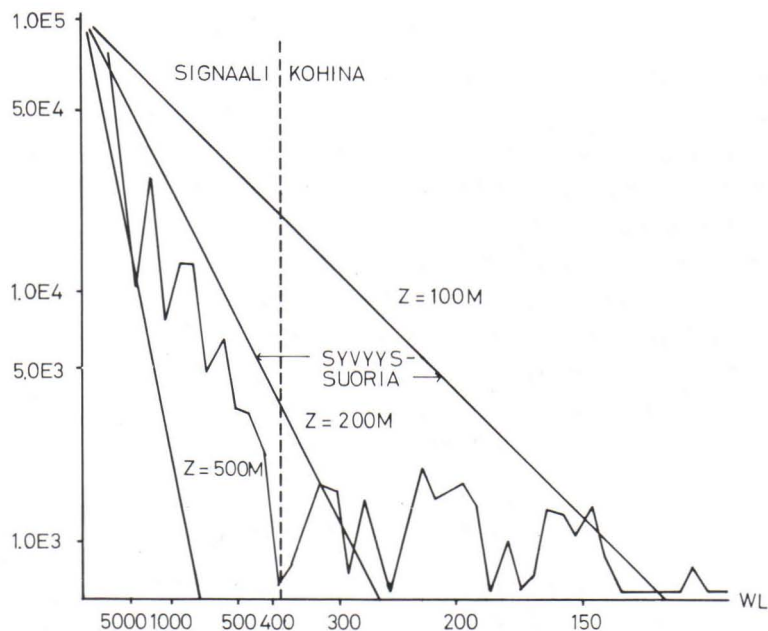


Kuva 6. Testialueen Bouguer-anomaliakartta.
 Fig. 6. Bouguer anomaly map of test area.

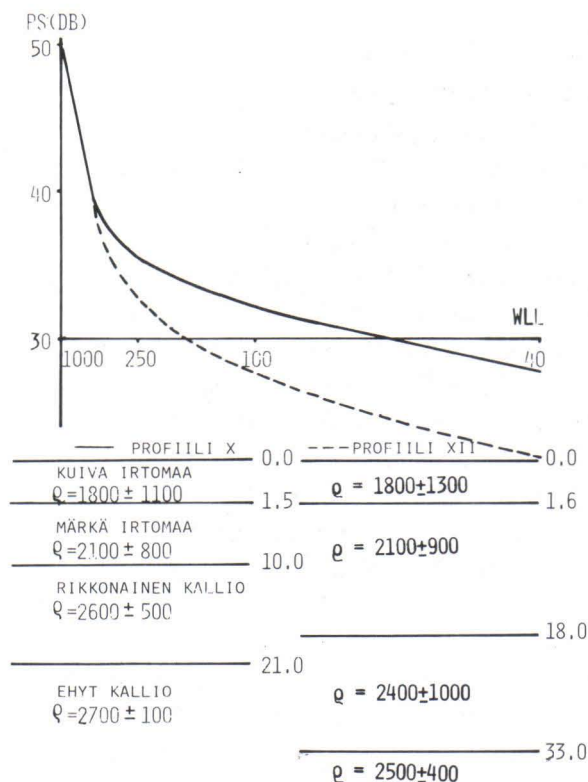
ja itse mittauksesta aiheutuvia satunnaisvirheitä. Samoin kuin itse anomaliat myös anomalioiden spektrit sekoittuvat toisiinsa. Kuitenkin osaspektrit ryhmittyvät aaltoluvun funktiona siten, että syvällä olevien lähteiden spektri keskittyy pääasiassa pieniin aaltolukuihin eli pitkiin aaltoihin. Lähellä pintaa olevat lähteet muodostavat spektrin pääosan suurilla aaltoluvuilla eli lyhyillä aalloilla. Koska spektrin kaltevuus kuvaa lähteiden syvyyttä, lähes vakiona oleva osa spektristä aiheutuu pääasiassa satunnaisvirheistä.

Kuvassa 7 on esimerkki mitatuista havainnoista lasketusta spektristä. Argumenttinä on aallonpituus. Alkuosa spektristä aiheutuu pääasiassa noin 200 – 300 metrin syvyydessä olevista lähteistä. Loppuosa spektristä, jossa aallonpituudet ovat lyhyempiä kuin 400 m, spektrin odotusarvo on likimain vakio ja tulkittavissa kohinaksi. Vaikka syvällä olevien lähteiden kuvaamiseen tarvittaisiinkin myös lyhyitä aallonpituuksia, satunnaisvirheet peittävät niiden osuuden. Aallonpituudet, jotka ovat lyhyempiä kuin 400 m, voidaan suodattaa alkuperäisistä havainnoista pois ilman että menetetään mitään oleellista tietoa syvällä sijaitsevista lähteistä. Suodatuksen jälkeen suodatettujen havaintojen määrää voidaan vähentää ja siten suorittaa jatkokäsittely pienempää havaintomäärää käyttäen ja taloudellisemmin.

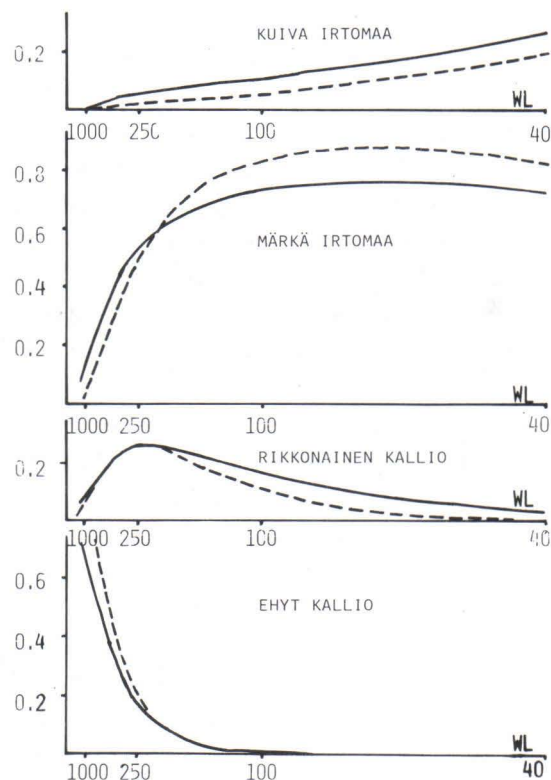
Toisena spektrianalyysin sovelluksena tutkittiin maankamaran eri osatekijöiden osuutta painovoimahavainnoissa. Lähtömateriaalina käytettiin seismisiä refraktioluotaustuloksia, joista nopeus- ja kerrosrajavaihtelut muutettiin tiheysvaihteluiksi. Maankamara jaettiin seuraaviin kerroksiin: kuiva ja kostea irtomaa, rapautunut kallio ja ehyt kallio. Kuvissa 8 ja 9 on kerrosrajojen ja tiheyden vaihtelujen perusteella laaditut spektrit kahdesta tapauksesta. Toisessa irtomaita on noin 10 m ja rapautunutta kalliota saman verran. Toisessa tapauksessa irtomaiden ja rapautuneen kallion osuus on suurempi, yli 30 m. Toisen kerroksen vaikutus aiheutuu pääasiassa kalliopinnan topografiasta, koska seisminen nopeus ja ilmeisesti myös tiheys on likimain vakio. Huomiota herättävä on toisen kerroksen osuus spektrissä ja siten myös varsinaisissa painovoimahavainnoissa lyhyillä aallonpi-



Kuva 7. Mitatun painovoimaprofiilin tehospektri.
Fig. 7. Power spectrum of observed gravity profile.



Kuva 8. Kerrosmallia vastaava simuloitu tehospektri.
Fig. 8. Simulated power spectrum corresponding layer model.



Kuva 9. Osaspektrien osuus kerrosmallin tehospektristä.
Fig. 9. Shares of partial spectra in layer model power spectrum.

tuuksilla. Tulos osoittaa sen usein käytännössä havaitun tosiasian, että painovoimahavainnot korreloivat valitettavan hyvin kalliopinnan topografian kanssa. Vaikka kalliopinnan topografia korreloisikin kivilajien kanssa ja tuloksena olisi näennäisen hyvä korrelaatio painovoimahavaintojen ja kivilajivaihtelujen välillä, kalliopinnan topografian huomiotta jättäminen aiheuttaa virhetuloksia.

Varsinaisten kivilajianomalioiden osuus kasvaa, kun aallonpituudet ovat yli 500 m. Sen sijaan irtomaiden ja kallion yläpinnan osuus on vähäinen kaikilla näillä aallonpituuksilla.

Edellä esitettyjen tulosten perusteella voidaan päätellä, että painovoimakentän detaljimitoituksissa kalliopinnan topografian vaikutus on vähintään yhtä merkittävä kuin kivilajien tiheysvaihtelujen osuus. Sen sijaan jos kenttä on mitattu esim. 500 metrin pistevälillä, anomaliat aiheutuvat pääasiassa kallioperän tiheysvaihteluista.

Jäännösanomaliakarttojen ja 2. vertikaaliderivaattakarttojen vertailu

Painovoimakarttoja käytetään geologisessa tutkimuksessa, koska painovoima-anomaliat jo sellaisenaan antavat kvalitatiivisen kuvan maankamaran massajakaumasta. Matalalla sijaitsevien pienten kohteiden tutkiminen on kuitenkin hankalaa, koska niistä aiheutuvat pienet anomaliat vääristyvät voimakkaan regionaalisanomalian vuoksi. Erityisesti jyrkät

gradientit peittävät pieniä anomalioita. Sen vuoksi regionaalikentän vaikutusta pyritään eliminoimaan joko puhtaasti matemaattisin tai fysikaalisesti perustelluin menetelmin.

Projekti on laatinut jäännösanomaliakarttoja ja toisen vertikaaliderivaatan karttoja, joiden pitäisi kuvata painovoimakentän pieniä vaihteluja (Lanne 1976b). Molempien tyyppiset johdannaiskartat on laskettu liukuvan painotetun keskiarvon menetelmällä. Painokerroinjoukkoa kutsutaan operaattoriksi.

Jäännösanomalia tietyssä pisteessä määritetään pisteen painovoima-arvon ja ympäröivän anomalian erotuksena. Jäännösanomalian arvo riippuu säteestä, jolla regionaaliano-malia lasketaan. Jäännösanomaliakartat ovat siten puhtaasti matemaattisia ja niiden käyttö edellyttää kokemuksia aikaisemmista vastaaventyypisistä sovelluksista.

Toisen vertikaaliderivaatan kartat perustuvat painovoimakentän teoriaan. Koska käytännön laskutoimitukset ovat approksimatiivisia, laadittujen operaattoreiden ominaisuudet vaihtelevat. Tässä työssä on verrattu kahta varsin eri tyyppistä operaattoria. Hendersonin ja Zietzin laatima operaattori on teoreettisesti hyvä. Toinen, Elkinsin laatima operaattori on teoreettisesti heikko, mutta sillä saadut tulokset ovat osoittautuneet käytökelpoisiksi. Elkinsin operaattorin teoreettinen puute on, että se tasoittaa voimakkaasti alkuperäisen kentän nopeimpia vaihteluita.

Operaattorit edellyttävät neliösilmäistä havaintopistehilaa, joka piti interpoloida. Kompromissina hilavälin ja pistevälin kesken valittiin hilaväliseksi 250 m.

Koska alueelta ei ollut riittävän yksityiskohtaista geologista tietoa, käytettiin vertailumateriaalina refraktioseismisiä tuloksia. Seismisistä luotauksista saatava fysikaalinen ominaisuus on tosin seisminen nopeus, kun taas painovoima-anomaliat perustuvat tiheyden vaihteluihin. Koska tiheys ja seisminen nopeus kuitenkin korreloivat voimakkaasti keskenään, vertailu on mahdollista.

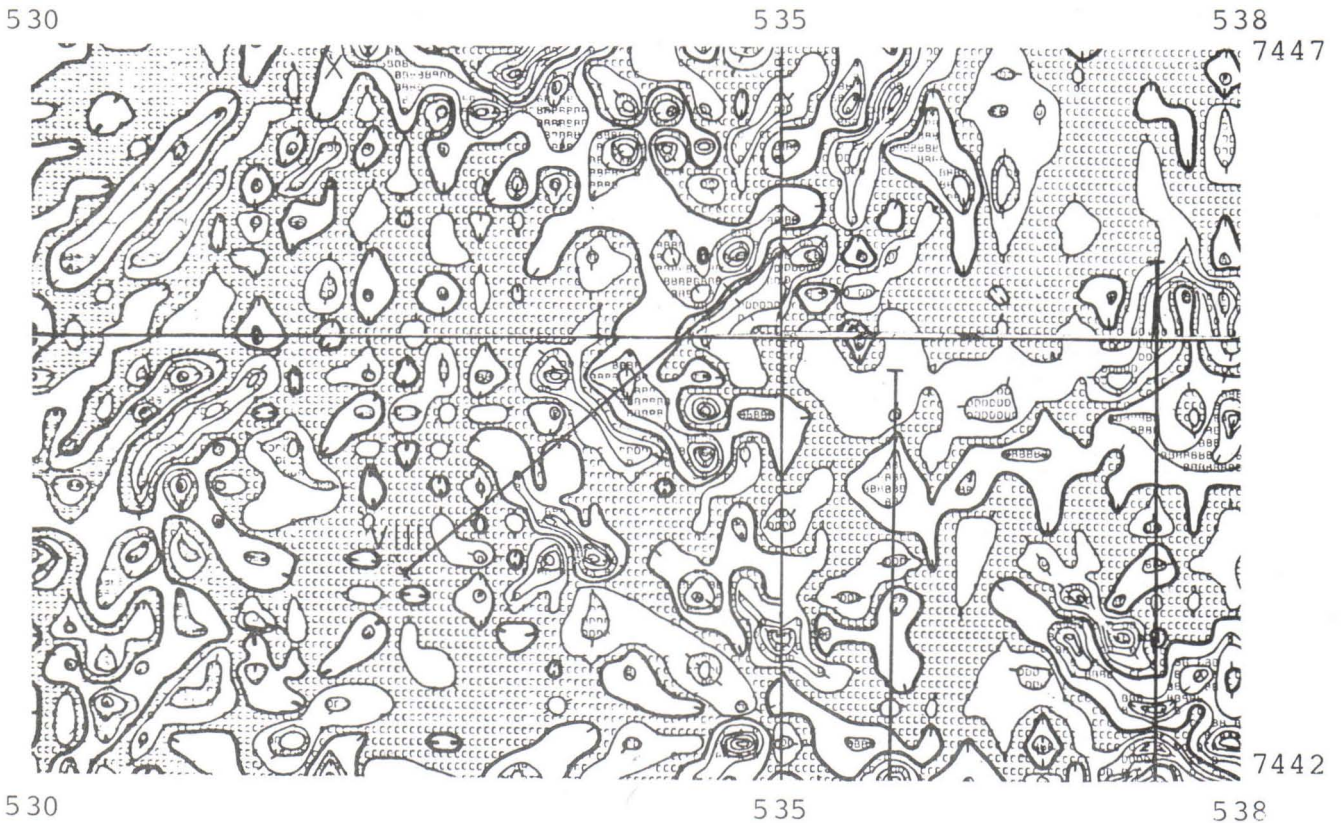
Seuraavassa nimitetään Hendersonin ja Zietzin operaattorilla laadittua karttaa H-Z-kartaksi ja Elkinsin operaattorilla laadittua karttaa Elkins-kartaksi. Jäännösanomaliakarttoja kutsutaan R300- ja R760-kartoiksi laskentasäteen mukaan. Kartat on esitetty kuvissa 10-13. Odotetusti eniten yksityiskohtia löytyy H-Z-kartasta, kun taas vähiten niitä on R760-kartassa. Elkins- ja R300-kartat muistuttavat toisiaan.

H-Z-kartassa (kuva 10) yksityiset hilapisteet näkyvät »helmi» -anomaliaina. Vertailu seismisten tulosten kanssa osoittaa kuitenkin, että useimmille yksityiskohdille löytyy luonteva selitys. Koska operaattori korostaa voimakkaasti yksityiskohtia, kartan kokonaisvaikutelma onkin hiukan sekava. Esimerkiksi vulkaniittikompleksi ei erotu ympäristöstään, vaikka alkuperäisessä painovoimakartassa se tulee selvästi ilmi. Esimerkki osoittaa myös, että yksityiskohtia kuvaava kartta ei välttämättä kerro mitään suurrakenteista.

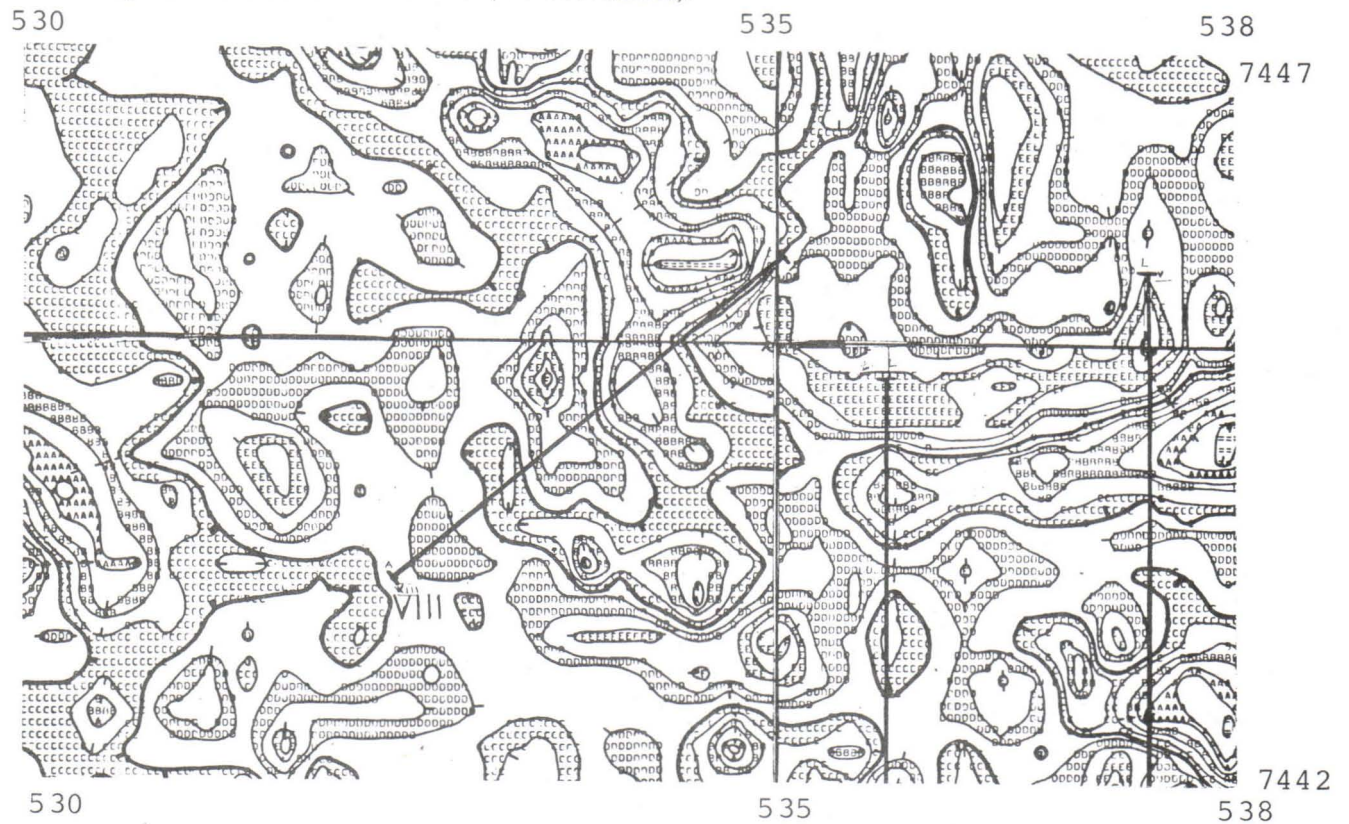
Elkins-kartan (kuva 11) antama vaikutelma on selkeämpi, koska alkuperäisen kentän nopeimmat vaihtelut on poistettu. Useimmille yksityiskohdille voidaan löytää selitys seismisistä tuloksista.

R300-kartta (kuva 12) käyttäytyy hiukan arvaamattomasti. Vaikuttaa siltä, että se korostaa valikoiden nopeita ja hitaita vaihteluita. Sovelluksissa poikkeamalla tuskin lie-nee kuitenkaan käytännön merkitystä.

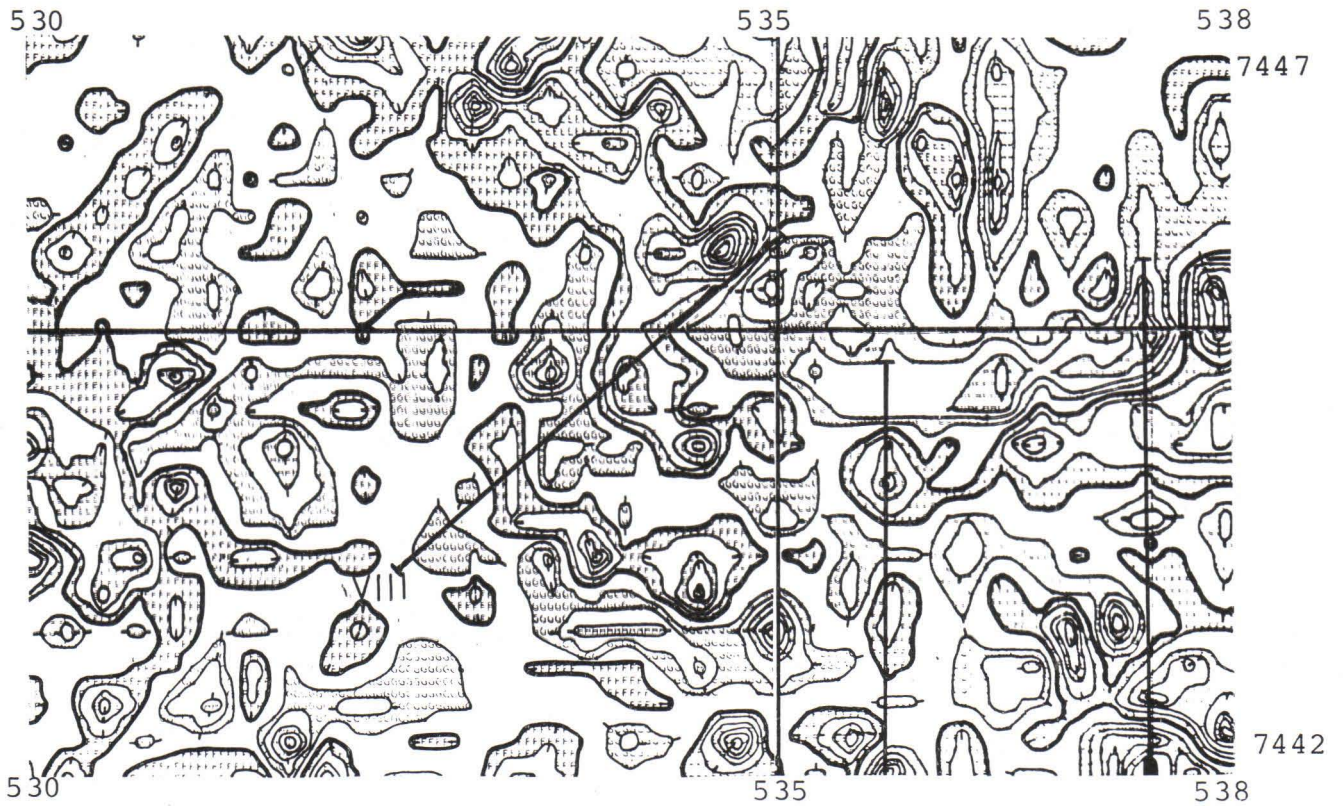
Vähiten yksityiskohtia on R760-kartassa (kuva 13). Vain laajat geologiset yksiköt erottuvat, mutta yksinkertaistavan vaikutuksensa vuoksi karttojen antama kuva on vääristynyt.



Kuva 10. Toinen vertikaaliderivaatta (Henderson-Zietz).
Fig. 10. Second vertical derivative (Henderson-Zietz).

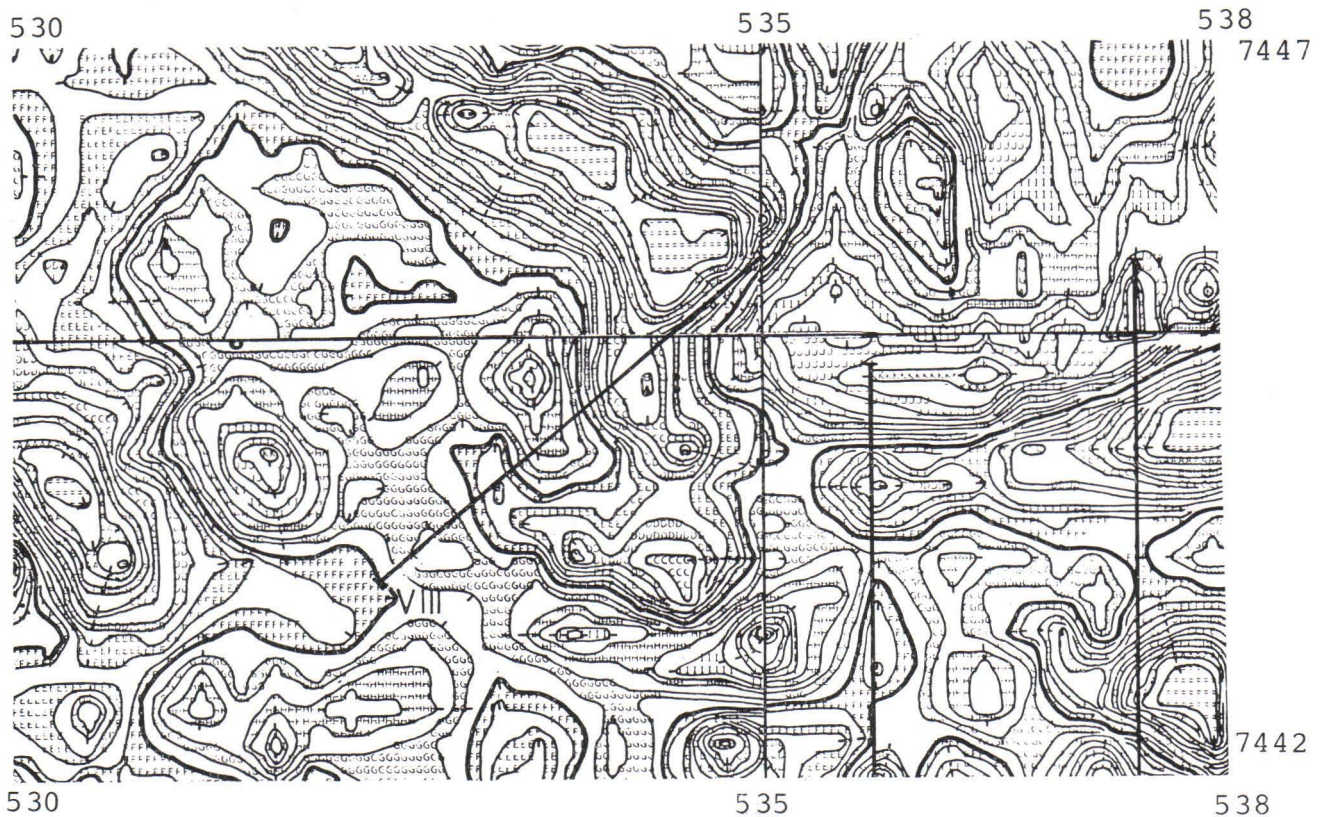


Kuva 11. Toinen vertikaaliderivaatta (Elkins).
Fig. 11. Second vertical derivative (Elkins).



Kuva 12. Jäännösanomalia (laskentasäde 300 m).

Fig. 12. Residual anomaly (radius 300 m).



Kuva 13. Jäännösanomalia (laskentasäde 760 m).

Fig. 13. Residual anomaly (radius 760 m).

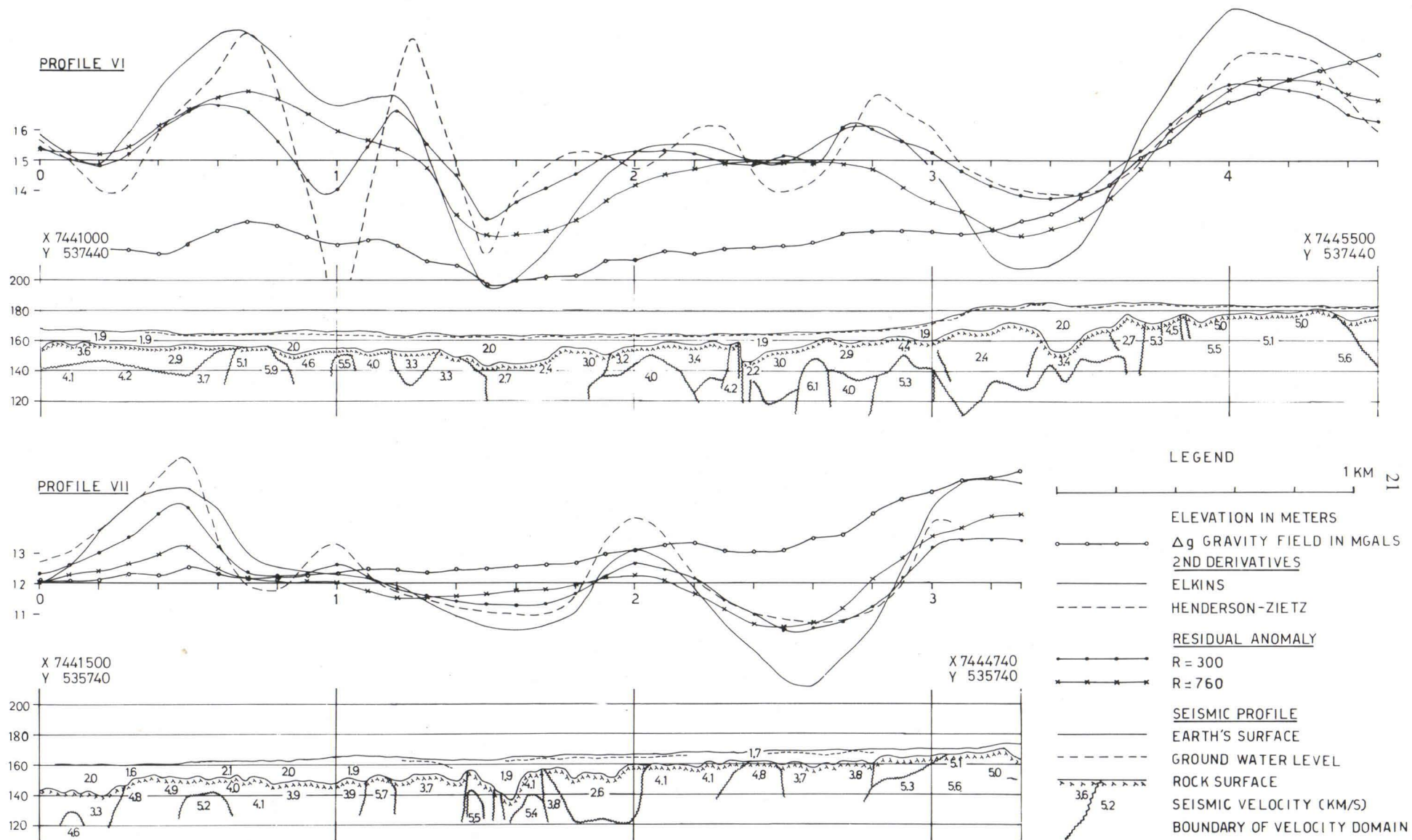
Vertailtaessa karttojen antamaa kuvaa seismisiin tuloksiin on muistettava, että esitetyt seismiset tulokset kuvaavat maankamaraa huomattavasti yksityiskohtaisemmin kuin johdannaiskartat. Seismiset profiilit sisältävät yksityiskohtia, joiden leveys on muutamia kymmeniä metrejä, kun taas johdannaiskartat perustuvat 250 metrin hilaväliin. Vaikka seismisen nopeuden ja tiheyden oletetaan korreloivan, ristiriidat voivat olla myös todellisia. Kairaustulosten perusteella on todettu, että erittäin alhaisen nopeuden alueet korreloivat ruhjeiden ja rapautumamuodostumien kanssa. Alhaisen nopeuden alueilla on usein kvartsiittia. Korkean nopeuden alueet korreloivat vihreäkivien ja albiitti-diaasien kanssa. Seuraavassa tarkastellaan kahta profiilia yksityiskohtaisemmin (kuva 14).

Profiili VI: Alussa n. 0,2 km olevalle kaikissa johdannaisprofiileissa havaittavalle pienehkölle minimille ei löydy seismisestä profiilista selitystä. 0,7 km:n kohdalla oleva maksimi liittyy selvästi alueeseen, jossa seisminen nopeus on yli 5000 m/s. Elkins-profiililla arvot pysyvät koko ajan positiivisina n. 1,4 km:iin saakka, kun taas H-Z-profiililla on voimakas minimi 1 km:ssä. Tälle minimille ei kuitenkaan löydy selitystä seismisistä tuloksista. Leveä pienen nopeuden alue ulottuu n. 0,4 km:stä 1,9 km:iin. Sen keskikohtaan, n. 1,6 km, liittyy selvä minimi kaikissa profiileissa. Elkins- ja R300-profiilien nollakohdat rajaavat myös varsin hyvin yksikköä. 2,4 km:ssä on ruhjeeksi tulkittu pienen nopeuden alue. Selvimmin minimi näkyy H-Z-profiilissa, mutta myös Elkins-profiililta löytyy paikallinen minimi. N. 2,7 km:ssä havaittavat maksimit liittynevät kahteen suuren nopeuden (n. 5500 – 6000 m/s) yksikköön. Elkins- ja R300-profiilien nollakohdat indikoivat hyvin suurinopeuksisen ja viereisen pienen nopeuden yksikön rajaa. 3,7 km:ssä taas alkaa yhtenäinen, melko suuren nopeuden yksikkö, jota myös kaikkien johdannaisprofiilien nollakohdat indikoivat. Kuten yleensäkin, vähiten yksityiskohtia löytyy R760-profiililta. Minimien perusteella voi paikantaa vain 1,7 km:ssä ja 3,3 km:ssä olevat pienen nopeuden yksiköt. Maksimit taas liittyvät selvästi vain n. 0,7 km:ssä ja 4,2 km:ssä oleviin suuren nopeuden yksiköihin.

Profiili VII: N. 0,5 km:ssä on kaikissa johdannaisprofiileissa maksimi, jolle myös seismisestä profiilista löytyy ilmeinen selitys. 1,6 km:ssä on ruhje, jota ympäröivät suurinopeuksiset yksiköt. Seismisten nopeuksien perusteella laskettu keskimääräinen tiheys osoittaa kuitenkin, että ruhjeen vaikutus on suurempi. Johdannaisanomaliat ovat sopuoinnussa saadun tuloksen kanssa ja antavat lievän minimin. Sensijaan 2,0 km:ssä olevalle maksimille ei seismisistä tuloksista löydy vastaavuutta. Itse asiassa paikalla pitäisi olla minimi ja tässä onkin eräs selittämätön ristiriita seismisten ja painovoimahavaintojen välillä. Interpoloinnista ei virhe voi aiheutua, koska alkuperäisessä painovoimakentässä oli havaittavissa myös lievä maksimi, jota operaattorit korostavat. Välillä 2,5 – 2,8 km on melko pienen nopeuden alue, johon johdannaisanomaliaissa oleva minimi ilmeisesti liittyy. Kaikkien operaattoreiden antamat tulokset ovat keskenään yhdenmukaisia.

Tarkemman käsityksen saamiseksi johdannaiskarttojen sisältämästä tietomäärästä määrättiin profiileista nollakohdat, maksimit, minimi ja käännepisteet. Ääriarvoja oletettiin liittyvän alhaisen tai korkean nopeuden yksikköön. Nollakohtien ja käännepisteiden oletettiin paikantavan em. yksiköitä vähintään 150 metrin tarkkuudella. Koska seismiset tulokset ovat yksityiskohtaisempia, vertailu on edelleen melko kvalitatiivinen. Taulukossa 1. on esitetty kaikki analysoitujen profiilien tulokset (Lanne 1976b).

Eniten yksityiskohtia on H-Z-profiileissa, mutta niissä on myös eniten virheellisyksiä. Luotettavin johdannaiskartta näyttää olevan Elkins-kartta, sillä vain n. 15 % profiilien yksityiskohdista on virheellisiä. Vähiten yksityiskohtia löytyy R760-profiileilta.



Kuva 14. Johdannaisanomalioiden ja seismisten tulosten vertailu.

Fig. 14. Comparison between processed anomalies and seismic results.

Taulukko 1. Geologisten yksiköiden paikantaminen johdannaisanomalioiden perusteella.
 Table 1. Determining the location of geological units by derivative anomalies.

	Elkins			Henderson-Zietz			R300			R760		
	Z	E	I	Z	E	I	Z	E	I	Z	E	I
R	16	20	20	21	30	26	17	21	18	8	15	13
W	4	4	8	9	10	16	5	4	11	7	2	7
S	20	24	28	30	40	42	22	25	29	15	17	20
%	80	84	72	70	75	62	77	84	62	53	88	65

Z = nollapiste
 E = ääriarvo
 I = käänne piste

R = oikea paikantaminen
 W = virheellinen paikantaminen
 S = kokonaismäärä
 % = oikeiden paikannusten määrä prosentteina kokonaismäärästä

Suuriin yksiköihin liittyvät ääriarvot ovat kyllä luotettavia, mutta yksiköiden rajaamiseen ei R760-kartta sovellu.

Edellä esitetyillä johdannaiskartoilla on selvä korrelaatio kallion pintaosien rakenteen kanssa. Rapautumat ja ruhjeet aiheuttavat minimeja, kun taas maksimit aiheutuvat tutkimusalueella vulkaniiteista ja albiitti-diabaaseista. On selvää, ettei johdannaisanomalia sisällä mitään uutta verrattuna alkuperäiseen anomaliaan. Alkuperäisen anomaliakartan käyttö yksityiskohtien analysoinnissa vaatii kuitenkin enemmän kokemusta ja työtä verrattuna johdannaiskartan käyttöön.

Aeromagneettisten havaintojen tulkinta

Aeromagneettisten tulkintojen tarkoituksena Vuotoksen alueella olivat Hjeltin ja Heiskasen ohjelmapaketin testaus ja rakennegeologisen tiedon saaminen. Lähtöaineistona olivat 1 : 20000 matalalentokartat, joilta anomalian arvot poimittiin manuaalisesti tulkintaa varten. Profiilien määrä on noin 30 kpl. Ohjelman testausvaiheessa profiilit valittiin alueilta, joilta oli paljastumahavainnointia. Koska erityisesti kaadetiedot helpottavat painovoimatulkintaa ja koska magneettiset tulkintatulokset olivat lupaavia, laajennettiin tulkintaa myös alueille, joilta puuttuivat paljastumat.

Tulkintatulosten geologinen merkitys on kuitenkin monitahoinen. Osa magneettisista anomaliaista aiheutuu liuskekompleksiin kuuluvista kivistä, osa taas lävistävistä kivistä. Anomalian muodon perusteella voi kuitenkin jonkin verran päätellä aiheuttajan tyyppiä. Lävistävät kivet liittyivät usein ruhjeisiin, jotka taas kontrolloivat vulkaniittikompleksin rakennetta. Tulkinnalla saavutettiin siten vulkaniittikompleksia koskevaa rakennetietoa.

Profiilien määrä ei riitä yhtenäisen rakennegeologisen kuvan luomiseen tutkimusalueelta. Kuitenkin liuskelohkon alueella, jolta puuttuivat paljastumahavainnot lähes kokonaan, NW-SE-suuntaisista anomaliaista tulkittujen kaateiden pääasiallinen suunta on 40 – 70 astetta koilliseen. E-W-suuntaisissa anomaliaissa saadut kaateet ovat taas n. 60 astetta etelään. Painovoimatulkinnan yhteydessä todettiin, että mielekkäimmät ratkaisut olivat sopusoinnussa saatujen kaadetietojen kanssa.

Painovoimatulkinnat

Painovoimatulkinnassa keskityttiin vulkaniittilohkon rakenteen selvittämiseen. Lohkoon liittyvän anomalian suuruus ympäristöön nähden on n. 14 mgal. Koska anomalia ei leviä sanottavasti vulkaniittilohkon ulkopuolelle, anomalian aiheuttaja on ilmeisesti matalalla.

Vaikutena tulkinnassa oli tarkkojen tiheystietojen puute. Vulkaniittialueelta on jonkin verran havaintoja, mutta ympäristön tiheys arvioitiin kivilajien mukaisten kirjallisuustietojen perusteella. Vulkaniittialueen tiheyseroksi ympäristöön nähden oletettiin 200 kg/m^3 , mitä on pidettävä pikemminkin liian pienenä kuin suurena arvona.

Koska vulkaniittilohkolla on selvä tiheusero ympäristöön nähden ja koska se muodostaa laajan yhtenäisen alueen, ainakin osa anomaliasta tuli selittyä vulkaniitin avulla. Kokeiltaessa lukuisia vaihtoehtoisia ratkaisuja luontevimmiksi osoittautuivat sellaiset mallit, joissa anomalian aiheuttaja on maanpintaan ulottuva levymäinen kappale. Myös tiheuseron tuli olla melko suuri, vähintään vulkaniittilohkoon liittyvän tiheuseron 200 kg/m^3 luokkaa. Levyn pohjareliefi ei poikkea kovin paljon anomalian muodosta. Etelä- ja luoteisrajalla, missä on jyrkät gradientit, kontakti ympäristöön nähden on melko pysty, $60 - 70^\circ$, ja se kaatuu koilliseen. Sen sijaan lounaisreunalla anomalia kasvaa tasaisesti. Luontevin oletus mallista on loivakaateinen, tasaisesti vahveneva laatta. Anomalia selittyi hyvin myös malleilla, joissa anomalia vahveni terassimaisesti yhdellä tai kahdella portaalla. Vulkaniittilohkon paksuudeksi saatiin noin 1,5 km käytettäessä edellä oletettua tiheuseroa.

Koska tulkintaan liittyi melko paljon epävarmuutta, alueella suoritettiin magnetotelluurisia luotauksia. Niiden mukaan vulkaniittiyksikön paksuus olisi vain noin kilometrin luokkaa. Tiheyseroksi tulisi noin 300 kg/m^3 , jota ei voida pitää liian korkeana arvona vulkaniittilohkolle. Edellä esitetyn nojalla anomalia voidaan selittää pääosiltaan vulkaniittilohkon aiheuttamaksi. Kontakti ympäristöön nähden näyttää myös magnetotelluuristen tulosten valossa varsin jyrkältä.

Magnetotelluuriset luotaukset Jauratsin alueella

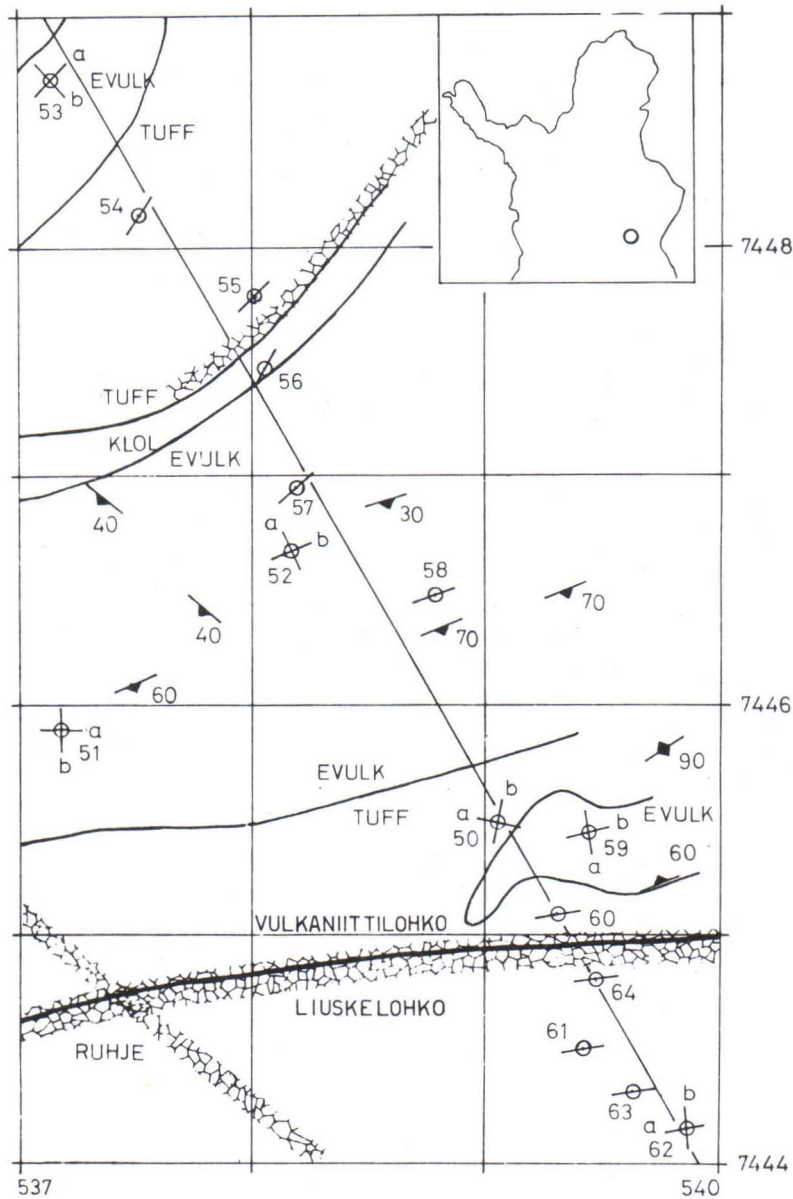
Vulkaniittiyksikköä tutkittiin myös magnetotelluurisin luotauksin Jauratsin suunnalla (Lanne & Pelkonen, 1976). Niillä pyrittiin selvittämään samaa asiaa kuin painovoimatulkinnalla ts. vulkaniittiyksikön paksuutta. Koska menetelmä on uusi Suomessa, luotauksilla oli oma arvonsa myös menetelmäkokeiluna.

Luonnon magneettikentän vaihtelut indusoivat maankamaraan sähkömagneettisen kentän. Magnetotelluurinen menetelmä perustuu indusoituneen kentän vaihtelujen mittamiseen. Vaihtelujen voimakkuus ja tunkeutumissyvyys riippuvat vaihtelujen taajuudesta, maankamaraan sähkönsäilytyksestä ja geologisesta rakenteesta.

Tutkimuksessa käytetty laitteisto oli ranskalaisvalmisteinen Resistivimetre Magneto-Tellurique (ECA 541-10). Se toimii yhdeksällä kiinteällä taajuudella ja mittaustuloksena saadaan näennäinen ominaisvastus.

Koska Jauratsin alueella tuli selvittää sekä horisontaalista että vertikaalista rakennetta, suoritettiin pisteluotauksia vulkaniittilohkon ja liuskelohkon kontaktin yli menevällä profiililla (kuva 15). Anisotropian ja vertikaalisten kontaktien vaikutuksen selvittämiseksi osa luotauksista suoritettiin ristikkäisinä.

Mittaustulokset tulkittiin käyttäen tietokonepohjaista kerrosmallitulkintaa. Tulkin-tojen perusteella laadittu rakennemalli on kuvassa 16. Yksiköt perustuvat saatuihin omi-

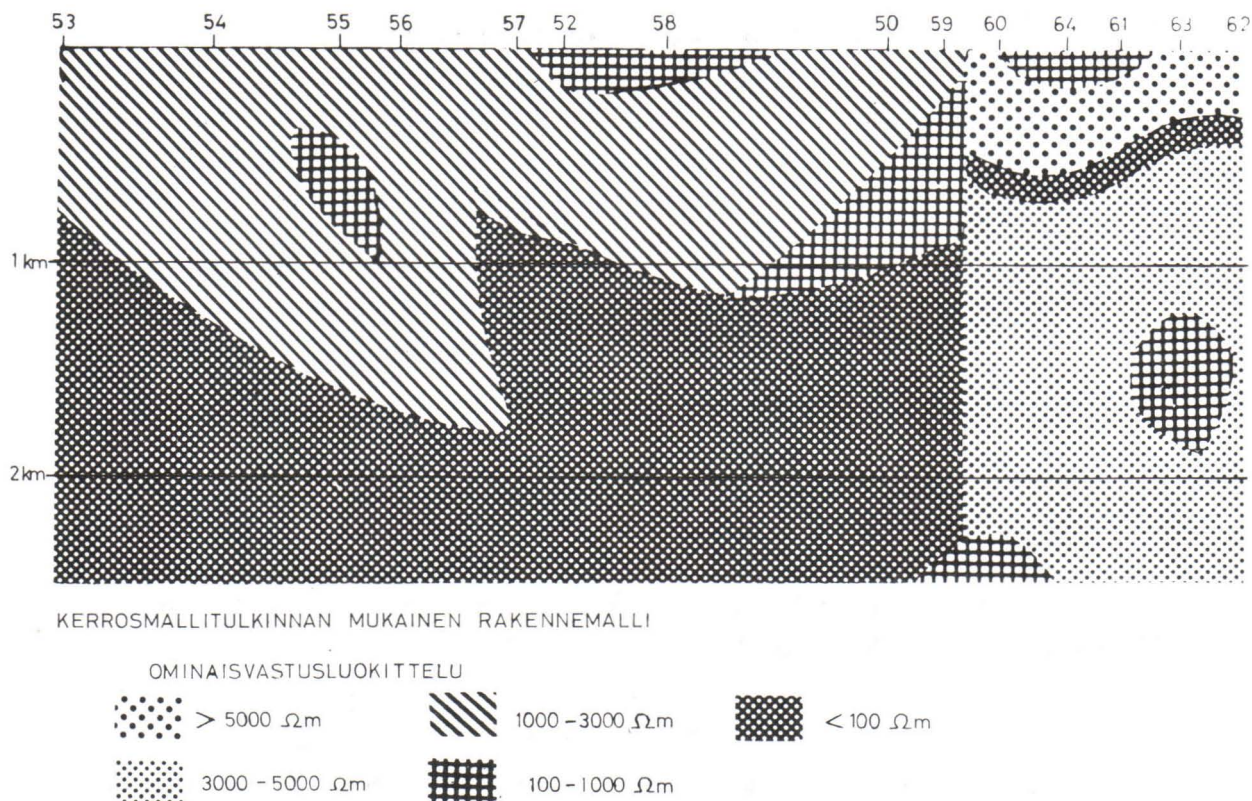


Kuva 15. Magnetotelluuristen luotauspisteiden sijainti ja geologinen kartta.
 Fig. 15. Locations of magnetotelluric sounding stations and geological map.

naisvastusarvoihin ja kerrossyvyksiin. Mallissa oleviin yksityiskohtiin tulee suhtautua varovasti, sillä ne ovat todennäköisesti vääristyneitä puutteellisten tulkintamenetelmien vuoksi.

Vulkaniittilohkon alueella esiintyy emäksisille vulkaniiteille tyypillisiä ominaisvastuksia 1500 – 3000 m:n syvyydessä. Noin kilometrin syvyydessä todetun johdekerroksen ominaisvastus poikkeaa selvästi vulkaniitin ominaisvastuksesta.

Painovoimatulkinnalla on vulkaniittilohkon paksuudeksi saatu n. 1,5 km, jota on pidettävä pikemminkin liian paksuna kuin ohuena. Edellä esitetyn perusteella johdekerroksen yläpuolella oleva 1500 m – 3000 m:n kerros on ilmeisesti vulkaniittiyksikkö.



Kuva 16. Kerrosmallitulkinnan perusteella laadittu rakennemalli.

Fig. 16. Structural model corresponding to layer model interpretation of magnetotelluric soundings.

Vulkaniittiyksikön alla olevaa johdekerroksen koostumusta ei tehtyjen mittausten perusteella voi päätellä. Koska vulkaniittiyksikön läheisyydessä on laajoja alueita mustaliusketta ja sillä on poikkeuksellisen alhainen ominaisvastus, eräs mahdollisuus voisi olla juuri mustaliuske.

Liuskelohkon alueella kivilajipäätelmien teko on hankalampaa. Johdekerroksen yläpuolella todetut suuret ominaisvastukset ja kairauksin todetut kvartsiitit saattavat liittyä toisiinsa.

Vaikka magnetotelluuristen luotausten vaatima aika projektin koko toiminnassa olikin vähäinen verrattuna muihin tehtäviin, luotauksista saadut kokemukset ovat merkittäviä. Muutamien kilometrien syvyyteen ulottuvien rakenteiden tutkimuksessa lähes ainoita menetelmiä ovat olleet painovoimatulkinta ja seismiset luotaukset. Seisminen menetelmä on kallis ja painovoimatulkintojen haittana on tulosten epämääräisyys. Magnetotelluurinen menetelmä on varteenotettava mahdollisuus sekä itsenäisenä että edellisten kanssa käytettynä menetelmänä maankuoren tutkimuksessa. Menetelmä on halpa, mutta sen soveltamisesta Suomessa pitää kerätä vielä kokemuksia.

Jauratsin alueella menetelmää käytettiin painovoimatulkintojen tarkistamiseen. Vaikka geologinen rakenne yksityiskohdissaan onkin monimutkainen, saadut tulokset ovat tyydyttävästi sopusoinnussa maanpintahavaintojen ja painovoimatulosten kanssa.

KITILÄN VIHREÄKIVIALUEEN TUTKIMUKSET

Tulkintaprojektin toinen tutkimusalue oli Keski-Lapin liuskealueeseen kuuluva Kittilän vihreäkivikompleksi. Muodoltaan monihaarainen kompleksi sisältää pääasiassa emäksisiä vulkaniitteja. Stratigrafisesti vulkaniittikompleksi sijaitsee alimpana heti pohjekompleksina olevan graniittigneissin päällä. Vulkaniittialueen yksityiskohtainen kivilajikoostumus on hyvin heterogeeninen. Painovoimatulkinnan kannalta aluetta voidaan kuitenkin käsitellä kokonaisuutena, sillä tiheydet ovat alueella varsin yhtenäiset.

Vulkaniittikompleksin reuna-alueilla esiintyy sekä emäksisiä että happamia liuskeyksiköitä, jotka sisältävät grafiittipitoisia kerroksia, sekä kvartsiitteja. Reunaosille tyypillisiä ovat myös graniittiset intruusiot.

Tulkintaprojektin tavoite Kittilän alueella oli vulkaniittikompleksin syvyysulottuvuuden ja kolmiulotteisen muodon selvittäminen. Pääasiallisimmaksi menetelmäksi asetettiin painovoimatulkinta. Projekti käytti hyväksi myös magneettisia tulkintoja rakennegeologisten tietojen saamiseksi pintaosista. Tutkimusmenetelmä, jota kannattaisi kokeilla, on magnetotelluurinen luotaus.

Kittilän alueen tutkimukset voidaan jakaa seuraavasti: magneettiset tulkinnat, petrofysikaaliset tutkimukset ja painovoimatulkinta.

Magneettiset tulkinnat

Magneettisten tulkintojen päätavoitteena oli rakennegeologisen tiedon saaminen. Kokeiltiin aeromagneettisten anomalioiden malmikriittisyyden testaamista tulkintaa hyväksikäyttäen. Menetelmä esitellään oheisena.

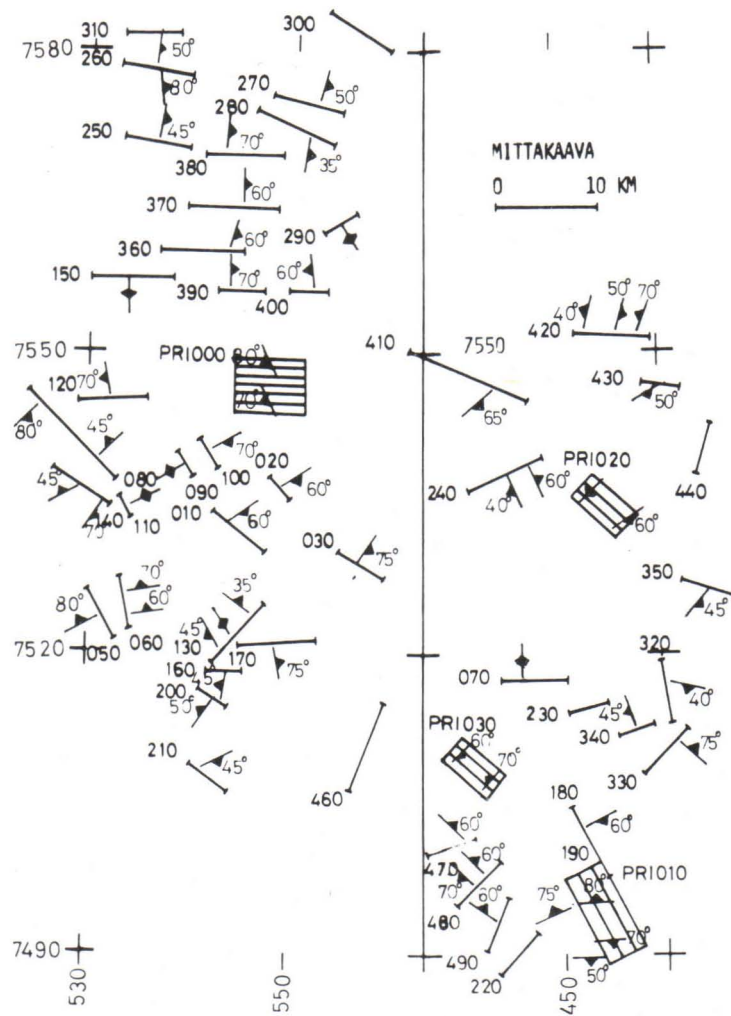
Kittilän alueella magneettisten tulkintojen lähtöaineistona olivat Geologisen tutkimuslaitoksen 150 metrin korkeudelta lennetyt aeromagneettiset havainnot. Tulkintaprofiilien määrä on noin 50 kpl ja niiden sijainti on esitetty kuvassa 17. Vihreäkivikompleksia koskevan painovoimatulkinnan kannalta mielenkiintoisin tieto on kaade, sillä muu tulkinnalla saatava tieto on liian yksityiskohtaista. Tulkinnan mukaan saadut kaateet on merkitty myös kuvassa 17. Sen sijaan yksityiskohtaisemmassa geologisessa tutkimuksessa tulkintatulosten perusteella voitaisiin arvioida magnetoituneen alueen leveyttä, magnetoitumista sekä sen jakaumaa anomalian aiheuttajan sisällä.

Alueilla, joilta oli kenttähavainnoja, tulkinnan mukaiset kaateet olivat varsin yhdenmukaisia kerroksellisuuden kaateen kanssa. Vihreäkivialueelta kenttähavainnot usein kuitenkin puuttuivat, koska anomalian aiheuttajien kohdalla oli suota tai vesistöjä.

Aeromagneettisten anomalioiden tulkinta magneettisten malmien etsimisessä

Vaikka malmit aiheuttavatkin geofysikaalisia anomalioita, niitä on yleensä mahdollista erottaa kivilajianomalioidista. Geofysiikan hyöty malminetsinnässä onkin yleensä epäsuora; geofysiikan avulla saadaan rakennegeologista tietoa, jota sitten käytetään malmin geologisen aseman selvittämiseen (Lanne, valmisteilla).

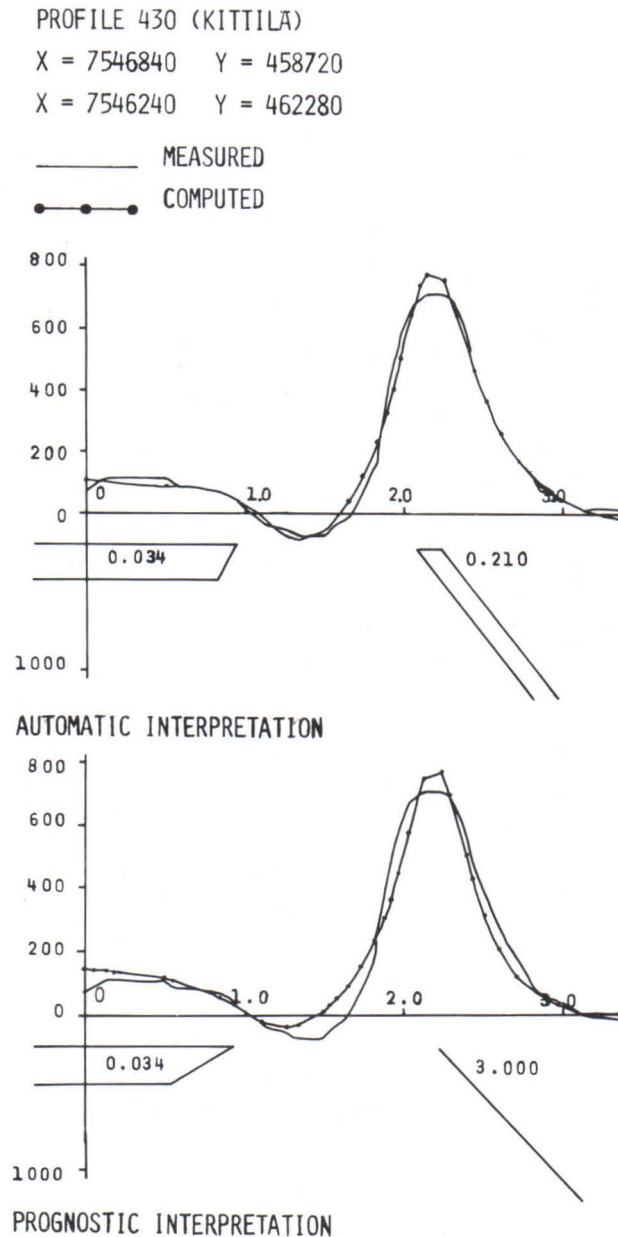
Magneettisten anomalioiden riittävän yksityiskohtaisella tulkinnalla voidaan kuitenkin ratkaista, aiheutuuko anomalia kompaktista, mutta voimakkaasti magnetoituneesta lähteestä vai suuresta heikosti magnetoituneesta kappaleesta. Edellisessä tapauksessa anomalian saattaa aiheuttaa malmi.



Kuva 17. Yleiskuva Kittilän alueen magneettisista tulkinnoista.
 Fig. 17. Survey of magnetic interpretations in Kittilä area.

Tutkittaessa Kittilän vihreäkivialueen aeromagneettisia anomaliaita rakennegeologisen tiedon saamiseksi automaattisen tulkintaprosessin tulokseksi tuli muutamia malleja, jotka sisälsivät voimakkaasti magnetoituneita kappaleita. Mikään tulkintatuloksista ei sellaisenaan antanut malmikriittisiä susceptibiliteettiarvoja. Tulos on ymmärrettävä, koska ohjelma etsii automaattisessa tulkinnassa mallikappaleita, jotka ovat mahdollisimman lähellä pintaa, mahdollisimman laaja-alaisia ja heikosti magnetoituneita. Pääasiassa satunnaisvirheiden vuoksi mitatun ja lasketun anomalian yhteensopivuus ei enää parantunut tietyn laskenta-ajan jälkeen. Automaattisen tulkinnan tuloksena saadaan siis malminetsinnällisesti mahdollisimman pessimistisiä tuloksia.

Tulkinnan tuloksena saadut suhteellisen voimakkaasti magnetoituneet kappaleet korvattiin kappaleilla, joille asetettiin malmin esiintymisen kannalta mielenkiintoinen susceptibiliteetti. Uusintatulkinta osoitti, kuinka hyvin uusi, malmikriittinen malli toteutti anomalian.



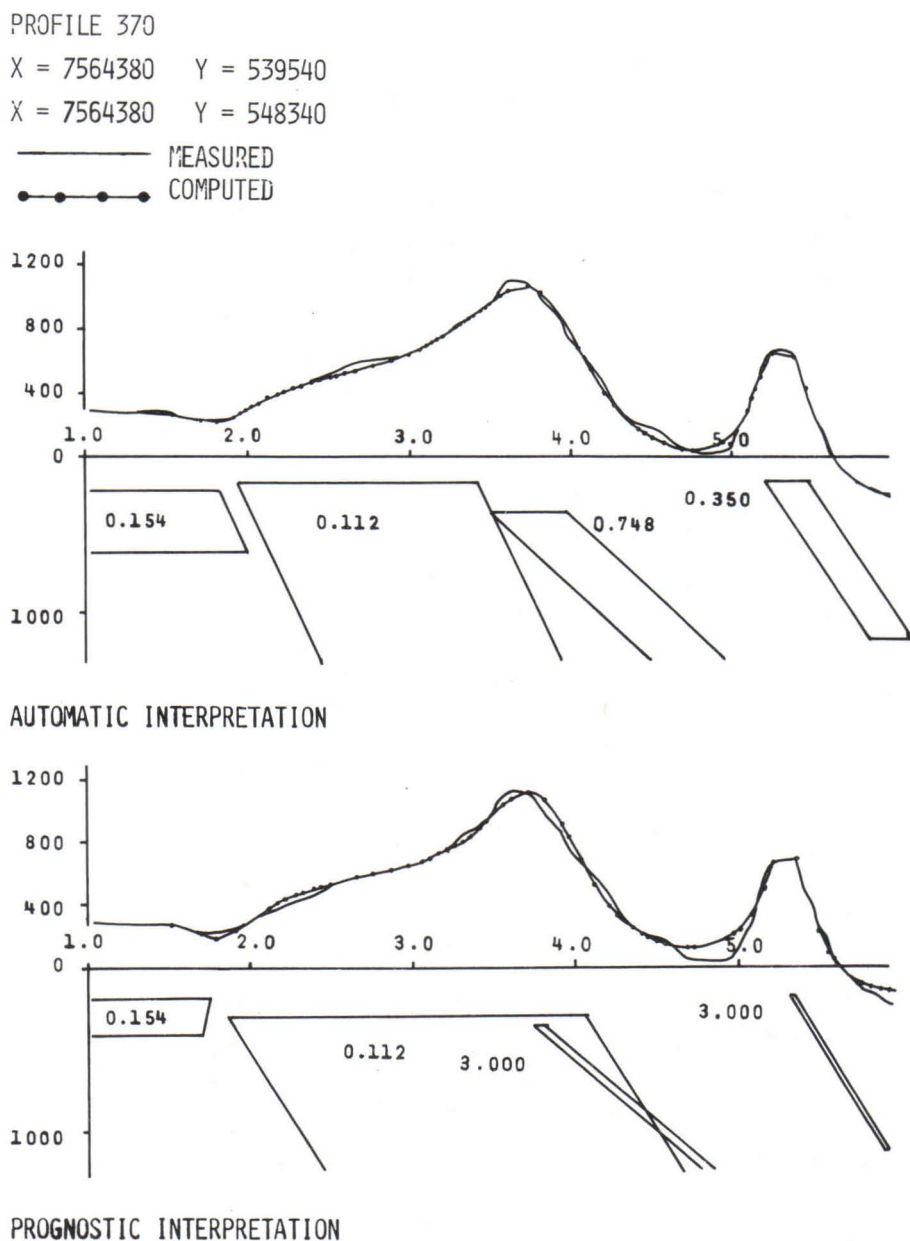
Kuva 18. Automaattinen magneettinen tulkinta ja malmikriittinen prognostinen tulkinta.
Fig. 18. Automatic magnetic interpretation and ore-critical prognostic interpretation.

Jos uusintatulokinnassa yhteensopivuus on huonompi, ei anomalia todennäköisesti aiheudu suoranaisesti kompaktista malmista. Tulos voi olla myös muuten epätydyttävä: esim. anomalian aiheuttaja on liian syvällä.

Seuraavassa esitellään kaksi esimerkkiä profiileista, joilla tavattiin suuria susceptibiliteetteja. Prognosiotulkinnassa käytettiin susceptibiliteettia 3, mikä vastaa n. 30 %:n magnetiittipitoisuutta.

Profiililla 370 (kuva 17) anomalian aiheuttajat ovat tulkinnan mukaan jo kaikenkaikkiaan voimakkaasti magnetoituneita (kuva 18). Voimakkaimmin magnetoitunut kap-

pale sijaitsee n. 3800 m:n kohdalla, jossa susceptibiliteetti vastaa n. 10 %:n FEM-pitoisuutta. Myös 5300 m:n kohdalla on melko kompakti kappale. Prognosiotulkinnassa yhteensopivuus on säilynyt. Susceptibiliteetin 0,112 omaava kappale on levinnyt siten, että magnetoitunut alue ulottuu n. 4000 metriin kuten alkuperäisessäkin tulkinnassa. Sensijaan 5300 m:n kohdalla olevan kappaleen anomalian prognosiotulkinta on heikompi kuin alkuperäinen. 3800 m:ssä olevan kappaleen yläpinta on lähes 350 m:n syvyydellä mittaus-tasosta eli n. 200 m maanpinnasta.



Kuva 19. Automaattinen magneettinen tulkinta ja ei-malmikriittinen prognostinen tulkinta.
 Fig. 19. Automatic magnetic interpretation and non-orecritical prognostic interpretation.

Sen sijaan profiililla 430 uusintatulkinta ei onnistunut huolimatta siitä, että anomalia selittyy melko kapella suuren susceptibiliteetin omaavalla levyllä (kuva 19). Jos anomalia tulkitaan malmin aiheuttamaksi, on yhteensopivuus selvästi huonompi.

Projektin puitteissa ei ollut mahdollisuuksia tarkistaa anomalioiden todellista aiheuttajaa. Koska aeromagneettinen anomalia on jo huomattavasti tasoittunut verrattuna esim. maanpinnalla havaittavaan kenttään, tulkintatulos antaa yksinkertaistetun kuvan häiriön aiheuttajasta. Vaikka tulos olisikin mielenkiintoinen, maanpinnalta tehdyt geologiset ja geofysikaaliset tutkimukset ovat välttämättömiä esim. kairaussuunnitelmaa laadittaessa. Myös maanpintamittausten tulkinnalla voidaan tarkentaa kohteen rakennegeologista kuvaa.

Vaikka jatkotutkimuksissa todettaisiinkin esim. magnetiittipirotetta, tulee kvantitatiivisesti tarkistaa, riittääkö pirote aiheuttamaan todetun anomalian.

Petrofysikaalisten suureiden määrittäminen

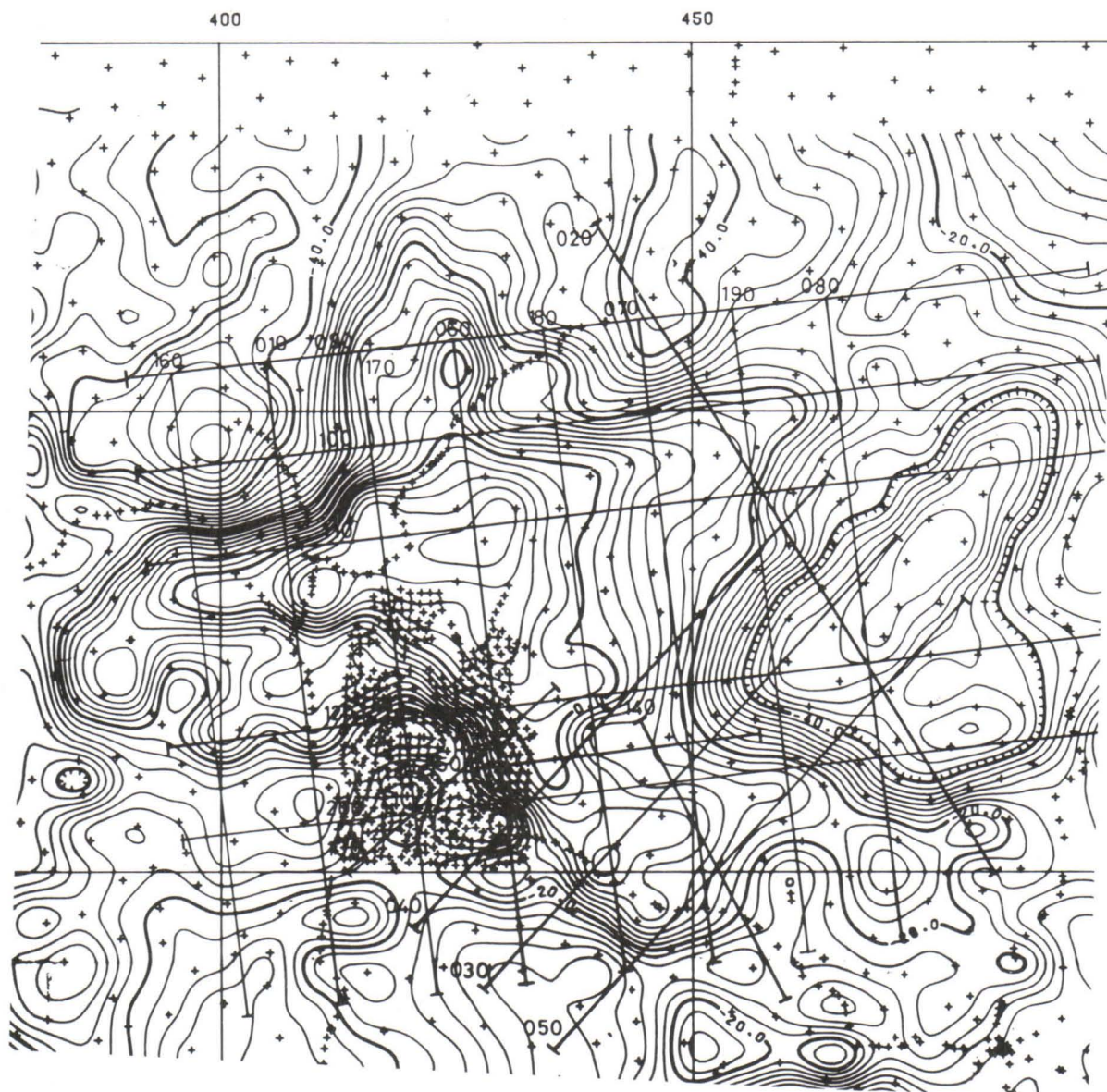
Kvantitatiivisen tulkinnan luotettavuus riippuu suuresti tulkinnassa käytettävien materiaalivakioiden tuntemuksesta. Projektin käyttämät petrofysikaaliset tiedot perustuivat kirjallisuustietoihin, eri organisaatioiden aineistoon sekä itse tehtyihin määrittämiin. Projektissa tehdyt työt ovat petrofysikaalisten näytteiden keräys ja maavastusluotaukset.

Maavastusluotauksilla selvitettiin vihreäkivikompleksin ominaisvastusoloja magnetotelluurisia luotauksia silmällä pitäen. Luotauksia koskevassa raportissa (Pernu & Lanne, 1976) tosin epäillään magnetotelluurisen menetelmän soveltuvuutta vihreäkivikompleksin paksuuden tutkimukseen. Epäily perustuu kuitenkin olettamukseen vihreäkivikompleksin suuremmasta paksuudesta nykyiseen käsitykseen verrattuna.

Tärkeimmät projektin tarvitsemat petrofysikaaliset tiedot olivat tiheystiedot painovoimatulkintaa varten. Näiden tietojen hankkimiseksi kerättiin kiviä näytteitä Kittilän vihreäkivialueelta ja sen ympäristöstä. Näytteistä määrättiin tiheys ja susceptibiliteetti. Susceptibiliteettiarvoista ei tosin ollut suoranaista hyötyä projektille, koska näytetiheys oli liian harva magneettisia tulkintoja varten. Koska määrittäminen ei vaatinut sanottavasti lisätyötä, sitä suoritettiin mahdollista myöhempää käyttöä varten. Yleisimpien alueen kivilajien tiheydet ja susceptibiliteetit ovat taulukossa 2.

Taulukko 2. Tavallisempien kivilajien tiheydet ja susceptibiliteetit.
Table 2. The densities and susceptibilities of general rocks.

Kivilaji	Lukumäärä	Tiheys (kg/m ³)		Susceptibiliteetti SI-yksiköt
		keskiarvo	hajonta	
Albiittidiabaasi	7	2980	50	0.0180
Amfiboliitti	54	3040	100	0.0019
Emäkiset vulkaniitit (ei AFB)	117	2900	100	0.0022
Gabro	8	3140	110	0.0155
Gneissi	8	2680	50	0.0016
Gneissigraniitti	11	2660	30	0.0013
Graniitti	69	2640	30	0.0027
Graniittigneissi	32	2690	70	0.0018
Granodioriitti	3	2720	60	0.0122
Karbonaattikivi	4	2800	100	0.0024
Kiilleliuske	12	2830	100	0.0026
Konglomeraatti	10	2810	50	0.0262
Kvartsiitti	42	2680	50	0.0008
Tuffiitti	8	2810	50	0.0024

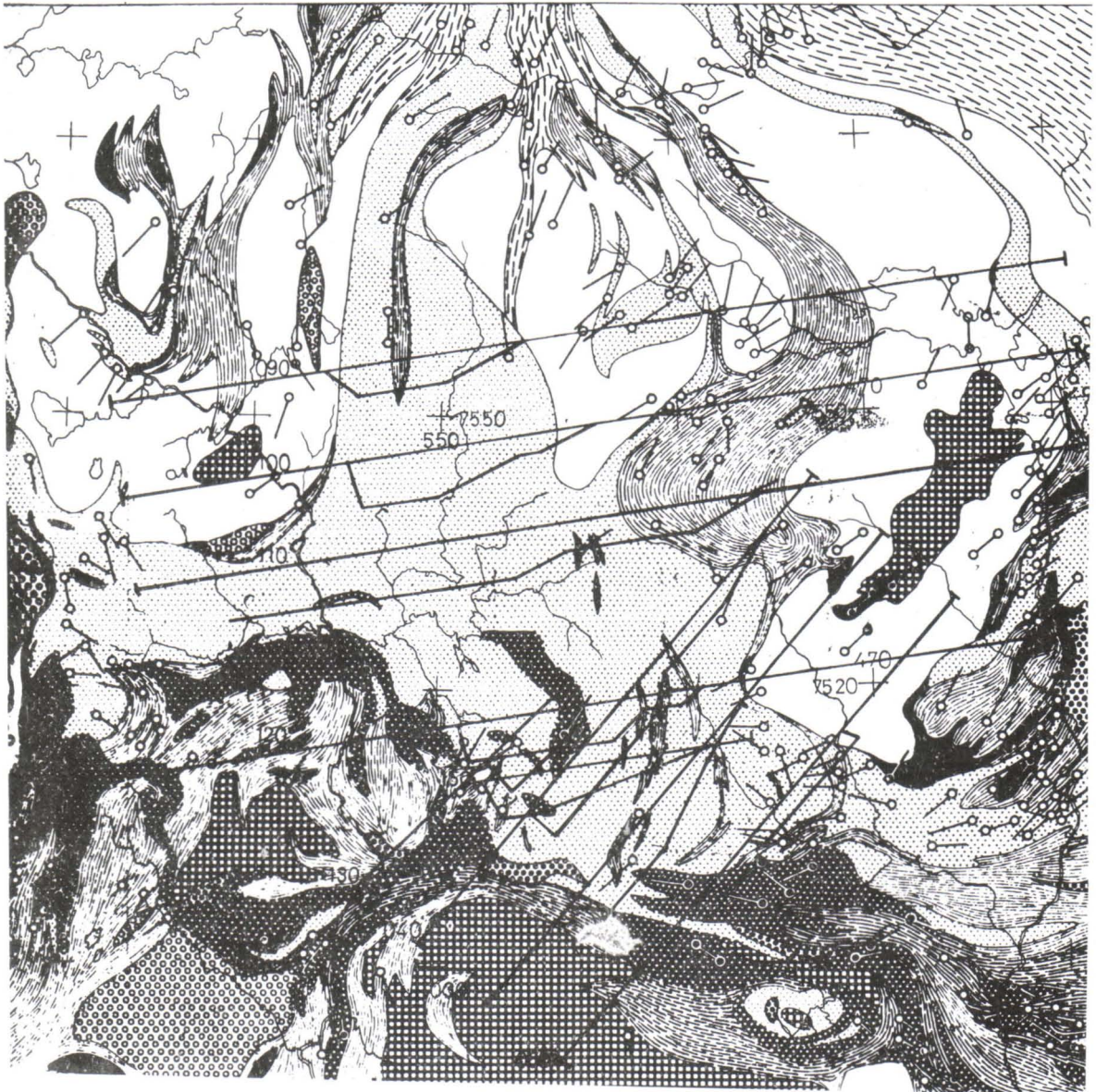


Kuva 20. Kittilän alueen Bouguer-anomaliakartta (Geodeettinen laitos).
 Fig. 20. Bouguer anomaly map of Kittilä area (Finnish Geodetic institute).

Alueen kivilajaista aikaisemmin tehtyjen mineraalimääritysten mukaan lasketut tiheydet ovat hyvin sopisoinnussa suoraan määrittäen tiheyksien kanssa. Sen perusteella on ymmärrettävää, että lukuunottamatta amfiboliittia emäksisten vulkaniittien (vihreäkivi, vihreäliuske, kloriittiliuske jne.) tiheydet eivät juuri poikenneet toisistaan. Emäksisillä vulkaniiteilla tiheyden keskiarvoksi tuli 2900 kg/m^3 .

Ympäristön kivilajeilla on pienin tiheys graniitilla, 2640 kg/m^3 . Sen jälkeen tulee gneissigraniitti 2660 kg/m^3 ja graniittigneissi 2690 kg/m^3 . Liuskekompleksiin kuuluvista kivistä kvartsiitin tiheys on 2680 kg/m^3 ja kiilleliuskeen 2830 kg/m^3 .

Kivilajien keskitiheyden luotettavuutta ei kuvaa niinkään kivinäytteistä määrittäen tiheyksien hajonta vaan keskiarvon keskivirhe, joka riippuu sekä hajonnasta että näytteen määrästä. Amfiboliitilla keskiarvon keskivirhe on 14 kg/m^3 ja muilla emäksisillä vulkaniiteilla 9 kg/m^3 . Graniittigneissillä se on 12 kg/m^3 ja graniitilla 4 kg/m^3 .



Kuva 21. Kittilän vihreäkivikompleksin painovoimatulkinta. (E-W suuntaiset profiilit).
 Fig. 21. Gravity interpretation of Kittilä greenstone complex (Profiles in E-W direction).

Kittilän alueen painovoimatulkinta

Kittilän vihreäkivialueella on voimakas, ympäristöönsä nähden positiivinen painovoima-anomalia, (kuva 20). Projektin eräänä tehtävänä oli selvittää tämän anomalian ja vihreäkivikompleksin välistä riippuvuutta.

Perusolettamuksen mukaan anomalia tuli selittää vihreäkivien ja ympäristön välisellä tiheyserolla. Mikäli selitys ei vaikuttaisi luontevalta, tulisi etsiä muita selitysmalleja.

Tulkintamallien luonne riippuu oleellisesti valitusta nollatasosta. Kittilän alueella vulkaniittikompleksiin liittyvän anomalian lisäksi kompleksin haarakkeiden välissä on selvät minimi. Nollataso Kittilän alueella määrättiin seuraavasti. Valittiin sellaisia paino-



Kuva 22. Kittilän vihreäkivikompleksin painovoimatulkinta. (N-S suuntaiset profiilit).
 Fig. 22. Gravity interpretation of Kittilä greenstone complex (Profiles in N-S direction).

voimakentän arvoja, jotka eivät olleet selvästi anomaalisia. Niiden kautta sijoitettiin regressioanalyysin avulla polynomipinta, jonka oletettiin kuvaavan nollatasoa. Valitsemalla polynomipinta pyrittiin ottamaan huomioon nollatasossa mahdollisesti oleva kaarevuus. Saatu nollataso on kuitenkin alueella melko tasainen vaihdellen $-25 - -30$ mgal välillä.

Sivumennen mainittakoon, että nollataso korreloi selvästi granuliittikaaren kanssa, vaikka granuliittialueeseen liittyviä arvoja ei nollatasoa laskettaessa käytettykään.

Painovoima-anomaliat aiheutuvat maankamaran tiheysvaihteluista. Sen vuoksi alueelle oli määrättävä referenssi tiheys, jonka suhteen kivilajien tiheyserot laskettiin.

Painovoimakartassa, joka oli korjattu nollatason suhteen, kentän nolla-arvot sattuivat likimain alueille, joilla oli graniittigneissiiä. Toisaalta graniittigneissi muodostaa pohjan, jolle sedimenttiset kivet ja vulkaniitit ovat kerrostuneet. Edellä esitetyn perusteella referenssiarvoiksi valittiin graniittigneissin tiheys 2690 kg/m^3 ja muihin kivilajeihin liittyvät tiheyserot laskettiin sen suhteen.

Emäksisiin vulkaniitteihin liittyväksi tiheyseroksi tulee n. 200 kg/m^3 lukuun ottamatta amfiboliittia, jolla se on 350 kg/m^3 . Graniitteihin liittyy selvä negatiivinen tiheys -50 kg/m^3 .

Tiheyksien keskiarvojen keskiarvoista saadaan tiheyserojen luotettavuus. Emäksisillä vulkaniiteilla tiheyseron hajonta on 7 %:n luokkaa ja amfiboliitilla 5 %. Graniitin ja graniittigneissin pienen tiheyseron vuoksi graniittiin liittyvän tiheyseron virhe on 25 %. Kvartsiittiin liittyvä tiheysero -10 kg/m^3 peittyy satunnaisvirheisiin. Liuskeiden koostumus ja tiheys tunnetaan heikosti. Arvioidaan, että niihin liittyvät tiheyserot ovat $100 - 150 \text{ kg/m}^3$.

Anomalian muodon vuoksi tulkintaprofiilien sijoittamiselle ei ollut mitään selvästi muita edullisempaa suuntaa. Profiilit pyrittiin sijoittamaan siten, että ne kuljivat anomalian haarakkeiden poikki (kuva 20). Profiilit interpoloitiin käyttäen Vuotoksen aluetta varten kehitettyä ohjelmaa. Hankalasta muodosta huolimatta vihreäkivialueeseen liittyvä anomalia ei ole kovin vaikea tulkita. Esitettyjen tiheyserojen, nollatason ja vihreäkivi-alueen maanpinnalla todettujen ulottuvuuksien perusteella anomalia selittyy ohuehkolla n. 5 km paksulla vihreäkivilaattalla. Anomalian keskialueella Bouguer-laatta approksimoi varsin hyvin anomalian aiheuttajaa. Reuna-alueellakin riittää varsin usein kaksiulotteisen tulkinnan tarkkuus. Tulkinnat suoritettiin käyttäen Hjeltin ja Heiskasen tulkintaohjelmistoa. Tulkintatulokset on esitetty kuvissa 21 ja 22. Syvyyskaala on sama kuin kartan horisontaaliskaala.

Tulkinnan tarkkuus riippuu useista seikoista. Tiheyserojen satunnaisvirheistä vulkaniittikompleksin laskettuun paksuuteen aiheutuu alle 10 % keskimääräinen virhe. Nollatason ja syvyysuunnassa tapahtuvista tiheysvaihteluista aiheutuvaa virhettä on vaikea arvioida. Mittauspisteistön tiheys rajoittaa reunaosien yksityiskohtaista tulkintaa. Tihennetyllä alueella pistetiheys on kuitenkin riittävä. Pohjareliefissä E-W-suuntaisissa profiileissa todettava terassimainen oheneminen saattaa pitää paikkansa, mutta harva pistetiheys rajoittaa anomalian tuntemista riittävän yksityiskohtaisesti.

SUOSITELTAVIA JATKOTUTKIMUKSIA

Projekti on tuottanut myös aineistoa, jota ei ole täysin voitu käyttää hyväksi. Aineistoa voidaan kuitenkin käyttää hyväksi geofysiikan laitoksen tutkimuksessa ja ope- tuksessa. Seuraavassa luetellaan eräitä tutkimusaiheita, joihin projekti olisi erityisesti halunnut paneutua, mutta jotka olisivat edellyttäneet huomattavasti lisää voimavaroja.

Tulkintatulosten geologinen arviointi: Tulkintatulosten perusteellinen analysointi olisi edellyttänyt paitsi päätoimista geologista asiantuntijaa, myös huomattavan osan projektin geofysiikan työajasta. Projektin alkuperäiset tavoitteet olisivat saattaneet jäädä silloin kokonaan saavuttamatta.

Aeromagneettisten tulkintojen rakennegeologinen merkitys: Magneettisten tulkintojen yksityiskohtaisempaa rakennegeologista merkitystä voitaisiin selvittää. Testialueilta tulisi yhtenäisen geologisen tiedon olla kuitenkin yksityiskohtaisempaa kuin magneettisista havainnoista todennäköisesti saatava tieto.

Aeromagneettisten tulkintojen käyttö magneettisten malmien etsimisessä: Prognositulkintoja pitäisi suorittaa tunnetuista rautamuodostumista, jolloin saataisiin käsitys tulkintojen luotettavuudesta.

Magnetotelluuriset luotaukset: Erityisesti Kittilän vihreäkivikompleksin rakenteen selvittämiseksi voisi suorittaa magnetotelluurisia luotauksia. Luotauksia voisi käyttää osin itsenäisenä menetelmänä, osin muiden menetelmien käytön suunnittelussa. Painovoiman havaintoverkoston tihentäminen kannattaa suunnata sinne, missä myös magnetotelluurisella menetelmällä on mahdollista saada asianmukaisia tuloksia. Jos Suomessa tehdään syväseismisiä luotauksia, asemien sijoittelussa tulisi ottaa huomioon geologisen rakenteen monimutkaisuus. Magnetotelluurisella ja gravimetrisellä tulkinnalla voitaisiin tarkistaa, etteivät maankamaran pintaosien epähomogeenisuudet vääristä tuloksia kohtuuttomasti.

Painovoimatulkinnat: Geodeettisen laitoksen havaintojen Pohjois-Suomesta olevan nykyisen pistetiheyden perusteella painovoimatulkintoja voitaisiin suorittaa mm. seuraavista kohteista: Keski-Lapin graniitti, granuliittialue, sekä suurimmat liuskekompleksit. Välttämättömänä edellytyksenä ovat kuitenkin petrofysikaaliset ja geologiset tiedot, sillä anomalioiden aiheuttajien vaakaulottuvuudet ovat todennäköisesti huomattavasti suurempia kuin syvyysulottuvuus. Painovoimatulkinnan tulokset tulisi tarkistaa muilla syvärakenteiden tutkimusmenetelmillä.

Tulkintamenetelmien kehittämisestä: Tulkintamenetelmiä laadittaessa ne tulee testata aluksi teoreettisilla malleilla. Kuitenkin tulkintamenetelmien käytännöllinen arvo selviää vasta todellisten havaintojen tulkintatuloksista. Muodollisen fysikaalimatemaattisen tulkinnan tekeminen ei yleensä ole ongelma; ongelma on matemaattisfysikaalisen tulkinnan ja geologisen rakenteen yhteensopivuuden saavuttaminen.

Summary

ON THE INTERPRETATION OF GEOPHYSICAL DATA FROM THE VUOTOS AND KITTILÄ AREAS, NORTHERN FINLAND

The geophysical interpretation project of Northern Finland began April 1, 1974 and ended Dec. 31, 1976. It was under the supervision of the Ministry of Commerce and Industry and carried out by the Department of Geophysics, University of Oulu. The aim was to obtain geological information by interpretation of geophysical data. Apart from the interpretation itself, the project called for the development of computerized processing methods and the collection of petrophysical data. The main research material consisted of gravity and magnetic data. The research targets of Vuotos in Pelkosenniemi and the Kittilä greenstone complex belong to the schist area of Central Lapland.

A program was worked out for the automatic gravity and magnetic interpretation using as the basic model a thick inclined sheet or prism. The actual interpretation model consists of one or several basic models. The points of correlation between the model anomaly and the actual observations are sought automatically. Thus the package is applicable to the interpretation of complicated geological structures.

In the Vuotos area (c. 600 km²), there occur schists, quartzites and carbonate rocks. There is a volcanic unit, which causes a prominent gravity anomaly. Gabros and diabases intrude the schists. There are ore mineralizations, too. The area is in places very poor in outcrops and the information about the structural geology for the purpose of gravity interpretation was obtained by the interpretation of aeromagnetic data. The number of gravity observations was over 32 000 and they were transformed from field data into suitable form for ADP. For the proper interpretation and processing, profiles and a regular grids were interpolated. The interpolation system developed comprises, in addition to the interpolation itself, the filtering and reduction of the number of original data.

Spectrum analysis and model interpretation were applied to the gravity data. The data processed to form the residual and second-derivative maps. The application of spectrum analysis to the interpretation seems to be troublesome because of the fortuitous character of the time spectrum. Conversely, the spectrum analysis offers a good tool to estimate the proportion of random variations in the gravity data. Simulated spectra show that short wave length gravity anomalies are to a great extent caused by underground rock topography. So the correlation between the gravity observations and the geology depends on the morphological phenomena. The results of the spectrum analysis were taken into consideration in the filtering of the original gravity data.

Second-derivative and residual anomaly maps were compiled by using various sets of coefficients. The theoretically good weighting method of Henderson and Zietz puts strong emphasis on details, unfortunately on random errors, too. A theoretically inferior method was developed by Elkins, but the results obtained were most reliable. The use of residual anomaly maps calls for experience, since the properties depend greatly on the radius by which the refraction seismic soundings of the map are used as reference material.

According to the gravity interpretation, the thickness of the volcanic unit is about 1.5 km. The contacts with the surroundings are quite sharp and probably limited by faults. Because the density contrast was inadequately known, the thickness value was not reliable.

The gravity interpretation was checked by carrying out magnetotelluric soundings, which proved that the thickness was correct. Furthermore, the magnetotelluric soundings revealed a thick horizon of moderate conductivity, which was assumed to be a black schist horizon.

Another area investigated was the Kittilä greenstone complex. On the basis of the experience gained in the Vuotos area, the information on the structural geology was extended by magnetic interpretation. For gravity interpretation, petrophysical samples were collected from the complex itself and its surroundings. The mean density of the complex is 2900 kg/m^3 , while the density of the obvious basement complex (i.e., granitic gneiss) is 2690 kg/m^3 . The positive gravity anomaly adjoining the multi-branched greenstone complex is highly complicated, because local minima occur between the branches. The minima seem to be associated with the granitic intrusions. For interpretation, the zero level of the field was chosen on the basis of value associated with granitic gneiss. The density of the granitic gneiss was used as reference density. According to the quantitative interpretation and the densities arrived at, the volcanic complex is a horizontal plate. It is thickest in the western branch, where it is over 5 km thick, but it thins down eastwards. The relief of the basement complex is possibly terracelike or folded. The contacts with the surrounding rock on the western and southern sides are quite steep. The thickness in the branches is about 3 km.

KIRJALLISUUTTA – REFERENCES

- Hjelt, S.E. & Heiskanen, V. (valmisteilla): Magneettisten painovoimahavaintojen tulkin-
taohjelmisto. PSMT-P13-76-7.
- Lanne, E., 1976 a. Spektrianalyysi painovoimahavaintojen käsittelyssä. Esitelmä, Geo-
fysiikan päivät 1975, Oulu. PSMT-P13-76-2.
- Lanne, E. 1976b. Painovoimahavaintojen jäännösanomalia- ja vertikaaliderivaattakartto-
jen vertailu. PSMT-P13-76-5.
- Lanne, E. (valmisteilla): Aeromagneettisten anomalioiden tulkinta magneettisten malmien
etsimisessä. PSMT-P13-76-11.
- Lanne, E. & Pelkonen, R., 1976. Magnetotelluurisia luotauksia Pelosenniemellä, Jaurat-
sin vulkaniittialueella. Dept. Geoph., Univ. Oulu, Contrib. No. 66. 21 s.
- Pernu, T. & Lanne, E., 1976. Maavastusluotauksia Kittilän vihreäkivialueella. Dept.
Geoph., Univ. Oulu, Contrib. No. 62. 15 s.

PSMT = Pohjois-Suomen malmigeologisen toimikunnan aineisto Geologisen tutkimus-
laitoksen arkistossa.

