

Arto Julkunen

---

# GEOFYSIIKAN TUTKIMUSMENETELMÄT KALLIORAKENTAMISESSA

---

Arto Julkunen

**GEOFYSIIKAN TUTKIMUSMENETELMÄT  
KALLIORAKENTAMISESSA**

Geoteknisen osaston tiedote 46



## ALKUSANAT

Helsingin kaupunki on merkittävä kalliorakentaja. Kalliorakennuskohteiden suunnittelussa voi geofysiikalisten menetelmien käytöstä olla suurta hyötyä. Asian selvittämiseksi aloitettiin helmikuussa 1986 selvitystyö, jonka tulos tämä tiedonanto on.

Tämä työ on luonteeltaan esiselvitys laajasta tutkimusalueesta. Eräs tämän tiedotteen tavoitteista on, että myös muut kuin geofysiikan ammattilaiset voisivat tutustua sovelletun geofysiikan tarjoamiin mahdollisuuksiin.

Työ on tehty osittain yhteistyössä Teknillisen korkeakoulun taloudellisen geologian laboratorion kanssa. Maastomittauksissa ovat edellisen lisäksi olleet mukana seuraavat laitokset ja yhtiöt: Geologian tutkimuskeskus, Imatran Voima Oy, Oy Lohja Ab, Outokumpu Oy, Rautaruukki Oy, Suomen Malmi Oy sekä Valtion teknillinen tutkimuskeskus.

Geofysiikan tutkimusmenetelmien käyttöä kalliorakentamisessa on syytä lisätä ja saatuja kokemuksia on tarpeen edelleen selostaa kalliorakentamisessa mukana oleville eri asiantuntijoille.

Helsingissä marraskuun 23. päivänä 1987

Usko Anttikoski  
Osastopäällikkö



## TIIVISTELMÄ

Tutkimuksen tavoitteena on ollut selvittää geofysikaalisten maanpinta- ja reikämittausten soveltuvuutta kallion rakennetutkimuksiin kirjallisuuden ja kenttäkokeiden avulla. Tärkein kriteeri menetelmien valinnassa oli menetelmien mahdollinen soveltuvuus kalliorakentajaa kiinnostavien kysymysten ratkaisemisessa. Kenttämittauksissa käytettyjen menetelmien valintaan vaikutti myös laitteiden saatavuus.

Kalliomassojen käyttäytymistä hallitsee pääasiassa kolme tekijää:

- itse kallion fysikaaliset ominaisuudet
- epäjatkuvuuksien (rakojen, ruhjeiden ja siirrosten) suunnat ja fysikaaliset ominaisuudet
- pohjaveden paine ja virtaukset.

Näistä kaksi viimeistä ja erityisesti kallion epäjatkuvuudet ovat olleet tämän tutkimuksen kohteena. Lisäksi on käsitelty irtomaakerroksen paksuuden määrittämisen mahdollisuutta eri menetelmillä.

Irtomaakerroksen ja ruhjeiden määrittämisessä voidaan käyttää hyväksi pääasiassa seuraavia fysikaalisia ominaisuuksia:

- kimmo-ominaisuuksia
- sähköisiä ominaisuuksia
- tiheyttä
- suskeptiivisuutta (suuret ruhjevyöhykkeet).

Kenttämittaukset tehtiin Helsingin kaupungin alueella kolmessa kohteessa: maanpintamittaukset Talissa ja Roihuvuoressa sekä reikämittauksia Viikinmäessä. Talissa ja Roihuvuoressa on tunneli, josta käsin saatiin geologista vertailutietoa. Viikinmäessä on suuri maanalainen kalliorakennushanke, johon liittyen paikalla tehdään muun muassa timanttikairauksia. Missään tutkimuskohteessa ei ollut todella selvää ruhjetta tutkittavaksi. Ainoastaan kapeita rakoiluvyöhykkeitä ja vaakarakoilua esiintyi. Ihmisen tekemät rakennelmat - talot, tiet, sähkölinjat ja kunnallistekniset johdot - aiheuttavat häiriöitä. Reiässä tehdyt mittaukset ovat paremmin turvassa erilaisilta häiriöiltä kuin maanpintamittaukset.

Tämän tutkimuksen perusteella soveltuvat pienikokoisten ruhjeiden ja irtomaakerroksen tutkimiseen maanpintamenetelmistä parhaiten seisminen refraktioluotaus ja maatutka. Varauksin osoit-tautuivat käyttökelpoisiksi vastusluotaus ja VLF-R-mittaus.

Reikämittausmenetelmistä osoittautuivat tässä tutkimuksessa parhaiksi ominaisvastusmittaus ja latauspotentiaalimittaus. Varauksin osoittutuivat käyttökelpoisiksi gamma - gamma-mittaus, neutron - neutron-mittaus ja suskeptiivisuusmittaus.

Muut tutkitut menetelmät olivat magneettinen totaalikenttä-, pystygradientti- ja vaakagradienmittaus, korkeataajuus- ja minislingram maanpinnalta sekä radioaktiivisen säteilyn totaali-intensiteetti reiästä.



## ABSTRACT

The purpose of this study was to explain how geophysical methods can be used to explore the structure and properties of the rock for rock engineering purposes.

There are three important factors that the properties of rock mass consist of:

- physical properties of the rock itself
- directions and physical properties of the discontinuities of rock
- pressure and flow of the ground water.

Especially the second factor has been studied here.

The following physical properties can be used to explain the properties of the ground and fracture zones of bedrock:

- elastic properties
- electric properties
- density
- magnetic susceptibility (large fracture zones).

The field surveys were made at three localities in Helsinki. None of the targets had any larger fracture zone to explore. Only minor fracture zones were available. The urban structures (buildings, streets, electric cables etc.) have a disturbing influence which the well logging methods tolerate usually better than measurements on the ground.

According to this study, the following ground survey methods suite well to the exploration of the ground and the minor fracture zones: seismic refraction, ground-probing radar and resistivity sounding.

The following well logging methods appeared to suit best to the exploration of fractures: resistivity method and charged potential (CP-) method.

The other methods used were VLF-R, magnetic method (including total field, vertical and horizontal gradient method), 16 kHz slingram and minislingram. Also the following well logging methods were used: gamma-gamma and neutron-neutron method, magnetic susceptibility method and the natural radioactivity method.





## SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT.....	7
1 JOHDANTO.....	8
1.1 Tutkimuksen taustaa.....	8
1.2 Tutkimuksen tavoite.....	8
1.3 Tutkimuksen rajaukset.....	8
1.4 Tutkimuksen esittely.....	9
2 KALLIOPERÄ KALLIORAKENTAMISEN NÄKÖKULMASTA.....	10
2.1 Kivilajien ominaisuudet.....	10
2.2 Kallion epäjatkuvuus.....	11
2.3 Vesi kalliossa.....	12
2.4 Kallioluokituksesta.....	13
3 YLEISTÄ GEOFYSIKAALISISTA MENETELMISTÄ.....	15
3.1 Mitattavat suureet ja tavallisimmat menetelmät.....	15
3.2 Geofysikaalisten menetelmien rooli geologisissa tutkimuksissa.....	18
3.3 Kallion rakenteen tutkiminen geofysikaalisilla menetelmillä.....	19
3.4 Sivilisaatioympäristön vaikutus mittauksiin.....	20
4 KALLIORAKENTAMISEN GEOFYSIIKKAIA SIVUAVIA SELVITYKSIÄ.....	22
4.1 Eriksson 1974 - kokemuksia Ruotsissa .....	22
4.2 Henkel ja Guzman 1977 - ruhjeiden magneettisista ominaisuuksista .....	24
4.3 Bolmen-tunnelin tutkimukset.....	25
4.4 Ydinjätetutkimukset .....	27
4.5 Maatutkaselvitykset.....	27
4.6 Dammert ja Väätäinen 1986 - yleiskatsaus kallion tutkimusmenetelmistä.....	28
4.7 Espoon Ämmässuon tutkimukset.....	29
5 KENTTÄMITTAUSKOHTEET.....	31
5.1 Yleistä.....	31
5.2 Tali.....	36
5.2.1 Maaperä.....	36
5.2.2 Kallioperä.....	36
5.2.3 Johdot.....	37
5.3 Roihuvuori.....	38
5.3.1 Maaperä.....	38
5.3.2 Kallioperä.....	38
5.3.3 Johdot.....	39
5.4 Viikinmäki.....	39
5.4.1 Maaperä.....	39
5.4.2 Kallioperä.....	39
5.4.3 Johdot.....	40

6	KENTTÄMITTAUKSET.....	41
6.1	Yleistä.....	41
6.2	Maanpintamittausmenetelmät ja -laitteet.....	43
6.2.1	Magneettinen totaalikenttämittaus.....	43
6.2.2	Magneettinen pystygradienttimittaus.....	44
6.2.3	Magneettinen vaakagradienttimittaus.....	45
6.2.4	Korkeataajuuslingram.....	49
6.2.5	Minislingram.....	54
6.2.6	Maavastusluotaus.....	56
6.2.7	VLF-R-mittaus.....	58
6.2.8	Maatutkamittaukset.....	60
6.2.9	Seisminen refraktioluotaus.....	64
6.3	Reikämittausmenetelmät ja -laitteet.....	68
6.3.1	Ominaisvastusmittaus.....	68
6.3.2	Suskeptiivisuusmittaus.....	72
6.3.3	Radioaktiivisen säteilyn totaali-intensiteetti.....	72
6.3.4	Latauspotentiaalimittaus reiästä reikään.....	73
6.3.5	Gamma - gamma-mittaus.....	74
6.3.6	Neutron - neutron-mittaus.....	76
7	TULOSTEN ARVIOINTIA.....	79
7.1	Irtomaakerrosten määrittäminen.....	79
7.2	Ruhjeiden ja rakojen määrittäminen.....	82
7.2.1	Maanpintamittausmenetelmät.....	82
7.2.2	Reikämittausmenetelmät.....	89
7.3	Mittauksia häiritsevät tekijät.....	95
8	YHTEENVETO.....	97
8.1	Yleisiä johtopäätöksiä.....	97
8.2	Maanpintamittausten soveltuminen kalliorakentamisen tutkimuksiin.....	97
8.3	Reikämittausten soveltuminen kalliorakentamisen esitutkimuksiin.....	99
	LÄHDELUETTELO.....	101
	KIRJALLISUUTTA.....	106

## MERKINNÄT

Seuraavassa on esitetty työssä käytettyjä merkintöjä. Luettelo ei ole täysin kattava, vaan lähinnä kaavoissa käytetyt symbolit on esitetty.

B	magneettikentän voimakkuus
c	sähkömagneettisen aallon nopeus tyhjiössä ( $2,9979 \times 10^8$ m/s)
I	virta
J	spinmomentti
k	kimmomoduuli
Li	liuskeisuusluku
n	leikkausmoduuli
P	potentiaalielektrodi
Q	Königsbergin suhde (remanentin ja induoidun magnetismin suhde)
R	resistanssi
R <sub>k</sub>	rakotiheys
R <sub>p</sub>	rapautumisluku
ΔV	potentiaaliero
Z	kerrospaksuus (seisminen luotaus)
v	nopeus
ε <sub>r</sub>	suhteellinen dielektrisyysvakio
σ	johtavuus (mho/m)
φ	vaihekulma
μ <sub>0</sub>	magneettinen permittiivisyys
v	taajuus
Ω	kulmanopeus
ρ	ominaisvastus, aineen tiheys
ρ <sub>a</sub>	näennäinen ominaisvastus

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Tutkimuksen taustaa

Kalliorakentaminen on lisääntynyt merkittävästi viime vuosina Suomessa. Varsinkin pääkaupunkiseudulla suuntaus on selvä. Maanalaiset rakennushankkeet ovat usein melko suuria. Tämän vuoksi on tärkeää, että maanalaisten tilojen sijoituspaikat tutkitaan etukäteen huolella, jotta tilat louhittaisiin tähän tarkoitukseen mahdollisimman hyvin sopivaan kalliopeeraan.

Joskus saatetaan joutua tilanteeseen, jossa rakennusteknisesti todella hyvää sijoituspaikkaa ei ole mahdollista käyttää. Tällöin on tärkeää tuntea rakennuskohde tarkasti ennalta, jotta kustannusarvio voidaan tehdä mahdollisimman luotettavasti. Myös urakoitsija voi pienentää hyvien tutkimustietojen ansiosta tarjoustensa riskikerrointa /32/.

Sovelletun geofysiikan keinoja on perinteisesti käytetty varsin rajoitetusti kalliorakennushankkeissa. Seisminen refraktioluotaus on ollut lähes ainoa käytetty menetelmä. Tosin vastusluotausta on käytetty irtomaakerroksen paksuuden selvittämiseen ja aivan viime aikoina myös maatutkaa.

Malminetsinnän tarpeisiin on vuosikymmenien aikana kehitetty lukuisa määrä menetelmiä ja laitteita, joita on periaatteessa mahdollista käyttää myös kallion rakennetutkimuksiin. Myös ydinjätteiden sijoituspaikkatutkimukset ovat tuoneet esiin paljon kalliorakentajaakin hyödyttävää tietoa varsinkin reikästä tehdyistä geofysikaalisista mittauksista.

## 1.2 Tutkimuksen tavoite

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää kirjallisuuden ja kenttäkokeiden avulla sovelletun geofysiikan hyväksikäyttömahdollisuuksia kalliorakentamisen esitutkimuksissa.

## 1.3 Tutkimuksen rajaukset

Tutkimuksessa on selvitetty sekä maanpinta- että reikämittausten soveltuvuutta kalliorakennustutkimuksiin.

Tärkein kriteeri menetelmien valinnassa oli menetelmien mahdollinen soveltuvuus kalliorakentajaa kiinnostavien kysymysten ratkaisemisessa. Työssä keskityttiin menetelmiin, jotka tiedettiin ainakin jossain määrin kiinnostaviksi jo etukäteen. Kenttämittauksissa käytettyjen menetelmien valintaan vaikutti myös laitteiden saatavuus.

Kallion jännitystilamittaukset on jätetty tästä tutkimuksesta pois, vaikka niiden voitaisiinkin katsoa kuuluvan otsikon aihepiiriin. Rajauksen perusteluna on toisaalta se, että selvityksestä olisi tullut tarpeettoman laaja, toisaalta se, että jännitystilamittauksia käsitellään yleensä kalliomekaanisten tutkimusten yhteydessä. Vesimenekikokeet on jätetty samoista syistä johtuen pois.

#### 1.4

#### Tutkimuksen esittely

Selvityksen alkuosassa kuvataan käsiteltäviä ongelmia ja käytettävissä olevia työkaluja ongelmien ratkaisemiseksi. Loppuosassa keskitytään käytännön kokeisiin.

Luvussa 2 luodaan katsaus tutkittavaan kohteeseen eli kallioon yleisesti, mutta kuitenkin kalliorakentajan näkökulmasta. Kivilajien vaikutusta käsitellään näin ollen vain vähän kallion rikkonaisuuden saadessa enemmän huomiota.

Luvussa 3 kuvataan niitä fysikaalisia suureita, joiden muutoksia tutkimalla voidaan päätellä jotakin kallion rakenteesta. Samalla tuodaan esille eri suureiden mittaamiseen liittyvä geofysiikaalinen tutkimusmenetelmä. Luvussa keskitytään kuitenkin lähinnä tässä tutkimuksessa käytettyihin menetelmiin. Lisäksi tarkastellaan geofysiikaalisten menetelmien roolia geologisissa tutkimuksissa ja sivilisaatioympäristön vaikutuksia mittauksiin.

Luvussa 4 esitetään joidenkin aikaisempien tutkimusten keskeisiä tuloksia.

Luvussa 5 kuvataan kenttätutkimuskohteiden geologiaa ja kunnallisteknisiä häiriölähteitä.

Luvussa 6 esitellään kenttämittauksissa käytetyt mittausten menetelmät. Myös käytetyt laitteet ja niiden toimintaperiaate esitetään.

Luvut 7 ja 8 sisältävät tulosten arvioinnin ja yhteenvedon tutkimuksesta.

## KALLIOPERÄ KALLIORAKENTAMISEN NÄKÖKULMASTA

Kalliomassojen käyttäytymistä hallitsee pääasiassa kolme tekijää /58/:

- itse kallion fysikaaliset ominaisuudet
- epäjatkuvuuskohtien (rakojen, ruhjeiden ja siirrostien) suunnat ja fysikaaliset ominaisuudet
- pohjaveden paine ja virtaukset.

## 2.1

## Kivilajien ominaisuudet

Kallioperä koostuu kivilajeista, joiden perusosaset ovat mineraaleja. Mineraali on kemiallisten luonnonilmiöiden tuloksena muotonsa saanut kiteinen tai amorfinen aines, joka määritetään atomien muodostaman rakenteen ja koostumuksen avulla. Useimmat mineraalit ovat kiteisiä /21/.

Rakennusteknisesti mielenkiintoisia mineraalien ominaisuuksia ovat: /21/

- rapautumisherkkyys
- lohkeavuus
- kovuus
- sitkeys
- muoto.

Rapautumisherkkyys tarkoittaa mineraalien alttiutta kiderakennetta heikentäviin tai hajottaviin kemiallisiin ja fysikaalisiin muutoksiin. Fysikaalinen rapautuminen tarkoittaa mineraalirakeiden irtoamista toisistaan.

Joillakin suuntautuneilla mineraaleilla (esimerkiksi maasälvät ja kiilteet) lohkeavuus johonkin tiettyyn suuntaan on erityisen suuri. Kivi lohkeaa sitä herkemmin, mitä enemmän tätä mineraalia kivilajissa on ja mitä selvemmin kivilaji on suuntautunut.

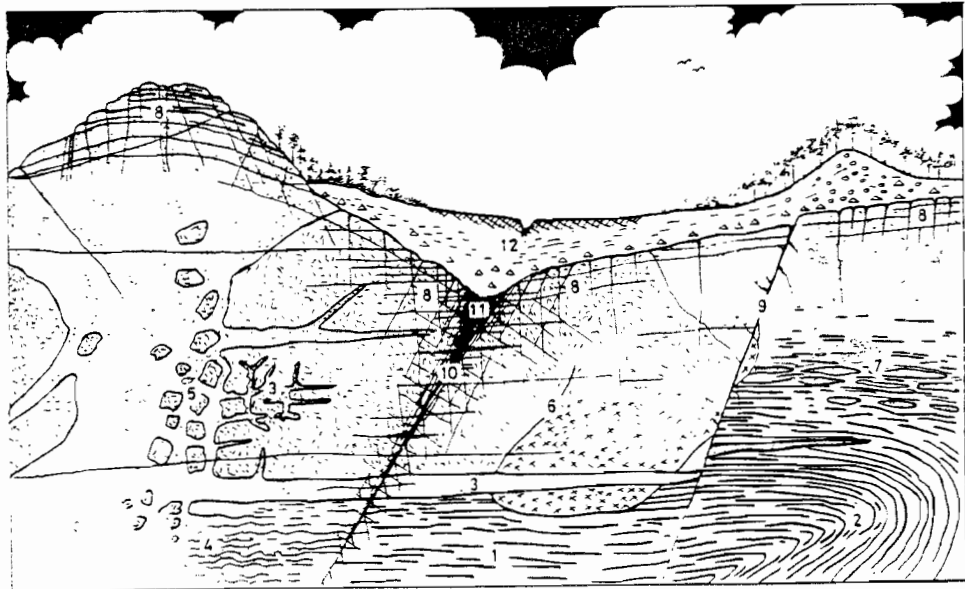
Kovuus ja sitkeys tarkoittavat mineraalien kestävyyttä mekaanisissa rasituksissa. Kova mineraali kestää hankausta tai muuta kulutusta paremmin kuin pehmeä. Sitkeässä mineraalissa ilmenee rasituksessa juuri ennen murtumista suurempi muodonmuutos kuin hauraassa.

Mineraalin muoto vaikuttaa esimerkiksi siihen, kuinka lujasti kivilajin rakeet liittyvät toisiinsa. Epämääräisen muotoiset, sälöiset ja kuituiset rakeet aikaansaavat usein lujemman rakenteen kuin pyöreähköt ja suorakulmaiset rakeet.

## 2.2

### Kallion epäjatkuvuus

Jos kallio olisi jatkuvaa ja homogeenista massaa, määräytyisi kallion lujuus lähes täysin niiden kivilajien lujuuden mukaan, jotka muodostavat kallion. Kallio on kuitenkin monimutkaisempi systeemi. Usein kalliorakentamista haittaavat enemmän rakoilu ja heikkousvyöhykkeet kuin heikkohko mutta ehyt kivilaji (kuva 1).



Kuva 1. Kallioperän tektonisia rakenteita kaavamaisesti esitettynä /21/: liuskeisuus (1), poimu (2), juonia (3), suonia (4), breksia eli sivukivisulkeumia syväkivilajissa (5), terävä kontakti (6), kontaktivyöhyke (7), rakoilua (8), siirros (9), ruhjevyyhyke (10), savivyöhyke kalliossa (11) sekä maalaaja (12).

Kallion rikkoutumisrakenteet, joiksi voidaan nimittää rakoilua ja rikkonaista kalliota, ovat syntyneet murrosdeformaatiossa.

Rakoilulla tarkoitetaan rakojen muodostamia järjestelmiä, joita on kaikkialla kallioperän pintaosissa /21/. Raot ovat laadultaan tiiviitä, avoimia tai täytteisiä.

Avoimia rakoja esiintyy etenkin kallion pintaosissa. Täytteiset raot vaihtelevat sekä syntyavaltaan että laadultaan. Jos kallion sisäinen liukumisliike on keskittynyt kapeaan vyöhykkeeseen tai pintaan, on tähän voinut muodostua niin sanottu haarniskarako. Haarniskaraon pinnoilla on usein muuttumisen tuloksena liukkaita ja pehmeitä mineraaleja.



Jos rakopinnoilla on tapahtunut voimakasta kemiallista rapautumista, saattaa rakotäytteenä esiintyä kalliosavea. Myös rakojen reunoista ja maaperästä saattaa kerääntyä täytettä rakoon. Tällöin muodostuu niin sanottu mururako /21/.

Rikkonaisella kalliolla tarkoitetaan runsaan tai tiheän rakoilun heikentämää kalliota, jossa voi esiintyä eriasteista rapautumista. Jos rikkonainen tai löyhä kallio muodostaa selvästi rajoitetun, ympäristöään heikomman kallion osan, tätä nimitetään heikkousvyöhykkeeksi /21/.

Rikkonainen kallio lisää louhintakustannuksia /32/ pääasiassa kahdesta syystä:

- rikkonaisessa kalliossa usein virtaileva vesi voi vaatia tiivistystoimenpiteitä
- työn aikana on usein tehtävä lujitustyötä.

On tärkeätä tuntea jo suunnitteluvaiheessa kohteen rakoilu- ja pohjavesiolosuhteet, jotta suurilta ylätyksiltä louhintakustannuksissa vältyttäisiin.

### 2.3

#### Vesi kalliossa

Vesi esiintyy kalliossa periaatteessa kahdella eritavalla: kemiallisesti eri mineraaleihin sitoutuneena sekä vapaana kallioperän huokosissa, raoissa ja onkaloissa. Suomessa esiintyvien kivilajien huokoisuus on yleensä pieni (alle 1 %) ja vesipitoisuus vähäinen. Vesi sijaitsee pääasiassa kallion raoissa ja ruhjeissa /62/.

Kalliossa olevan vapaan veden määrä riippuu pääasiassa kallion rikkonaisuudesta. Vettä sisältävät raot ulottuvat yleensä noin 100 m syvyyteen. Tätä syvemällä jännityskenttä pyrkii sulkemaan rakoja ja pienentämään rakojen vedenläpäisevyyttä. Rakotiheys, kallion jännitystilä sekä rakojen laatu ja avonaisuus saattavat kuitenkin aiheuttaa suuriakin alueellisia vaihteluja veden esiintymisessä kalliossa.

Suurimmat pohjavesivarastot ovat yleensä laajoissa rikkonaisissa kallion osissa. Näihin kohtiin on usein syntynyt niin sanottuja kalliopainanteita, koska eroosio on kuluttanut nämä kohdat muuta kallion pinnan tasoa alemmaksi. Tällaisiin kohtiin voi kertyä vettä laajoilta alueilta sekä itse kallioperästä että kallion päällä olevista maakerroksista.

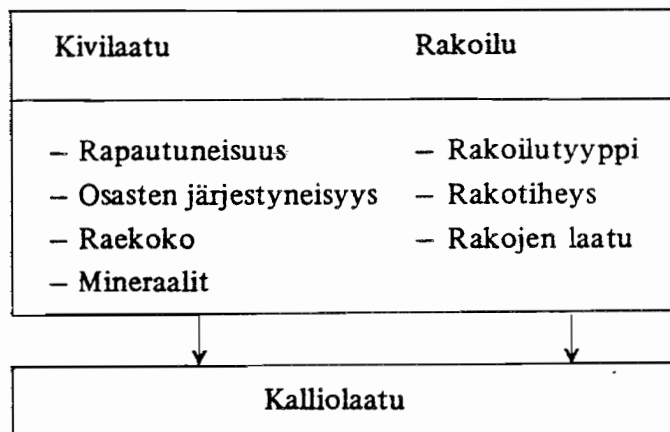
Vesi vaikuttaa kallioon lähinnä vedenpaineen kautta. Tämä pyrkii yleensä heikentämään kallion stabiili-teettia. Tietyt savimineraalit, esimerkiksi montmorillonitti, paisuvat veden vaikutuksesta ja pyrkivät avaamaan täytteisiä rakoja. Myös pinnan läheisyydessä olevissa raoissa oleva vesi pyrkii jäätyessään vaikuttamaan samalla tavalla.

Heikkousvyöhykkeissä tehtävissä louhintatöissä on otettava huomioon myös pohjaveden pinnan hallitseminen. Vuotovedet pyrkivät alentamaan lähiseudulla pohjaveden pintaa. Tämä ei ole suotavaa, sillä kaivot saattavat kuivua ja rakennusten perustukset kärsiä. Erityisesti asutuilla seuduilla tulee usein injektointitöissä määrääväksi kriteeriksi juuri ympäristön pohjaveden pinnan tason hallinta.

## 2.4 Kallioluokituksista

On kehitetty monenlaisia luokituksia, joilla pyritään luonnehtimaan kallion ominaisuuksia. Erityisesti kalliorakentamisessa on tarvetta luokitukselle, jonka avulla mahdollisimman yksiselitteisellä tavalla voitaisiin kuvata kallion rakentamiskelpoisuutta. Kehitetyissä luokitusjärjestelmissä on etsitty yleensä kokemusperäisesti kehitettyjen parametrien ja kalliotilojen pysyvyyden sekä lujitustarpeen välistä yhteyttä.

Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen (VTT) geotekniikan laboratorion rakennusgeologinen kallioluokitus /21/ pyrkii määrittämään kalliolaadun kivilaadun ja rakoilun avulla (kuva 2). Kivilaadun määräävät kivilajin tekniset ominaisuudet. Rakoilu taas käsittää kaikkien rako- ja murtumapintojen muodostaman systeemin.



Kuva 2. Rakennusgeologisen kallioluokituksen luokitusperusteet /21/.

Deere ja Miller /12/ ovat pyrkineet luokittelemaan kalliota pelkkien fysikaalisten ominaisuuksien, kimmomoduulin ja puristusmurtolujuuden mukaan. Menetelmä saattaa sopia suuriin, heikosti metamorfoituneisiin kivimassoihin. Suomen oloissa luokitus ei ilmeisesti toimisi kunnolla.

Hansagi /15/ on kehittänyt menetelmän, jossa timanttikairauksilla saatujen sydännäytteiden keskipituus

mitataan ja tätä verrataan ehjästä kalliosta saatavaan keskipituuteen. Kun näin saatu tekijä kerrotaan kiven puristusmurtolujuudella, saadaan mitta kallion pysyvyydelle.

Bergman /7/ on tehnyt ehdotuksen ruotsalaiseksi kallioluokitusjärjestelmäksi. Ehdotuksessa käytetään hyväksi kuutta eri tekijää:

- kiven yksiaksiaalinen puristusmurtolujuus
- muodonmuutos ennen murtumaa
- murtuman luonne
- kallion rakenne
- keskimääräinen rakotiheys
- rakotyyppi.

Tekijöiden valinta tuntuu jossain määrin mielivaltaiselta eikä välttämättä anna oikeaa kuvaa luokitellusta kalliosta /58/.

Müller /28/ on tehnyt luokituksen, jonka perustana ovat rakoilu ja rapautuminen sekä toisaalta erilaiset häiriövyöhykkeet. Luokitus sopii lähinnä keskieuropalaisille sedimenttikiville, joissa kallio-perän ja maaperän välinen raja on usein epämääräinen.

Niin sanottu norjalainen kallioluokitus eli NGI-luokitus /5/ lienee varsin käyttökelpoinen, vaikka sitäkin on kritisoitu /45/. Tässä luokituksessa otetaan huomioon kuusi eri tekijää, jotka painottavat yhtä paljon kallion fysikaalisia ominaisuuksia, rakoilua ja pohjavettä. Tekijöistä saatavan indeksin Q avulla voidaan arvioida tietyn jännevälän omaavan kalliotilan lujitustarve tiettyä pysyvyyttä varten. Tiivis, suomenkielinen esitys NGI-luokituksesta esitetään esimerkiksi viitteessä /62/.

CSIR-luokitus /8/ perustuu melkein samojen tekijöiden määritykseen kuin NGI-luokitus. Kalliolaadun määräävä RMR-luku saadaan kuuden eri osatekijän painotettuna summana. Nämä tekijät ovat:

- kiviaineksen lujuus
- RQD-luku
- rakoetaisyys
- rakojen laatu
- pohjavesi
- kalliotilan sijainti rakoilun suhteen.

RQD-luku, joka on käytössä myös NGI-luokituksessa, saadaan kairasydännäyttestä. Luku luonnehtii kairasydännäytteen eheyttä.

Edellä esitetyistä luokituksista osa on lähinnä geologisia, kuten RG-luokitus, ja osa on tarkoitettu lujitusluokituksiksi. Raja ei kuitenkaan aina ole täysin selvä. Luokituksia on aina käytettävä vain terveen järjen apuna.

## YLEISTÄ GEOFYSIKAALISISTA MENETELMISTÄ

## 3.1

## Mitattavat suureet ja tavallisimmat menetelmät

Geofysikaaliset menetelmät jaotellaan tavallisesti siten, että jaottelu kuvaa menetelmän luonnetta ja fysikaalista perustaa. Lisäksi käytettyyn jaotteluun vaikuttaa yleensä mittauksen käytännöllinen toteutustapa. Eräs jaottelu, jota useimmat oppikirjat soveltaen käyttävät, on seuraavanlainen:

- gravimetriset menetelmät
- seismiset menetelmät
- magneettiset menetelmät
- sähköinen omapotentiaalimenetelmä
- sähköiset galvaaniset menetelmät
- sähköiset induktiiviset menetelmät
- induoitu polarisaatio
- radiometriset menetelmät.

Lisäksi käsitellään usein omana ryhmänään reikämittaukset. Näissä ovat kyseessä edellä mainitut menetelmät, joita sovelletaan maanpintamittauksiin verrattuna mittausteknisesti poikkeavalla tavalla.

Gravimetrisissä menetelmissä mitataan maan gravitaatiokentän voimakkuutta. Gravitaatiokentän voimakkuus riippuu muun muassa mittauspisteen alapuolella olevan kallion massasta. Koska yleensä luonnontilassa olevassa kalliassa ei ole suuria onkaloita, massan muutokset ovat suorassa yhteydessä kallioperän tiheyden muutoksiin. Niin sanotulla mikrogravimetrauksella voidaan tutkia esimerkiksi louhosten tai jopa ruhjeiden sijaintia.

Luonteensa vuoksi gravimetriset menetelmät soveltuvat kuitenkin parhaiten suurten rakenteiden tutkimuksiin. Gravimetrisille mittaustuloksille joudutaan tekemään joitakin korjauksia, ennen kuin mittaustulosten paikallista muutosta eli anomaliaa on mielekästä tarkastella. Yleensä tehdään seuraavat korjaukset:

- leveysastekorjaus
- ilmakorjaus, jolla korjataan mittauskorkeuden vaihtelusta aiheutuva virhe
- Bouguer-korjaus, jolla korjataan perustason ja mittauspisteen väliin jääneen kivimassan aiheuttama virhe.

Lisäksi voidaan tehdä topografiakorjaus, jolla eliminoidaan suurten topografisten vaihteluiden aiheuttama vaikutus mittaustulokseen. Tätä korjausta ei yleensä tarvitse tehdä Suomen oloissa.

Näiden korjausten jälkeen saatua tulosta kutsutaan Bouguer-anomaliaksi, joka siis kuvastaa maankamاران tiheysvaihteluja.

Kallioperän kimmo-ominaisuuksien ja massan muutokset ovat yhteydessä kimmoaaltojen etenemisnopeuteen. Tämän suureen vaihtelujen hyväksikäyttöön perustuvat seismiset menetelmät. Refraktioseismiikalla pyritään nimenomaan määrittämään seismisen aallon nopeus maaperän eri kerroksissa. Samalla määritetään mahdollisuuksien mukaan myös niiden kerrosten paksuus, joilla on toisistaan poikkeavat seismisen aallon nopeudet.

Geofysiikan rakennusteknisissä sovelluksissa on refraktioseismiikalla perinteisesti vankka sija, sillä seismisen aallon nopeuden määrittämisen avulla on mahdollista määrittää muun muassa pohjaveden pinnan korkeus sekä irtomaakerroksen ja kallionpinnan raja. Lisäksi on usein mahdollista luonnehtia kallion lujuutta määrittämällä seismisen aallon nopeus kallion eri kohdissa.

Seismisen aallon nopeuden jyrkät vaihtelut antavat mahdollisuuden myös toisentyypiseen tutkimusmenetelmään, nimittäin reflektioseismiseen menetelmään. Nimensä mukaisesti menetelmän avulla määritetään maa- ja kallioperässä olevien epäjatkuvuuskohtien paikat. Niiden avulla voidaan tulkita kallion rakennetta ja ominaisuuksia.

Reflektioseisminen menetelmä on maailmanlaajuisesti ottaen käytetyin geofysikaalinen tutkimusmenetelmä. Menetelmä on parhaimmillaan kerroksellisissa rakenteissa, eikä sen vuoksi sovellettu Suomen olosuhteisiin yleensä kovin hyvin. Menetelmän soveltamista on kuitenkin kokeiltu jonkinlaisella menestyksellä myös kiteisessä kallioperässä /30/.

Suskeptiivisuus eli magneettinen suskeptibiliteetti on voimakkaasti kivilajista riippuva ominaisuus. Ulkoisessa maan kentässä eli herätekentässä magneettinen materiaali indusoi sekundaarikentän. Suure, jota voidaan suoraan mitata, on magneettikentän voimakkuus. Mittaamalla magneettikentän voimakkuutta voidaan välillisesti arvioida mittauskohteen lähellä olevien kivilajien suskeptiivisuus.

Magnetiittipitoisuus on yleisesti ottaen suurin kivilajien magneettisuuden aiheuttaja, mistä syystä magneettinen menetelmä ei ole ihanteellinen kallion rakennetutkimuksissa. Tosin heikkousvyöhykkeissä on veden läsnäolo voinut aiheuttaa kemiallisia muutoksia, esimerkiksi magnetiitin muuttumista hematitiiksi.

Välillisesti, esimerkiksi kivilajirajojen ansiosta, voi myös olla mahdollista havaita muutoksia kallion lujuusominaisuuksissa mittaamalla magneettikentän voimakkuutta tai reikämittauksin suoraan suskeptiivisuutta.

Mineraalien magnetismi voi olla myös pysyvää eli remanenttia. Remanentin ja indusoidun magnetismin suhdetta, niin sanottua Königsbergin suhdetta, merkitään symbolilla Q.

Omapotentiaalimenetelmässä (SP-menetelmä eli self-potential) mitattava suure on sähköinen potentiaaliero. Tämä luonnon alkuperää oleva potentiaaliero on lähtöisin sähkökemiallisista ilmiöistä. SP-ilmiötä käytetään hyväksi lähinnä malminetsinnässä, mutta sedimenttikivissä se on tärkeä kiven huokoisuutta kuvaava suure.

Ominaisvastus on suure, joka voi saada hyvin erilaisia arvoja erilaisissa väliaineissa. Esimerkiksi määrän saven ominaisvastus voi olla  $20 \Omega \text{ m}$  tai vieläkin vähemmän. Kuivan kallion ominaisvastus voi olla helposti esimerkiksi  $40000 \Omega \text{ m}$ . Kuparilla, joka on hyvä johde, ominaisvastus on luokkaa  $10^{-8} \Omega \text{ m}$ . Ominaisvastuksen vaihtelut merkitäänkin usein logaritmiselle asteikolle.

Ominaisvastuksen määrittäminen perustuu Ohmin lakiin  $I = U \times R$ , jossa  $I =$  virta,  $U =$  jännite ja  $R =$  mitauselektrodien välinen resistanssi.

Galvaanisen ominaisvastuksen määrittäminen on niin sanottu aktiivinen mittausta: syötetään virtaa ja mitataan virran aiheuttamia potentiaalieroja. Laskeamalla voidaan määrittää näennäinen ominaisvastus, joka on tulokinnan apusuure.

Sähköisessä induktiivisessa mittauksessa käytetään hyväksi ulkoista muuttuvaa sähkökenttää, joka aiheuttaa johteessa pyörrevirtoja. Nämä pyörrevirrat synnyttävät puolestaan heikomman, niin sanotun sekundaarikentän. Sekundaarikentän voimakkuus ja yleensä myös vaihe ovat ne suureet, joita induktiivisissa menetelmissä mitataan.

Mittaussysteemejä on paljon erilaisia. Toisissa menetelmissä käytetään luonnollista alkuperää olevia sähkökenttiä (AMT-menetelmä), toisissa primaarikenttä synnytetään keinotekoisesti. Tällöin on yleensä mahdollista verrata totaalikenttää suoraan primaarikenttään referenssisignaalin välityksellä. Eräänlaiseksi välimuodoksi näiden välillä voidaan mainita VLF-menetelmä, jossa primaarikentän aiheuttaja on kaukainen navigointiradioasema eli lähde on keinotekoinen, mutta mittaajan kontrolloimattomissa, kuten luonnon kentät.

Induktiivisissa menetelmissä pyritään taajuus valitsemaan kohteen johtavuuden mukaisesti yleensä siten, että sekä totaalikentän (primaarikentän ja sekundaarikentän summakenttä) itseisarvossa että vaiheessa tapahtuu sopivia muutoksia. Tämä tarkoittaa yleensä pysyttelemistä äänitaajuusalueella. Toisaalta taas suurehkoja taajuuksia (esimerkiksi kymmeniä kilohertsejä) joudutaan käyttämään, jos kohde on huonohko johde.

Tässä yhteydessä voidaan mainita maatutka, jossa käytetyllä taajuudella (50 - 400 MHz) tutkitaan heijastavia rajapintoja. Tutkan käyttämällä taajuuksil-

la voimakkaasti tulkintaan vaikuttava suure on väliaineen dielektrisyysvakio, joka määrää tutka-aallon nopeuden. Johtavuus vaikuttaa lisäksi lähinnä tutka-aallon tunkeutumissyvyyteen.

Maaperän hiukkasten pinnoilla ja väleissä tapahtuvien sähkökemiallisten reaktioiden johdosta maaperällä voi olla kyky varautua, kun siihen johdetaan virtaa. IP-ilmiössä, kuten sitä sovelletussa geofysiikassa kutsutaan, ionit siirtyvät sähkökentän vaikutuksesta eri pinnoille eli tapahtuu polarisoitumista.

Kun virta katkaistaan, ei jännite palaudu heti nol-laksi. Ionien polarisoituminen on aiheuttanut kemiallisen varauksen syntymisen, jonka vaikutuksesta jännite alenee vähitellen. Koska kyseessä on pintojen välillä tapahtuva polarisoitumisilmiö, IP-ilmiö on verrannollinen sopivien pintojen alaan. Pirotteiset malmit ovatkin tavallinen IP-tutkimuksen kohde.

Kallioperässä esiintyvälle radioaktiiviselle säteilylle on pääasiassa kolme luonnollista alkuperää olevaa lähdettä: thoriumin, uraanin ja kaliumin radioaktiiviset isotoopit. Myös muita, vähemmän tärkeitä lähteitä on olemassa. Tällaisen taustasäteilyn mittaaminen ei ole kovin merkittävä (joskaan ei myöskään työläs) mittaus ruhjeiden tutkimuksessa. Välillisesti voidaan saada viitteitä ruhjeesta, sillä uraanin kaasumainen hajoamistuote radon liikkuu parhaiten rakoja pitkin.

Aineen tiheyttä ja kosteutta voidaan mitata välillisesti tutkimalla aineen kykyä sirottaa gamma- tai neutron-säteilyä. Näitä menetelmiä käytetään lähinnä reiästä tehtävinä mittauksina.

Kaikkia edellä mainittuja menetelmiä on käsitelty monissa geofysiikan oppikirjoissa, joista ensimmäisenä ja helppolukuisimpana voidaan mainita Parasnis /30/ sekä laajana ja perusteellisena Telford & al /59/. Alan suomenkielinen opetusmoniste on parhailaan painossa (Peltoniemi /37/).

### 3.2

#### Geofysikaalisten menetelmien rooli geologisissa tutkimuksissa

Geofysikaalisten mittaustulosten tulkintaan liittyy olennaisesti tulosten monikäsitteisyys. Mittaustuloksista ei voida yksikäsitteisesti johtaa anomalian aiheuttajaa. Tämän vuoksi on välttämätöntä saada muutakin tietoa tutkittavasta kohteesta. Myös muilla tavoilla tehtyjä tutkimuksia voidaan täydentää geofysikaalisilla tutkimuksilla, esimerkiksi tutkimalla kairauksissa havaittujen ruhjeiden välisten galvaanisten yhteyksien olemassaoloa.

Geologisten tutkimusten alkuvaiheessa geofysiikan menetelmin voidaan usein tehdä melko luotettavia yleisiä havaintoja, joiden perusteella tarkemmat ja

kalliimmat tutkimukset voidaan ohjata mahdollisimman hyödyllisesti. Näin esimerkiksi seismisillä refraktioluotauksilla voidaan kallionopeuksien määrittäminen varmistaa mahdolliset ruhje-epäilyt tai vaikuttaa tunnelin linjaukseen jo hyvissä ajoin. Vastaavalla tavalla malminetsintätyössä slingram-menetelmällä yhdessä magneettisen totaalikenttämittauksen kanssa voidaan huomata malminetsinnallisesti mielenkiintoisia alueita, joille suunnataan tarkempia tutkimuksia.

Tutkimusten loppuvaiheessakin hyödytään geofysikaalisten menetelmien oikeasta käytöstä. Kun kairaamalla tai muulla tavoin on saatu pistemäisesti tarkkaa tietoa kohdealueesta, voidaan sopivilla geofysikaalisilla menetelmillä usein tutkia väliin jääneet alueet. Tällainen geologisen rakenteen seuraaminen on tehokasta, sillä anomalian aiheuttajat, esimerkiksi ruhjeet ja juonet, ovat ainakin paikallisesti usein melko jatkuvia rakenteita.

### 3.3

#### Kallion rakenteen tutkiminen geofysikaalisilla menetelmillä

Kalliorakentamiseen liittyvien tutkimusten kohteena on tavallisesti irtomaakerrosten paksuus eli kalliopinnan sijainti sekä mahdolliset heikkousvyöhykkeet. Myös pohjavedenpinnan korkeudella on merkitystä.

Fysikaaliset ominaisuudet, joilla irtomaakerrokset on usein mahdollista erottaa kallion pinnasta, ovat:

- kimmo-ominaisuudet
- sähköiset ominaisuudet
- tiheys.

Seismisiä menetelmiä, lähinnä refraktioluotauksia, on käytetty jo pitkään irtomaakerrosten paksuuden määrittämisen apuna. Se onkin osoittautunut käytännössä tähän tarkoitukseen varsin sopivaksi menetelmäksi. Refraktioluotauksella saadaan tavallisesti määritettyksi myös kallion pintaosien seismiset nopeudet.

Galvaaniseen sähkönjohtavuuteen perustuvaa maavastusluotauksia on myös käytetty irtomaakerrosten paksuuden määrittämiseen. Seismisen luotauksen tapaan pyritään maavastusluotauksessakin ratkaisemaan tulkintaongelma useimmiten kerrosmallia käyttämällä.

Induktiivisilla sähkönjohtavuuden mittaamenetelmillä on myös mahdollista tutkia maakerrosten paksuutta. Mittausten etuna on nopeus ja halpuus, mutta tulosten tulkinnan tarkkuus ei ole maavastusluotauksen veroista.

Sähköisten ominaisuuksien eroavuuteen perustuu myös maatulostuksen käyttö. Maatulostuksen avulla voidaan saada tutkaheijastuksia maakerrosten ja kalliopinnan rajalta, mikäli tutka-aalto ei ole liiaksi vaimentunut johtavissa maakerroksissa.



Tiheyttä on ollut aikaisemmin vaikea käyttää hyväksi erotettaessa kalliomassaa ja irtomaata toisistaan. Tavanomaisilla gravimetrisillä menetelmillä se ei ole käytännössä mahdollista, mutta nykyisillä reikämittausmenetelmillä (gammasäteilyn takaisinsironta) on mahdollista tehdä riittävän tarkka mittaus (pelkän kalliopinnan paikan määrittämiseen riittää tietenkin kairauskin).

Heikkousvyöhykkeet erottuvat otollisissa olosuhteissa suunnilleen samojen fysikaalisten ominaisuuksien perusteella kuin irtomaakerroskin. Nämä ominaisuudet ovat:

- kimmo-ominaisuudet
- sähköiset ominaisuudet
- tiheys
- kosteus
- susceptiivisuus.

Maanpäältä tehtävät mittaukset ovat samantapaisia kuin irtomaakerrosten paksuutta määritettäessä. Ruhjeet ovat usein pystyhyökköjä, ja tämän vuoksi otollisissa olosuhteissa voidaan induktiivisilla mittauksilla saada tietoa ruhjeen paikasta ja muodosta. Joidenkin laajojen ruhjeiden on todettu aiheuttavan heikon (mutta selvän) negatiivisen magneettisen anomalian /14/. Susceptiivisuuden muutokset eivät kuitenkaan ole tyypillisimpiä ruhjeen ominaisuuksia.

Kallion sisällä sijaitsevien ruhjeiden tutkimiseen on viime vuosina kehitetty tehokkaita reikämittausmenetelmiä. Näillä menetelmillä on mahdollista tutkia kallion rakennetta muun muassa ominaisvastuksen, tiheyden, susceptiivisuuden sekä kosteuden muutosten perusteella. Reikämittaukset ovat tulossa vahvasti mukaan kallion rakenteen tutkimukseen ja niillä on mahdollisuus täydentää timanttikairausten antamaa tietoa.

### 3.4

#### Sivilisaatioympäristön vaikutus mittauksiin

Ihmisen tekemät rakenteet, kuten talot, tiet, sähkölinjat ja kunnallistekniset johdot, aiheuttavat häiriöitä useimpiin mittausmenetelmiin.

Seismisissä menetelmissä häiriötä aiheuttaa jonkin verran muualta tuleva värinä eli taustakohina, mutta eniten haittaa se, että mittausjärjestelyjä ei voida toteuttaa rakennusten vuoksi. Asfalttipinnat voivat myös aiheuttaa nopeita pintakerroksia, jotka roudan tapan voi sotkea mittauksia. Asutustaajamissa on myös räjähteiden käytössä noudatettava suurta varovaisuutta.

Magneettiset maanpintamittausmenetelmät kärsivät kaikista rautaromusta, jota on asutusten ympäristössä yllättävän paljon. Samoin monet maan alle sijoitetut johdot aiheuttavat häiriöitä mittauksiin.

Maan alle sijoitetut johdot ja metalliaidat ovat tyypillisiä rakenteita, jotka vaikuttavat latauspotentiaali- ja vastusluotausmittausten tuloksiin, siis galvaanisiin menetelmiin. Myös induktiiviset mittaukset häiriintyvät tällaisista rakennelmistä, mutta koska induktiivisiä mittauksia käytettäessä ei olla kontaktissa johteeseen, vaikuttavat tuloksiin kaikki johtavat, riittävän suuret muodostelmat. Tällaisia ovat esimerkiksi sähkölinjat tai läheisen pysäköintipaikan autot.

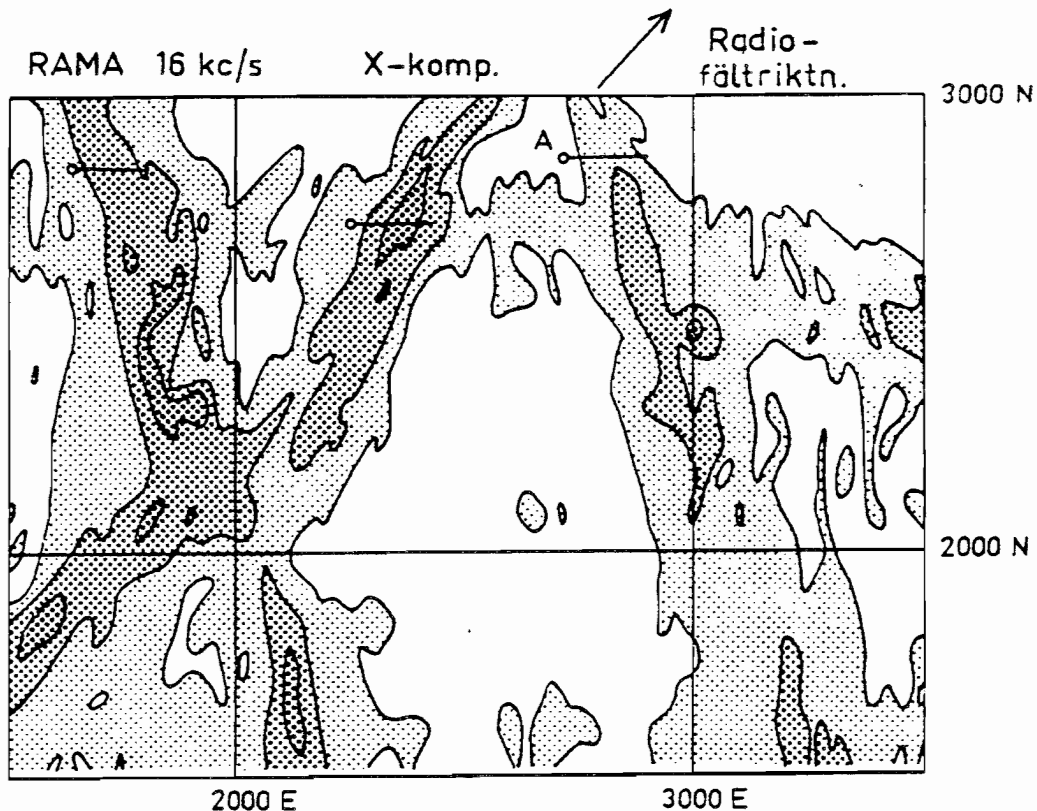
Reiässä tehdyt mittaukset ovat yleensä paremmassa turvassa häiriöiltä kuin maanpintamittaukset. Kallion sisällä, johon reikä yleensä tehdään, ei ole entuudestaan mitään muuta kuin kalliota. Reikämittauksissa tutkitaan vain reiän lähiympäristön ominaisuuksia. Poikkeuksena tähän voi olla latauspotentiaalimittaus, mutta reiästä reikään tehtynä sekin on maan alle rajoittunut.

4  
KALLIORAKENTAMISEN GEOFYYSIIKKA SIVUAVIA SELVITYKSIÄ

Seuraavassa esitellään joitakin tutkimuksia, jotka sivuavat tai suoranaisesti käsittelevät geofysiikan hyväksikäyttöä kalliorakentamisen esitutkimuksessa. Jos tutkimuksen tuloksena on saatu selkeitä tuloksia, ne on esitetty lyhyesti.

4.1  
Eriksson 1974 - kokemuksia Ruotsissa

Erikssonin selvityksessä /14/ käsitellään erityisesti sähköisiä ja magneettisia menetelmiä heikkousvyöhykkeiden paikantamisessa.

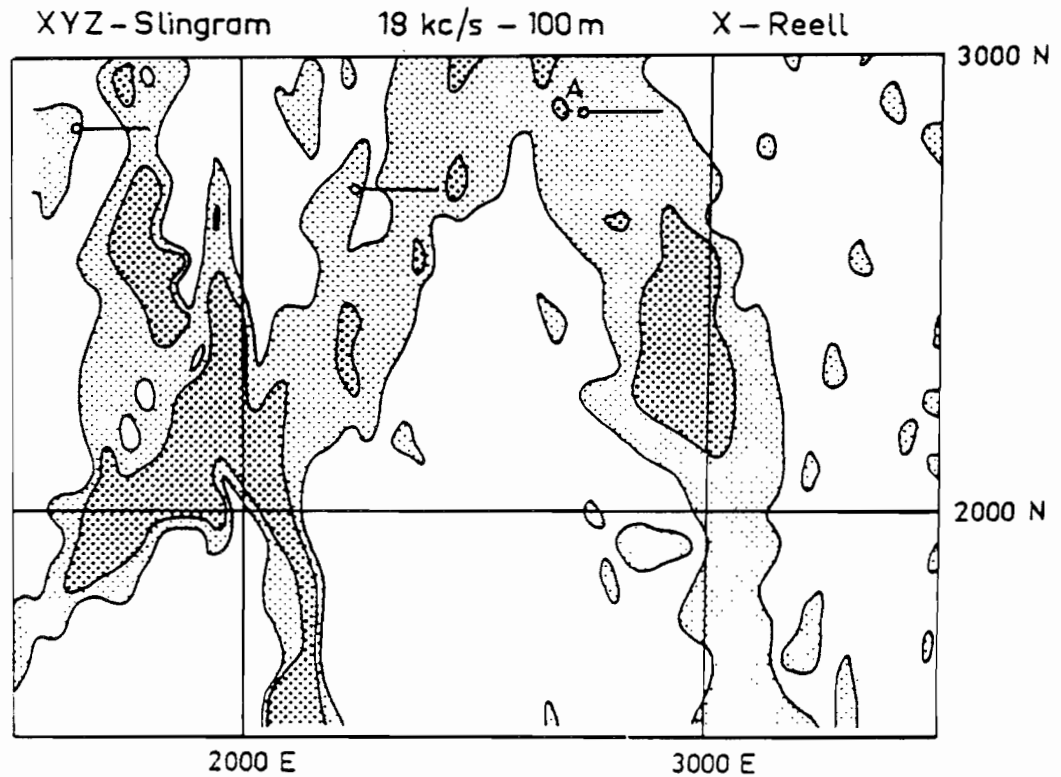


Kuva 3. VLF-(RAMA-)anomaliakartta kairauksin todetun heikkousvyöhykkeen kohdalla /14/.

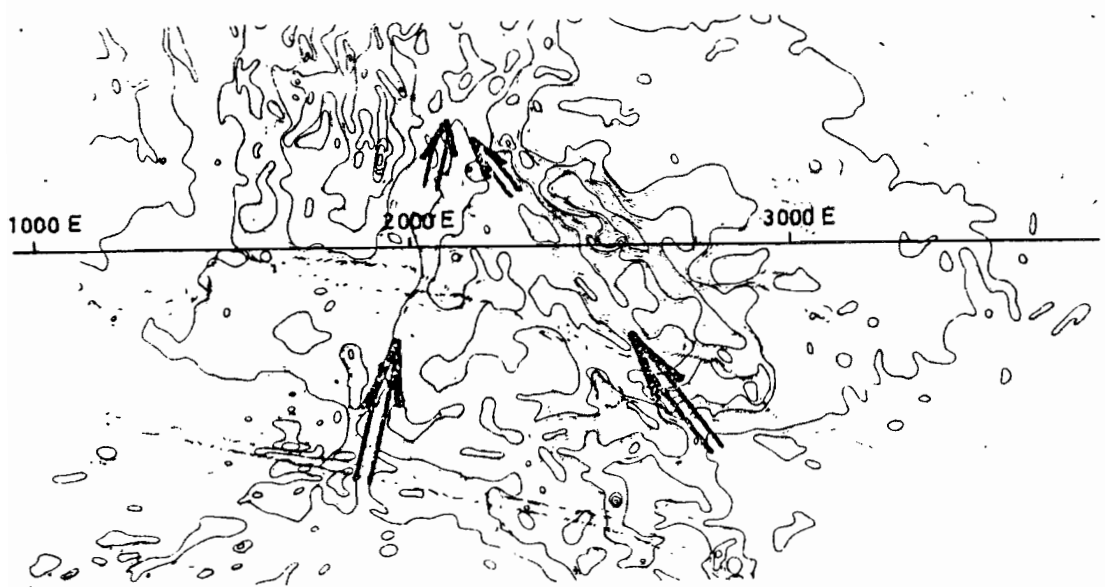
Metodien valinnassa on lähdetty eri menetelmien seuraavista ominaisuuksista:

- Seisminen menetelmä: huokoisuudesta johtuva seismisen aallon nopeuden aleneminen.
- Ilmakuvaus: liikuntojen ja eroosion aiheuttamat topografiaefektit.
- Magneettinen menetelmä: kemiallisesta muuttumisesta johtuva positiivinen tai negatiivinen susceptiivisuusero ympäröivään kallioon verrattuna (yleensä deformaatio aiheuttaa muutoksia susceptiivisuudessa).
- Sähköiset menetelmät: vesipitoisuuden lisääntymisestä aiheutunut johtavuuden parantuminen (sähköisten anomaliaa aiheuttavien rakenteiden

- deformoituminen).
- Gravimetrinen menetelmä: huokoisuudesta johtuva tiheyden alentuminen ruhjeessa (käytännössä rakotäytteenä voi olla suhteellisen tiheääkin ainetta).



Kuva 4. Slingram-anomaliakartta kairauksin todetun heikkousvyöhykkeen kohdalla /14/.

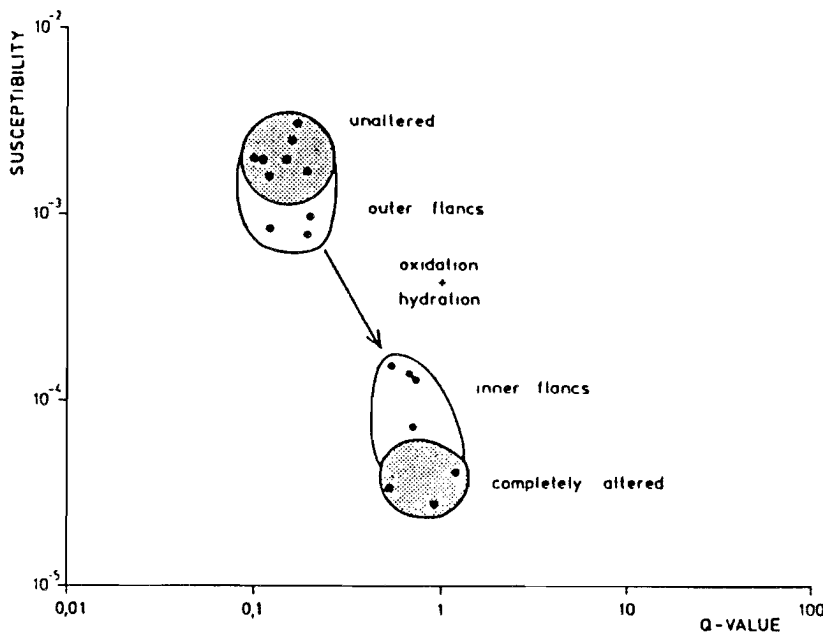


Kuva 5. Bastuseltunneli. Maamagneettisia anomaliaita, jotka indikoivat selviä heikkousvyöhykkeitä /14/.

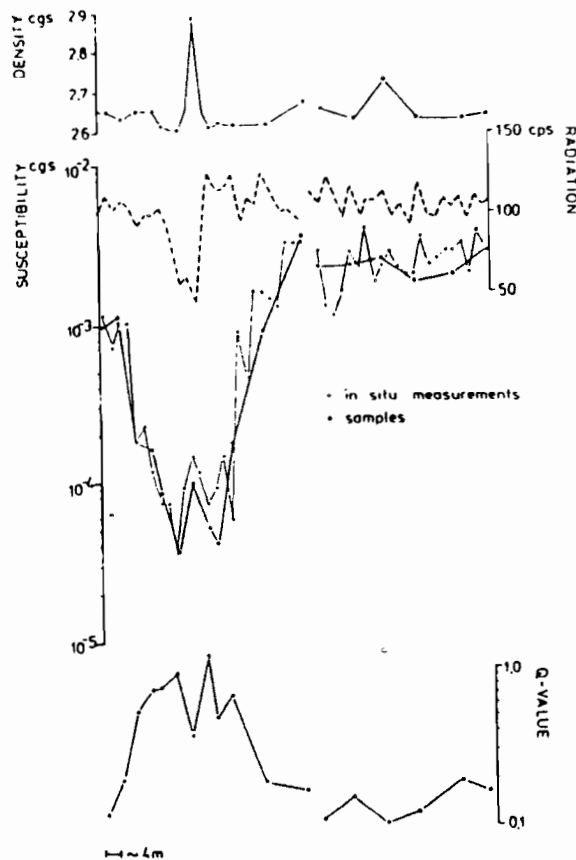
Mittauskohteiksi valitut heikkousvyöhykkeet ovat melko suuria, jopa kymmeniä kilometrejä leveitä (kalliorakentamisessa on usein tärkeää paikantaa kaapeita, jopa muutamien metrien levyisiä ruhjeita). Kuvissa 3 ja 4 on esitetty VLF- ja slingram-anomaliakartat kairauksin todettujen heikkousvyöhykkeiden kohdalla. Myös magneettisella mittauksella voitiin havaita selvien heikkousvyöhykkeiden paikat (kuva 5).

#### 4.2 Henkel ja Guzman 1977 - ruhjeiden magneettisista ominaisuuksista

Henkel ja Guzman /17/ kiinnittivät huomiota matalalentomittausten magneettisiin minimeihin. Tällaiset minimiit ovat usein heikkousvyöhykkeitä. Kirjoittajat ovat tehneet sekä in situ- että laboratoriomittauksia, joiden perusteella he ovat tehneet kuvan 6 mukaisen diagrammin hapettumisen ja hydrautumisen vaikutuksesta susceptiivisuuteen ja Q-arvoon. Tyypillinen hapettumisen aiheuttama muutos on magnetiitin muuttuminen hematitiiksi. Kuvassa 7 on esitetty petrofysikaalisten määritysten tuloksia pienen ruhjeen yli.



Kuva 6. Hapettumis- ja hydrautumisprosessi susceptiivisuus - Q-arvo -diagrammissa /17/.



Kuva 7. Pienen ruhjeen yli mitattuja petrofysikaalisia ominaisuuksia kohdasta, jossa esiintyi magneettinen minimianomalia /17/. Mitatut ominaisuudet ovat tiheys, susceptiivisuus, radioaktiivinen säteily sekä Q-arvo.

#### 4.3

##### Bolmen-tunnelin tutkimukset

Bolmen-tunneli on Bolmen-järvestä Ruotsin eteläosiin (Perstorpiin) ulottuva raakavesitunneli /55, 56, 57/. Tunneli on noin 80 km mittainen ja sen linjausvyvyys vaihtelee 50 m ja 100 m välillä maanpinnasta. Tunnelin poikkipinta-ala on  $8 \text{ m}^2$ .

Tutkimukset aloitettiin maavastusmittauksilla ja myöhemmin niitä laajennettiin VLF-mittauksiin ja slingram-mittauksiin. Mittauksia tehtiin yli 12 km matkalla.

Maavastusmittauksissa hyvä johtavuus yhdessä pitkän elektrodivälin kanssa indikoi kosteaa peruskalliota. Tulokinnan yksinkertaistamiseksi kallio jaettiin neljään johtavuusluokkaan.

Sähkömagneettisissa mittauksissa kiinnitettiin eniten huomiota sekundäärkentän ja vaiheen muutoksiin, vaikka joissakin tapauksissa myös näennäinen ominaisvastus oli mahdollista laskea. Sähkömagneettisten menetelmien suurin etu on niiden nopeudessa:

kontaktia tutkittavaan kohteeseen ei tarvita, joten suuria alueita on mahdollista kartoittaa systemaattisesti.

Seuraavassa on esitetty luettelonomaisesti tutkimuksen tuloksia /57/:

- Vettä vuotavista (heikkousvyöhyke on määritelty vettä vuotavaksi jos se vaati esi-injektointia) ruhjeista 59 % havaittiin VLF-mittauksin, 63 % slingram-mittauksin ja 57 % johtavuusmittauksin. Kaikki 12 erityisen paljon vuotavaa vyöhykettä havaittiin VLF- ja slingram-mittauksin, 10 havaittiin johtavuusmittauksin.
- Yli 50 m levyisistä vyöhykkeistä 73 % havaittiin VLF-mittauksin, 85 % slingram-mittauksin ja 65 % johtavuusmittauksin.
- Aiemmin oli seismisin tutkimuksin havaittu 52 % vettä vuotavista heikkousvyöhykkeistä.
- Useimmat sähköisin menetelmin havaitsematta jääneistä vyöhykkeistä olivat kapeita.
- Vuotamattomista 12 ruhjeesta 55 % havaittiin VLF-mittauksin ja 50 % johtavuus- ja seismisin mittauksin. Kolme näistä vyöhykkeistä oli savitäytteisiä.
- Vettä vuotavista ruhjeista oli 19 suhteellisen selvästi savipitoisia. Näistä savitäytteisistä vyöhykkeistä 95 % havaittiin VLF- ja slingram-mittauksin ja 74 % johtavuus- ja seismisin mittauksin.
- Heikkousvyöhykkeiden havaitseminen sähköisillä menetelmillä riippuu pääasiassa kohteen savi- ja vesipitoisuudesta.

Sähköisten menetelmien suurin etu on mittausten helppous ja nopeus. Ruotsissa (kuten Suomessakin) voi useimpia sähköisiä mittauksia tehdä jokamiehen oikeuksin. Toisaalta sähköä johtavat ihmisten tekemät rakennelmat vaikeuttavat mittauksia.

Bolmen-tunnelin geofysikaalaisten tutkimusten yleisinä johtopäätöksinä Stanfors /55/ mainitsee muun muassa seuraavat:

- Geofysikaaliset mittausten menetelmät ovat useimmiten tehokas apuväline. On kuitenkin tärkeää käyttää oikeaa menetelmää oikeassa ongelmassa.
- VLF on hyvä ja halpa menetelmä ruhje- ja rakoiluvyöhykkeiden paikantamisessa. Menetelmä on kuitenkin herkkä häiriöille.
- Vastusmittaus on selvästi kalliimpi menetelmä kuin VLF, mutta hyvä detaljitutkimukseen.
- Seisminen refraktioluotaus on useimmiten - oikein käytettynä - paras apuväline, kun kyseessä on kalliokerrokset.
- Paras tulos saadaan, kun vähintään kahta menetelmää voidaan tulkita yhdessä. On tärkeää ottaa huomioon menetelmien rajoitukset.

Mittausten suhteellinen hinta muodostui seuraavaksi /57/:

- VLF	1,0
- Slingram	1,5
- Maavastusmittaus	4,0
- Seisminen mittaus	15,0
- Magneettinen mittaus	1,9.

Maapeitteen paksuus, koostumus ja läpi virtaavan veden määrä, jotka ovat merkittäviä kysymyksiä, on jätetty tämän selvityksen ulkopuolelle.

#### 4.4

##### Ydinjätetutkimukset

Ydinjätteiden sijoituspaikkatutkimuksissa pyritään selvittämään kallioperän soveltumista ydinjätteiden loppusijoittamiseen. Näissä tutkimuksissa selvitetään periaatteessa samoja kallion rakennepiirteitä, jotka kiinnostavat myös kalliorakentajaa, nimittäin kallion rakoilua, jännitystä, kivilajeja sekä veden liikkumista kalliossa.

Ydinjätteet on suunniteltu sijoitettaviksi melko syvälle kallioon (500 - 1000 m), minkä vuoksi tutkimusmenetelmät ovat painottuneet hieman toisin kuin kalliorakentamisessa. Kuitenkin ydinjätteiden sijoituspaikkatutkimuksien yhteydessä tehty geofysikaalisten tutkimusmenetelmien kehittämistyö on avannut uusia mahdollisuuksia menetelmien hyväksikäytössä myös kalliorakentamisen hyväksi.

Pääpaino ydinjätetutkimuksiin liittyvässä geofysikaalisten menetelmien kehittämistyössä on reikämittauksissa. Ydinjätetutkimusten alkuvaiheessa tehdyt selvitykset olivat luonteeltaan menetelmäkartoituksia. Tällaiset kirjallisuusselvitykset /35, 39, 40, 43/ ovat hyödyllisiä yhteenvetoja myös muissa kallion rakenteen selvittämistä vaativissa kohteissa.

Suomessa on Laviälle kairattu noin 1000 m mittainen reikä, jossa on testattu erilaisia reikämittausmenetelmiä /4, 46, 47/. Lavian seudulla on testattu myös joitakin maanpintamittausmenetelmiä /23, 52/. Kairatun reiän viereen poratun reiän avulla voidaan tehdä mittauksia myös reiästä reikään. Kokemuksia sähköisistä monireikämittauksista Lavialla on esitetty viitteessä /46/.

Kanadan ja Pohjoismaitten ydinjätetutkimuksen tilanteesta vuoteen 1984 saakka antaa melko hyvän yleiskuvan Geoexploration-lehden erikoisnumero 3/4 1984 (esimerkiksi /20, 26, 27 ja 54/).

#### 4.5

##### Maatutkaselvitykset

Maatutka on mittalaite, jonka käyttöä on suunniteltu nimenomaan kalliorakentamista palvelevaan tutkimustyöhön. Sovelluksia on myös turvesoiden kartoittamisessa.



Ruotsissa on Ulriksen /60/ tehnyt vuonna 1982 väitöskirjan, jossa maatutkan käyttöä rakennuskohteissa tarkastellaan varsin perusteellisesti. Teoreettisten perusteiden esittämisen lisäksi maatutkan käyttöä on testattu maaperässä, kallioperässä ja vedessä. Myös lumessa ja tien päällä tehtyjä mittauksia on kokeiltu. Erikseen on selvitelty maaperän kosteusmittauksen mahdollisuutta.

Bjelm, Follin ja Svensson /9/ ovat vuonna 1982 tehneet selvityksen maatutkan käytöstä maaperätutkimuksiin. Selvitys on Ulriksenin tutkimukseen verrattuna käytännönläheisempi. Myös tässä selvityksessä on testattu maatutkaa erilaisissa käytännön tilanteissa ja maaperätyypeissä.

Pääasiassa Imatran Voima Oy:n ja Geologian tutkimuskeskuksen toimesta on Suomessakin kokeiltu maatutkaa erilaisissa maaperän tutkimuskohteissa, muun muassa turvesoiden tutkimuksissa ja ydinjätteen sijoituspaikkatutkimuksien yhteydessä. Vesterinen /61/ on tehnyt diplomityön, joka on lähinnä yleiskuvaus maatutkasta ja sen käyttömahdollisuuksista. Myös turvesoiden inventoimisesta on tehty tutkimuksia /2, 44/.

Sveriges Geologiska AB on tehnyt maatutkamittauksia Helsingin kaupungille kolmessa kohteessa, jotka olivat Malmi, Vuosaari ja Mellunmäki /51/. Tunkeutumissyvyys oli kohteissa 10 - 20 m, kuitenkin Mellunmäessä 10 m. Tulokset sisälsivät lähinnä "epävarmoja kalliopintoja" ja muita rajapintoja, jotka vaativat tarkistuskairauksia /51/.

Sveriges Geologiska AB on selvittänyt ja kokeillut maatutkan käyttöä myös reiässä /31/.

#### 4.6

Dammert ja Väättäinen 1986 - yleiskatsaus kallion tutkimusmenetelmistä

Dammert ja Väättäinen ovat Vuorimiesyhdistykselle tekemässään selvityksessä käsitelleet heikkousvyöhykkeiden tutkimista /11/. Selvitys on melko kattava yleiskatsaus erilaisiin menetelmiin, joita voidaan tutkimuksissa mahdollisesti käyttää.

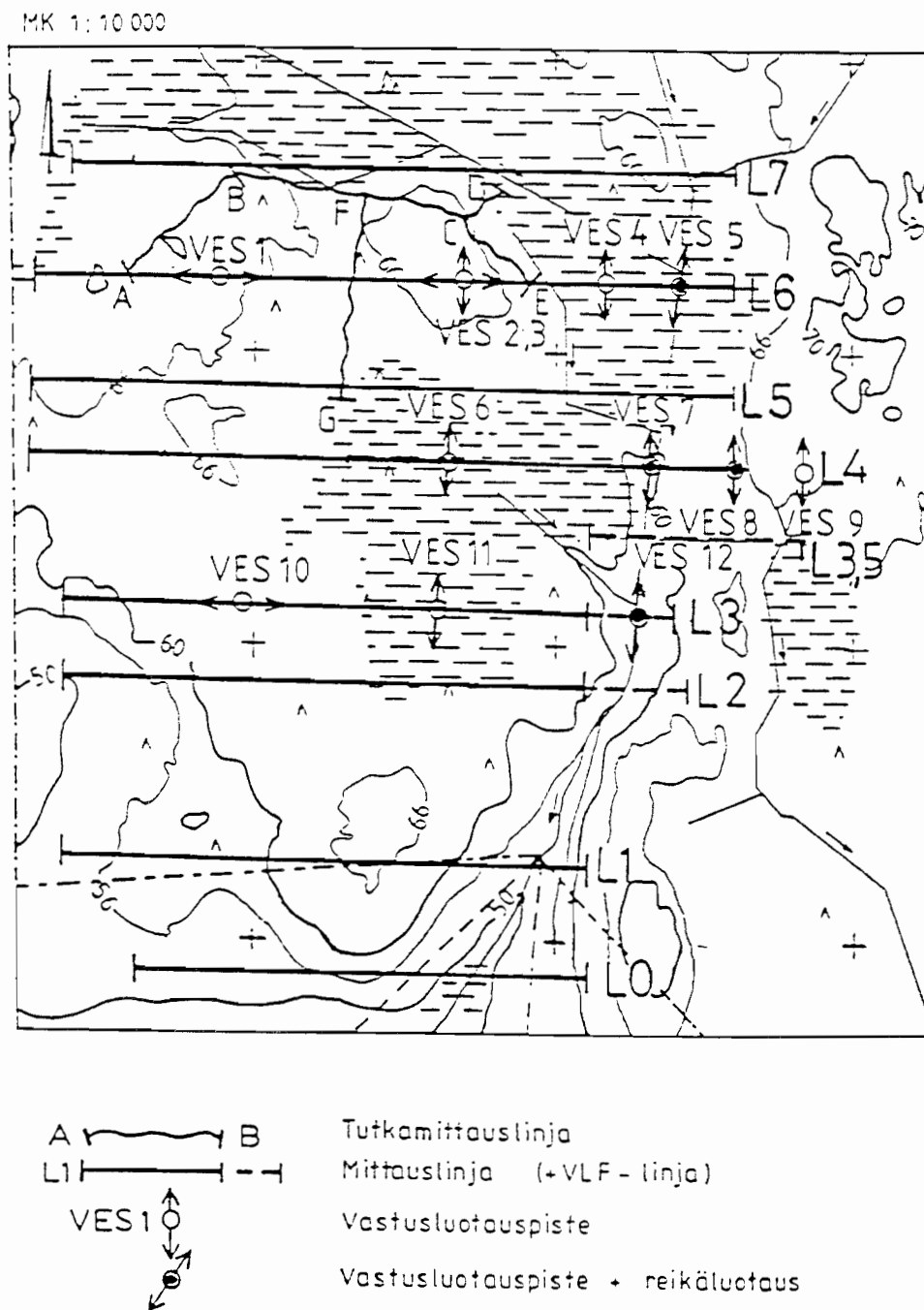
Selvityksen alkuosassa esitellään joitakin kallioluokituksia ja louhittavuusluokituksia. Kalliotutkimuksen metodiikan esittelyn jälkeen kuvaillaan erilaisia geofysikaalisia mittausten menetelmiä, mukaan luettuna aerogeofysikaaliset menetelmät. Selvityksessä käsitellään myös jännitystilamittauksia, vedenjohtavuusmittauksia sekä heikkousvyöhykkeiden vaikutusta louhintaan ja louhintakustannuksiin.

Raportin yhteenvedossa korostetaan, että kuhunkin kohteeseen on tärkeää valita juuri oikeat menetelmät. Maankamaran monimuotoisuuden vuoksi tutkimuksia ei voida tehdä kovin kaavamaisesti.

4.7

Espoon Ämmässuon tutkimukset

VTT:n geotekniikan laboratorio on tehnyt Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunnalle (YTV) tutkimuksia Pikku-Ämmässuon kaatopaikka-alueella (kuva 8) /22/.



Kuva 8. Espoon Ämmässuon geofysikaalinen mittauslinjasto /22/.

Tutkimusten tavoitteena oli mahdollisten kallioperän rakoilu- ja ruhjeytyöhykkeiden paikantaminen maanpintageofysikaalisin menetelmin maakerrosten alta sekä arvioida kallioperän homogeenisuus ja eheys. Tulkin-

tatulosten perusteella ohjattiin kallioperäkairaus tärkeimpiin rakovyöhykkeisiin, joissa rakoilun laatu ja asema sekä mahdollisten vyöhykkeiden keskinäiset hydrauliset yhteydet kartoitettiin geofysikaalisin reikämittauksin, kairausnäytehavainnoin ja vesimennekkikokein.

Kohteessa käytettiin seuraavia geofysikaalisia mittausten menetelmiä:

- vastuskartoitus
- vastusluotaus
- VLF-mittaus
- maatutkamittaus.

Neljässä reiässä tehtiin lisäksi:

- vesimennekkikokeet
- sähköiset mittaukset
- radiometriset mittaukset
- kairausnäytekuvaus.

Suoritetun tutkimuksen avulla pystyttiin Ämmässuon alueella paikantamaan kolme rikkonaisuusvyöhykettä.

5

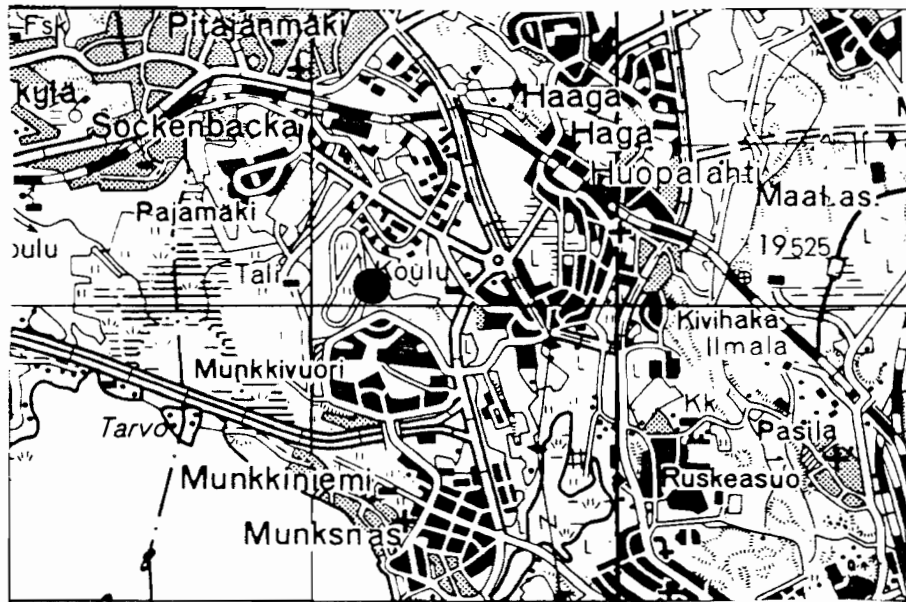
KENTTÄMITTAUSKOHTEET

5.1

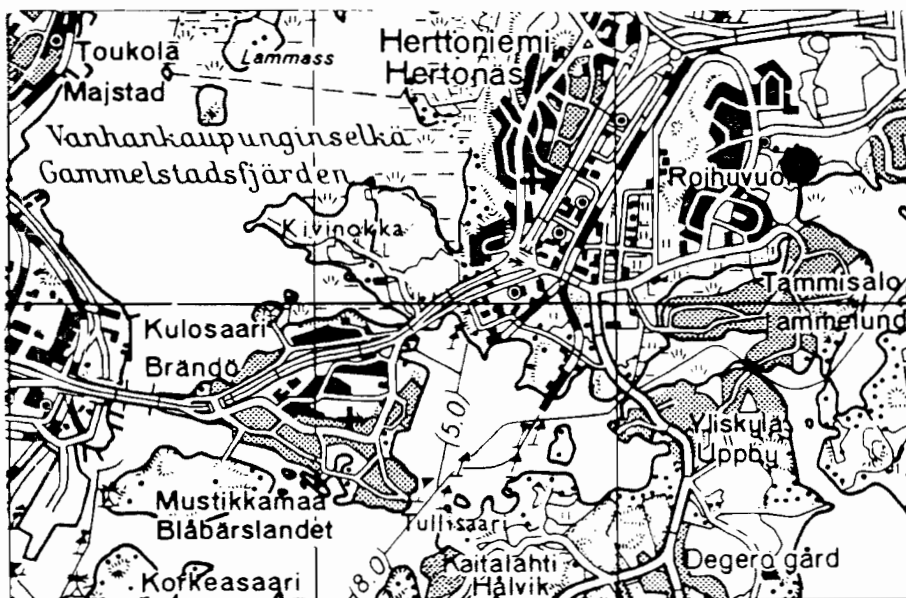
Yleistä

Tutkimuksessa tehtiin koemittauksia kolmessa kenttämittauskohteessa:

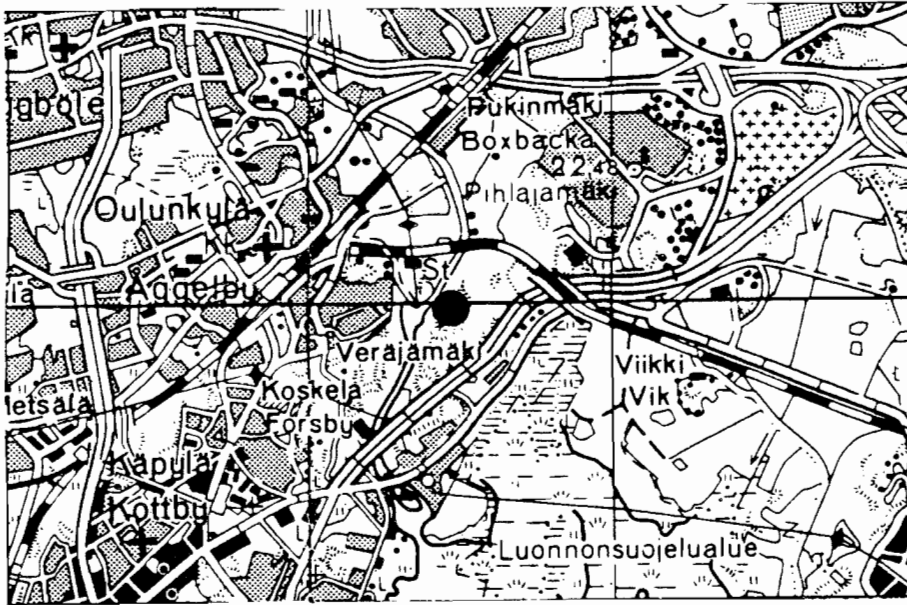
- Tali (kuvat 9 ja 12)
- Roihuvuori (kuvat 10 ja 13)
- Viikinmäki (kuvat 11 ja 14).



Kuva 9. Talin tutkimuskohteen sijainti Helsingissä.



Kuva 10. Roihuvuoren tutkimuskohteen sijainti Helsingissä.

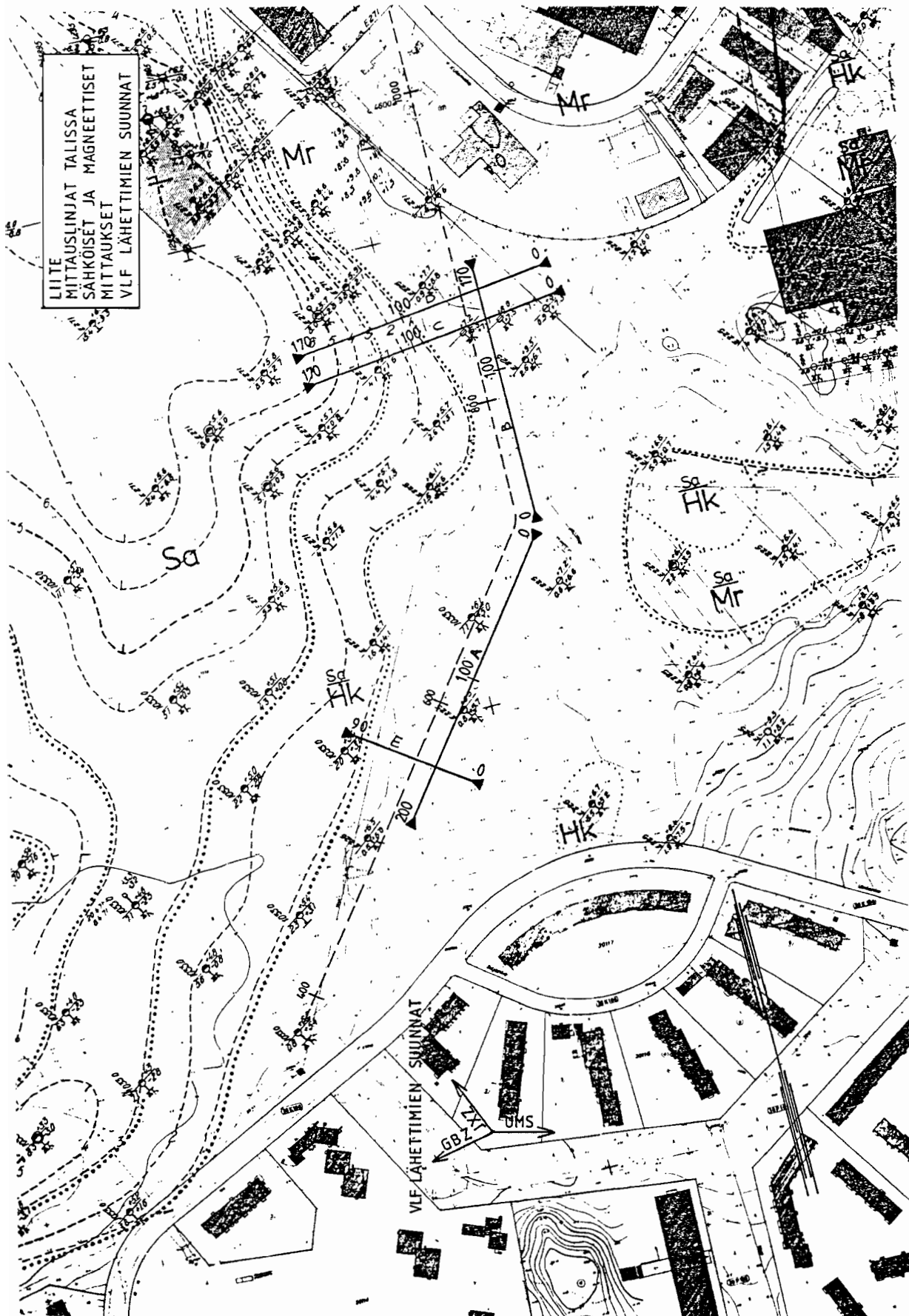


Kuva 11. Viikinmäen tutkimuskohteen sijainti Helsingissä.

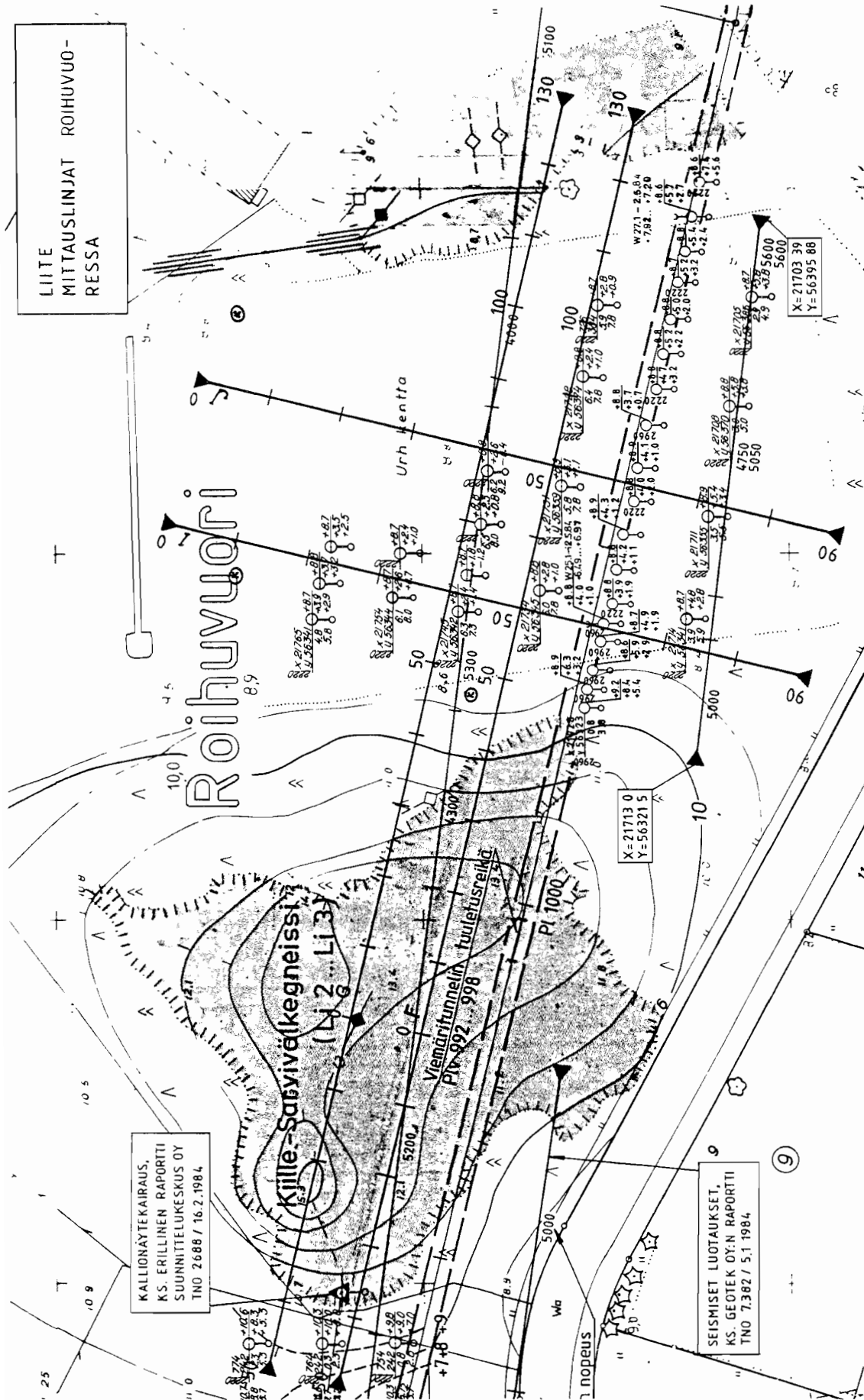
Talin tutkimusalue sijaitsee Helsingin Munkkivuoresa, Ulvilantien pohjoispuolella olevassa metsässä ja urheilukenttäalueella (kuvat 9 ja 12). Tutkittava alue mukaillee Tali - Lassila-viemäritunnelin linjausta ja on kooltaan noin 300 x 500 m.

Roihuvuoren tutkimusalue sijaitsee Itä-Helsingissä, Untuvaistentien pään tuntumassa osittain E-instituutin puistoalueella. Mittausalueen koko on noin 170 x 90 m (kuvat 10 ja 13). Alueen valintaan vaikutti maastomittauskelpoisuuden lisäksi se, että Roihuvuoren jätevesitunneli on rakennettu tämän alueen kohdalle.

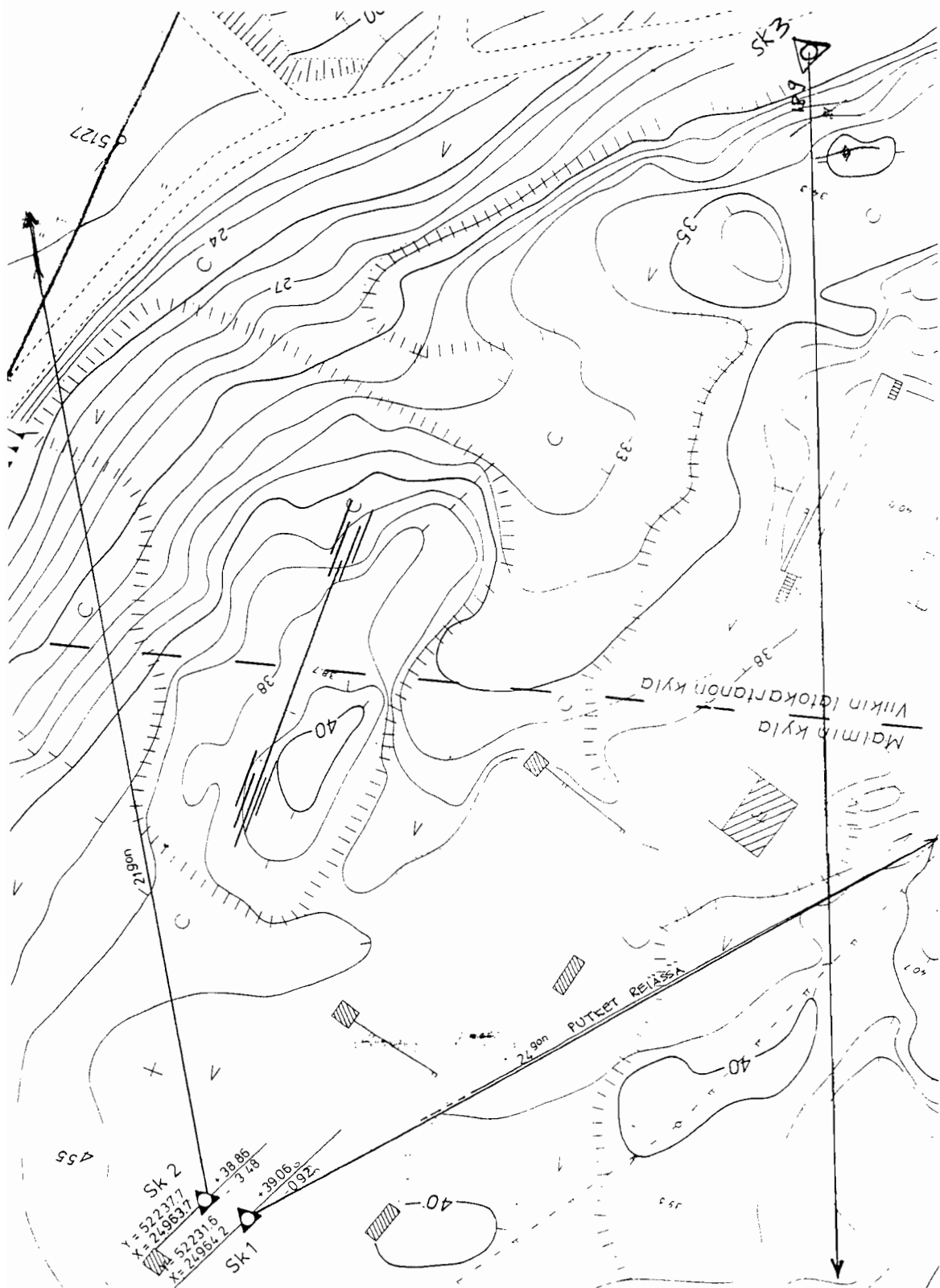
Viikinmäen tutkimusalue sijaitsee Viikinmäen ampumaradan alueella. Alueella on meneillään tutkimukset, jotka liittyvät maanalaisen jätevedenpuhdistamon rakennushankkeeseen. Alueelle tehtyjä timanttikaira-reikiä käytettiin geofysikaalisiin reikämittauksiin (kuvat 11 ja 14).



Kuva 12. Talin tutkimusalue. Kuvaan on merkitty päälinjat, joilla tehtiin sähköiset ja magneettiset mittaukset.



Kuva 13. Roihuvuoren mittausalue. Mittauslinjat mu-  
kailevat alueelle louhitun tunnelin linjausta.



Kuva 14. Viikinmäen tutkimusalue. Alueella on tehty timanttikairauksia maanalaisen jätevedenpuhdistamon suunnittelun yhteydessä.



5.2  
Tali

5.2.1  
Maaperä

Maanpinnan korkeus oli tutkimusalueella alimmassa kohdassa urheilukentällä noin +5,6 m ja ylimmässä kohdassa noin +9,3 m.

Urheilukenttä sijaitsee savikolla, jonka syvin tunnettu kohta on tasossa -9,3 m, jolloin savikerros on noin 15 m paksuinen. Kairaukset urheilukentän kaakkois- ja eteläosassa ovat päättyneet kiveen tai loh-kareeseen ja savikerroksen keskipaksuus on ollut 3 - 5 m.

Savikon alla on pohjamaakerros, joka on moreenia ja hiekkaa. Mittauslinjojen kohdalla on maalajikerros-ten paksuus suurimmillaan noin 7 m. Tällainen kohta on C- ja D-linjojen loppupäässä.

Urheilukentän ja metsän rajalla savikerros peittää kitkamaakerrosta, joka tutkimusalueen eteläosassa on hiekkaa ja pohjoiseen mentäessä muuttuu moreeniksi. Kairaussyvyyksistä arvioitu moreenikerroksen paksuus on tällä alueella 1 - 1,5 m.

5.2.2  
Kallioperä

Pääkivilaji Talin tutkimusalueella on kiillegneissi. Kiillegneississä on paikoin jopa 5 m levyisiä graniittijuonia. Paikoin gneissin ja graniitin kontakti on migmatiittiutunutta.

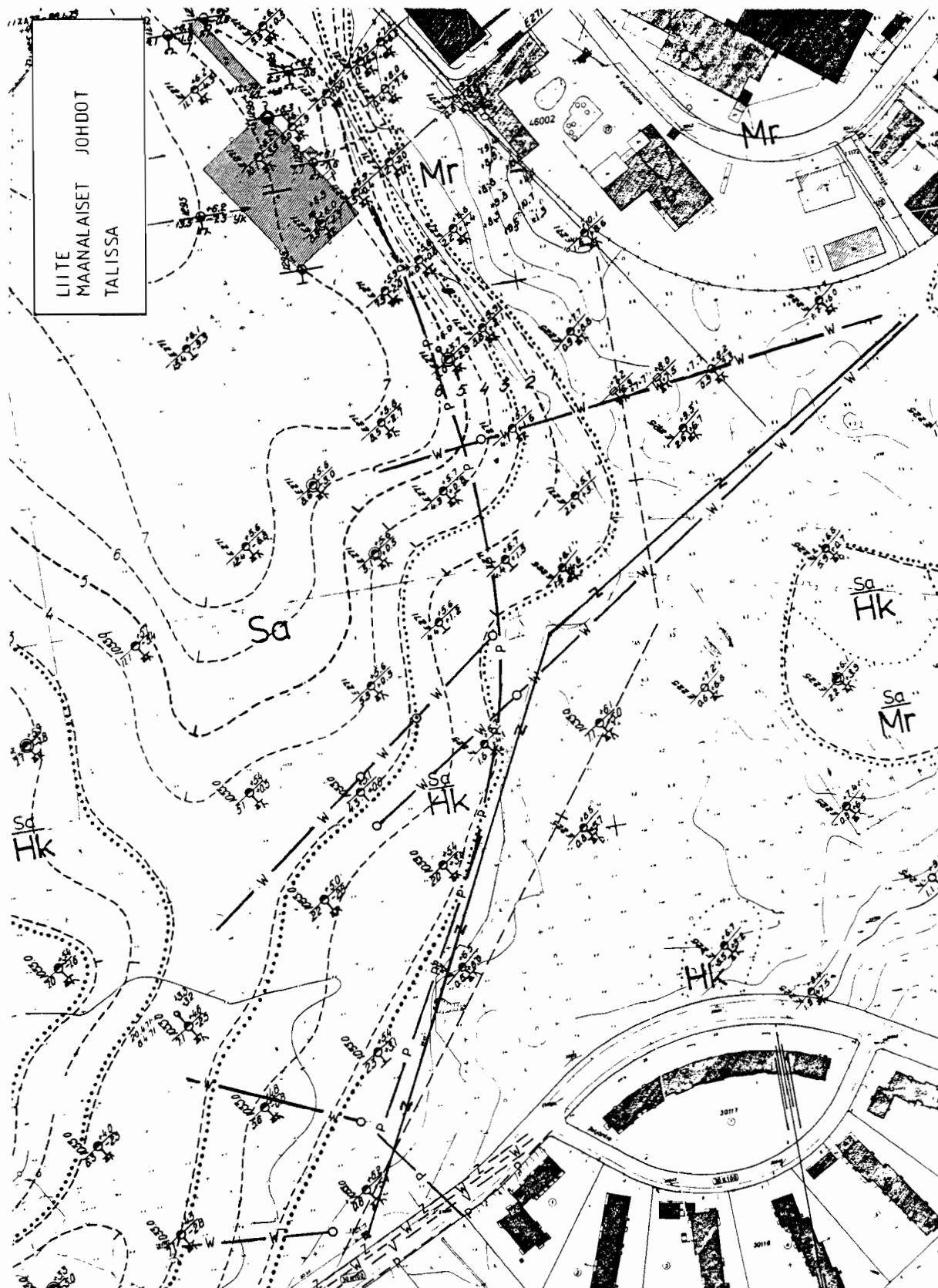
Kiillegneissin päämineraalit ovat kiilteet, kvartsi ja maasälpä. Graniitin päämineraalit ovat kvartsi, plagioklaasi ja kalimaasälpä.

Kiillegneissi on liuskeista, keskirakeista, rapautumatonta tai vähän rapautunutta (Rp 0 - 1). Liuskeisuusaste vaihtelee kohtalaisesta voimakkaaseen (L 2 - 3). Liuskeisuuden suunta on 205 - 210 astetta ja kaade lähes pysty.

Graniitti on massamaista, suuntauksetonta ja keski- tai karkearakeista. Paikoin graniitti on jopa pegmatiittia.

Kalliolaatu on kiinteää, liuskeista tai massamaista ja melko tiheärakoista (Rk 3 - 4). Kallioperässä on lisäksi tapahtunut pieniä siirroksia. Mittausalueen pohjoispäässä rakoilu on tiheämpää kuin eteläpäässä.

5.2.3  
Johdot



Kuva 15. Talin mittausalueen kunnallistekniset johdot.

Mittausalueella on useita kunnallisteknisiä johtoja: puhelinkaapeli, useita viemäriputkia sekä maanpäällinen sähkölinja. Lisäksi alueen kävelyteiden varsinne on vedetty lyhtyjä varten kaapelit. Kaapeleista ja muista johtimista saatiin tiedot asianomaisilta laitoksilta ja johdot merkittiin karttaan (kuva 15).

Mittaustulosten kannalta johtojen vaikutus ei ollut niin suuri kuin oli ennakkoon pelättävissä. Kuitenkin ruhjeiden aiheuttamat anomaliat ovat varsinkin induktiivisissa menetelmissä melko pieniä, joten kaikki häiriöt ovat haitaksi.

Ainakin osassa viemäriputkistoa on käytetty ilmeisesti jotakin keraamista materiaalia, jolla ei ollut ainakaan protonimagnetometrillä havaittavaa magneettisuutta, eikä merkittävää vaikutusta tullut esille muillakaan menetelmillä. Sen sijaan pallokentällä sijaitseva puhelinkaapeli saattoi olla yhdessä savikon reunan kanssa syynä slingramilla havaittuun anomaliaan.

### 5.3 Roihuvuori

#### 5.3.1 Maaperä

Maanpinnan korkeus on suurimmillaan mittausalueen länsiosassa noin +13 m. Alin kohta on pelikentän kohdalla, jossa maanpinta on suunnilleen tasossa +9 m.

Alueen länsiosassa on kallio, jonka rinteitä tasoittaa hiekasta ja sorasta koostuva kitkamaakerros. Urheilukenttä on vanhaa vesijättömaata, jossa kitkamaakerrosta peittää 1 - 3 m paksuinen savikerros.

#### 5.3.2 Kallioperä

Pääkivilajit Roihuvuoren tutkimuskohteessa ovat sarvivälke-kiillegneissi ja amfiboliitti. Kivilajien päämineraalit ovat kiilteet, sarvivälke, kvartsi ja maasälpä.

Kivilaatu on liuskeista, keskirakeista, rapautumattonta tai vähän rapautunutta (Rp 0 - 1). Paikoin on rapautumisen yhteydessä tapahtunut raudan hapettumista, minkä johdosta kallion pinta on "ruostunut" ja pintakerros rapautunut pois.

Liuskeisuusaste vaihtelee kohtalaisesta voimakkaaseen (L 2 - 3). Liuskeisuuden suunta on lähes itä-länsisuuntainen ja kaade on miltei pysty.

Rakotiheys vaihtelee vähärakoisesta runsasrakoiseen (Rk 2 - 3). Kallion pääarakosuunta yhtyy liuskeisuus-

den suuntaan. Kulun suunta ja kaade ovat (suunta/kaade) 285/90 astetta. Muut yleiset rakosuunnat ovat 220/90 astetta ja 160/90 astetta. Lisäksi kalliassa on loiva - vaaka-asentoista rakoilua.

Raot ovat yleensä tiiviitä, mutta kallion sisällä voi rakotäytteenä olla savimineraaleja, kalsiittia, karbonaattia, ruostetta ja kloriittia.

Kalliolaatu on kiinteää ja liuskeista (Li 2 - 3). Kalliassa esiintyy lisäksi paikallisia murros-ruhjerakenteisia vyöhykkeitä, jotka on havaittu alueen läpi louhitusta tunnelista.

### 5.3.3 Johdot

Mittausalueella olevalla pallokentällä sijaitsevat ainakin salaojia. Mitään kaupungin omistamia suuria kunnallisteknisiä johtoja ei kuitenkaan viemäritunnelia lukuunottamatta alueella sijaitse.

Johtojen vaikutus geofysikaalisissa mittauksissa on kuitenkin yleensä varsin selvästi havaittavissa, eikä ole esimerkiksi suurta vaaraa siitä, että johtoa voitaisiin luulla ruhjeeksi. Suurin vaikutus on valurautaisilla kaivon kansilla.

### 5.4 Viikinmäki

#### 5.4.1 Maaperä

Tutkimuspisteet sijaitsevat ympäristöään noin 20 m korkeammalla kalliomäellä. Mäen korkein huippu on tasolla + 40 m. Mäen päällä sijaitseva kairanreikä Sk2 lähtee tasolta +39 m. Mäen pohjoispuolella sijaitseva Sk3 lähtee tasolta +25 m. Mäellä on tehty myös muita timanttikairauksia, mutta yllä mainituissa rei'issä tehtiin reikägeofysikaalisia mittauksia.

Mäkeä peittää kitkamaalajikerros, jonka paksuus on 0 - 3 m. Reikien Sk2 ja Sk3 kohdalla hiekka ja sora muodostavat maakerroksen, jonka paksuus on noin 5 - 20 cm.

#### 5.4.2 Kallioperä

Viikinmäen pääkivilaji on graniitti. Graniitin kontaktit ympäröiviin kiillegneisseihin ovat migmatiittituituneet. Kairasydämistä on havaittu, että syvemmällä on amfiboliittijuonia.

Reikien Sk2 ja Sk3 kohdalla kivilaji on graniittia, jonka päämineraalit ovat kvartsi, maasälpä ja biotiitti. Graniitti on massamaista, kiinteää ja reikien Sk2 ja Sk3 kohdalla suuntauksetonta. Raekooltaan graniitti on keski - karkearakeista. Kallion pinta on vähän rapautunutta.

Graniitti on rakotihedeltään harvarakoista (Rk 1). Päärakosuunnat ovat reiän Sk2 lähistöllä 18 - 50/86 astetta, 212/86 astetta ja 278/86 astetta. Raot ovat enimmäkseen tiiviitä, vaikka avorakojakin esiintyy.

Kalliolaatu on kiinteää, massamaista ja harvarakoista. Paikoin graniitissa on merkkejä heikosta metamorfoitumisasteesta.

#### 5.4.3 Johdot

Viikinmäessä ei mittausalueella ole varsinaisia kunnallisteknisiä johtoja, sillä mittaukset suoritettiin kallion sisällä rei'issä. Kuitenkin kairauksien yhteydessä oli kairauskoneen putkikalustoa jäänyt reikään Sk1. Tämä saattoi vaikuttaa jonkin verran reiästä reikään tehtyihin latauspotentialimitauksiin. Suomen Malmi Oy:n tekemien kokeiden perusteella todettiin kuitenkin, että putkien vaikutus ei ollut olennainen tulosten kannalta.

6

## KENTTÄMITTAUKSET

## 6.1

## Yleistä

Kenttämittauksia tehtiin kolmessa kohteessa: Talissa, Roihuvuoressa ja Viikinmäessä. Talissa ja Roihuvuoressa tehtiin maanpintamittauksia, Viikinmäessä tehtiin seisminen luotaus sekä kairanreikämittauksia. Maanpintamittauksissa käytettiin (lukuunottamatta maavastusluotausta) 5 m pisteväliä (kuva 12).

Talissa käytettiin kaikkia tutkimuksessa mukana olleita maanpintamittausmenetelmiä, jotka ovat:

- magneettinen totaalikenttämittaus
- magneettinen pystygradienttimittaus
- magneettinen vaakagradien timittaus
- korkeataajuusslingram
- minislingram
- vastusluotaus
- VLF-R
- maatutkamittaus
- seisminen refraktioluotaus.

Magneettisia ja sähköisiä menetelmiä varten merkittiin alueelle mittauslinjat A, B, C, D, ja E. Linjojen yhteispituus on noin 800 m. Linjat A ja B myötäilevät alueelle tehtyä tunnelia, linjat C, D ja E ovat tunnelia vastaan kohtisuorassa.

Seismiset luotauslinjat S1 ja S4 sijaitsevat suunnilleen linjojen A ja B päällä tai aivan vieressä ja ovat yhdensuuntaisia näiden kanssa. Alueella on myös muita seismisiä mittauslinjoja (päälinja ja S2), jotka ovat etäämmällä muista mittauslinjoista.

Maatutkamittaukset tehtiin käyttäen hyväksi alueella sijaitsevia kevyen liikenteen teitä ja niittyä, sillä kalusto oli niin raskas, ettei sitä ollut soveliaasta käyttää kaupunkipuistossa.

Linjat TA ja TB myötäilevät mahdollisuuksien mukaan linjoja A ja B, joskin eroa suurimmillaan on jopa kymmeniä metrejä. Lisäksi tehtiin mittauksia poikkilinjoilla TE sekä linjan D loppuosalla. Maatutkalla mitattujen linjojen yhteispituus on noin 700 m.

Roihuvuoren mittauskohteessa käytettiin seuraavia menetelmiä:

- magneettinen totaalikenttämittaus
- magneettinen pystygradienttimittaus
- magneettinen vaakagradien timittaus
- minislingram
- vastusluotaus
- seisminen refraktioluotaus.

Linjat F, G, I ja J (kuva 13) sekä seisminen linja SF sijaitsevat Roihuvuoressa (kuva 13). Näistä F ja

G ovat alueella sijaitsevan tunnelin kanssa yhden-suuntaisia siten, että linja F sijaitsee 10 metrin etäisyydellä tunnelista ja G 20 metrin etäisyydellä tunnelista. Linjat I ja J ovat tunnelia vastaan koh-tisuorassa ja 20 metrin etäisyydellä toisistaan. Linjojen F, G, I ja J yhteispituus on noin 540 m.

Seisminen linja SF on suunnilleen tunnelin suuntainen, mutta sijaitsee eri puolella tunnelia kuin linjat F ja G.

Viikinmäessä tehtiin seuraavat reikämittaukset:

- ominaisvastusmittaus Wenner-menetelmällä
- susceptiivisuusmittaus
- radioaktiivisen säteilyn totaali-intensiteetti
- latauspotentiaalimittaus reiästä reikään
- gamma - gamma-mittaus
- neutron - neutron-mittaus
- seisminen refraktioluotaus.

Seisminen refraktioluotaus oli tehty aikaisemmin.

Taulukko 1. Yhteenvedo koemittauksista. Mittauspisteväli on maanpintamittauksissa joitakin paikallisia poikkeuksia lukuunottamatta 5 m. Reikämittauksissa pisteväli on yleensä muutamia senttimetrejä ("puolijatkuva" mittaus).

Mittaus- menetelmä	Linjapituus (m)			
	Tali	Roihu- vuori	Viikin- mäki	yhteen- sä
Magn. totaali-int.	800	540	-	1340
Magn. pystygradientti	800	540	-	1340
Magneettinen vaakagrad.	800	540	-	1340
Korkeataajuuslingram	800	-	-	800
Minislingram		800	540	-1340
Vastusluotaus	5 p.*	10 p.*	-	15 p.*
VLF-R	800	-	-	800
Maatutka		660	-	- 660
Seisminen refr.luotaus	400	110	+ **	510
Ominaisvastusmittaus	-	-	256	256
Susceptiivisuusmittaus	-	-	256	256
Radioakt. sät. tot.int.	-	-	230	230
Latauspotentiaalimitt.	-	-	130 ***	130
Gamma-gamma-mittaus	-	-	30	30
Neutron-neutron-mittaus	-	-	36	36
Yhteensä	5860 m	2270 m	938 m	9068 m

\* Vastusluotauspisteiden lukumäärä.

\*\* Alueella on tehty maan pinnalta seismisiä refraktioluotauksia. Tuloksia ei käsitellä tässä tutkimuksessa.

\*\*\* Reikämittauksissa käytettiin neljää maadotuspistettä. Lisäksi tehtiin joitakin tarkistusluotauksia osittain maanpinnalta.

Mittaukset tehtiin rei'issä Sk2 ja Sk3. Yksireikä-mittaukset tehtiin reiässä Sk2. Reiästä reikään la-  
tauspotentiaalimittauksessa käytettiin hyväksi myös  
reikää Sk3.

Maan pinnalta tehtyä seismistä refraktioluotausta  
varten on tehty omat linjansa.

## 6.2

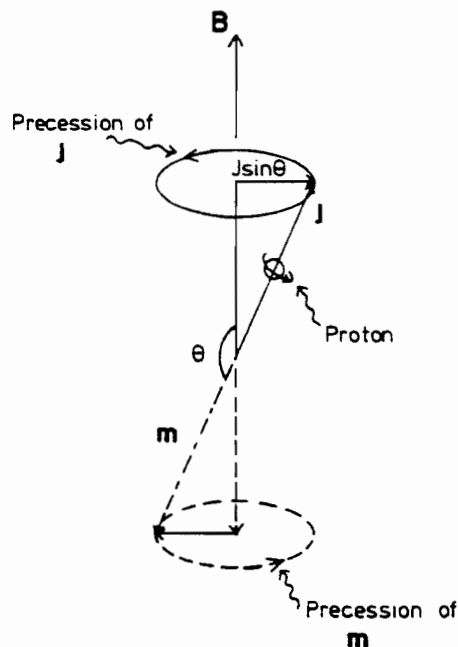
### Maanpintamittausmenetelmät ja -laitteet

#### 6.2.1

#### Magneettinen totaalikenttämittaus

Totaalikenttämittauksissa käytettiin Scintrex  
MP-2-protonimagnetometriä. Protonimagnetometrin toi-  
minta perustuu protonien (vety-ytimien) vapaan pre-  
kessiotaajuuden hyväksikäyttöön: voimakkaalla keino-  
tekoisella ulkoisella magneettikentällä anturin  
"mittausnesteen" -esimerkiksi kerosiinin- sisältämät  
vety-ytimet (protonit) suunnataan suunnilleen kohti-  
suoraan maan magneettikenttään nähden.

Kun keinotekoinen kenttä poistetaan, pyrkivät ytimet  
palautumaan mitattavan kentän suuntaisiksi. Lyhyen  
ajan ytimet värähtelevät tasapainotilan suhteen, jo-  
ka riippuu ulkoisen magneettikentän voimakkuudesta.



Kuva 16. Protonin prekessio /34/.



Magneettikentän voimakkuus voidaan siis saada selville mittaamalla taajuus, jolla ytimet palautumisen aikana prekessoivat tasapainotilan ympärillä. Protonit prekessoivat kulmanopeudella  $\omega$ , josta käytetään nimitystä Larmorin prekessiotaajuus (kuva 16).

Prekessioliikkeen taajuus  $\omega$  on suoraan verrannollinen vaikuttavan magneettikentän B voimakkuuteen. Kuvan 16 merkinnöin saadaan (kaava 1)

$$\omega = \frac{mB \sin \theta}{J \sin \theta} = \gamma B \quad (1)$$

Palautumisen aikana indusoituu anturin kelaan vaihtojännite, jonka taajuus mitataan. Mitatun taajuuden  $\nu$  ja magneettikentän voimakkuuden välinen yhteys saadaan muuttamalla kaava 1 muotoon (kaava 2):

$$B = \frac{\nu}{(\gamma/2\pi)} = 23,487 \nu \text{ nT} \quad (2)$$

Mittauksissa käytetyn Scintrex MP-2-magnetometrin resoluutio on 1 nT /49/. Käytössä mittauksen toistettavuus ei ole kuitenkaan tätä luokkaa edes peräkkäisillä mittauksilla samassa pisteessä. Arviolta noin 2 nT tarkkuuteen on mahdollista päästä, kun pisteeltä otetaan vähintään kolme mittausta, joista lasketaan oikea kentän arvo.

Laitteen gradientin sietokyky (5000 nT/m) ylitettiin vain yhdessä paikassa, nimittäin Roihuvuoressa avokalliolla emäksisen juonen päällä läheltä maan pintaa mitattaessa. Laite on erittäin kenttäkelpoinen ja painaa kokonaisuudessaan vain 3,7 kg.

### 6.2.2

#### Magneettinen pystygradienttimittaus

Magneettiseen pystygradienttimittaukseen käytetyn laitteen toiminta perustuu protonien prekession ominaistaajuuden (Larmor-taajuus) riippuvuuteen magneettikentästä. Laitteen toimintaperiaate on siten sama kuin magneettisen totaalikentän mittaamiseen käytetyssä laitteessa.

Tässä tutkimuksessa käytetty laite on EDA:n valmistama. Pystygradientin mittaaminen on toteutettu kahdella päällekkäin sijoitetulla anturilla. Anturien keskinäinen välimatka on 0,5 m ja anturit on sijoitettu alumiinisen sauvan päähän. Sauvan pituus määräytyy jatkokappaleiden lukumäärän mukaan. Tässä tutkimuksessa gradientin mittauspiste oli noin 2,5 m korkeudella maan pinnasta (kuva 17).



Kuva 17. Mittausta magneettisella gradiometrillä (pystygradienttimittaus).

Mittauksissa käytetty EDA-gradiometrin herkkyys on 0,1 nT eli noin kymmenen kertaa tarkempi kuin totaali-  
kenttämittauksiin käytetty laite.

Laite on varustettu monilla lisäominaisuuksilla, jotka helpottavat ja nopeuttavat kenttätyöskentelyä, muun muassa sisäänrakennetulla tiedonkeruulaitteella. Laitteella on mahdollista mitata gradienttimittauksen ohessa myös totaali-  
kenttää. Tällöin on hyötyä laitteen kyvystä tehdä annettujen referenssipisteiden avulla käyntikorjaus mittaustuloksille.

EDA-gradiometriä voi myös käyttää referenssiasemana, sillä sisäänrakennetun kellon avulla voi gradiometrin ohjelmoida tekemään mittauksen määräajoin. Tallennettu tieto on mahdollista siirtää ulos sarjalii-  
kenneväylän avulla. Virtalähteenä käytetään vyöllä kannettavaa akkua. Laitteisto painaa virtalähteineen noin 10 kg.

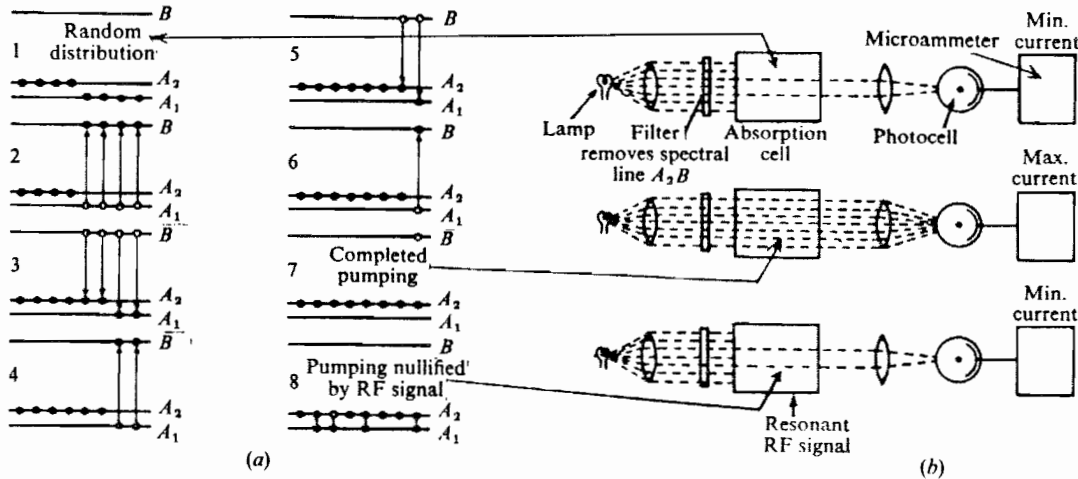
### 6.2.3

#### Magneettinen vaakagradienttimittaus

Vaakagradienttimittauksessa käytettiin laitetta Scintrex V-104. Tässä gradiometrissä magneettikentän voimakkuuden mittaaminen perustuu ns. Zeeman-efektiin. Zeeman-efektillä tarkoitetaan atomin elektronien energiatasojen "pirstoutumista" magneettikentässä.

Toisin sanoen perusenergiatasojen lisäksi syntyy ns. välitasoja. Välitasoja syntyy siitä, että elektro-

nien spinmomentille saadaan uusi lisäkvanttitila: magneettikentän suuntainen tai vastakkaissuuntainen /3/. Tarvitaan tietty energia nostamaan elektroni esimerkiksi tasolta A1 tasolle B (kuva 18). Tältä korkeammalta tasolta B elektroni palaa takaisin joko tasolle A1 tai A2 (tasojen B ja A2 spinmomentit ovat samat).



Kuva 18. Optinen pumppaus. Energiatasosiirtymät (a) ja valonsäteen aiheuttama pumppausefekti (b) /59/.

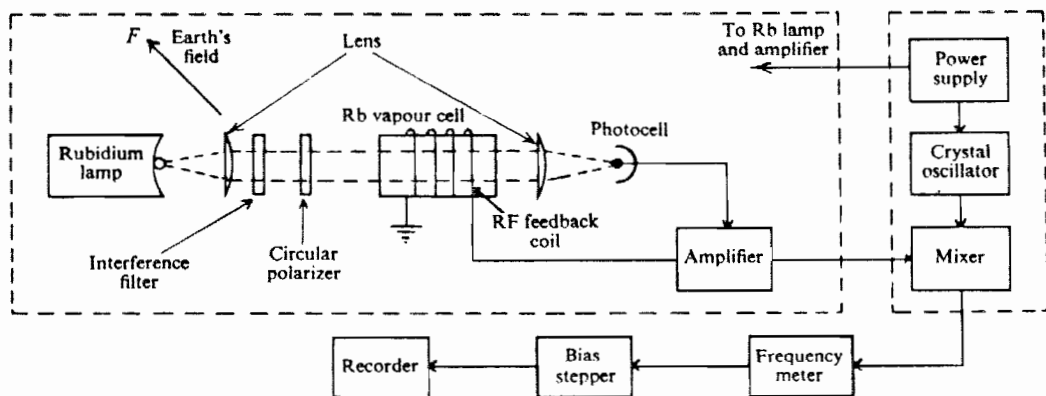
Energiaa voidaan antaa elektronille sopivan taajuisella säteilyllä, jolloin sen energia vastaa juuri tiettyjen energiatasojen välistä energiaeroa. Tähän tarvitaan monoenergistä valoa, joka saadaan aikaan esimerkiksi kumentamalla kaasua. Tämä valo polarisoidaan siten, että se antaa elektroneille sellaisen kvantin, joka nostaa elektronit tasolle B. Tältä tasolta elektronit palaavat takaisin nopeasti (noin 0,1 s) joko energiatasolle A1 tai A2.

Ne elektronit, jotka putoavat tasolle A1, saavat uudelleen energiakvantin ja nousevat taas tasolle B. Sen sijaan tasolle A2 putoavat elektronit eivät löydä monoenergisestä säteilystä sopivaa kvanttia noustakseen takaisin ylemmille tasoille. Elektronit siis kasautuvat tasolle A2, eikä kaasua enää absorboimaan valoa.

Jotta elektronit saadaan siirtymään tasolta A2 tasolle A1, tarvitaan pienempi energiakvantti eli käytettävän sähkömagneettisen säteilyn taajuuden tulee olla pienempi (radiotaajuus). Tämän radiotaajuuden sähkömagneettisen kentän taajuus säädetään sellaiseksi, että se on säteilevän valon välkkymisen kanssa resonanssissa. Tällöin absorptio tapahtuu terävästi.

Sopivia elektronien energiatasoja löytyy kaasuista, joilla on yksi elektroni uloimmalla kuorella. Tällaisia kaasuja ovat esimerkiksi rubidium, helium ja kesium. Mittalaitteen absorptiokennossa on tällaista kaasua. Lisäksi käytetään jotakin jalokaasua vaimenuskaasuna hidastamaan molekyylien törmäilyjä tilan seinämiin.

Sopiva valonlähde saadaan aikaan kuumentamalla samanlaista kaasua, mitä absorptiokennossa käytetään. Suotimen avulla valo saatetaan monoenergiseksi ja linssillä valo kohdistetaan absorptiokennoon (kuva 19).



Kuva 19. Kaavamainen kuva optista pumppausta hyväksi käyttävän magnetometrin toiminnasta /59/.

Valo pääsee absorptiokennon läpi, kun elektronit pumpataan tasolle A2. Valokenno ilmaisee läpitulleen valon määrän. Kun tasolla A1 on paljon elektroneja, ne pystyvät absorboimaan valoa parhaimmillaan 10 - 20 %.

Radiotaajuinen sähkömagneettinen kenttä saadaan aikaan absorptiokennon ympärille sijoitetun kelan avulla. Kun ympyräpolarisoitu valo on 45 asteen kulmassa magneettikenttään nähden, elektronit prekesoivat niin sanotulla Larmorin taajuudella, samaan tapaan kuin protonit protonimagnetometrissä.

Elektronien jakson jossain kohdassa (taso A2) spinmomentit ovat yhdensuuntaisia, jolloin säde kulkee läpi, jossain taas kohtisuorassa. Tästä on seurauksena välkkyvä valo, jonka taajuus mitataan. Nollaukseen käytetään jatkuvaa radiotaajuista signaalia, jonka taajuutta voidaan säätää. Suuntavaikutuksen poistamiseksi tarvitaan kahden kennon yhdistelmä.

Optista pumppausta käytävillä magnetometreillä voidaan päästä huomattavasti suurempaan tarkkuuteen kuin protonimagnetometrillä. Protonin värähtelytaajuuden muutoksen suhde magneettikentän voimakkuuden muutokseen on 0,04 Hz/nT, kun se vastaavasti optisessa pumppauksessa on esimerkiksi rubidium 85-isotoopilla 4,67 Hz/nT ja heliumilla 28 Hz/nT. Kesiumilla (jota tässä tutkimuksessa käytetty laite käyttää) suhde on 3,50 Hz/nT.

Tässä tutkimuksessa käytetty gradiometri on kesiumia absorptiokennossa käytävä laite. Valmistaja ilmoittaa sen resoluutioksi 0,01 nT /50/. Mittaus voi tapahtua kaksi kertaa sekunnissa ja digitaalnäytön lisäksi gradientin muutoksia voi tarkkailla myös äänisignaalin taajuuden muutoksien avulla. Tietoa saa ulos laitteesta myös TTL-tasojä käyttävästä digitaalisesta ulostulosta. Myös analogiselle signaalille on kaksi ulostuloa.

Paras herkkyys saavutetaan, kun anturi on 45 asteen kulmassa magneettikenttään nähden. Toiminta-alue on kuitenkin laajempi, 15 - 75 astetta.

Ladattava akku kestää valmistajan mukaan tyhjentymättä noin 3 tuntia lämpötilassa +25 °C. Olisi siis syytä käyttää kahta akkua vuorotellen, jotta mittausta voidaan tehdä koko päivä kerrallaan. Lisäksi on huomattava, että anturi joudutaan lämmittämään, joten laite kuluttaa virtaa sitä enemmän, mitä kylmemmissä mittauksissa suoritetaan. Jos mittaus keskeytetään, useita minutteja kestävä alkulämmitys joudutaan toistamaan.

Laitteen manuaali antaa ymmärtää, että mittauksen suorittamiseen riittää yksi henkilö. Käytännössä on oltava kuitenkin kaksi mittaajaa, sillä laitteen remanenttinen akku aiheuttaa useiden kymmenien nanoteslojen tason muutoksen mittaustuloksiin. Lisäksi pienikin muutos akun ja antureiden keskinäisessä asennossa aiheuttaa useiden nanoteslojen satunnaisen häiriön mittaustulokseen.

Valmistaja ei varoita käyttäjää akun magneettisuudesta ainakaan laitteen manuaalissa. Laitetta hankittaessa on sekä vara-akku että anturin jatkokäpelit pyydettävä erikseen.



Kuva 20. Scintrex V-104 Kesiumgradiometri.

Laitteen pääosat ovat gradiometri, anturit varsi-  
neen, akku sekä kuulokkeet, jos haluaa seurata ana-  
logiasignaalia kuulokkeilla (yksikkö sisältää myös  
kovaäänisen) (kuva 20). Koko mittauskalusto painaa  
noin 15 kg.

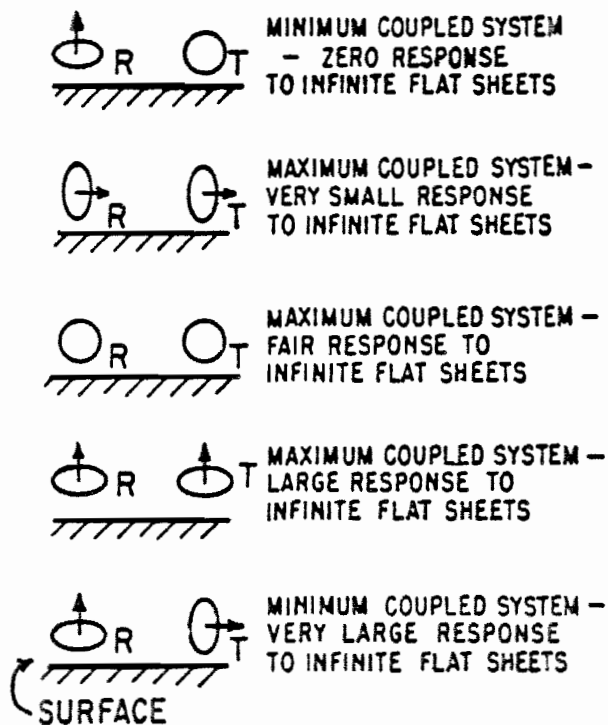
#### 6.2.4

#### Korkeataajuusslingram

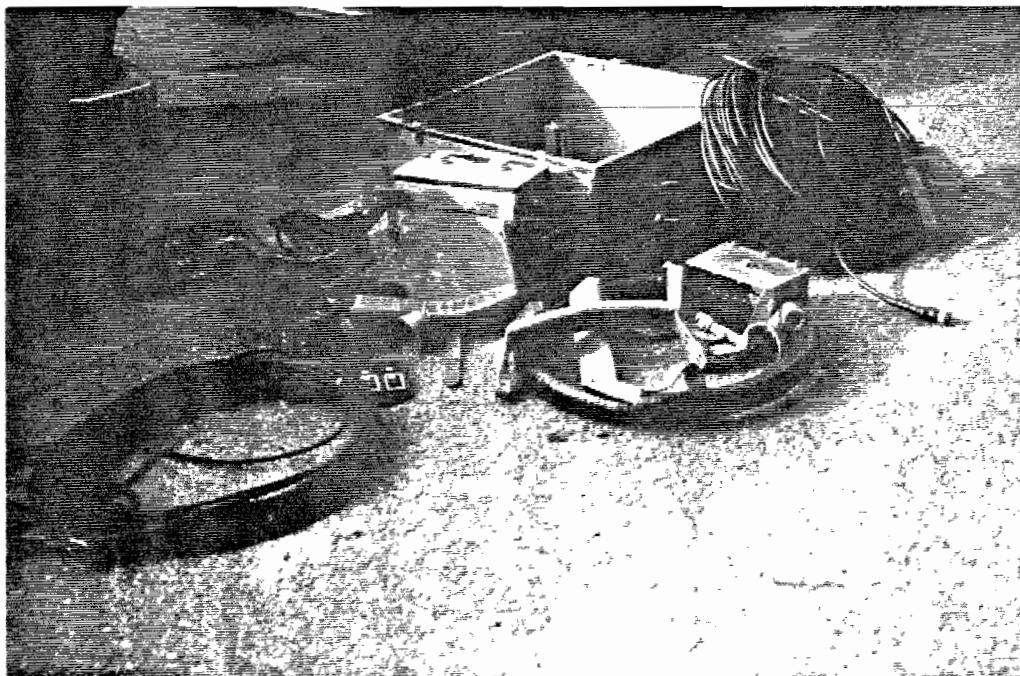
Nimitystä slingram käytetään yleensä sähkömagneetti-  
sista menetelmästä, jossa lähde ja vastaanotin liik-  
kuvat ja ovat vakioetäisyydellä toisistaan. Keloja  
pidetään vakioasennossa (paitsi kallistuskulmamene-  
telmässä), mutta erilaisia kelakonfiguraatioita käy-  
tetään (kuva 21).

Slingram on käytetyimpiä menetelmiä geofysikaalisiin  
kenttätutkimuksissa. Myös lentomittausten yhtey-  
dessä sitä käytetään lähes aina. Tämä johtuu muun  
muassa siitä, että menetelmä antaa hyvistä johteista  
selvän anomalian ja käytettyä taajuutta muuttamalla  
voidaan muuttaa myös vasteparametrin arvoa.

Tärkeä ominaisuus on myös se, että laite on nopea  
käyttää ja sillä saavutetaan suuri mittausnopeus  
systemaattisissa mittauksissa. Useimmiten käytetään  
100 Hz - 20 kHz taajuuksia. Yläpään taajuuksia käy-  
tettäessä puhutaan korkeataajuusslingramista.



Kuva 21. Erilaisia kelakonfiguraatioita slingram-menetelmässä /63/.



Kuva 22. Tyypillinen slingramlaitteiston kokoonpano. Kuvassa on lähetinkela (mittaajan ympärille sijoitettava rengas), vastaanotin, kaksi kaapelia sekä kuljetuslaatikko.

Mittauslaite muodostuu lähettimestä ja vastaanottimesta sekä välikaapelista (kuva 22). Lähetin on yleensä noin 2 - 5 W tehoinen oskillaattori, jonka teho syötetään joko ilmasydämiseen tai ferriittisydämiseen kelaan.

Laitteissa yleisesti käytetty taajuus on 1500 - 4000 Hz, mutta viime aikoina on sekä niin sanottua korkeajakso- (15 - 18 kHz) että matalajakso- (111 Hz tai 222 Hz alkaen) slingramia alettu käyttää hyvin tuloksin.

Kelaväli on yleensä 20 - 100 m (40 m ja 60 m yleisimmin käytetyt) mutta nykyisillä laitteilla päästään jopa yli 250 m kelaväleihin. Välikaapeli toimii referenssisignaalin siirtolinkkinä, kelaetäisyyden mittana sekä suurilla kelaetäisyyksillä tarvittavana puheyhteyslinkkinä. Kaapelikitkan ja -painon pienentämiseksi on siirrytty tavallisista muovipinnoitetuista kaapeleista teflon-päällysteisiin kaapeleihin.

Vastaanotin muodostuu ilma- tai ferriittisydämisestä kelasta, kompensattorista sekä näyttölaitteesta. Standardina on vertikaalikomponentin mittaus reaali- ja imaginaariosiin jaettuna. Eräissä laitteissa voidaan mittaus suorittaa myös horisontaalikomponentille sekä myös pystyä lähetinkelaa käyttäen, jolloin on kyseessä kallistuskulmamittaus.

Aikaisemmin kompensointi tapahtui manuaalisesti säätöpotentiometrejä kiertäen kunnes erosignaali mittaus- ja kompensointijännitteen välillä oli minimissä. Nykyisissä laitteissa kompensointi tapahtuu elektronisesti (suora näyttö).

Mittaustuloksina saadaan reaali (Re)- ja imaginaari (Im)-osat, prosentteina primaarikentän voimakkuuden arvosta. Lukematarkkuus on noin 0,25 - 0,5 %. Mittausten toistettavuus on normaaliolosuhteissa noin 0,25 - 1,0 %.

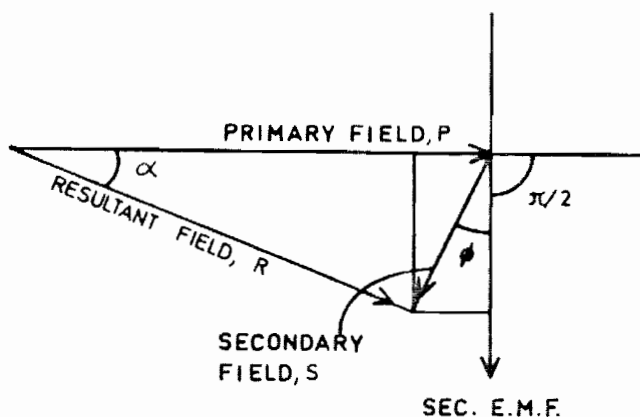
Yleisin mittaustapa on profiilimittaus vaakakelaparia käyttäen. Taajuus-, kelaväli- ja pistevälivaihtelu voi kuitenkin olla uusimmilla laitteilla niin suuri, että myös pisteluotaus rajoitetussa mielessä on standardilaittein käynyt mahdolliseksi.

Vierekkäisten johdevyöhykkeiden resoluutiota voidaan parantaa tuntuvasti suorittamalla mittaus kulun suuntaisilla linjoilla ja hyvin pienellä linjavälillä, eli ns. 'broadside'-mittauksena /24/.

Pisteluotaus voi olla joko taajuus- eli parametri- luotausta (taajuus vaihtelee) tai geometrinen luotausta (kelaväli vaihtelee). Sähkömagneettista luotausta slingram-laitteilla on käytetty toistaiseksi vain vähän, osittain sopivien laitteiden puuttumisen vuoksi.



Sekä kelojen etäisyysvirheet että kelojen keskinäiset korkeuserot aiheuttavat profiilimittauksessa virheen mittaustulokseen, koska primaarikentän voimakkuus tällöin muuttuu. Mittauksien aikana maastossa kelaväli ei aina pysy tarkasti vakiona, ja 1 % muutos etäisyydessä aiheuttaakin noin 3 % muutoksen reaalitylukemassa. Myös kelan kallistuminen aiheuttaa virhettä: 10 asteen muutos kallistuskulmassa aiheuttaa vähintään 1,5 % muutoksen reaalianomaliassa.



Kuva 23. Anomaliakentän vektoriesitys /34/.

Yleisin tapa esittää mittaustuloksia on jakaa totaalisignaali Re- ja Im-osaan. Myös amplitudi- ja vaihekulma-arvoja voidaan käyttää, samoin kallistuskulmamittauksista, jolloin tulokset ovat totaalikentän kaltevuuskulma-arvoja. Mitattavaa kenttää voidaan havainnollistaa vektoriesityksenä (kuva 23).

Tulosten yksinkertaisin tulkinta suoritetaan visuaalisena tarkasteluna. Tällöin saadaan anomalian aiheuttaja paikallistettua, ja voidaan tehdä myös joitakin päätelmiä sen ominaisuuksista:

- kaateen suunta anomalian epäsymmetrisyydestä
- johteen hyvyys Re/Im-suhteen avulla
- johteen paksuus anomaliakäyrän negatiivisen osan leveydestä
- johteen syvyys anomalia-arvojen suuruudesta.

Päätelmät perustuvat pienoismallimittauksista saattuihin tulkintakäyrästäihin, joita on esitetty oppikirjoissa, esimerkiksi /59/.

Näin saadaan kvalitatiivisia arvioita ja luokittelutietoja johteesta ja sen mahdollisista ominaisuuksista.

sista. Tällaisen tulkinnan tulosten luotettavuus riippuu kuitenkin suuresti tulkitsijan kokemuksesta eikä tulkinta käytä hyväksi kaikkia mittaustulosten sisältämiä mahdollisuuksia.

Karkeaan tulkintamenetelmään on kuitenkin tyydyttävä, jos anomalia on niin epämääräinen ja heikko, että esimerkiksi käyräsovituksia ei kunnolla voi käyttää. Sellainenkin anomalia voi kuitenkin olla vahva viite seuratessa vaikkapa ruhjeen kulkua.

Nykyisin jo lähes aina tulkintaa jatketaan tarkempaan, ainakin karakterisia pisteitä tai koko mitaustuloskäyrää hyväksikäyttävään piste- tai käyräsovitukseen.

Taajuuden lisäksi vaikuttaa slingram-menetelmän syvyysvaikutukseen eniten käytetty kelaväli. Pienois-mallimittausten perusteella on menetelmän syvyysvaikutus noin 0,5 - 0,7 x kelaväli pystylle johdelevylle ja noin 1,5 x kelaväli laajalle vaakajohteelle. Johtavan irtomaapeitteen mukanaolo vaikeuttaa kuitenkin tulostulkintaa, koska geologinen kohina mitaustuloksissa kasvaa.

Geologisen kohinan pienentämiseksi on slingram-mittauksissa alettu yllä mainituissa tilanteissa käyttää entistä selvästi pienempiä taajuuksia (100 - 800 Hz) yhdessä suurempien kelavälien (100 - 300 m) kanssa.

Ruhjeiden tutkimisessa slingram-laitteilla havaitaankin seuraavanlainen vaikeus: varsin usein ruhjeet sijaitsevat juuri sellaisissa painanteissa, joissa todennäköisesti on myös johtavia pintamaakeroksia. Toisaalta taas ruhjeiden sähköiset ominaisuudet (heikkoja johteita) edellyttävät suurten taajuuksien käyttöä. Suuret taajuudet johtavat huonoon tunkeutumiskykyyn.

Geologisen kohinan aiheuttajia ovat edellä jo mainittujen irtomaa- ja sivukiviefektien lisäksi topografiavaihtelut, joita usein vielä korostavat topografiasta riippuvat irtomaan paksuusvaihtelut.

Usean johdevyöhykkeen muodostama rakenne (esim. liuskevyöhyke) voidaan erotella eri johdevyöhykeisiin normaalissa slingram-mittauksessa vain jos käytetään niin pientä kelaväliä, että johteiden etäisyys on suurempi kuin kelaväli. Tämä edellyttää lisäksi, että johteiden yläpinnan syvyys on alle puolet kelavälistä. Muutoin johteiden vasteet summautuvat niin, että saadaan yhden paksun levyn anomaliaa muistuttava vaste.

Mittausvaikeuksia aiheutuu myös ihmistoiminnasta: sähkölinjojen, puhelinlinjojen, piikkilanka-aitojen, verkkoaitojen ja muiden keinotekoisien johtavien rakenteiden aiheuttamat häiriöt ovat haittana erityisesti kaupunkialueella mitattaessa.

Tutkimuksessa käytettiin Outokumpu Oy:n valmistamaa korkeataajuusslingramia. Laite käyttää 18 kHz taa-

juutta. Mittaukset tehtiin 40 m kelaväliä käyttäen. Lähettimenä toimi ilmasydäminen kela, joka mittauksen aikana on sijoitettu mittaajan ympärille vyötärön korkeudelle (kuva 22). Vastaanottimena toimi pienikokoinen ferriittisydänantenni. Vastaanotin toimii kompensointiperiaatteella.

Laitteen malli on jo melko vanha, mutta todettu erittäin luotettavaksi ja kenttäkelpoiseksi. Outokumpu Oy on tehnyt myös uuden slingram-mallin, joka käyttää tehokkaasti hyväksi mikroprosessorien tuomia mahdollisuuksia mittauksen suorittamisessa, virheen poistossa ja tiedon tallentamisessa. Kyseinen laite oli kuitenkin tätä tutkimusta tehtäessä vasta prototyyppiasteella.

#### 6.2.5 Minislingram

Minislingramit ovat yhden käyttäjän pieniä ja keveitä slingram-tyyppisiä laitteita, joita käytetään yleensä hyvin johtavien lohkareiden ja johdepaljastumien etsintään.

Laitteissa käytetään korkeata taajuutta, yleensä 15 - 50 kHz, ja kelaväli on vain 1 - 3 m. Kelat on sijoitettu kiinteästi runkorakenteen molempiin päihin, jolloin kelojen etäisyysmuutoksista aiheutuvat virheet saadaan lähes eliminoiduiksi. Edelleen käytetään herkkyyden parantamiseksi kelojen asennusta 57 asteen kaltevuuskulmaan, koska tällöin vastaanotinkelaan osuva primaarikenttä on minimissä (ideaalitulauksessa nolla).

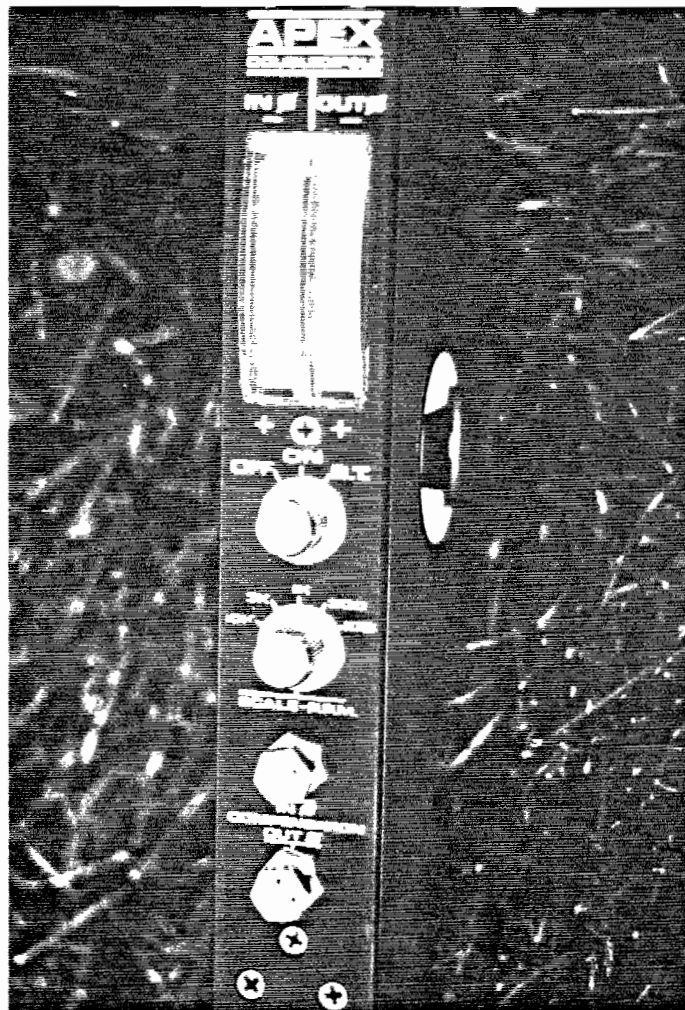


Kuva 24. APEX MKII pienoisslingram kenttäkäytössä Roihuvuoressa.

Vanhemmissa laitteissa mitattiin vain imaginaarikomponenttia, uusissa mitataan sekä Re- että Im-komponentit. Minislingramin syvyysulottuvuus on noin 3 - 10 x kelaväli, joka riittää yleensä maan pinnassa olevien johteiden etsinnässä.

Ruhjeiden paikallistaminen on minislingramilla mahdollista, jos irtomaakerrokset eivät ole kovin johtavia. Korkea taajuus mahdollistaa heikohkojenkin johteiden havaitsemisen, mutta johtava irtomaakerros toisaalta pienentää ennestäänkin melko pientä syvyysulottuvuutta.

Tässä tutkimuksessa käytettiin APEX MKII-minislingramia (kuva 24). Laite on varustettu automaattikompensoinnilla, mikä tarkoittaa sitä, että lukemat nähdään suoraan mittareista (kuva 25). Mittausalue on -10000 ppm - +10000 ppm. Laitteen kelaväli on 1,22 m ja taajuus 8000 Hz /64/.



Kuva 25. Apex MKII pienoisslingramin käyttöpaneeli. Ruuvit ovat pohjatason säätöä varten, kiertonupeista valitaan mittausalue.

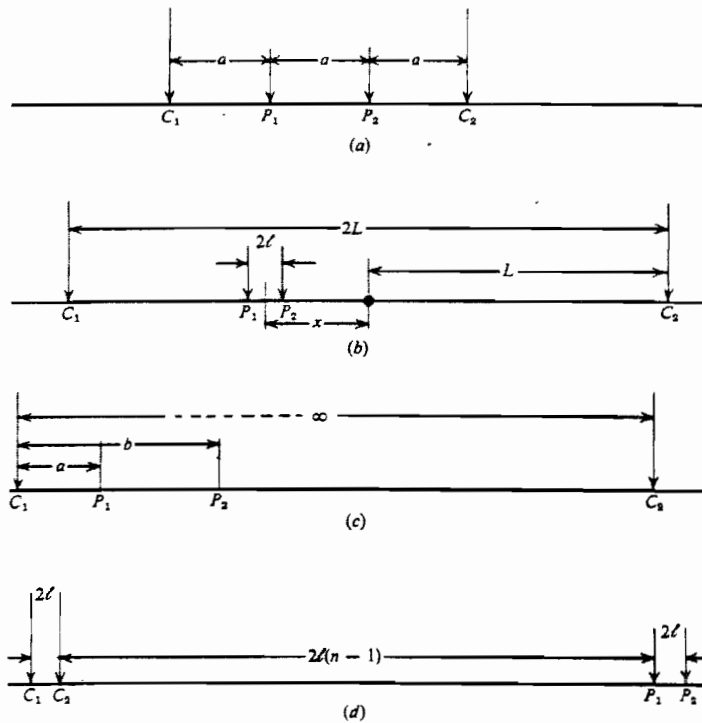
6.2.6  
Maavastusluotaus

Mittaus tehdään yleensä 4 elektrodilla: 2 virtaelektrodilla syötetään virta  $I$  maahan ja 2 potentiaalelektrodilla mitataan potentiaalieroja  $\Delta V$  (kuva 26).

Näistä yksi virta- ja/tai yksi potentiaalelektrodi voidaan viedä efektiivisesti äärettömän kauas (eivät vaikuta mittaukseen). Mitatuista suureista lasketaan näennäinen ominaisvastus (kaava 3).

$$\rho_a = \frac{2\pi\Delta V}{I \left( \frac{1}{C_1 P_1} - \frac{1}{C_2 P_1} - \frac{1}{C_1 P_2} + \frac{1}{C_2 P_2} \right)} \quad (3)$$

Jos väliaine on homogeenista, kaavasta mittaustulosten avulla laskettu tulos on todellinen ominaisvastus. Maankamara on kuitenkin yleensä epähomogeenista.



Kuva 26. Vastusluotauksessa käytettyjä elektrodijärjestelmiä: Wenner- (a), Schlumberger- (b), kolmipiste- (c) ja dipoli - dipoli-järjestelmä (d).

Virhelähteitä maavastusmittauksissa voivat olla muun muassa:

- luonnon potentiaali-ilmiöt (SP-ilmiöt)
- vastaanotinelektrodien polarisoituminen (erityisesti DC-mittauksissa)

- mäkien ja jyrkänteitten aiheuttamat topografiaefektit
- sähkölinjat ja muut sivilisaatiohäiriöt
- kapasitiiviset kytkennät virta- (I-) ja jännite- (V-) kaapelien välillä, jos maan ominaisvastus on korkea ja käytetään vaihtovirtaa.

Maavastusmittauksissa on käytössä erilaisia elektrodijärjestelmiä. Yhteistä näille järjestelmille on yleensä se, että elektrodit sijoitetaan samalle suoralle. Eroavuudet vaikuttavat lähinnä käytännön mitausnopeuteen ja virheiden eliminoimiseen. Kuvassa 26 on esitetty joitakin yleisesti käytössä olevia elektrodijärjestelmiä.

Maavastusluotauksen avulla tutkitaan johtavuuseroja syvyys suunnassa. Homogeenisessa väliaineessa kulkee 90 % syöttövirrasta sen puolipallon sisällä, jonka halkaisija on virtaelektrodien väli, joten virtaelektrodien väliä kasvattamalla saadaan suurempi syvyyssulottuvuus.



Kuva 27. Maavastusluotauksissa käytetty vanhanmallinen ABEM Terrameter. Kuvassa on koko laitteisto: lähetin, vastaanotin, kaapelit ja elektrodit.

Mittauspiste eli systeemin keskipiste pysyy paikallaan, kun elektrodietäisyyksiä lisätään symmetrisesti keskipisteen suhteen. Tulokset esitetään yleensä profiileina logaritmisilla akseleilla. Tulkinta tapahtuu vertaamalla mitattuja luotauskäyriä teoreettisesti laskettuihin käyriin. Tavallisimmat mallikäyrät on laskettu 2-, 3- ja 4-kerrosmalleilla, joiden kerrospaksuuksia ja johtavuuksia muutellaan.

Maavastusluotauksissa käytettävät mittauslaitteistot muodostuvat tavallisesti lähettimestä ja vastaanotimesta sekä neljästä elektrodista. Virtalähteinä ovat yleensä kuivapariot tai syväluotauksissa moottorigeneraattori.

Lähetin syöttää maahan tasavirtaa tai matalajaksoista (0,1 - 10 Hz) vaihtovirtaa. Vastaanotin on jännitemittari, jolla on suuri sisäänmenoimpedanssi tai mittaus tapahtuu kompensointiperiaatteella impedanssisillalla. Jos mittauksissa käytetään todellista tasavirtaa, tarvitaan polarisoitumattomat potentiaalielektrodit, muutoin voidaan elektrodeina käyttää metallisauvoja.

Tässä tutkimuksessa käytettiin vastusluotaukseen ABEM Terrameter laitetta (kuva 27) (yhteisestä nimestä huolimatta vastusluotauksessa käytetty laite poikkeaa latauspotentiaalimittauksiin (kohta 6.3.6) käytetystä vastaavasta laitteesta: vastusluotauksissa käytetty laite on vanhempi kuin latauspotentiaalimittauksissa käytetty varsin moderni laite).

Laite on peruskokoonpanoltaan jokseenkin tavanomainen: lähetin, joka syöttää 4 Hz taajuudella virtaa maahan sekä vastaanotin, joka on kytketty referenssikaapelilla lähettimeen. Lähettimessä on mahdollisuus valita virran syöttö joko kokoteholla (noin 6 W) tai puoliteholla (noin 3 W). Jännitteeksi voidaan valita 100, 200 tai 400 V /1/.

Vastuksen mittaaminen tapahtuu impedanssisillalla kompensointiperiaatteella. Käytännössä mittaus tapahtuu siten, että maahan syötetään virtaa. Virran suuruus nähdään ampeerimittarista, ja se pannaan muistiin. Laite muutetaan vertailutilaan kytkimestä kääntämällä ja lankapotentiometrillä säädetään vertailuvastus siten, että piirin läpi kulkee yhtä suuri virta kuin maahan virtaa syötettäessä. Kun yhtäsuuruus on saavutettu, luetaan lankapotentimetrin lukema. Nyt  $\rho_a$  voidaan laskea kaavasta (3), kun myös elektrodietäisyydet tunnetaan.

#### 6.2.7 VLF-R-mittaus

VLF-mittauksessa käytetään primaarikentän lähteenä VLF-radioasemaa. Näitä asemia, joiden taajuus on yleensä 15 - 25 kHz, käytetään enimmäkseen sotilallisiin navigointi- ja viestintätehtäviin. Asemia on

niin paljon, että niiden kuuluvuusalueet kattavat reilusti koko maapallon ja vieläpä niin, että yhdessä pisteessä kuuluu yleensä monta asemaa hyvin.

Kaukana lähteestä sähkömagneettista kenttää voidaan kuvata tasoaallolla. Homogeenisessa, johtavassa maassa sähkökenttä  $E$  on elliptisesti polarisoitunut. Kulma  $\emptyset$ , jonka ellipsin pääakseli muodostaa maanpinnan normaalin kanssa, samoin kuin pääakselin ja pikkuakselin suhde pysyvät vakiona käytännöllisesti katsoen joka pisteessä. Geofysiikan sovelluksissa voidaan kirjoittaa, kun etäisyys lähteeseen on useita aallonpituuksia /34/:

$$\rho_a = \frac{1}{4\pi\mu_0 V} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (4)$$

Kaava 4 antaa homogeenisella maalla todellisen ominaisvastuksen, mutta yleisessä tapauksessa niin sanotun näennäisen ominaisvastuksen  $\rho_a$ .



Kuva 28. Geonics EM16R laitteisto lähikuvassa.

Sähkökenttää mitataan kahdella elektrodilla, jotka sijoitetaan kymmenen metrin päähän toisistaan. Elektrodit sijoitetaan samalle linjalle aseman kanssa. Laitteeseen kiinteästi asennetulla kela-antennilla mitataan magneettikenttää.

Kela-antenni suunnataan siten, että ferriittisauva on kohtisuorassa aseman suuntaa vastaan ja antennin varsi antennineen osoittaa aseman suuntaan (kuva



28). Laitteesta kuuluvan äänisignaalin voimakkuus minimoidaan säätämällä vaihekulmasäädintä ja näennäisen ominaisvastuksen säädintä. Kun minimointi on onnistunut, luetaan vaihekulman ja näennäisen ominaisvastuksen arvo vastaavan säätimen asteikosta /25/.

Vaihekulma  $\emptyset$  eli vaihe-ero  $E_x-H_y$  on 45 astetta, kun maa on homogeenista ainakin kentän tunkeutumissyvyyteen asti. Jos maahan voi soveltaa kaksikerrosmallia ja ylempi kerros on johtavampi kuin alempi kerros, on vaihekulma suurempi kuin 45 astetta.

Jos alempi kerros on johtavampi, on vaihekulma pienempi kuin 45 astetta. VLF-R-mittaus antaa kaksi suuretta, mutta jo kaksikerrostulkinnassa tarvitaan kolme, nimittäin kerrosten ominaisvastukset ja ylemmän kerroksen paksuus. Niinpä kaksikerrostulkintaa varten on tiedettävä ensimmäisen kerroksen johtavuus. Tämä on joko mitattava (esimerkiksi vastusluotauksella) tai arvioitava.



Kuva 29. VLF-R-mittausta Helsingin Talissa.

#### 6.2.8 Maatutkamittaukset

Maatutka käyttää tutkataajuisia (80 - 1000 MHz) radioaaltoja. Kun radioaalto kohtaa rajapinnan, jossa väliaineen impedanssi muuttuu, osa aallosta heijastuu takaisin ja osa läpäisee rajapinnan. Kohteen

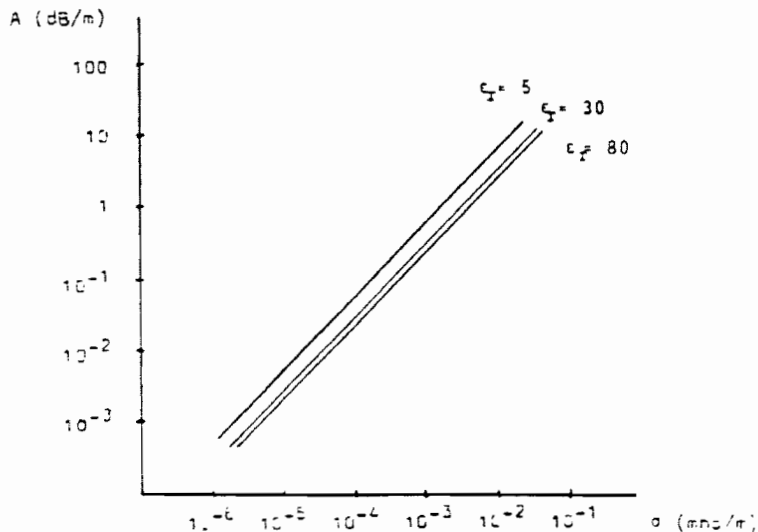
etäisyys voidaan laskea aallon käyttämän ajan avulla, jos tunnetaan kulku-aika ja aallon nopeus väliaineessa.

Sähkömagneettisen aallon nopeus väliaineessa riippuu aineen suhteellisesta dielektrisyysvakioista  $\epsilon_r$ . Tyhjiössä dielektrisyysvakion arvo on 1. Sähkömagneettisen aallon nopeuden ja suhteellisen dielektrisyysvakion  $\epsilon_r$  välistä riippuvuutta kuvaa yhtälö 5:

$$\epsilon_r = \left(\frac{c}{v}\right)^2 \quad (5)$$

missä

- c = sähkömagneettisen aallon nopeus tyhjiössä
- v = sähkömagneettisen aallon nopeus väliaineessa.



Kuva 30. Radiotaajuuden sähkömagneettisen aallon vaimentuminen väliaineessa eri dielektrisyysarvoilla /60/.

Toinen tärkeä suure, joka vaikuttaa sähkömagneettisen aallon käyttäytymiseen väliaineessa, on väliaineen johtavuus  $\sigma$ . Johtavuus vaikuttaa erityisesti sähkömagneettisen aallon vaimenemiseen (kuva 30). Taulukossa 2 on esitetty dielektrisyys- ja johtavuuden arvoja joillekin väliaineille. Sekä dielektrisyysvakio että johtavuus ovat taajuudesta riippuvia suureita.

Tässä työssä käytetyn tutkan perustana on Geophysical Survey System Inc:n valmistama tutka SIR (Sub-surface Interface Radar). Laitteen omistaa Imatran Voima Oy, joka on hankkinut edellä mainitulta valmistajalta valmiina ohjausyksikön, antenniyksikön ja

piirturin. Muut osat on laitteen omistaja tehnyt itse tai hankkinut muualta. Mittauksissa käytetty laite koostuu kuudesta yksiköstä:

- antenni
- lähetin
- vastaanotin
- ohjausyksikkö
- nauhuri
- piirturi.

Taulukko 2. Johtavuuden ja dielektrisyysvakion arvoja joillekin väliaineille /60/.

Aine	$\sigma$ (mho/m)	$\epsilon_r$
Ilma	0	1
Vesi	$10^{-4} - 3 \times 10^{-2}$	81
Merivesi	4	81
Jää	$10^{-3}$	4
Graniitti (kuiva)	$10^{-8}$	5
Graniitti (märkä)	$10^{-3}$	7
Kalkkikivi (kuiva)	$10^{-9}$	7
Kalkkikivi (märkä)	$2,5 \times 10^{-2}$	8
Basaltti (märkä)	$10^{-2}$	8
Hiekkakivi (märkä)	$4 \times 10^{-2}$	6
Kupari	$5,8 \times 10^7$	1
Rauta	$10^6$	1
Hiekka (kuiva)	$1,4 \times 10^{-5}$	3 - 6
Hiekka (märkä)	$6,9 \times 10^{-3}$	25 - 30
Savi (kuiva)	$2,7 \times 10^{-4}$	3
Savi (märkä)	$5,0 \times 10^{-2}$	15
Routa	$10^{-5} - 10^{-2}$	4 - 8
Suon pintaosa		24
Märkä rahkaturve		66
Hyvin märkä turve		76

Dipolityyppinen antenni on tehty kolmionmuotoisista kuparilevyistä. Antennin pituus on puolet aallonpituudesta. Mittauksissa käytettiin taajuutta 80 MHz. Antenni on sijoitettu laatikkoon yhdessä lähettimen ja vastaanottimen kanssa.

Laatikkoa hinataan ahkiossa telamaasturilla tai maastoautolla. Normaalisti antennilaatikkoon on kiinnitetty matkapyörä, joka antaa 20 cm välein sykäyksen nauhurille. Osa mittauksista tehtiin kuitenkin ilman matkapyörää, jolloin matka sidottiin vähintään 50 m välein etukäteen mitattuihin kiintopisteisiin. Tällöin auton kuljettaja kiinnitti erityistä huomiota tasaiseen etenemisnopeuteen.

Lähettimen pulssin toistotaajuus on 51,2 kHz. Kohteista heijastuneet pulssit havaitaan saman antennin

avulla. Koska signaali muuttuu hitaasti kahden peräkkäisen pulssin välillä, voidaan käyttää oskilloskooppeissakin yleistä näytteenottotekniikkaa, joka perustuu peräkkäisten mittausten samankaltaisuuteen.

Jokaista jaksoa kohden otetaan yksi näyte siten, että näytteenottoväli  $T+d$  on  $d:n$  verran suurempi kuin jakson pituus  $T$ . Pitopiirillä näyte pidetään vakiona, kunnes seuraava näyte otetaan. Ajan  $T+d$  kuluttua aloitetaan näytteenotto alusta ja sama toimenpide uusiutuu. Aikaansaatua jaksoa kutsutaan pyyhkäisyksi. Tämä on ideaalitapauksessa samanmuotoinen, mutta  $d/T$  kertaa hitaammin muuttuva kuin alkuperäinen jakso.

Ohjausyksikön perustana on 102,4 kHz taajuinen kello, jonka värähtelytaajuutta jakamalla saadaan 51,2 kHz pulssitaajuus, 6,4 kHz kellotaajuus piirturille ja pyyhkäisytaajuudet. Vastaanottimelta saapuva signaali vahvistetaan sopivasti ja syötetään nauhurille ja piirturille.

Ohjausyksikössä on oskilloskooppi, josta voidaan tarkkailla sekä lähetettyä että heijastunutta signaalia. Heijastunut signaali voidaan vahvistaa ja suodattaa muun muassa siten, että heikot ja syvältä tulevat heijastukset tulevat esiin vahvistettuina.

Mittauksissa käytetyssä laitteessa käytettiin Teac R-61D reportterinauhuria mittausten tallennukseen. Nauhurissa käytetään normaalia C-kasettia. Kasetilta voidaan myöhemmin ikään kuin toistaa tehty maastomittaus.

Tutkagrammiksi kutsutaan piirturilla aikaansaatavaa mittaustulosten graafista esitysmuotoa. Tutkagrammista voidaan tehdä tulkintaa luotauslinjan kohdalla olevien maaperän rakennepiirteiden selvittämiseksi.

Lumi ja jää huonontavat mittaustuloksia. Myös runsas ja pitkään jatkunut vesisade saattaa haitata mittauksia.

Koska tutkan antennia hinataan aivan maan pinnassa, on maan pinnan laadulla merkitystä. Jos maasto on vaikeakulkuista, saattaa maatutkan käyttö olla käytännössä lähes mahdotonta.

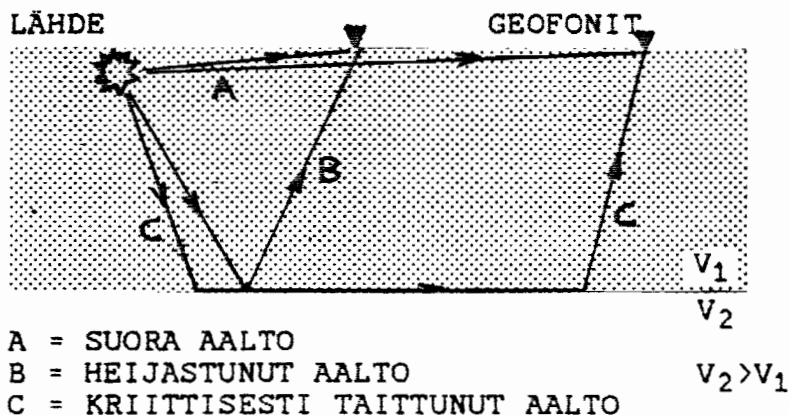
Ruotsissa on kokeiltu tutkamittausten tekemistä ilmasta käsin /60/. Tulkintakelpoisia tuloksia saatiin 80 MHz antennia käyttämällä. Tämä ei kuitenkaan toistaiseksi näytä käyttökelpoiselta mittaustavalta aivan erityistapauksia lukuunottamatta, sillä tutka-antennin on oltava alle metrin korkeudella maan pinnasta. Lisäksi on huomattava, että mittaussnopeutta ei voi oleellisesti nostaa maanpintamittauksiin verrattuna mittaustuloksen laadun kärsimättä. Tästä syystä lentomittaus tulisi hyvin kalliiksi.

## 6.2.9

## Seisminen refraktioluotaus

Seisminen menetelmä on maailman eniten käytetty geofysikaalinen tutkimusmenetelmä, jota käytetään etenkin öljyn etsintään /59/. Menetelmä soveltuu hyvin myös pohjaveden etsintään sekä pohjatutkimuksiin.

Reflektioseisminen menetelmä käyttää hyväksi sitä, että seismiset aallot heijastuvat rajapinnoista, joissa väliaineen akustinen impedanssi (aineen tiheyden ja kimmoaallon etenemisnopeuden tulo) muuttuu, osan aalloista jatkaessa rajapinnan läpi (kuva 31). Tämä menetelmä on käytössä lähinnä öljynetsintäkohteissa. Kuitenkaan se ei sovellu hyvin tyypillisiin pohjarakennustutkimuksiin.



Kuva 31. Seismisen aallon erilaisia reittejä kerroksellisessa rakenteessa.

Refraktioseismisessä menetelmässä tutkittu aalto etenee eri kerroksissa välillä taittuen. Nopein (ensimmäisenä geofoniin saapuva) aalto rekisteröidään (kuva 33).

Jännitystilän muutos etenee väliaineessa kimmo- eli elastisena aaltona /59/. Elastinen aalto voi muodostua usealla eri tavalla kiinteässä väliaineessa. Niistä neljä tärkeää esimerkkiä ovat seuraavat /19/:

- pitkittäinen puristusaalto eli paineaalto (P-aalto)
- leikkausaalto eli poikittainen aalto (S-aalto)
- Rayleigh-aalto (pinta-aalto)
- Love-aalto (rajapinta-aalto, joka voi syntyä, kun alemmassa kerroksessa aallon nopeus on suurempi kuin ylempässä).

Taulukko 3. Elastisen P-aallon nopeuksia eräille väliaineille /10, 34/.

Väliaine	Elastisen P-aallon nopeus (m/s)
Ilma	330
Savi	1000-2500
Hiekka (kuiva)	200-1000
Hiekka (märkä)	1500-2000
Vesi	1400-1500
Routa	3500-4000
Moreeni	1500-2700
Kalkkikivet ja dolomiitit	3500-6500
Vuorisuola	4000-5500
Graniitti	5500-6000
Gabro	6500-7000
Ultraemäksiset kivet	7500-8500
Serpentiniitti	5500-6500
Teräs	6100
Rauta	5800
Alumiini	6600

Sovelletussa geofysiikassa P-aalto on tärkein, joskin S-aaltoa tarvitaan, kun halutaan määrittää aineen dynaamisia kimmo-ominaisuuksia. P-aallon nopeus  $V_p$  on /34/

$$V_p = \left( \frac{k + \frac{4}{3}n}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

jossa

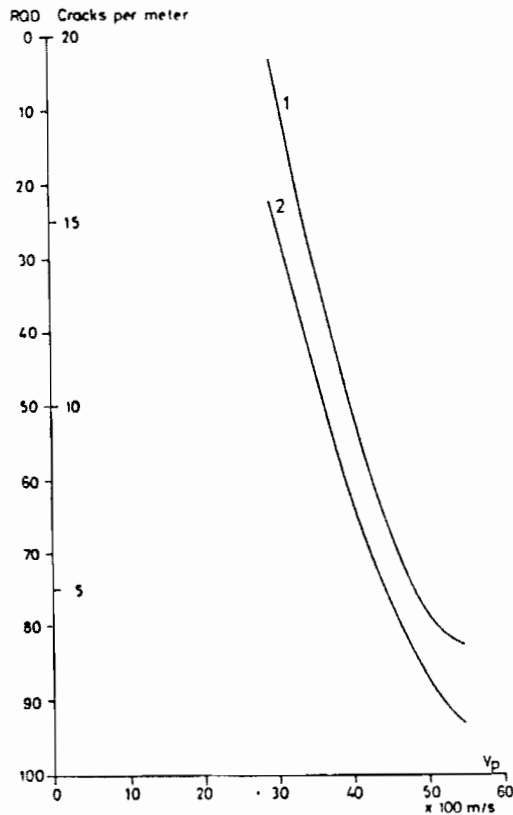
- k = kimmomoduuli
- n = leikkausmoduuli
- $\rho$  = aineen tiheys.

S-aallon nopeus  $V_s$  on vastaavasti

$$V_s = \left( \frac{n}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

S-aalto voi edetä vain kiinteässä väliaineessa, toisin kuin P-aalto. P-aallon etenemisnopeus on suurempi kuin S-aallon. Taulukossa 3 on esitetty joillekin väliaineille P-aallon nopeuksia.

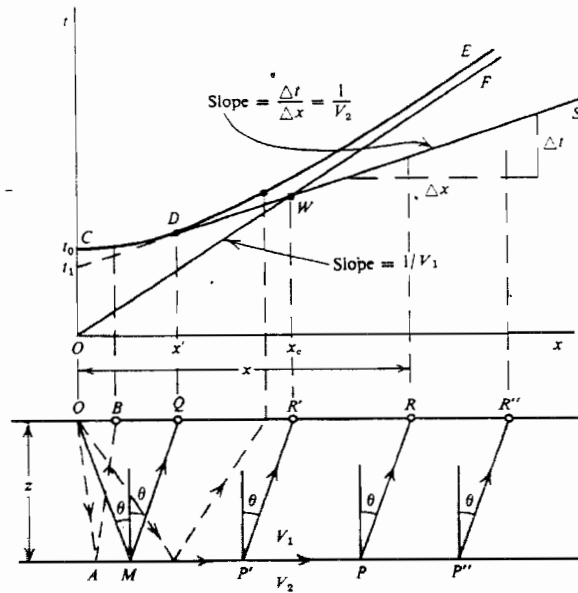
P-aallon etenemisnopeuden ja väliaineena toimivan kallion rakoilulla on todettu olevan yhteyttä (kuva 32). Tämä juuri mahdollistaa kallion laadun arvioimisen seismisen tutkimuksen avulla /53/.



Kuva 32. Keskimääräisiä riipuvuuksia  $V_p$ :n ja kallion rakoilun (rakoja/m, käyrä 1) sekä RQD-luvun (käyrä 2) välillä /53/.

Elastinen aalto noudattaa Snellin lakia kohdatessaan rajapintoja. Refraktioseisminen maastomittaus esitetään matka - aika-kuvaajana, jossa vaaka-akselilla on räjäytyspisteen ja havaintopisteen (geofonin) välinen etäisyys ja pystyakselilla elastisen aallon tämän matkan kulkemiseen käyttämä aika (kuva 33).

Refraktioseismisiin mittauksiin sovelleaan usein niin sanottua crossover distance-menetelmää. Kahden kerroksen tapauksessa on selvitettävä seismiset nopeudet  $V_1$  ja  $V_2$  sekä kerroksen paksuus  $z$ . Kuvan 33 merkinnöin saadaan  $V_1$  suoran F kulmakertoimen käänteislukuna ja nopeus  $V_2$  suoran S kulmakertoimen käänteislukuna. Näiden suorien leikkauspisteen  $W$  x-koordinaattia merkitään  $x_c$ :llä.



Kuva 33. Elastisen aallon nopeimpia reittejä ja vastaava matka-aikakuvaaja yhden rajapinnan (kahden kerroksen) tapauksessa.  $V$  on elastisen aallon nopeus alaindeksin osoittamassa kerroksessa ja  $\theta$  on Snellin lain mukainen kriittinen kulma.  $t_1$  on niin sanottu leikkausaika /59/.

Kuvan 33 merkinnöin saadaan kerroksen paksuudeksi /59/

$$z = \frac{X_c}{2} \left( \frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

Rajapinnan kaltevuus on eräs virhelähde, joka voidaan ottaa tulkinnessa huomioon. Lisäksi niin sanottua profiilitulkintamenetelmää käyttäen voidaan tulkintaa vahvistaa jossain määrin /59/.

Refraktioseismisissä mittauksissa käytettävä kalusto koostuu tyypillisesti monikanavaisesta (esimerkiksi 12-, 16- tai 24-kanavaisesta) mittausyksiköstä, johon kuuluu piirturi.

Seismiset värähtelyt havaitaan maahan painettavilla geofoneilla, jotka periaatteessa muistuttavat dynaamisia mikrofoneja (kela - sydän-systeemi). Kuva 34 esittää tyypillistä refraktiomittauksen UV-piirturin tulostusta.





Kuva 34. Tyypillinen refraktioluotauksen UV-piirturilla saatu tulostus. Kuvasta on pystyttävä määrittämään ensimmäiset P-aallot.

Tutkimuskohteissa käytetyn laitteiston merkki ja malli on ABEM Trio SX. Laitteisto on 24-kanavainen UV-piirturilla varustettu refraktioluotaukscalusto /18/.

Luotaus tehtiin normaalina linjaluotauksena viiden metrin geofoniväliä käyttäen. Yleensä käytettiin seitsemän räjäytyspaikan systeemiä, jolloin räjäytyspisteet sijaitsivat geofoniasetelman keskellä, päissä, 50 m etäisyydellä päistä sekä 100 m etäisyydellä geofonisysteemin päistä.

Niin sanottujen kaukoräjäytyspisteiden määrää on jouduttu rajoittamaan joissakin tapauksissa asutuksen vuoksi. Tämän on katsottu mahdollisesti joskus vaikuttaneen tulkintaan /18/.

### 6.3

#### Reikämittausmenetelmät ja -laitteet

##### 6.3.1

#### Ominaisvastusmittaus

Menetelmää voidaan käyttää hyväksi, kun halutaan tutkia

- kivilajeja ja kivilajien rajoja
- tektonisia rakenteita (kuten rakoilua)
- rakojen ominaisuuksia /35/.

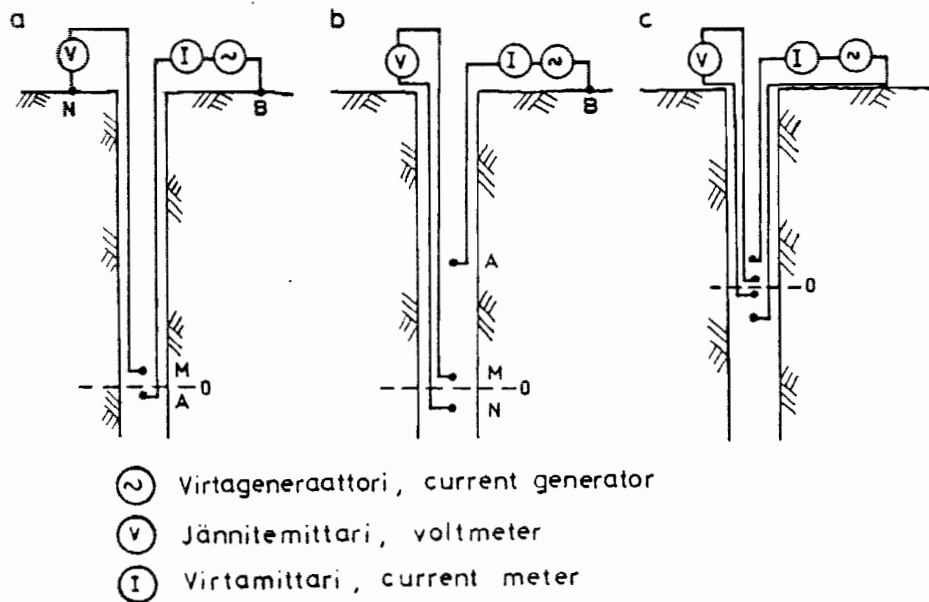
Vesipitoiset raot ja ruhjeet näkyvät mittausprofiilissa alhaisen ominaisvastuksen alueina. Reiässä ta-

pahtuva ominaisvastusmittaus tehdään periaatteessa samalla tavalla kuin maan pinnallakin: virtaelektrodeilla syötetään virtaa ja potentiaalielektrodeilla mitataan virran synnyttämä jännite.

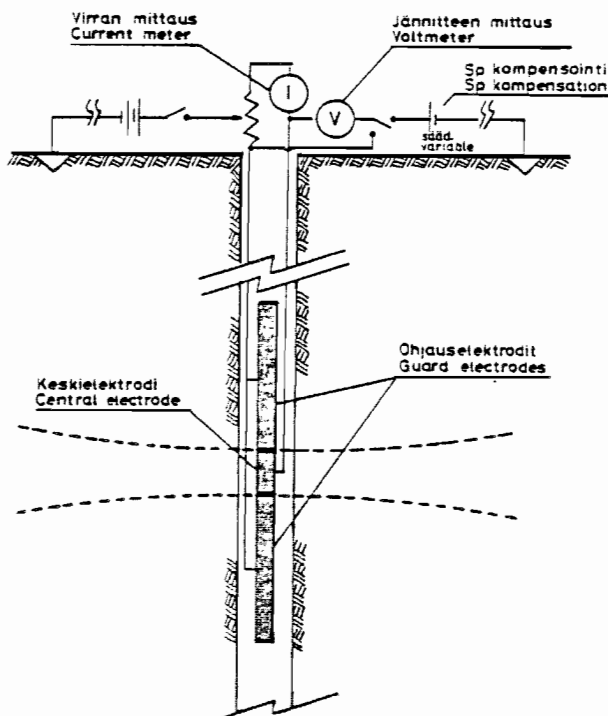
Syötetyn virran voimakkuuden ja mitatun jännitteen avulla lasketaan ympäristön näennäinen ominaisvastus. Näennäinen ominaisvastus antaa todellisen ominaisvastuksen arvon, kun ympäristö on homogeeninen. Elektrodiväljen suuruutta muuttamalla voidaan vaikuttaa mittaustulosta parhaiten edustavan tilavuuden suuruuteen.

Yleisimmin käytettyjä elektrodijärjestelmiä ovat niin sanottu normaalijärjestelmä, lateraalijärjestelmä ja Wenner-järjestelmä. Wenner-järjestelmässä kaikki elektrodit ovat reiässä ja elektrodien välimatka on vakio (kuva 35).

Lisäksi voidaan mainita niin sanottu fokusoitu vastusmittausjärjestelmä /40/. Tässä järjestelmässä käytetään reiässä kolmea elektrodia, jotka ovat kaikki samassa potentiaalissa. Keskimäinen elektrodi on varsinainen mittauselektrodi ja reunimmat ovat ohjauselektrodeja (kuva 36).



Kuva 35. Yleisesti käytettyjä ominaisvastusmittaus-systeemejä: normaalijärjestelmä (a), lateraalijärjestelmä (b) sekä Wenner-järjestelmä (c). Virtaelektrodeja on merkitty A:lla ja B:llä, potentiaalielektrodeja M:llä ja N:llä. Mittauspistettä on merkitty O:lla.



Kuva 36. Fokusoitu ominaisvastusmittaus /40/.

Normaalijärjestelmässä vain toinen potentiaali- ja virtaelektrodi on reiässä. Maan pinnalla oleva virtaelektrodi sijoitetaan riittävän etäälle, jotta se ei merkittävästi vaikuttaisi mittaustuloksen. Mittaustulokseen vaikuttaa karkeasti pallon muotoinen tila, jonka keskipiste on mittauspiste O ja läpimitä välin A - M luokkaa (kuva 35).

Normaalijärjestelmä antaa symmetrisen mittaustuloksen. Menetelmällä ei voida kartoittaa elektrodiväliä ohuempia kerroksia. Usein käytetään sekä pitkää että lyhyttä elektrodiväliä, jotta saataisiin mittaustuloksiin sekä syvyysulottuvuutta että yksityiskohtaisuutta.

Lateraalijärjestelmässä molemmat potentiaalielektrodit ovat reiässä. Näennäinen ominaisvastus vastaa todellista ominaisvastusta paksuilla ja melko ohuilla kerroksilla. Mittaustulos on kuitenkin epäsymmetrinen.

Lateraalijärjestelmällä on niin sanottu kuollut vyöhyke potentiaalielektrodien ja virtaelektrodin A välillä. Jos toinen resistiivinen vyöhyke olisi tällä välillä, se näkyisi huonosti mittaustuloksessa. Kerroksen kaateen vaikutus mittaustulokseen on lateraalijärjestelmää käytettäessä suurempi kuin normaalijärjestelmää käytettäessä.

Wenner-järjestelmä, jota käytettiin myös tässä tutkimuksessa, on Suomessa paljon käytetty menetelmä.

Tässä järjestelmässä kaikki elektrodit on sijoitettu reikään. Näennäinen ominaisvastus  $\rho_a$  voidaan laskea kaavasta /41/

$$\rho_a = \frac{1}{I(4\pi a\Delta V)} \quad (9)$$

jossa

I = syötetyn virran suuruus  
a = elektrodien väli  
 $\Delta V$  = mitattu jännite.

Tässä tutkimuksessa käytetty mittalaite on Rautaruukki Oy:n valmistama RR0M-2 (kuva 37). Laite mittaa ominaisvastuksen reiän seinämästä galvaanisesti Wenner-järjestelmällä. Laitteen koko elektroniikka on sijoitettu poranreikäanturiin. Syötetyn virran taajuus on 20 Hz.

Mittaustuloksen rekisteröinnissä käytetään piirturiyksikköä RRAR-3, joka myös on Rautaruukki Oy:n valmistama. Mittausalue on 1,2 - 400000  $\Omega$ m. Laitteen sisäisen kalibrointiyksikön avulla voidaan piirtää kalibroitu mitta-asteikko piirturipaperin alkuun.

Anturin halkaisija on 42 mm, pituus 1570 mm ja elektrodiväli  $a=318$  mm.



Kuva 37. Poranreikämittausta loivasta reiästä Viikin tutkimusalueella.

## 6.3.2

## Suskeptiivisuusmittaus

Suskeptiivisuusmittausta voidaan käyttää /40/

- kivilajivaihtelun paikallistamiseen
- kivilajimuuntautumisasteen arvioimiseen
- eri vyöhykkeiden korrelointiin reikien välillä
- kallonäyteanalyysin ohjaamiseen
- magneettisten maanpintamittausten tulkinnan läh-  
töarvoina.

Suskeptiivisuusmittaukseen käytetään induktiivista poranreikäslingramin tapaista laitetta. Vastaanotin-  
kela on viritetty siten, että suskeptiivisuuden muu-  
tokset näkyvät imaginaarikomponentissa ja sähkön  
johtavuuden muutokset reaalikomponentissa /35/.

Tähän tutkimukseen liittyvissä suskeptiivisuusmit-  
tauksissa käytettiin Rautaruukki Oy:n valmistamaa  
mittaria RRK-10. Laitteisto koostuu mittausanturis-  
ta, matkanmittauspyörästä, kaapelikelasta sekä re-  
kisteröintilaitteesta. Mittauskela ja elektroniik-  
kayksikkö on sijoitettu anturin sisälle /42/.

Mittausten rekisteröintiin käytettiin piirturia  
RRAR-3, jonka peruskalibrointi on tehty siten, että  
1 V vastaa 1 SI-yksikköä piirturilla. Laitteen herk-  
kyys on vähintään  $50 \times 10^{-5}$  yksikköä.

## 6.3.3

## Radioaktiivisen säteilyn totaali-intensiteetti

Luonnollisen gammasäteilyn mittauksia voidaan käyt-  
tää erilaisten kivilajiyksiköiden rajaamiseen. Sä-  
teilyn voimakkuus riippuu pääasiassa kivilajin ka-  
lium-, uraani- ja toriumpitoisuudesta.

Happamat kivilajit, etenkin graniitit ja pegmatii-  
tit, sisältävät runsaammin radioaktiivisia mineraa-  
leja kuin emäksiset kivilajit. Tästä syystä happamat  
kivilajit voidaan periaatteessa erottaa ympäristös-  
tään korkeamman radioaktiivisuuden perusteella /59/.

Tässä tutkimuksessa tehtiin mittauksia Rautaruukki  
Oy:n valmistamalla gammasäteilyanturilla. Anturissa  
käytetään geiger-putkea /16/. Laite ei ole erityisen  
herkkä gammasäteilyn mittaamisessa. Mittausten re-  
kisteröintiin käytettiin piirturia RRAR-3.

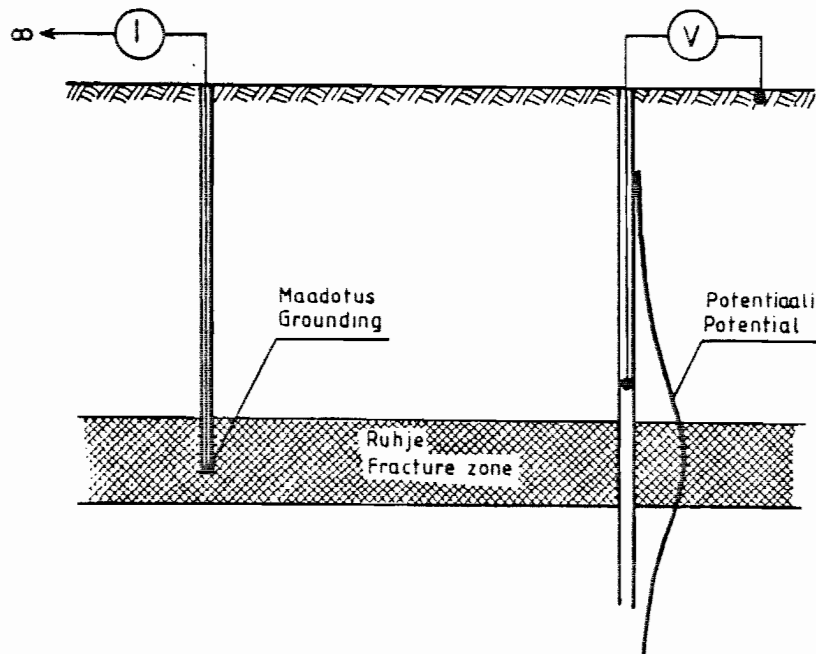
Gammasäteilymittausta tehtiin myös VTT:n omistamalla  
laitteella. Tämä Neuvostoliitossa valmistettu pieni-  
kokoinen laitteisto on skintillometriperustainen  
(tukeilmaisimeen perustuva) ja Rautaruukin laitetta  
herkempi. Tähän laitteeseen oli mittausajankohtana  
saatavissa vain noin 30 m mittainen anturin kaapeli.

## 6.3.4

## Latauspotentiaalimittaus reiästä reikään

Latauspotentiaalimittausta on käytetty perinteisesti malminetsinnässä hyvin johtavien malmien seuraamiseen. Menetelmässä maadotetaan toinen virtaelektrodi suoraan tutkittavaan johteeseen ja toinen vietään riittävän kauas, jotta se ei vaikuta mittaustulokseen merkittävästi (kuva 38). Tällöin koko johtava muodostuma toimii ikään kuin virtaelektrodina.

Maahan syötetyn virran aiheuttama potentiaali mitataan maanpinnalla ja/tai sopivissa poranrei'issä. Jännite mitataan kahden elektrodin väliltä. Näistä toinen on kiinteä ja toinen liikuteltava. Kiinteä elektrodi sijaitsee tavallisimmin johteessa olevan virtamaadotuksen lähetyvillä, jolloin elektrodien väliltä mitattu jännite saadaan suuremmaksi.



Kuva 38. Latauspotentiaalimittausperiaate /40/.

Latauspotentiaalimittaus onnistuu sitä paremmin mitä suurempi on johtavuuskontrasti tutkittavan kohteen ja ympäristön välillä. Vesipitoisten ruhjeiden johtavuuskontrasti on ympäristöön verrattuna yleensä 10 - 100. Joitakin rakovyöhykkeitä on pystytty seuraamaan jopa 150 m päähän virtamaadotuksesta /20/.

Tulkinta tehdään vieläkin tavallisesti vain kvalitatiivisena, vaikka erilaisiin mallitulkitointoihin perustuvia tulkintamenetelmiä tutkitaan (esimerkiksi /6, 13 ja 20/).



Kuva 39. Latauspotentialimitauksissa käytetty ABEM Terrameter-laitteisto. Kuvassa on lähetin-vastaanotin, suurteholähetin sekä valintakytkin vaihtoehtoisille maadotuselektrodeille.

Viikinmäen mittaukset tehtiin siten, että ominaisvastusmittauksissa löydettyjä johtavia rakoiluvyöhykkeitä käytettiin mahdollisina maadotuspaikkoina. Virtamaadotusten sopivuus reiässä Sk2 tarkistettiin vielä maadotusvastusmittauksin. Valittiin kolme virtamaadotuspaikkaa. Toista potentialielektrodeista liikuteltiin toisessa reiässä Sk3.

Tässä tutkimuksessa käytettiin ABEM Terrameter-nimistä laitteistoa (latauspotentialilaitteisto on huomattavasti uudenaikaisempi kuin se, jota käytettiin maavastusluotauksissa). Laitteiston perusosa on lähetin ja vastaanotin, samassa kotelossa. Lähettimen teho ei kuitenkaan riitä kovin suurilla elektrodiväleillä käytettäessä. Niinpä tässäkin tapauksessa käytettiin apuna suurteholähetintä (booster), joka on lisävaruste (kuva 39).

#### 6.3.5

#### Gamma - gamma-mittaus

Gamma - gamma-mittaus (gammäsäteilyn takaisinsiron-ta) on kehitetty vuonna 1953 tiheysmäärityksiä varten /59/. Mittauksen tavoitteena on tutkia kallion kivilaji- ja rakoiluoimaisuuksia kallion tiheysvaihtelun perusteella. Myöhemmin menetelmä on saanut tärkeän sovelluksen huokosmäärityksissä.

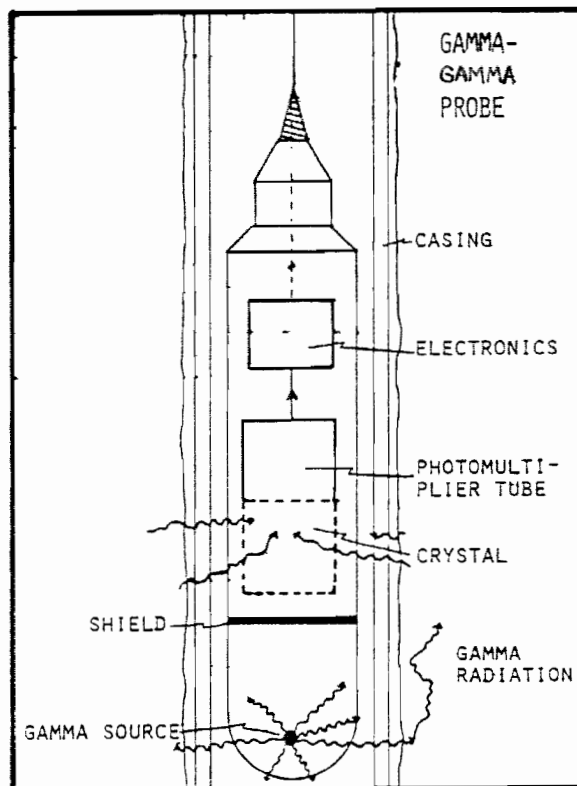
Gamma - gamma-mittauksen periaate on seuraava (kuva 40): anturissa on monoenergeettistä gammäsäteilyä

säteilylähteeksi. Lähteenä voidaan käyttää esimerkiksi  $^{27}\text{Co}^{60}$  tai  $^{137}\text{Cs}$  isotooppeja. Gammakvantit siroavat kalliosta detektoriin. Käytetyillä energioilla (0,5 - 2 MeV) sironta on Compton-sirontaa. Kvantit siroavat siis atomien elektroneista /3/.

Sironnan määrä on verrannollinen atomien elektronitiheyteen, jonka suhde aineen tiheyteen on useimmilla alkuaineilla vakio. Vastaanotetun sironnan intensiteetistä voidaan määrittää kallion tiheys. Usein on järkevää kalibroida tiheysmittaus juuri kullollekin mittausalueelle oikeaksi. Tämä onnistuu esimerkiksi kairasydännäytteen avulla. Suhteellista vertailua tosin voidaan tehdä ilman kalibrointiakin.

Tässä tutkimuksessa mittaukset tehtiin VTT:n laitteella PPGR-1, joka on neuvostoliittolaisvalmisteen ja käyttää Cesium-137-isotooppia /29/.

Tiheyden mittausalue on tällä laitteella 0,8 - 2,3 g/cm<sup>3</sup>, kun mittausvirhe 90 % todennäköisyydellä on enintään 0,06 g/cm<sup>3</sup>. Mittaussyvyys on alkuperäisellä laitteella enintään noin 30 m, mutta vinoissa rei'issä voi periaatteessa käyttää myös pitempää kaapelia. Tässä tutkimuksessa sellaista ei kuitenkaan ollut käytettävissä, joten tiheysmittaus on tehty vain 30 m syvyyteen saakka.



Kuva 40. Gamma - gamma-mittauksen eli gammasäteilyn takaisinsirontamittauksen periaate /36/.



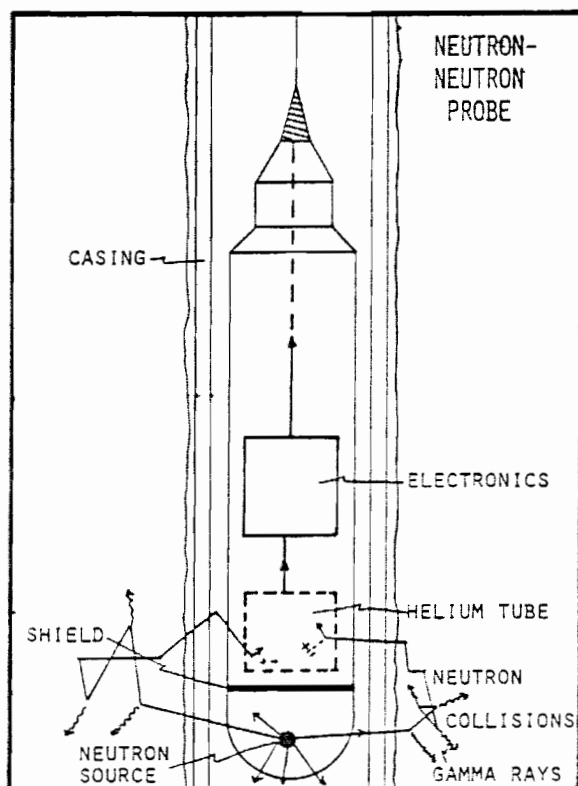
## 6.3.6

## Neutron - neutron-mittaus

Neutron - neutron-mittaus eli neutronisäteilyn takaisinsironna on menetelmä, jonka tavoitteena on selvittää kallion rakoilua ja kivilajeja.

Laitteen mittapäässä on voimakas neutronilähde ja neutronidetektori (kuva 41). Neutronilähteestä emittoituvat nopeat neutronit (energia yli 0,1 MeV) törmäilevät aluksi kiven tai veden atomeihin, jolloin ne siroavat ja menettävät samalla liike-energiaansa eli niiden nopeus pienenee.

Hidastuessaan neutronit muuttuvat aluksi epitermiksi ja lopulta termisiksi (energia noin 0,025 eV) /36/. Termiset neutronit voivat lopulta absorboitua kokonaan törmällessään atomeihin. Vastaanotetun säteilyn intensiteetin perusteella voidaan arvioida veden määrää ja ominaisuuksia.



Kuva 41. Neutron - neutron-mittauksen eli neutronisäteilyn takaisinsironnan periaate /36/.

Atomiytimellä on kaksi tärkeää ominaisuutta, jotka vaikuttavat vastaanotetun säteilyn määrään, nimittäin sirottava vaikutusala (scatter cross section) ja absorboiva vaikutusala (capture cross section) /3/.

Sirottavan vaikutusalan suurudesta riippuu, kuinka nopeasti neutronit törmäävät ja hidastuvat atomeis-

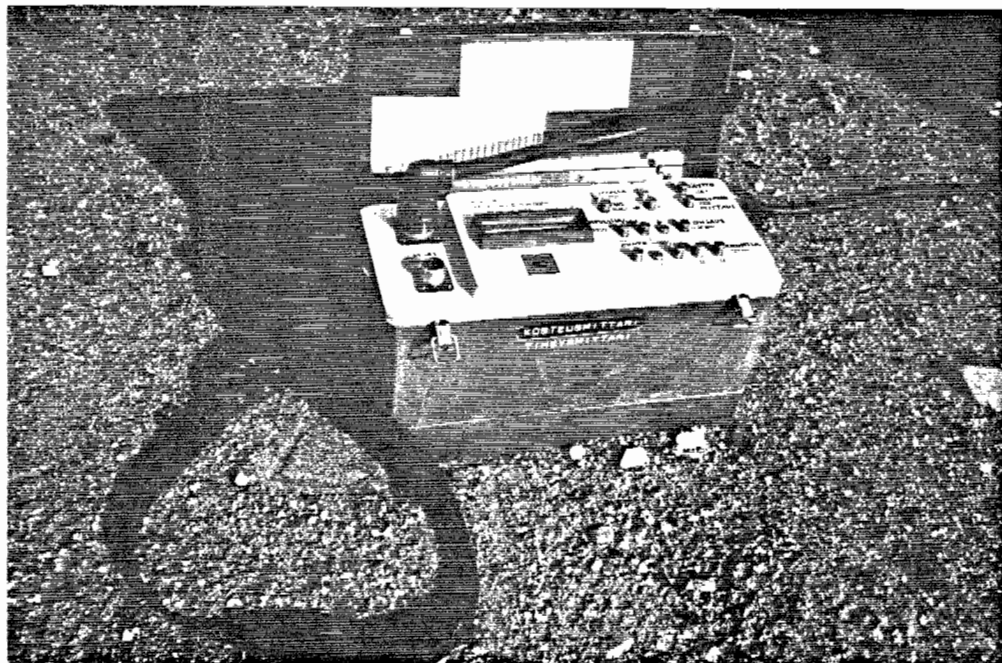
sa. Sirottava vaikutusala saa hyvin erilaisia arvoja eri alkuaineilla ja isotoopeilla. Esimerkiksi vedyllä on suuri sirottava vaikutusala ja suhteellisen pieni termisiä neutroneja absorboiva vaikutusala.

Käytännössä neutronien hidastuminen termisiksi riippuu lähes kokonaan väliaineen vetytytyisyydestä. Mittattavaan termisten neutronien intensiteettiin vaikuttavat kuitenkin eräät termisiä neutroneja absorboivat raskaammat alkuaineet kuten kloori. Mittaamalla epitermisiä neutroneja vältetään tältä vaikutukselta.

Kallioperän kokonaishuokoisuuden määrittäminen menetelmällä vaatii tunnetut korjauskertoimet, jotka saadaan laboratoriomittauksin. Kertoimien suuruus vaihtelee kivilajeittain. Itse kiven huokoisuuden ja tiheyden avulla voidaan laskea rakojen aiheuttama huokoisuus.

Tässä tutkimuksessa käytettiin VTT:n omistamaa neuvostoliittolaisvalmisteista laitetta VPGR-1 (kuva 42). Mittarin toiminta perustuu siihen, että radioaktiivinen plutonium - beryllium-säteilijä lähettää ympärilleen nopeita neutroneja.

Tutkittavassa väliaineessa energiaansa menettäneet neutronit siroavat pääasiassa vetyatomeista. Nämä hitaat neutronit havaitaan helium-kaasudetektorilla ja muutetaan sähköpulsseiksi, jotka laskuri SIP-IM laskee.



Kuva 42. Neutron - neutron-mittalaite Viikinmäessä.

Pulssien määrä on verrannollinen tutkitun aineen kosteuteen. Kalibroiminen, jonka avulla tehdään kos-

teuden mittaamisessa tarvittavat käyrästöt, on tehtävä vuosittain. Reikämittauksissa on laitteen mittausalue 0 - 100 % ja mittausvirhe 10 - 25 % /29/.

Laite on kokonaisuudessaan melko pienikokoinen, jopa yhden miehen siirrettävä. Käytetyn laitteen mittausanturin kaapelin pituus oli vain noin 30 m. Loivissa rei'issä ei anturin paineensietokykyä ylitetä, vaikka käytettäisiin pitempääkin kaapelia. Tässä tutkimuksessa ei kuitenkaan sellaista ollut käytettävissä.

7

## TULOSTEN ARVIOINTIA

## 7.1

## Irtomaakerrosten määrittäminen

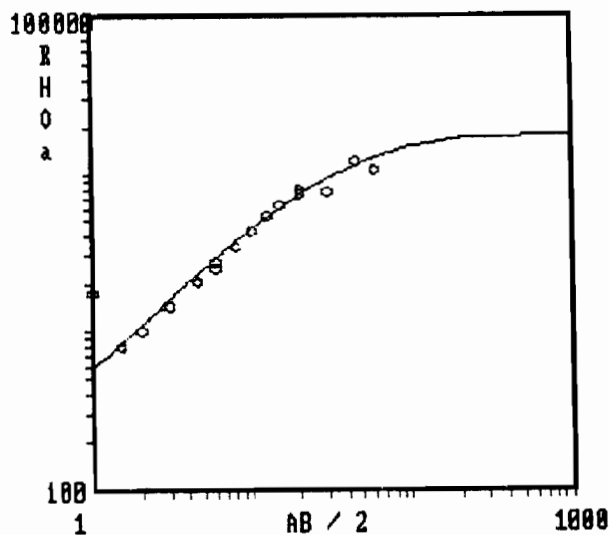
Irtomaakerrosten paksuuden määrittäminen on mielekäästä maanpintamittausmenetelmällä, sillä reikämittausmenetelmällä maakerrosten paksuus selviää jo poraus- tai kairausvaiheessa.

Magneettisilla menetelmillä ei voitu määrittää irtomaakerrosten paksuutta. Irtomaakerros ja kallio voivat muodostaa yhdessä rakenteen, joka voi aiheuttaa magneettisen anomalian. Tällaisessa tapauksessa on mahdollista yrittää tulkita anomaliaa esimerkiksi askelmamallilla, jolloin kalliopinnan korkeustason muutokset erottuvat.

Linjalla F Roihuvuoressa (kuva 50) voitiin havaita edellä kuvattu ilmiö välillä 70 - 110 m: sekä totaalkentän että pystygradientin arvo kasvoi irtomaakerroksen ohetessa. Magneettiset menetelmät eivät kuitenkaan sovellu varsinaisesti maakerrosten paksuuden määrittämiseen.

Sähköisten induktiivisten menetelmien käyttökelpoisuus on samantapainen kuin magneettisten menetelmien: muutoksia maakerrosten paksuudessa ja laadussa voidaan joissakin olosuhteissa havaita, mutta paksuuden määrittäminen on käytännössä vaikeaa.

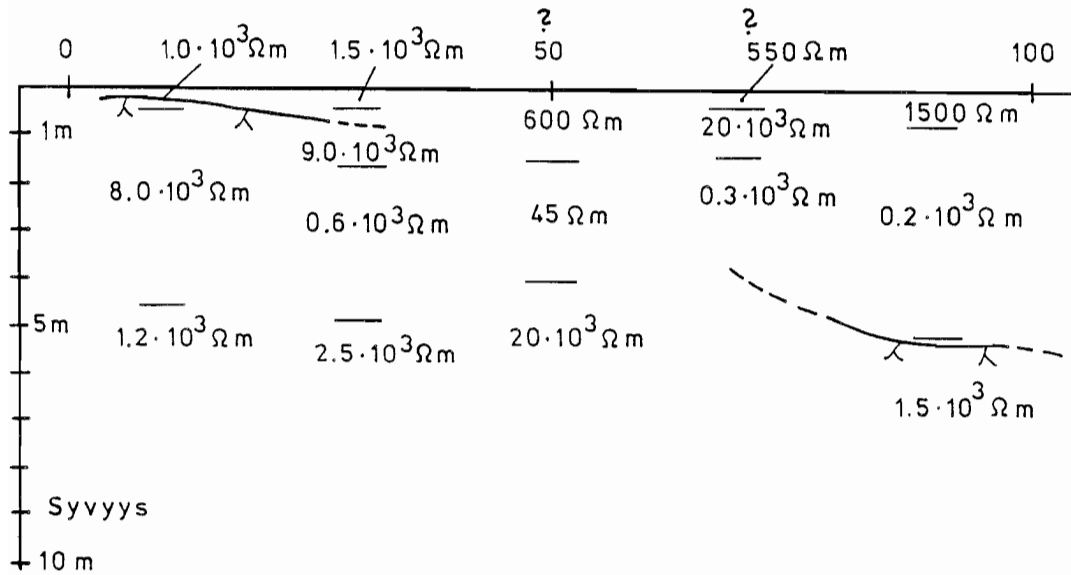
Talli A100  
KOKO-SCHLUMBERGER LUOTAUS



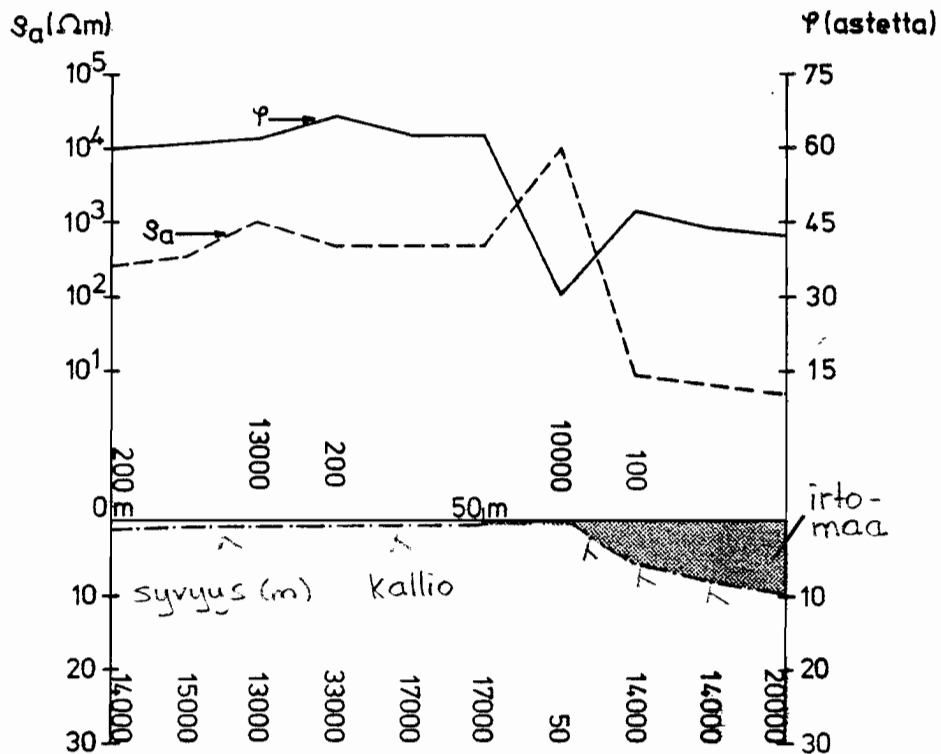
I	H(I)	RHO(I)
1	0.7	400
2	999.0	18000

FNS(lg) : 1.282096

Kuva 43. Vastusluotaustulos ja siihen sovitettu tulkinta. Tulkintaohjelma on tehty VTT:n geotekniikan laboratoriossa.



Kuva 44. Vastusluotauspisteitä linjalla G Roihuvuoressa. Kysymysmerkillä merkityt luotautulokset ovat ilmeisesti häiriintyneitä.



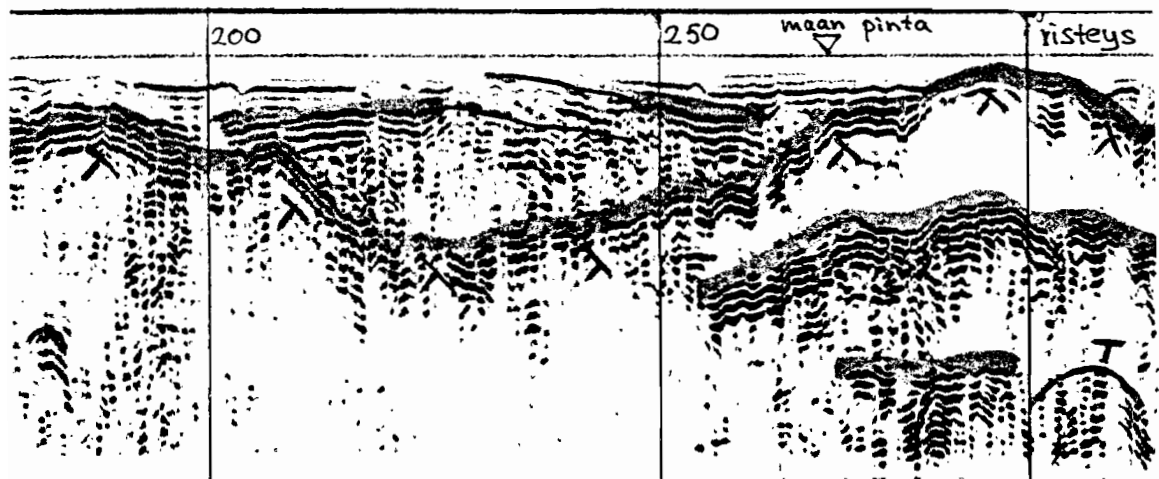
Kuva 45. VLF-R kaksikerrosmallitulkinna linjalla D Talissa.

Epäsuoria havaintoja irtomaakerrosten muutoksista saadaan esimerkiksi silloin, kun kalliopinnassa olevaan painaumaan on muodostunut johtava savikerros. Talissa linjalla D (kuva 49) sekä korkeataajuus- että pienoisslingram antoivat selvän anomalian, kun kallio painui johtavan irtomaakerroksen alle.

Vastusluotausta voidaan käyttää maakerrosten paksuuden määrittämiseen (kuvat 43 ja 44). Paikoissa, joissa kerrosmallin käyttö on ylipäättään mahdollista, on vastusluotauksen avulla mahdollista arvioida jopa maakerrosten välisten rajapintojen (esimerkiksi moreeni - savi) syvyyttä.

VLF-R-mittaus antaa mahdollisuuden kaksikerrosmallin käyttöön. Tässä mallissa ensimmäinen kerros olisi usein juuri maakerros ja toinen kerros kallio. Kaksikerrosmallissa on tiedettävä mitatut arvot (näennäinen ominaisvastus ja kulma  $\emptyset$ ) sekä ensimmäisen kerroksen johtavuus (kuva 45). Johtavuus voidaan mitata esimerkiksi vastusluotauksen yhteydessä tai arvioida irtomaan pintakerroksen laadun perusteella.

Maatutkamittauksia tehtiin vain Talin mittauskohteessa. Menetelmän rajoitukset tulivat mittauksissa selvästi esiin: jos maa on hyvin johtavaa, on maatutkan tunkeutuvuus huono (alle 10 m). Jos irtomaakerros on ohut tai huonosti johtavaa (esimerkiksi soraa), voidaan laitteella tehdä havaintoja kallion rakoilusta syvemmilläkin.



Kuva 46. Maatutkan tulostus kevyen liikenteen tien päältä tehdystä mittauksesta. Mittaus on suunnilleen yhdensuuntainen linjan A (Tali) kanssa, mutta kuvan esittämällä alueella noin 10 metrin etäisyydellä.

Tutkan tulostus on yksinkertainen: tutkaheijastuksista muodostuu kuvio, joka on tulkittava lähinnä

visuaalisesti (toistaiseksi). Tulkinnan tarvetta aiheuttaa lähinnä dielektrisyysvakion vaikutus todellisiin etäisyyksiin. Kuitenkin maatutkan tulostama kuva on sellaisenaankin jo "katselukelpoinen" (kuva 46).

Tutkimuskohteissa tehdyt refraktioluotaukset ovat antaneet suhteellisen hyviä arvioita irtomaakerrosten paksuudelle. Refraktioluotauksessa käytetty suure (elastisen P-aallon etenemisnopeus) erottaakin useimmiten kiteisen kallioperän ja sen päällä olevan irtomaakerroksen toisistaan.

Linjoilla A ja F tehdyt refraktioluotaukset (kuvat 47 ja 50) osoittavat, että refraktioluotauksella voidaan hyvissä olosuhteissa tehdä varsin luotettava irtomaakerroksen paksuuden määrittäminen.

## 7.2

### Ruhjeiden ja rakojen määrittäminen

#### 7.2.1

##### Maanpintamittausmenetelmät

Ruhjeisiin ja heikkousvyöhykkeisiin liittyvät fyysiset muutokset antavat periaatteessa mahdollisuuden magneettisten, sähköisten (sekä induktiivisten että galvaanisten) ja seismisten menetelmien sekä maatutkan hyväksikäyttöön.

Tutkimuskohteista puuttuivat todella selvät ruhjeet, mutta joitakin rikkonaisuusvyöhykkeitä kohdetunneleista löytyi. Vähäisten ruhjeiden ja rakoiluvyöhykkeiden löytäminen ja määrittäminen maanpintamittauksin osoittautui vaativaksi tehtäväksi.

Magneettiset menetelmät ovat antaneet heikkousvyöhykkeiden tutkimuksissa hyviäkin tuloksia, kun tutkimuskohde on ollut suuri (1 - 50 km) /17/. Kuitenkin tässä tutkimuksessa kävi ilmi, että magneettikentän voimakkuus riippuu pääasiassa muista tekijöistä kuin melko vähäisestä kallion rikkonaisuudesta johtuvista muutoksista. Kuvissa 47 - 50 on esitetty joitakin mittaustuloksia. Joihinkin kuviin on liitetty tietoja tunnelissa tehdyistä geologisista kartoituksista.

Linjalla A tehdyissä mittauksissa (kuva 47) kohdassa 170 m on mahdollinen pieni ruhje, joka erottuu magneettisilla menetelmillä. Linjalla B (Tali) näkyy selvä magneettinen anomalia kohdassa 40 - 60 m. Anomalia johtuu ilmeisesti viemäriputken maahansijoittamisen yhteydessä syntyneistä kivikasoista. Linjan D (kuva 49) pieni anomalia kohdassa 60 m aiheutui siirtolohkareesta.

Roihuvuoressa linjalla F (kuva 50) kohdassa -15 m oleva vähäinen heikkousvyöhyke kalliossa erottuu joten kuten. Muuten anomaliat johtuvat enemmän kivila-

jijuonista sekä irtomaan paksuuden vaihtelusta. Esimerkiksi kohdassa 60 m (kuva 50) oleva selvä anomalia johtuu jostakin hyvin paikallisesta tarkemmin määrittämättömästä lähteestä.

Korkeataajuus-slingramilla ei saatu Talissa tehdyissä mittauksissa juuri mitään anomaliaa. Ainoastaan poikittaislinja, joka leikkasi kohtisuoraan kallion ja savisen niityn rajaa, antoi selvän anomalian (kuva 49). Tällöin pääasiallinen anomalian aiheuttaja oli johtava irtomaan reuna. Tämä osoittaa, että laite ei sovellu sellaisenaan kallion pienten rakennepiirteiden selvittämiseen.

Slingram osoittautui Ruotsissa tehdyissä mittauksissa /57/ suurten heikkousvyöhykkeiden tutkimisessa paremmaksi menetelmäksi kuin tässä selvityksessä kehitettyjen pienten rakoiluvyöhykkeiden kohdalla näyttää.

Pienois-slingram antoi linjalla A (kuva 47) pienen Re-anomalian kohdassa, jossa on maatutkalla havaittu mahdollinen pysty rakoilu. Linjalla B (kuva 48) mitatut anomaliat johtuivat pääasiassa irtolouheesta ja rautaromusta. Linjalla D (kuva 49) saatiin kohdassa 60 m anomalia lohkarista, mutta kohdasta 100 m alkava niitty ja kalliopinnan aleneminen näkyy myös selvästi. Linjan lopussa voidaan havaita selvästi puhelinkaapelin aiheuttama häiriö.

Roihuvuoreissa saatiin pienois-slingramilla pieniä anomaliaita mahdollisten kallion rikkonaisuuksien kohdalla (kuva 50). Edellytyksenä oli kuitenkin, että irtomaata ei kallion päällä juuri saanut olla. Pienois-slingram oli herkkä (alkuperäisen käyttötarkoituksen mukaisesti!) pintaan puhkeaville johtaville juonille, joita esiintyi kohdasta 120 m eteenpäin.

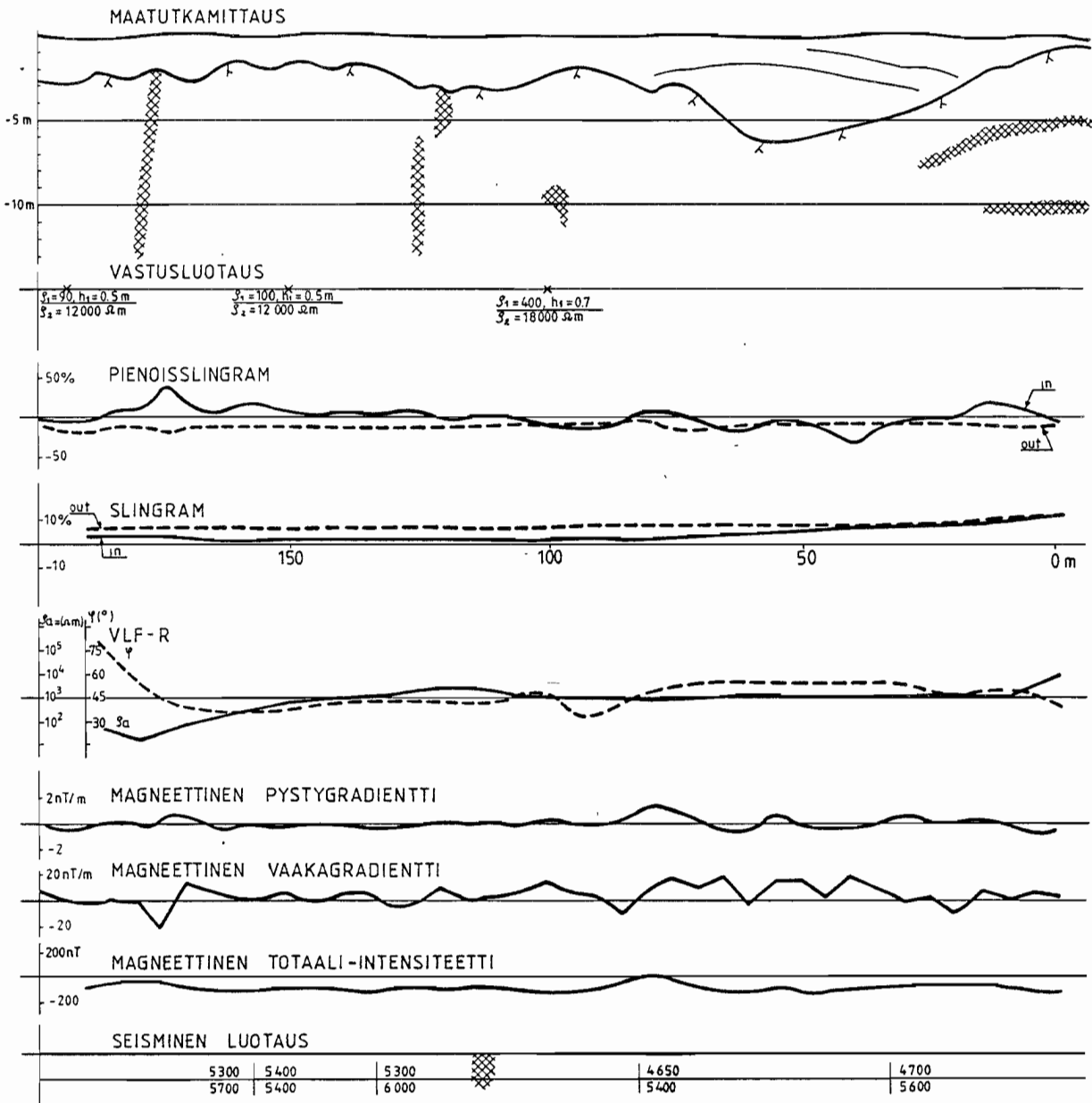
Vastusluotaus antoi joissakin tapauksissa kerrosmaalitulkinnan tuloksena viitteitä siitä, että kallion johtavuus olisi kohonnut (kuva 44). Tämä voi olla joissakin tapauksissa merkki kallion rikkonaisuudesta. Linjalla A (kuva 47) kallion ominaisvastus on 12000 - 18000  $\Omega$ m. Noin puolen metrin paksuinen irtomaakerros erottuu mittauksissa selvästi.

Linjalla B (kuva 48) tehty vastusluotaus antaa viitteitä kohonneesta johtavuudesta kalliosta. Tämä tulee maatutkalla ja kallion pinnalta tehtyjä havaintoja: kalliosta esiintyy rakoilua kyseisessä kohdassa. Kerrosten 3 ja 4 tulkintaan on syytä suhtautua varauksella, sillä alueella esiintyi häiriöitä (muun muassa elektrodien väliin jäänyt kosteikko ja tie).

Niityllä (kuva 49) linjalla D tehty vastusluotaus antoi hyvän kuvan maankamaran rakenteesta: päällä alle 1 m kerros multaa ja hiekkaa, alla savipitoista maata ja noin 4 m syvyydellä kallio.



TALI LINJA A



Kuva 47. Mittaustuloksia Talista linjalta A. Maatutkalinja TA sijaitsee muita linjoja lähempänä niitä, joten myös havaitut irtomaakerrokset ovat paksumpia kuin muiden linjojen kohdalla.

TALI LINJA B

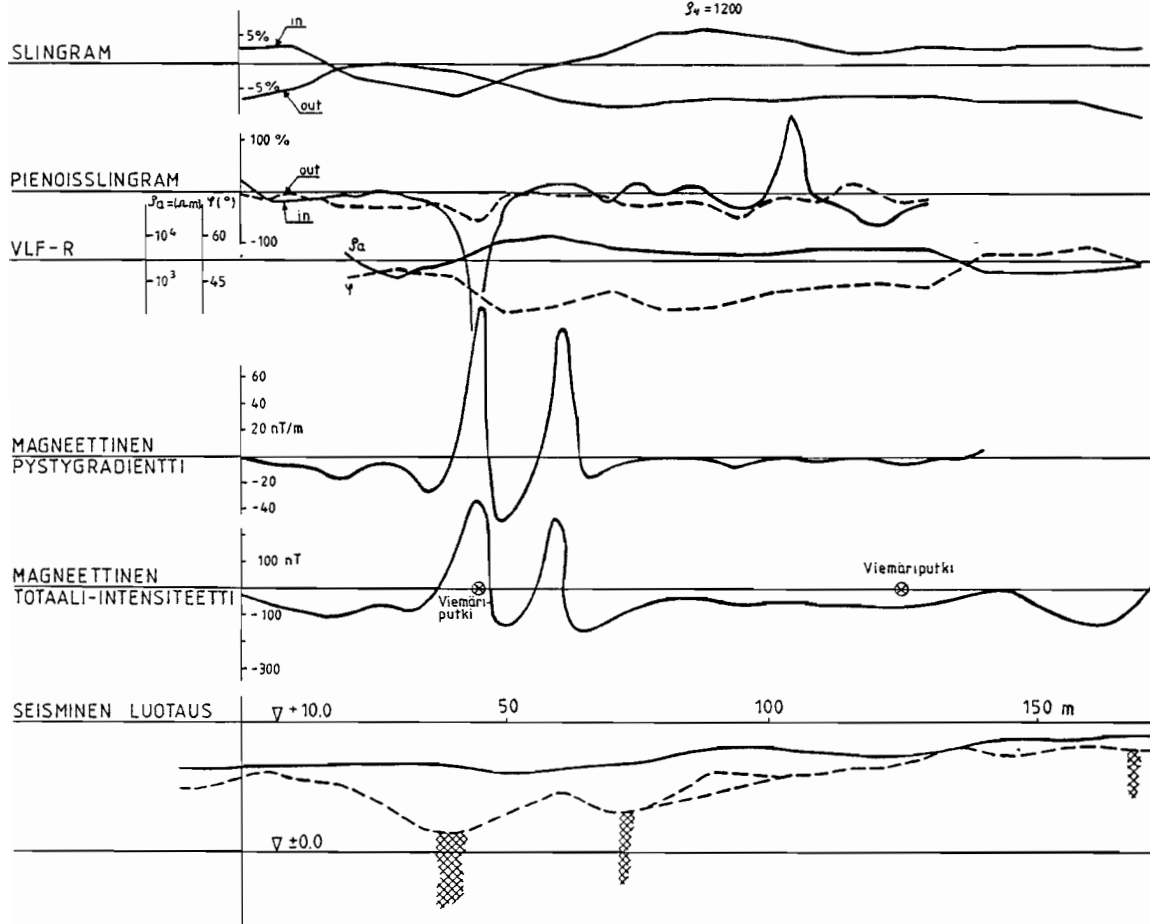
VASTUSLUOTAUS

( $S_1 = 2500 \Omega m, h_1 = 1.0 m$ )

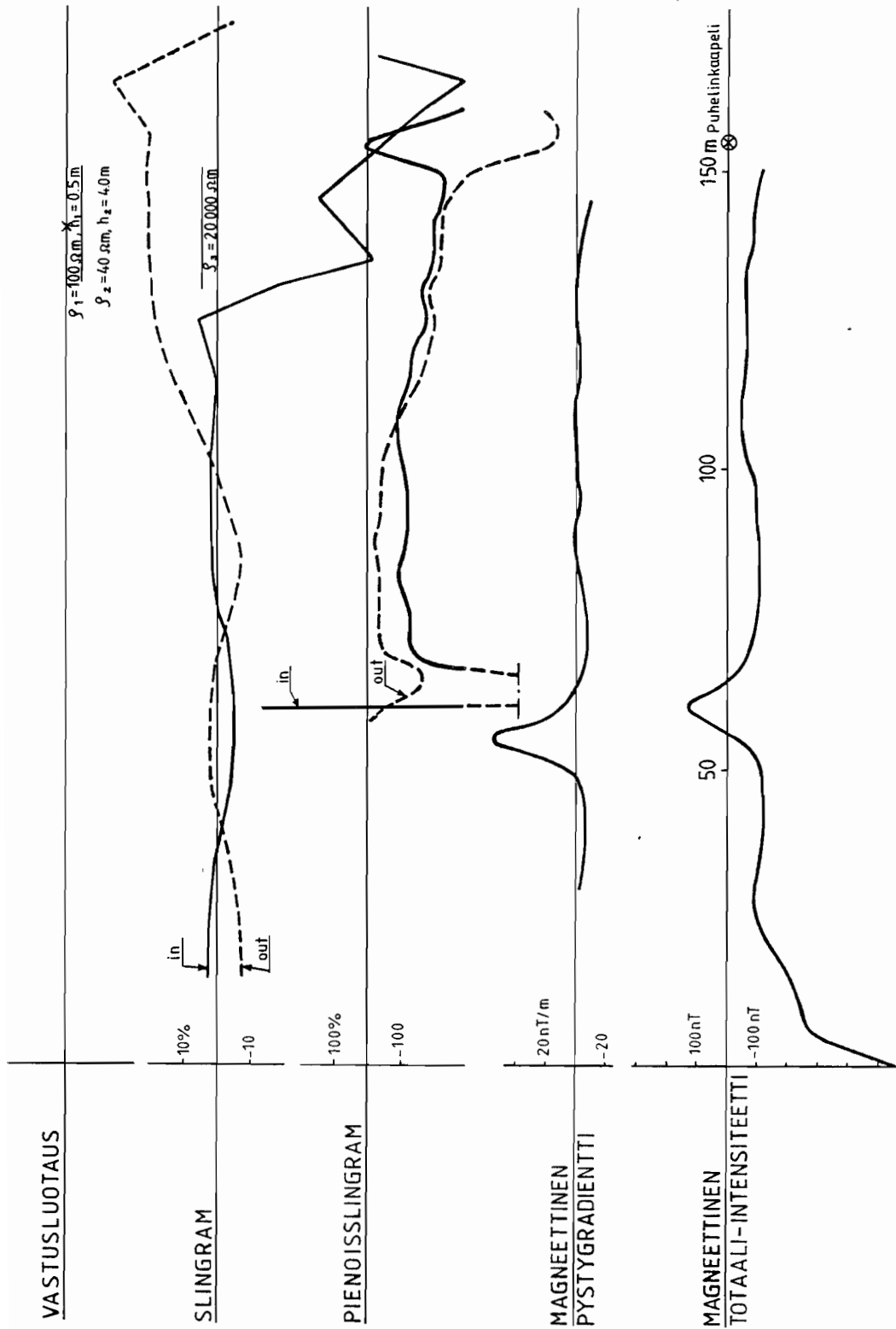
( $S_2 = 1000 \Omega m, h_2 = 2.0 m$ )

$S_3 = 2000 \Omega m, h_3 = 4.0 m$

$S_4 = 1200 \Omega m$

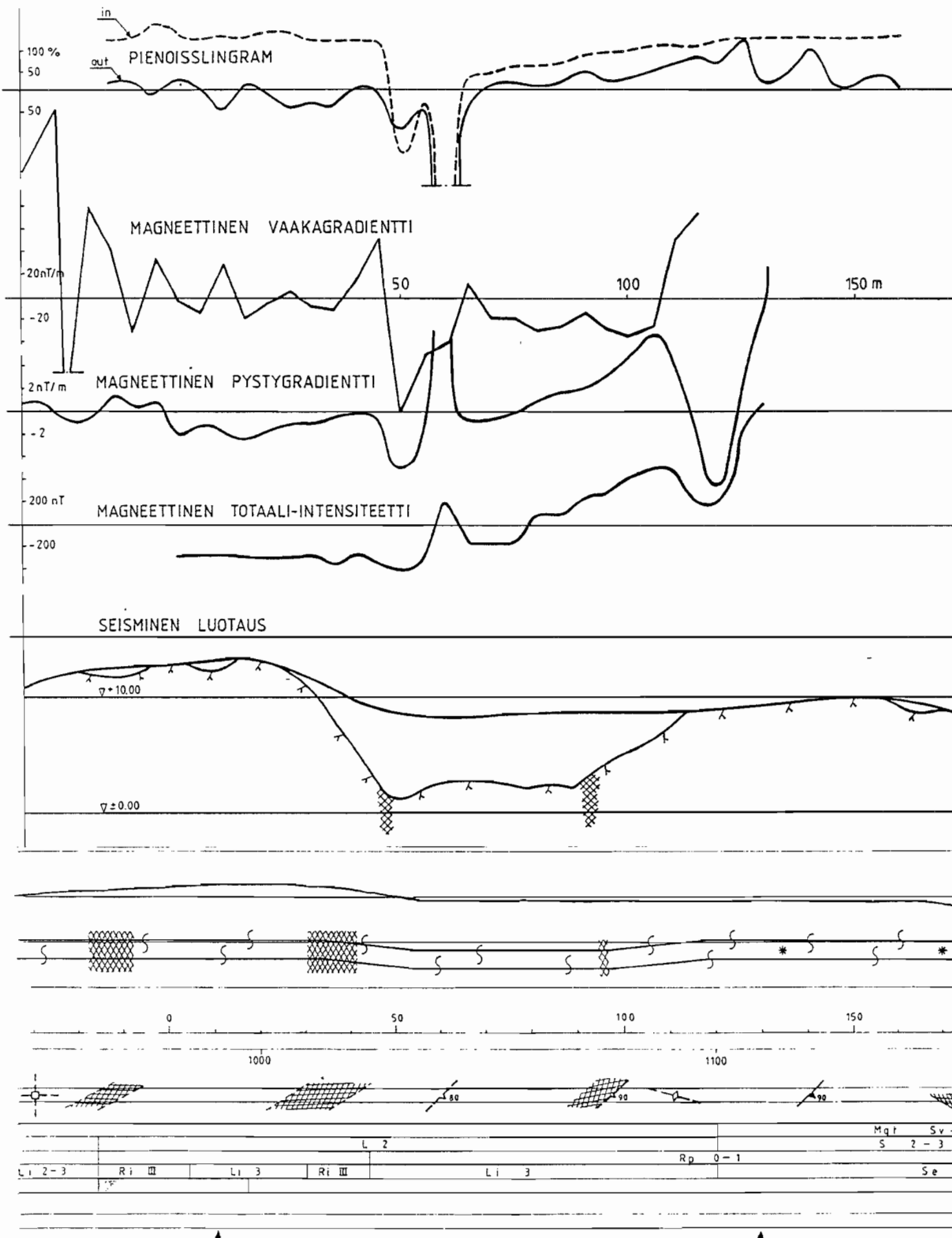


Kuva 48. Mittaustuloksia Talista linjalta B. Kohdassa 40 m sijaitsee pieni märkä painanne ja oja. Viemäriputken kaivamisjätteet näkyivät maastossa selvästi.



Kuva 49. Mittaustuloksia Talista linjalta D. Linja sijaitsee poikittain tunneliin nähden. Kohdassa 100 m alkaa kostea niitty ja kalliopinta laskee savipitoisen maakerroksen alle.

ROIHUVUORI LINJA F



Kuva 50. Mittaustuloksia linjalta F Roihuvuoresta. Linja F sijaitsee 10 m etäisyydellä tunnelista ja on sen kanssa yhdensuuntainen.

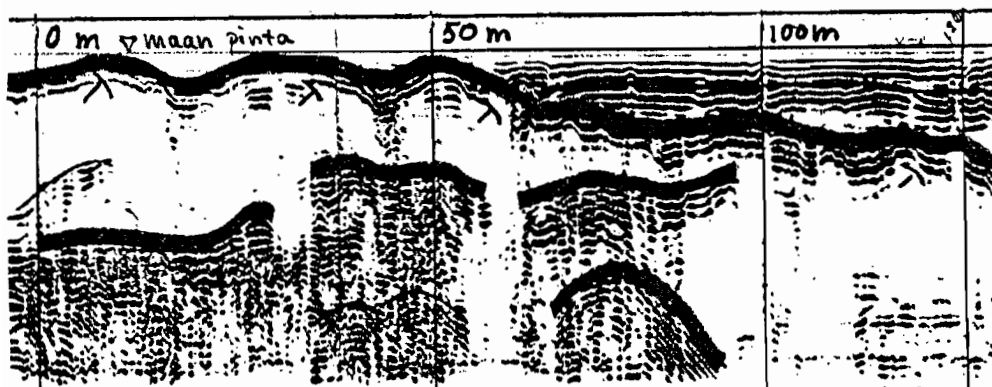
VLF-R mittauksista tehtiin kaksikerrosmallitulkintoja. Toisen kerroksen johtavuuden perusteella voi periaatteessa päätellä jotakin kallion ominaisuuksista (kuva 45). Suurin osa kallion ominaisvastusarvoista on uskottavia, sillä linjan alkupää on kalliolla, jonka päällä on vain vähän irtomaata.

Kallion pinta alenee mennäkseen kohdassa 60 m kostean niityn alle. On kuitenkin huomattava, että käytännössä VLF-R-mittausten tarkkuus vaikutti monesti heikohkolta (esimerkiksi saattoi olla vaikeaa saada mittauservoa). Tämä seikka vähentää mittausten arvoa ainakin kaupunkihäiriöiden vaikutusalueella.

Maatutkamittaukset jouduttiin tekemään käytännön syistä kevyen liikenteen teillä sekä niityillä. Maatutkan heijastukset tapahtuvat rajapinnoista, joissa väliaineen dielektrisyys muuttuu.

Jos irtomaakerros ei ole todella johtavaa, voi tutkamittaus antaa runsaasti tietoa, esimerkiksi kallion pinta voi erottua hyvin (kuva 52). Vaakarakoilu, joka on havaittu myös tunnelin sisältä, erottuu mittaustuloksesta. Myös tunneli erottuu kuvasta.

Kuvassa 51 näkyvä vaakarakoilu ei käytännössä häntannut louhintaa, mitä ei ilmeisesti pelkän tutkaku- van perusteella olisi voitu todeta. Tutkagrammissa kuva on aika - matka-kuvaaja. Jotta syvyysmittakaava saadaan oikeaksi on aika muutettava kerrosten arvioitujen tai mitattujen dielektrisyysvakioiden avulla matka - matka-kuvaksi (kuva 52).



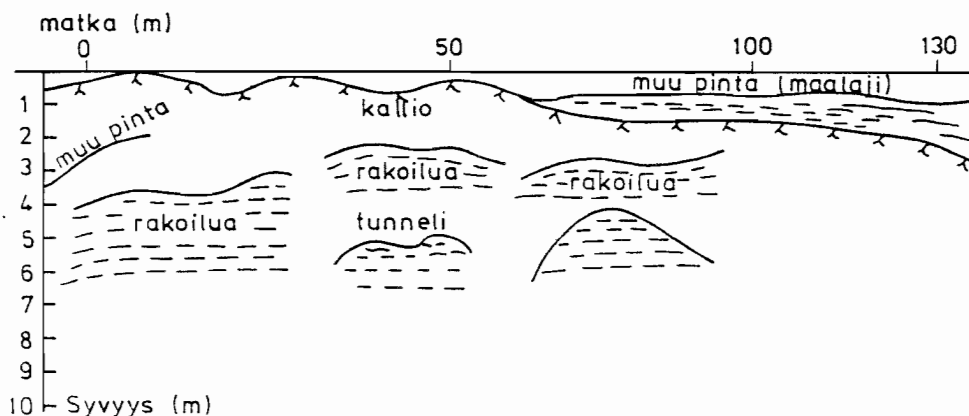
Kuva 51. Tutkagrammi linjalta TE Talista. Mittaus on tehty tunneliin nähden poikittain, kevyen liikenteen tien päällä.

Seisminen refraktioluotaus oli tehty molemmissa mitauskohteissa jo tunnelien esitutkimusvaiheessa. Ympäristön sallissa saadaan seismisellä refraktioluotauksella erinomaista tietoa suunnittelun avuksi.

Kuvan 46 luotaustulos esimerkiksi on vastannut tunnelissa toteutuneita toimenpiteitä varsin hyvin. Tallin tutkimuskohteessa oli varmuuden vuoksi merkitty eräs heikkousvyöhyke, joka ei kuitenkaan haitannut louhintaa. Tämä johtui osittain rakennuttajan varovaisuudesta, osittain käytetystä pienestä tunnelin koosta (louheen siirrossa käytettiin kiskokalustoa).

Tässä tutkimuksessa käytetyistä menetelmistä seisminen refraktioluotaus on eräs sopivimmista menetelmistä kallion pintaosiin ulottuvien heikkousvyöhykkeiden paikallistamisessa ja arvioimisessa.

Linjalla A tehdyt refraktioluotaustulokset ja maatutkamittauksen tulokset näyttävät korreloivan (kuva 47): tutkaheijastuksien perusteella on tulkittu rakoilua kohtiin 0 - 30 m ja 100 - 120 m. Vastaavissa kohdissa on havaittavissa kallionopeuksien alenemista (maatutkamittauslinja ja seisminen linja ovat noin 20 m toisistaan erillään).



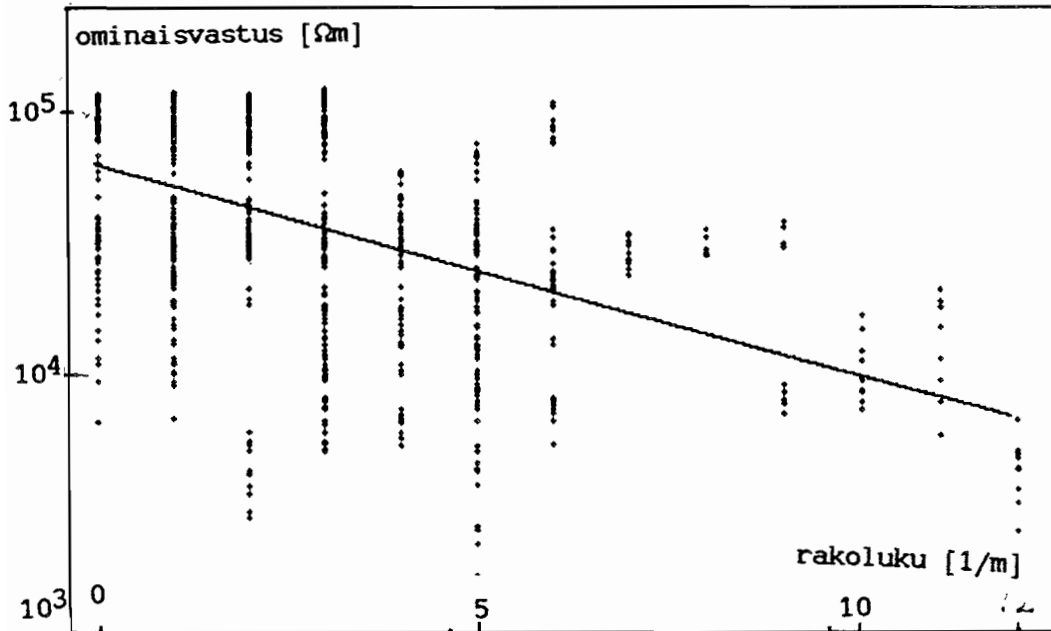
Kuva 52. Kuvan 51 tutkagrammin perusteella tehty tulkinta, jossa syvyysarvot on korjattu.

### 7.2.2

#### Reikämittausmenetelmät

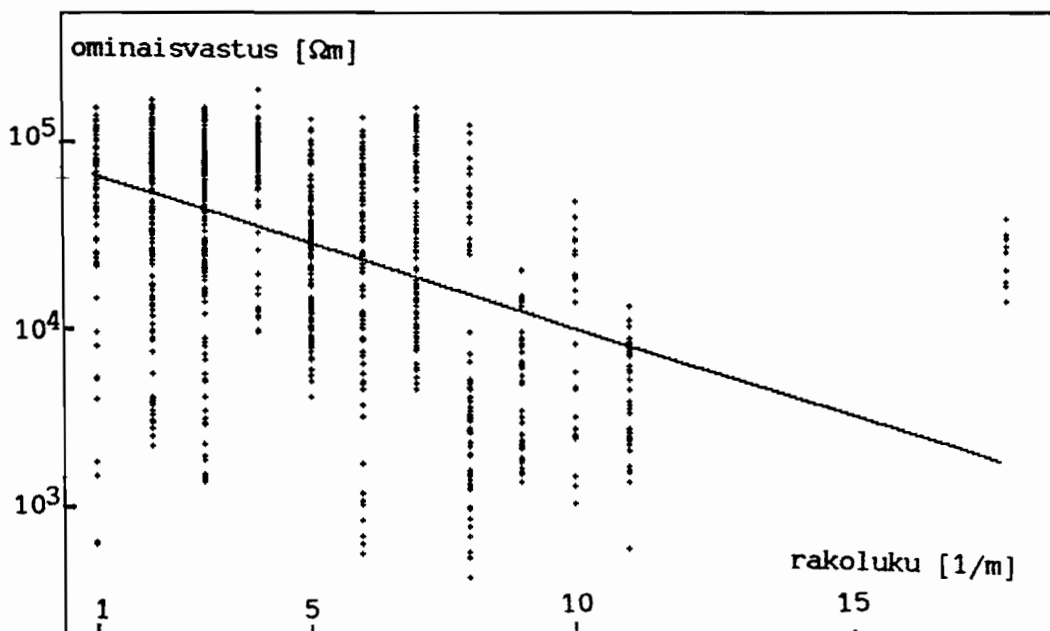
Gamma - gamma- ja neutron - neutron-mittauksia tehtiin reiässä Sk2. Mittaustuloksia oli käytettävissä vain 30 m:n syvyyteen saakka. Muut mittaustulokset ulottuvat 125 m:n syvyyteen saakka reiässä Sk2 (gamma-säteilyn totaali-intensiteetti mitattiin kuitenkin vain 100 m:n syvyyteen asti) ja 125 m:n syvyyteen reiässä Sk3.

Lyhyissä mittauksissa (neutron - neutron ja gamma - gamma-mittaus) oli käytettävissä 230 mittauspistettä. Muissa mittauksissa oli käytettävissä 931 (Sk2) ja 1178 (Sk3) mittauspistettä.



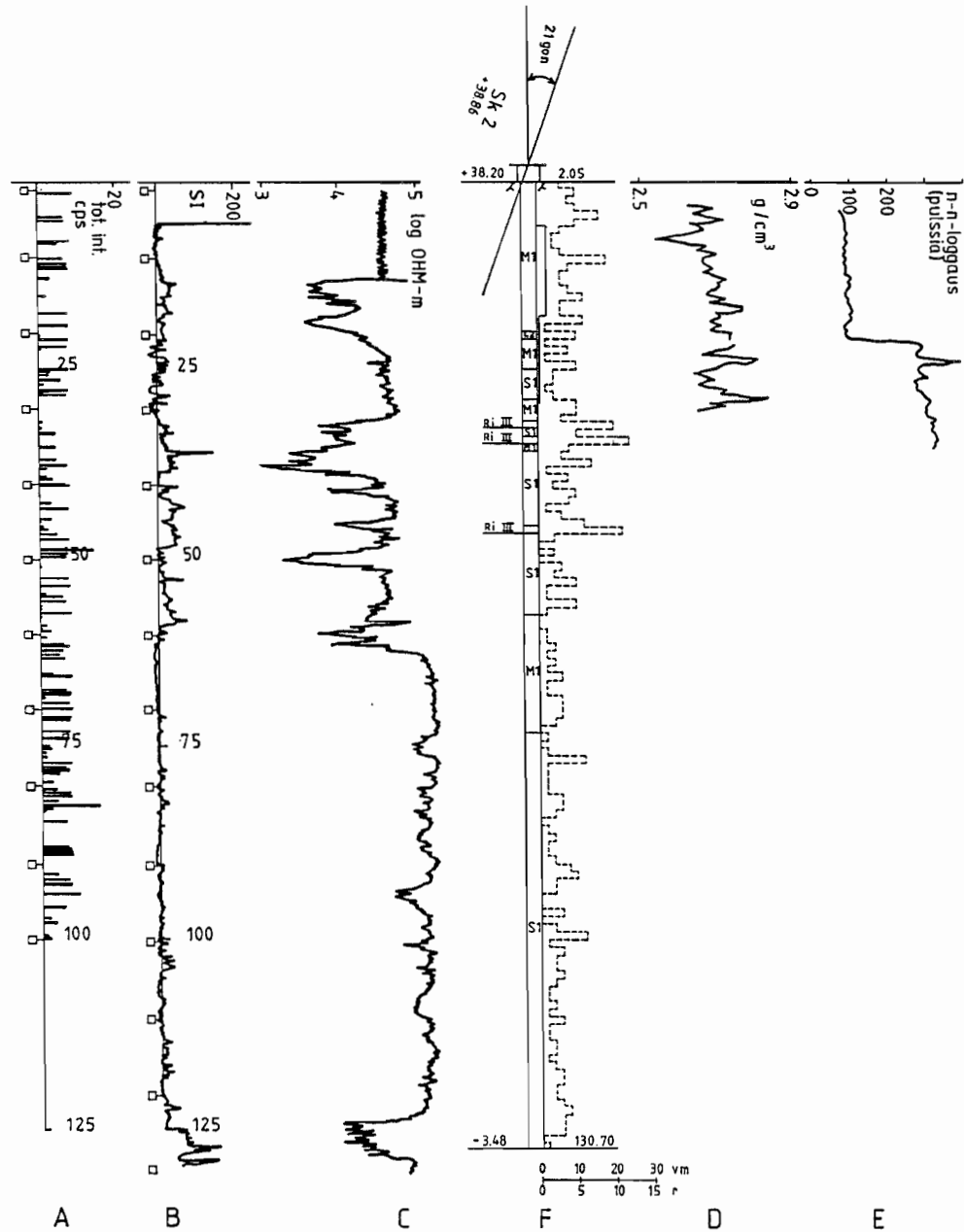
$$\log(Y) = 5,0 - 0,1 * X, r = 0,49$$

Kuva 53. Ominaisvastus rakoluvun funktiona reiässä Sk2.



$$\log(Y) = 5,1 - 0,09 * X, r = 0,45$$

Kuva 54. Ominaisvastus rakoluvun funktiona reiässä Sk3.



Kuva 55. Yksireikämittauksia reiästä Sk2 Viikinmäes-  
tä: Radioaktiivisen säteilyn totaali-intensiteetti  
(a), susceptiivisuusmittaus (b), ominaisvastusmit-  
taus (c), gamma - gamma- (d) ja neutron - neutron-  
mittaus (e). Lisäksi kuvaan on lisätty vertailtavak-  
si timanttikairauksen tulos (rakokartoitus ja vesi-  
menekikokeen tulos) (f) /65/.



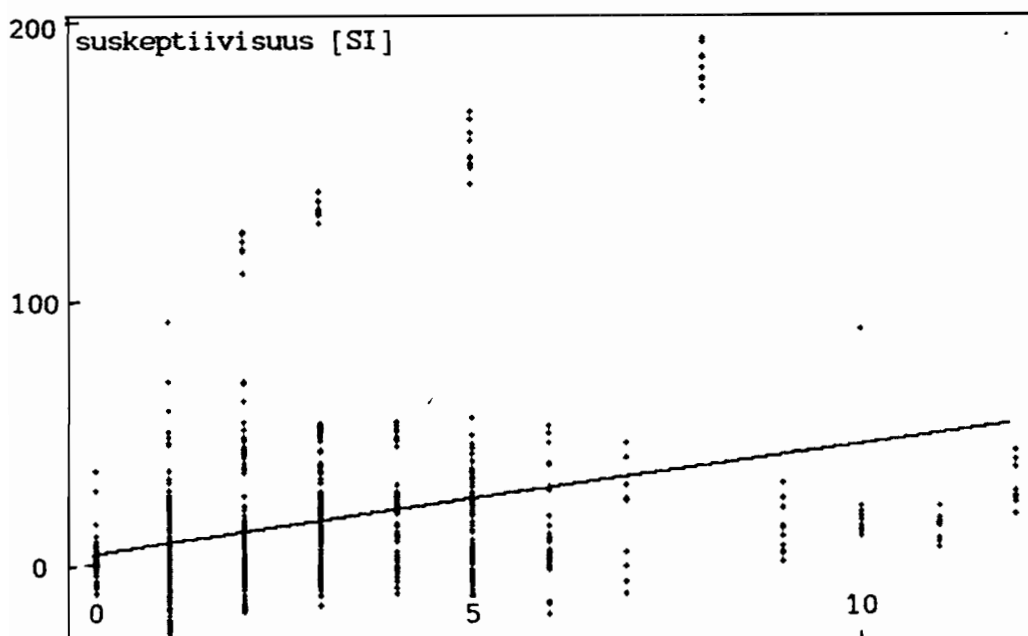
Ominaisvastusluotaus reiästä on antanut monissa aikaisemmissa tutkimuksissa hyviä tuloksia, kun kalliosta ei ole ollut häiritseviä kivilajeja (esimerkiksi /48/).

Viikinmäen tutkimuskohteen graniittiset kivilajit olivat sähköisesti sopivia, koska kivilajien ominaisvastuksissa ei ollut suuria vaihteluja. Ominaisvastuksen ja rakoluvun välillä havaittiin selvä yhteys (kuvat 53 ja 54). Myös Ri III-vyöhykkeet näkyvät ominaisvastuksen alenemisena (kuvat 55 ja 57).

Suskeptiivisuusmittauksen tulokseen vaikuttaa eniten kivilajien muutokset. Tunnettua on, että tavallisina syy suskeptiivisuuden muutoksiin kalliosta on kiven sisältämän magnetiittipiroctteen määrän vaihtelu (esimerkiksi /59/). Suskeptiivisuuden ja rakoilun välillä voidaan kuitenkin havaita jonkin verran riippuvuutta (kuva 56).

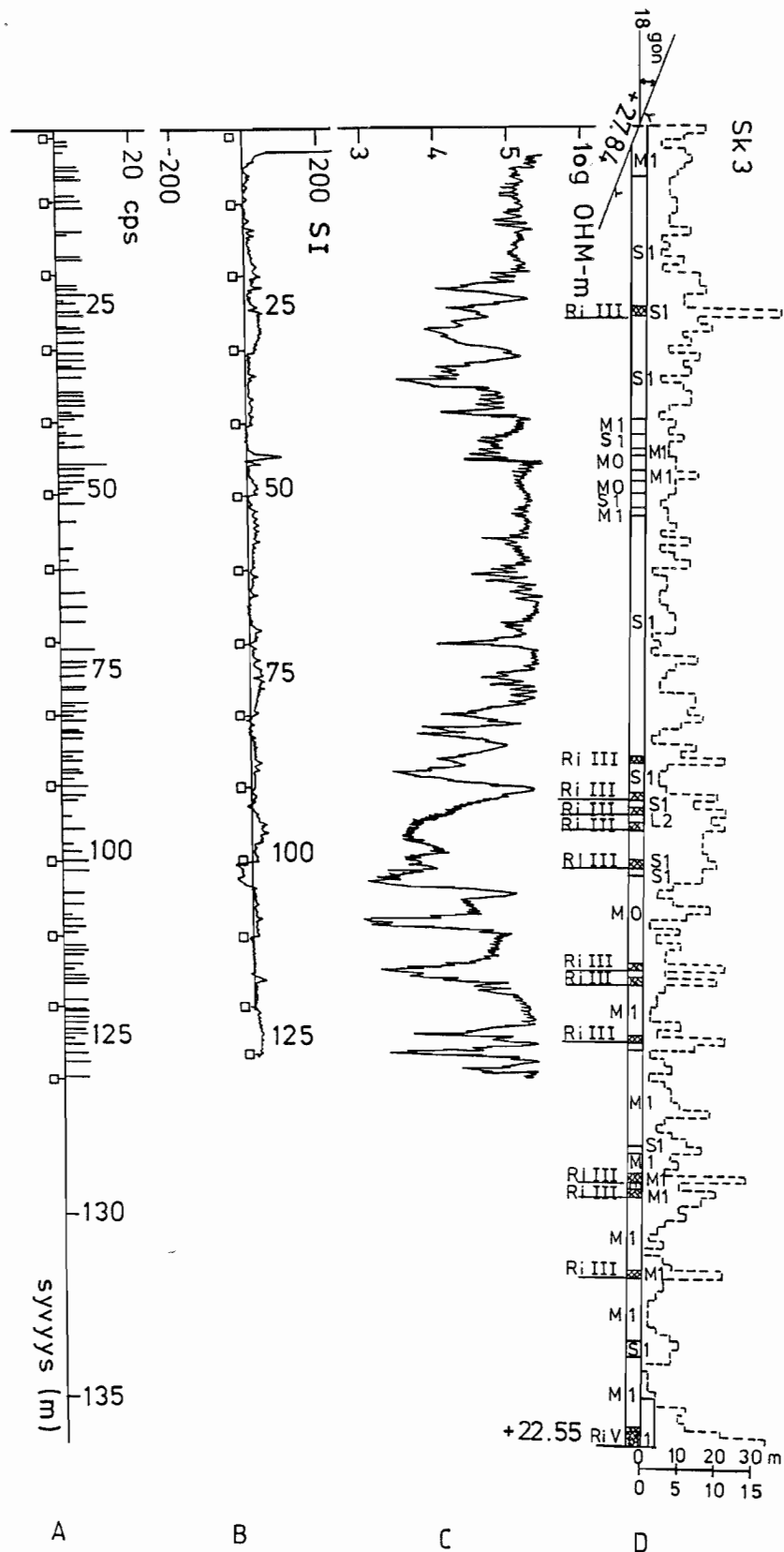
Radioaktiivisista reikämittausmenetelmistä Geigerputkella tehty radioaktiivisen säteilyn totaali-intensiteetin mittausta ei antanut olennaista tietoa kalliosta eikä varsinkaan sen rikkonaisuudesta (kuvat 55 ja 57). Sitä vastoin gammasäteilyn takaisinsironnasta (gamma - gamma-mittaus), jota käytetään tiheyden määrittämiseen, vaikutti lupaavammalta.

Tutkimuksessa käytetty gamma - gamma-mittalaite on varsinaisesti tarkoitettu maaperätutkimuksiin. Tästä syystä kallon tiheysarvot ovat laitteen mittausalueen ääriarvoilla. Mittausanturin kaapeli on vain noin 30 m:n mittainen, joten mittausaineisto on melko puutteellinen.

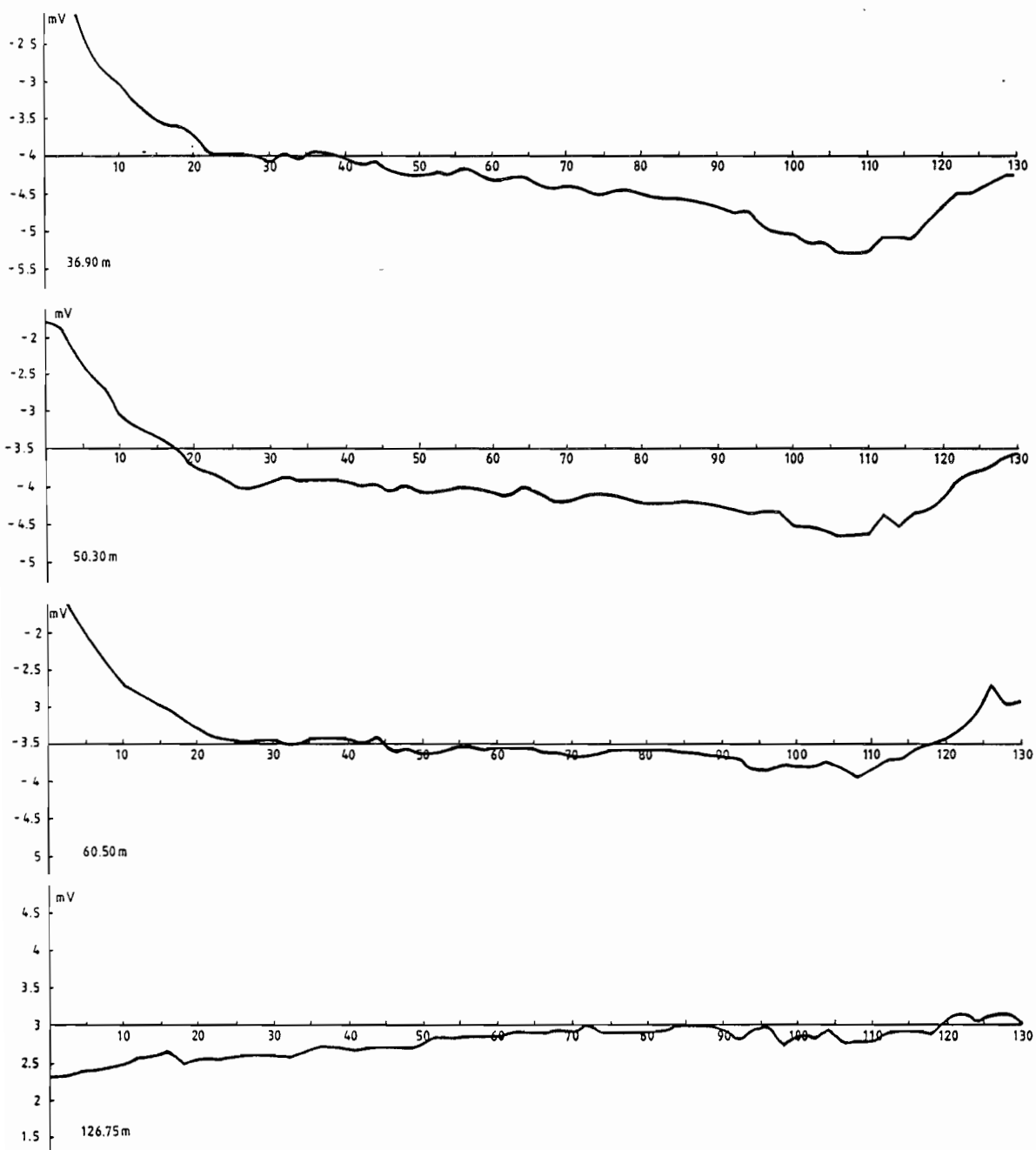


$$Y = 4,2 + 4,2 * X, r = 0,3$$

Kuva 56. Suskeptiivisuus rakoluvun funktiona reiässä Sk2.



Kuva 57. Yksireikämittauksia reiästä Sk3 Viikinmäes-  
tä: Radioaktiivisen säteilyn totaali-intensiteetti  
(a), suskeptiivisuusmittaus (b) sekä ominaisvastus-  
mittaus (c). Kuvaan on lisätty vertailtavaksi ti-  
manttikairauksen tulos (rakokartoitus ja vesimenek-  
kikokeen tulos) (d) /66/.



Kuva 58. Latauspotentiaalimittausten tuloksia eri maadotuksilla. Mittaukset tehtiin reiässä Sk3, virtamaadotukset olivat reiässä Sk2.

Gamma - gamma-mittaus on periaatteessa käyttökelpoinen menetelmä kallion tiheyden (ja rakoilun) tutkimiseen. Anturi on kuitenkin tehtävä kestävämpään suurempia mittaussyvyysiksiä.

Neutronsäteilyn takaisinsironta (neutron - neutronmittaus) on menetelmä, jonka avulla voidaan määrittää vesipitoisuutta (vety-ytimien määrää). Vesipitoisuus taas riippuu vettä sisältävien rakojen määrästä.

Mittauksessa vedenpinnan taso näkyy selvästi, mutta hieman yli 30 m:n syvyydessä oleva rakoiluvyöhyke jää kaapelin ulottumattomiin (kuva 55). Tämäkin menetelmä on periaatteessa käyttökelpoinen, mutta lyhyt mittausanturin kaapeli (noin 30 m) häytti koe-mittausta.

Latauspotentiaaalimittaus tehtiin reiässä Sk3. Virtamaadotukset sijoitettiin reikään Sk2 syvyyksille 36,9 m, 50,3 m, 60,5 m ja 126,8 m ominaisvastus- (kuva 55) ja maadotusvastusmittausten perusteella. Mittaus reiässä Sk3 osoitti, että paras sähköinen yhteys maadotuksiin 36,9 m, 50,3 m ja 60,5 m tulee syvyydelle 108 m.

Eri maadotuksilla saadut tulokset ovat varsin samantyyppisiä, mikä osoittaa maadotettujen vyöhykkeiden olevan yhteydessä toisiinsa. Sen sijaan syvyydellä 126,8 m maadotettu vyöhyke ei ole yhteydessä reiässä Sk3 havaittuihin vyöhykkeisiin. Minimipotentiaali näyttää tulevan reiän Sk3 etupuolelle (kuva 58). Galvaaninen yhteys maadotusten välillä saattaa johtua maadotuspaikkojen välillä olevasta johtavasta rakovyöhykkeestä.

### 7.3

#### Mittauksia häiritsevät tekijät

Kalliorakentamista palvelevien geofysikaalisten tutkimusten kannalta mittauksia häiritseviä tekijöitä ovat:

- geologinen kohina
- mittausta estävät tekijät
- ihmisen tekemien rakennelmien aiheuttama kohina.

Geologinen kohina tässä tapauksessa tarkoittaa - päinvastoin kuin malminetsintätehtävissä - lähinnä kivilajivaihteluja. Tältä osin suurinta häiriötä aiheutui magneettisille mittauksille, jotka häiriintyvät vähäisistäkin susceptiivisuuden muutoksista (mahdolliset ruhjeiden aiheuttamat magneettiset anomaliathan ovat heikkoja). Mittauskohteitten geologinen kohina oli kuitenkin hyvin vähäistä, minkä voi mittaustuloksia tarkastelemalla selvästi todeta.

Mittauksia estäviä tekijöitä ovat lähinnä kielletyt alueet ja talot. Mittausalueet valittiin alunperin

siten, että mittaukset voitiin suorittaa. Kuitenkin Talin mittauskohteen pohjoisosaan rakennettiin mitausten aikana pysäköintialue, joka esti mitausten tekemisen mittausjakson loppupuolella tällä alueella.

Estävät tekijät merkitsivät välillisesti tulosten kannalta paljonkin, sillä esimerkiksi Talissa mielenkiintoisimmat ruhjeet sijaitsivat luoksepääsemättömissä paikoissa: teollisuushallin alla sekä kerrostalojen alla. Tämä mittauksia häiritsevä tekijä on erityisen hankala juuri kaupunkialueella.

Kohinaa aiheuttavia ihmisen tekemiä rakennelmia ovat sähköisten menetelmien kannalta:

- aidat
- rakennukset
- kunnallistekniset johdot
- koneet.

Sähköisissä mittauksissa jouduttiin tekemisiin lähes kaikkien edellä mainittujen häiriölähteiden kanssa. Koneet (autot, traktorit ym.) olivat sen verran tiilapäisiä häiritsijöitä, että niiden poistumista voitiin odottaa. Kunnallistekniset johdot saattavat olla galvaanisten mitausten kannalta hyvin hankalia, sillä sopivasti sijaitseva johto maassa saattaa aiheuttaa johtavaa maakerrosta muistuttavan anomalian.

Kaupunkialueella on tärkeää tietää maanalaisten johdotojen sijainti, jotta niiden vaikutus voidaan ennakoita. Johtokarttoja saa esimerkiksi kaupunkien teknisiltä virastoilta.

Maanpintamittaukset ovat huomattavasti alttiimpia erilaisille häiriölähteille kuin reikämittaukset.

8  
YHTEENVETO

8.1  
Yleisiä johtopäätöksiä

Geofysikaalisia maanpintamittauksia on hyödyllistä käyttää erityisesti kahdessa vaiheessa:

- alustavan kartoituksen yhteydessä (esimerkiksi tunnelin linjauksen suunnittelun alkuvaiheessa) ohjaamaan tarkempia tutkimuksia
- tutkimusten loppuvaiheessa, kun muilla tutkimusmenetelmillä (esimerkiksi maa - tai timanttikairauksilla) on saatu tarkempaa tietoa osasta tutkituista kohteista.

Tällöin voidaan palata tarkastelemaan aikaisemmin saatuja geofysikaalisten mittausten tuloksia, joiden tulkintaa voidaan mahdollisesti parantaa uuden tarkennetun tiedon valossa. Geofysikaalisten tutkimusmenetelmien monikäsitteisyydestä johtuen on syytä aina tehdä kairauksia, jotta tulkinnan monikäsitteisyyttä voidaan vähentää.

Reikämittauksilla voidaan saada varsin pikkutarkkaa ja luotettavaa tietoa kallion rakoilusta. Tämä vaatii kuitenkin maanpintamittausten tapaan mittaustulosten sitomista kairaamalla. Suurin tarkkuus ja hyöty saadaan reikämittauksista siten, että tehdään joitakin timanttikairauksia, joilla sidotaan käytetyt reikämittausmenetelmät paikallisiin olosuhteisiin.

Lisäksi voidaan tehdä poraamalla reikiä (jotka ovat huomattavasti timanttikairauksia halvempia), joissa voidaan tehdä yksi- ja monireikämittauksia. Koska tietyt reikämittausmenetelmät ovat osoittautuneet varsin luotettaviksi, voidaan suhteellisen pienellä tutkimuskustannusten lisäyksellä parantaa tutkimusten tasoa oleellisesti.

8.2  
Maanpintamittausten soveltuminen kalliorakentamisen tutkimukseen

Magneettisten maanpintamittausten käyttö voi olla hyödyllistä suurien alueiden tutkimuksessa, kun halutaan saada alueen geologiasta yleiskuva /17/. Herkillä gradienttimittauslaitteilla voidaan joissakin tapauksissa saada esiin myös pieniä rakenteita (kuten arkeologian tutkimuksissa).

Magneettinen menetelmä on herkin kivilajimuutoksille. Menetelmä sopii laajojen alueiden kartoitukseen (myös halpuutensa vuoksi), mutta tarkempaan ruhjeiden tutkimukseen se ei näytä sopivan muuten kuin erikoistapauksissa.

Slingram-mittauksilla on saatu Ruotsissa /14, 56, 57/ tunnelin linjauksen avuksi tehdyissä tutkimuk-

sissa melko hyviä tuloksia, kun ruhjeet olivat suu-  
rehkoja. Tässä tutkimuksessa tehtyjen mittausten pe-  
rusteella slingram ei ole sopiva menetelmä pieniko-  
koisten rakoiluvyöhykkeiden paikantamiseen ja tutki-  
miseen, mikä tukee Ruotsissa tehtyjä havaintoja.

Pienois-slingram antoi anomalian kallion pintaosiin  
puhkeavasta pienestä ruhjeesta. Sopivasti käytettynä  
pienois-slingramista voi olla hyötyä kalliorakenne-  
tutkimuksissa, mutta rutiinimittausmenetelmäksi se  
ei sovi.

Vastusluotaus osoittautui sopivaksi menetelmäksi,  
kun halutaan saada tietoa irtomaakerrosten paksuu-  
desta. Joissakin tapauksissa myös kallion ominai-  
suuksista ja eri maakerroksista voidaan saada viit-  
teitä. Rajoituksina voidaan mainita herkkyys johti-  
mille sekä vaatimus, että mitattavaan kohteeseen  
voidaan soveltaa kerrosmalliajattelua. Maavastusluo-  
tausta voidaan pitää oikein käytettynä sopivana tut-  
kimusmenetelmänä myös kalliorakennustutkimuksissa.

VLF-R-mittaus antoi melko hyvän kuvan irtomaakerrok-  
sen paksuuden määrittämisessä. Tulkinnan moniselittei-  
syyden vuoksi tarvitaan kuitenkin käytännössä jon-  
kinlainen vastusluotaus pintamaakerroksen ominais-  
vastuksen määrittämiseksi.

VLF-R-mittaus on nopea ja edullinen menetelmä. Siitä  
voidaan sanoa, että se muita mittauksia täydentävänä  
voi olla jopa erittäin suositeltava menetelmä.

Maatutkamittaukset antoivat hyvän kuvan irtomaaker-  
rosten paksuudesta ja rakoilusta kallion pintaosis-  
sa. Menetelmän rajoituksena on huono tunkeutumissy-  
vyys hyvin johtavan maakerroksen läpi. Menetelmän  
rajoitukset ovat kuitenkin selkeät ja useimmiten hy-  
vin ennakoitavissa. Tulokset ovat useimmiten selkei-  
tä. Maatutkamittaus on menetelmä, joka sopii lähes  
rutiiniluonteiseksi mittausmenetelmäksi kallioraken-  
nustutkimuksiin.

Seisminen refraktioluotaus on kallion rakennetutki-  
muksissa jo vakiintuneen aseman saanut menetelmä. Se  
antaa suhteellisen luotettavan kuvan irtomaakerrok-  
sen paksuudesta ja kallion pintaosien seismisestä  
nopeudesta, joka korreloi kallion rikkonaisuuden  
kanssa melko hyvin. Seisminen refraktioluotaus on  
erittäin sopiva tutkimusmenetelmä kalliorakentamisen  
esitutkimuksissa.

Parhaiten tutkituista maanpintamenetelmistä sopivat  
pienikokoisten kohteiden tutkimiseen:

- maatutka
- seisminen refraktioluotaus.

Varauksin (esimerkiksi lisämittauksiin) voidaan  
käyttää seuraavia menetelmiä:

- vastusluotaus
- VLF-R-mittaus.

Kokeilluista maanpintamittausmenetelmistä soveltuvat pienikokoisten ruhjeiden ja irtomaakerroksen tutkimiseen melko huonosti seuraavat menetelmät:

- magneettinen totaalikenttämittaus
- magneettinen pystygradienttimittaus
- magneettinen vaakagradienttimittaus
- slingram
- minislingram.

Kaikkia tutkimuksessa kokeiltuja menetelmiä, erityisesti sähkömagneettisia menetelmiä, voidaan käyttää kirjallisuudessa esiintyneiden tietojen /14, 55, 56, 57/ perusteella suurten alueiden tutkimisessa.

On myös huomattava, että VLF (ilman R-optiota) on todettu hyväksi menetelmäksi ruhjevyöhykkeiden havaitsemiseen, mutta menetelmä on varsin herkkä häiriöille. Tästä syystä menetelmä ei sovi hyvin kaupunkiympäristöön.

### 8.3

Reikämittausten soveltuminen kalliorakentamisen esitutkimuksiin

Ominaisvastusmittaus on osoittautunut toimivaksi menetelmäksi, kun halutaan selvittää kallion rakoilua. Hyvä tulos saadaan varsinkin silloin, kun tutkimuskohteen kivilajit eivät aiheuta ylimääräisiä anomaliaita. Olosuhteet olivat tässä suhteessa Viikinmäen tutkimuskohteessa hyvät. Ominaisvastusmittaustulosten korrelaatio kallion rakoiluun ja vesimenekkikokkeiden tuloksiin on niin hyvä, että menetelmällä voi hyvin täydentää timanttikairausten antamaa tietoa.

Suskeptiivisuusmittaus on herkkä kivilajin magneettiipitoisuuteen. Suskeptiivisuuden mittaus käy helposti, kun reikämittauslaitteet on reiän äärelle saatu. Mittaus tehdäänkin usein samalla muiden reikämittausten kanssa.

Suskeptiivisuusmittaus toimii parhaiten kivimassoissa, jotka ovat magneettisesti "tasaisia", kuten tämän tutkimuksen mittauskohteessa. Suskeptiivisuusmittaus antaa joissakin olosuhteissa lisätietoja rakoilusta.

Radioaktiivisen säteilyn totaali-intensiteettimittaus ei antanut havaittavaa informaatiota mittauskohteena olleen kallion rakoilusta.

Latauspotentiaalimittaus reiästä reikään antaa usein oleellisesti uutta informaatiota timanttikairaustuloksiin. Galvaanisen yhteyden löytyminen eri rakoiluvyöhykkeiden välillä saattaa merkitä sitä, että vyöhyke jatkuu kyseisten reikien välillä.

Gamma - gamma-mittaus antaa tulokseksi lukeman, joka korreloi kiven tiheyden kanssa. Menetelmä on lupaa-va, mutta mittauksessa käytetty laite soveltui enintään 30 m:n syvyisen mittauksen tekemiseen.



Neutron - neutron-mittaus soveltuu kosteuden mittaamiseen. Veden määrä kalliassa on rakojen kohdalla suurempi kuin muualla, joten menetelmä antaa suunnittelun kannalta relevanttia tietoa kalliosta. Menetelmä on käyttökelpoinen, mutta laitteessa oli liian lyhyt mittausanturin kaapeli (30 m).

Kokeiltujen reikämittausmenetelmien hinnoissa ja mittaussnopeuksissa ei ole suuria eroja. Tämän tutkimuksen perusteella sopivat rakoilun ja ruhjeiden kartoitukseen:

- ominaisvastusmittaus
- latauspotentialimittaus
- gamma - gamma-mittaus
- neutron - neutron-mittaus.

Kaksi viimeistä on jouduttu arvioimaan melko puutteellisen aineiston perusteella.

Suskeptiivisuusmittaus voi oikein valitussa kohteessa antaa melko hyviä tuloksia ja tukea muita mittaustuloksia.

Radioaktiivisen säteilyn kokonaisintensiteetin mittaaminen sopii melko huonosti rakoilun selvittämiseen tämän tutkimuksen perusteella.

LÄHDELUETTELO

- 1 Abem Terrameter Operators Manual.
- 2 Ahokas, H. Maaperätutkan ja suosondin soveltuvuus polttoturvetutkimuksiin. Imatran Voima Oy. Helsinki 1984. 28 s.
- 3 Alonso, M., Finn, E. J., Fundamental university physics. Volume III, quantum and statistical physics. Addison-Wesley publishing company 1978. 965 s.
- 4 Andersson, P. & al., Geophysical borehole logging in Lavia borehole - results and interpretation of sonic and tube wave measurements. Report YJT-85-07, Voimayhtiöiden Ydinjätetoimikunta 1985. 41 s.
- 5 Barton, N. & al., Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics vol. 6, nro 4, s. 189 - 236.
- 6 Beasley, C. W., Ward, S. H., Three-dimensional mise-a-la-masse modelling applied to mapping fracture zones. Geophysics 51 (1986) 1, s. 98 - 113.
- 7 Bergman, S. G., Funktionell bergklassifisering, Bergmekanik, IVA Medd. 142, s. 115-123.
- 8 Bieniawski, Z. T., Geomechanics classification of rock masses and its application in tunnelling. Proceedings 3:rd International Congress of Rock Mechanics 1A. 27-32 National Academy of Sciences, Washington. USA 1974.
- 9 Bjelm, L. & al., Georadar som grundundersökningsmetod. Tekniska Högskolan i Lund, Avdelningen för teknisk geologi. LUTVDG/TVTIG-3002/1982, Lund 1982. 71 s.
- 10 Breiner, S., Applications Manual for Portable Magnetometers. GeoMetrics 1973. USA. 58 s.
- 11 Dammert V., Väättäinen, A., Heikkousvyöhykkeiden geofysikaaliset tutkimusmenetelmät. Tutkimuslause A 75. Vuorimiesyhdistys. Outokumpu 1986. 100 s.
- 12 Deere, D. V., Miller, R. P., Engineering classification and index properties for intact rock, Technical Report No AFWL-TR-65-116, Air Force Weapons Laboratory, Kirtland Air Force Base, New Mexico 1966.
- 13 Eloranta, E. H., Studies on integral-equation based modelling of mise-a-la-masse anomalies for geophysical surveying. Acta Polytechnica Scandinavica. Applied physics series No 153. Helsinki 1986. 42 s.
- 14 Eriksson, L., Elektriska och magnetiska metoder för påvisande av svaghetszoner i berg. BeFo. Bergmekanikdag 1974. s. 64 - 80.

- 15 Hansagi, I., Bergarternas hållfasthets egenskaper och deras bestämningar i Kiruna. Bergmekanik, IVA Medd. 142. s. 128 - 134.
- 16 Hattula, A., Measuring and data processing systems for ground and borehole geophysics by Rautaruukki Oy. Rautaruukki Oy 1984. 85 s.
- 17 Henkel, H., Guzman, M., Magnetic features of fracture zones, Geoexploration 15 (1977) 3, s. 173 - 181.
- 18 Ihalainen, M., Tali-Lassilan viemäritunneli. Seisminen luotaus. Työraportti. Geotek Oy. Helsinki 1984.
- 19 Jaeger, J. C. & Cook, N. G. W., Fundamentals of rock mechanics. London 1979. 593 s.
- 20 Jämtlid, A. & al., Electrical borehole measurements for the mapping of fracture zones in crystalline rock, Geoexploration 22 (1984) 3/4, s. 203 - 216.
- 21 Korhonen, K-H. & al., Rakennusalan kallioluokitus. Geotekniikan laboratorio. Tiedonanto 12, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Otaniemi 1974. 78 s.
- 22 Korkealaakso, J., Ämmässuon kaatopaikka-alueen kallioperän tiiveyden tutkiminen geofysikaalisin menetelmin. Geofysiikkaa kalliorakennusprojekteihin. Esitelmä 18.5.1987. Vuorimiesyhdistys 1987.
- 23 Kukkonen, I., Lavian koereiän geofysikaalisten mittauksen tulkinta. TVO/Koereikä, työraportti 85-05. Geologian tutkimuskeskus. Espoo 1985. 25 s.
- 24 Lakanen, E., Slingramilla kulun suuntaisesti eli Broadside Slingram. Outokumpu Oy Malminetsintä 1978. 5 s. Julkaisematon.
- 25 Lakanen, E., VLF-vastusoptio (EM16R). Outokumpu Oy malminetsintä 1977. 13 s. Julkaisematon.
- 26 Lapointe, P. & al., Significance of magnetic susceptibility measurements from the Lac du Bonnet batholith, Manitoba, Canada. Geoexploration 22 (1984) 3/4, s. 217-230
- 27 Magnusson, K. O., Duran, O., Comparison between corelog and hydraulic and geophysical measurement in boreholes. Geoexploration 22 (1984) 3/4, s. 169 - 186.
- 28 Müller, L., Der Felsban, vol. I-II, Enke Verlag, Stuttgart 1963.
- 29 Okko, O., Tiheysmittarin PPGR-1 ja kosteusmittarin VPGR-1 käyttöohje. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, geotekniikan laboratorio 1986. Julkaisematon.

- 30 Okko, O., Heijastusseismisten menetelmien käytöstä kiteisen kallioperän rakennetutkimuksissa. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, vuoriteollisuusosasto. Espoo 1986.
- 31 Olsson, O., Borrhålsradar - ett set att se genom berg. Sveriges Geologiska AB. Bergmekanisk diskussionsmöte i Stockholm 13 mars 1986. Stockholm 1986.
- 32 Paavola, P., Kunnallisteknisten tunneleiden louhintakustannusselvitys. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, vuoriteollisuusosasto. Espoo 1982.
- 33 Parasnis, D. S., Mining Geophysics. Elsevier, 1973.
- 34 Parasnis, D. S., Principles of applied geophysics, Chapman and Hall, London 1979. 275 s.
- 35 Peltonen, E., Rouhiainen, P., Kallioperän tutkimusmenetelmät ydinjätteen loppusijoituksessa, osa II. Menetelmäkuvaukset. Voimayhtiöiden ydinjätetoimikunta. Raportti YJT-80-08. 1980. 171 s.
- 36 Peltonen, E., Rouhiainen, P., Kallioperän tutkimusmenetelmät ydinjätteen loppusijoituksessa, osa I. YJT-80-07. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Helsinki 1980.
- 37 Peltoniemi, M., Sovelletun geofysiikan sähköiset menetelmät. Opetusmoniste. Teknillinen Korkeakoulu, 1987.
- 38 Plouffe, R. D., Geophysical logging for mineral exploration and development, CIM Bulletin 74 (1981) 828, s. 84 - 92.
- 39 Poikonen, A., Suitability of certain borehole geophysical methods for structural and hydrogeological studies of finnish bedrock in concretion with disposal of nuclear waste. Report YJT-83-06. Helsinki 1983. 59 s.
- 40 Poikonen, A., Hassinen, P., Loviisan voimalaitosalueen kallioperän soveltuvuus voimalaitosjätteen loppusijoitukseen, geofysikaaliset tutkimukset. Voimayhtiöiden ydinjätetoimikunta, YJT-82-07. Helsinki 1982. 20 s.
- 41 Rautaruukki Oy. Porareikäominaisuusmittari RROM-2. Käsikirja ja käyttöohje. Rautaruukki Oy 1982. 6 s.
- 42 Rautaruukki Oy. Suskeptibiliteettimittari RRK-10. Käsikirja ja käyttöohje. Rautaruukki Oy 1982. 5 s.
- 43 Rouhiainen, P., Käytetyn polttoaineen loppusijoitus, geofysikaaliset reikämittaukset. Voimalaitosyhtiöiden ydinjätetoimikunta. YJT-84-01. Helsinki 1984. 55 s.
- 44 Rouhiainen, P., Maatutka. Laitteisto- ja käyttökokemuksia. Geotekniikan päivä marraskuussa 1985. Luento- moniste. Rakentajain Kustannus Oy. Helsinki 1986.

- 45 Ruoppa, A., Kalliotilojen pysyvyyden käsittely suunnitteluprosessissa. Kalliomekaniikan päivät. Suomen Geoteknillinen yhdistys Ry, 122-76. Helsinki 1976.
- 46 Saksa, P., Lavian koereikäprojektin geofysikaaliset tutkimukset 1985. TVO/koereikä Työraportti 85-15 vol 1. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, geotekniikan laboratorio. Espoo 1985. 80 s.
- 47 Saksa, P., Borehole geophysical investigations of Lavia deep testhole, Finland. Report YJT-85-06. Voimayhtiöiden Ydinjätetoimikunta 1985. 82 s.
- 48 Saksa, P., Radiometric, electrical and acoustic geophysical borehole studies of the Loviisa power plant site in 1983. Report YJT-84-02. Voimayhtiöiden Ydinjätetoimikunta 1984. 40 s.
- 49 Scintrex MP 2. Operators Manual.
- 50 Scintrex V-104 Portable cesium high-sensitivity gradiometer system. Scintrex Limited, Ontario. 25 s.
- 51 Sigurdsson, T., Georadarmätning på tre platser inom Helsinki storstadsområde. Sveriges Geologiska AB. Uppsala 1985.
- 52 Silvennoinen, H., Geofysikaaliset maanpintamittaukset koareiän ympäristössä Laviassa. Suomen Malmi Oy. Työraportti. Espoo 1984. 9 s.
- 53 Sjögren, B. & al., Seismic classification of rock mass qualities. Geophysical Prospecting 27 (1979) 2.
- 54 Soonawala, N. M., An overview of the geophysics activity within the Canadian nuclear fuel waste program. Geoexploration 22 (1984) 3/4, s. 149 - 168.
- 55 Stanfors, R., Projektet Bolmentunneln - site investigations and correlation forecast - real time. Bergmekanisk diskussionsmöte i Stockholm 13 mars 1986. Stockholm 1986.
- 56 Stanfors, R., Eriksson, C., Elektriska mätningar för bedömning av vatteninläckning i Bolmentunneln. Väg- och Vattenbyggaren, Stockholm 1984: 3, s. 27 - 30.
- 57 Stanfors, R. & al., Electrical measurements for assessing water ingress into the Bolmen Tunnel. Tunnels & Tunnelling, September 1985.
- 58 Särkkä, P., Rakoilumittausten merkitys, Kalliomekaniikan päivä 1976, julkaisu 122-76, INSKO 1976.
- 59 Telford, V. M. & al., Applied geophysics, Cambridge University Press, 1981. 859 s.
- 60 Ulriksen, C. P. F., Application of impulse radar to civil engineering, doctoral thesis, Lund University of Technology, Department of Engineering Geology, Lund 1982. 179 s.

- 61 Vesterinen, M. S. Maatutkan käyttö geologisissa koh-  
teissa. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, vuori-  
teollisuusosasto. Espoo 1986.
- 62 Vuorimiesyhdistys. Kaivos- ja louhintatekniikan kä-  
sikirja. Helsinki 1982. 801 s.
- 63 Ward, S. H., Rogers, G.R., Mining Geophysics vol.  
II. Introduction. The Society of Exploration  
Geophysics (SEG), Oklahoma 1977. 708 s.
- 64 Ylikunnari, J., Apex minislingramin käyttöohje. Rau-  
taruukki Oy 1978. Julkaisematon. 16 s.
- 65 Öhberg, J., Keskuspuhdistamon kallionäyttekairauk-  
set, kairausreikä Sk2. Terraplan Oy, työraportti.  
Helsingin kaupunki, vesi- ja viemärilaitos 1986.
- 66 Öhberg, J., Keskuspuhdistamon kallionäyttekairauk-  
set, kairausreikä Sk3. Terraplan Oy, työraportti.  
Helsingin kaupunki, vesi- ja viemärilaitos 1986.

## KIRJALLISUUTTA

- Angeleri, G. P., Carpi, R., Porosity prediction from seismic data, *Geophysical Prospecting* 30 (1982), s. 580 - 607.
- Attewell, P. B., Site investigation - how much should be done? *Tunnels and Tunnelling* 12 (1980) 10, s. 11 - 12.
- Aven, S. (edit.), *Hanboken Bygg. Geoteknik. Geofysiska undersökningsmetoder.* Stockholm 1984.
- Barrows, L. J. & al., Geotechnical field measurements for evaluation of the WIPP site. *IEE Transactions on Nuclear Science*, vol. NS-29, n. 1, s. 239 - 241.
- Birkel J. O., *Tunnel engineering handbook.* Van Nostrand. New York 1982. s. 11 - 35.
- Castagna, J. P., & al., Relationship between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks. *Geophysics* 50 (1985) 4, s. 571 - 581.
- Chyba, J., On the interpretation of resistivity soundings by the least-squares method. *Geophysical Prospecting* 31 (1983), s. 795 - 799.
- Cosma, C., Seismic probing of dam sites by cross-hole method, *Väg- och Vattenbyggaren* 1985: 5-6.
- Crossley, D. J., The theory of EM Surface wave impedance measurements. *Geophysical Applications of Surface Wave Impedance Measurements.* Canada Geological Survey, Paper 81-15. Canada 1982.
- Deadrick, F. J. & al., In situ fracture mapping using geotomography and brine tracers. *IEE Transactions on Nuclear Science*, vol. NS-29, n. 1, s. 236 - 238.
- Drury, M. J., Borehole temperature logging for the detection of water flow, *Geoexploration* 22 (1984) 3/4, s. 231 - 244.
- Enmark, T., Versatile interactive compute program for computation and automatic optimization of gravity models. *Geoexploration* 19 (1981) 1, s. 47 - 66.
- Fischer, G. & al., VLF ground surveys, a powerful tool for the study of shallow two-dimensional structures. *Geophysical Prospecting* 31 (1983) 6, s. 977 - 991.
- Fraser, D., Review of some useful algorithms in geophysics. *CIM Bulletin* 74 (1981) 828, s. 76 - 83.

Gardemeister, R. & al., Turun seudun kaukolämpö Oy kaukolämpötunnelin rakentamisen rakennusgeologiset kokemukset, Imatran voima Oy, R-84-1, Helsinki 1984. 76 s.

Gardener, R., Seismic refraction as a tool. Civil Engineering, 1983: 6, s. 34 - 36, 51, 54.

Ghosh, N. & al., Low-Pass Filtering of Noisy Schlumberger Sounding Curves, Part II: Application, Geophysical Prospecting 34 (1986) 1, s. 124 - 129.

Griffith, O. H. G., King, R. F., Applied Geophysics for Geologists & Engineers. Pergamon Press. Great Britain 1981.

Hjelt, S. E., Pietilä, R., On the interpretation of VLF resistivity measurements. Geoexploration 23 (1985) 2, s. 71 - 181.

Hooper, J. W., Engineering geophysics - Report of meeting, The Quarterly Journal of Engineering Geology 16 (1983) 3, s. 247 - 250.

Howes, E. W., Reum, J. W., Geotechnical Instrumentation and Data Acquisition System for Site and Prel. Design Validation at the DOE Waste Isolation Pilot Plant, Eddy County, NM, IEE Transactions on Nuclear Science, vol. NS-29, n. 1, s. 247 - 251.

Huang, C. F., Hunter, J. A., The tube-wave method of estimating in-situ rock fracture permeability in fluid-filled boreholes, Geoexploration 22 (1984) 3/4, s. 245 - 260.

Härkiö, E., Kämpfi, A., Kalliotilojen käyttö vesihuollossa. Kalliomekaniikan päivä 16 (1985). Rakennusgeologinen yhdistys ry. Helsinki 1985. s. XII/1 - 9

Jones, D. & Telford, V. M., Mapping Bedrock Terrain with the EM16R-VLF Unit. Geophysical Applications of Surface Wave Impedance Measurements. Canada Geological Survey, Paper 81-15. Canada 1982.

Karous, M., Hjelt, S. E., Linear filtering of VLF dip-angle measurements. Geophysical Prospecting 31 (1983) 5, s. 782 - 794.

Kukkonen, I., Kuivamäki, A., Geologisia ja geofysikaalisia havaintoja Pasmajärven ja Suasseljän postglasiaalisista siirroksista. Geologian tutkimuskeskus. Tiedonanto YST-46. 14 s. Espoo 1985.

Lysne, P. C., A model for the high-frequency electrical response of wet rocks, Geophysics 48 (1983) 6, s. 775 - 786.

Mathieson, C., Corssley, D. J., Interpretation of Single Frequency VLF Data. Geophysical Applications of Surface Wave Impedance Measurements. Canada Geological Survey, Paper 81-15. Canada 1982.



- Mathur R., Telford, W. M., Magnetotelluric Phase Measurements. Geophysical Applications of Surface Wave Impedance Measurements. Canada Geological Survey, Paper 81-15. Canada 1982.
- Nunn, K. R. & al., In situ seismic and electrical measurements of fracture anisotropy in the Lincolnshire Chalk, The Quarterly Journal of Engineering Geology 16 (1983) 6, s. 187 - 196.
- Olsson, O. & al., Geophysical investigations in Sweden for the characterization of a site for radioactive waste disposal - an overview, Geoprospection 22 (1984) 3/4 s. 187 - 202.
- Pascal, H., Further discussion on attenuation and dispersion of electromagnetic wave propagation in fluid-saturated rocks and applications to dielectric-constant well logging, Geophysics 48 (1983) 10, s. 1373 - 1380.
- Patella, D., Low-Pass Filtering of Noisy Schlumberger Sounding Curves, Part I: Theory, Geophysical Prospecting 34 (1986) 1, s. 109 - 123.
- Peltoniemi, M., Lappalainen, P., Maavastusmittaus - eräs menetelmä irtomaapteen paksuuden määrittämiseksi, rakennustekniikka 1972: 2, s. 115 - 119.
- Pernu, T., Maa- ja kallioperän tutkiminen tasavirtamittauksilla erityisesti Suomen oloissa. Oulu 1979. Oulun yliopisto, geofysiikan laitos. Lisensiaattitutkimus. 99 s.
- Poikonen, A. & al., Suitability of Bedrock of Loviisa Power Plant Site for Final Disposal of Reactor Waste, Supplementary Geophysical Studies. Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies. Report YJT 83-05. 185 + app. Helsinki 1983.
- Rafavich, F. & al., The relationship between acoustic properties and the petrographic character of carbonate rocks, Geophysics 49 (1984) 10, s. 1622 - 1636.
- Rouhiainen, P., Loviisa power station final disposal of reactor waste geophysical methods in structural study of the bedrock of Hästholmen. Report YJT-86-10. 37 s + app. Helsinki 1986.
- Rouhiainen, P., Sähköiset mittaukset kairatuissa kalliorei'issä. Geotekniikan päivä marraskuu 1985. Luentomoniste. Rakentajain Kustannus Oy. Helsinki 1986.
- Saksa, P., Sähköiset mittaukset maaperän ja pohjaveden likaantumisen seurannassa. Geotekniikan päivä marraskuu 1985. Luentomoniste. Rakentajain Kustannus Oy. Helsinki 1986.

Sauer, F. K., Geotechnical applications of electrical borehole logging in southern Saskatchewan. Canadian Geotechnical Journal 17 (1980) 4, s. 545 - 558.

Schimsal, A. & al. The relationship of geophysical measurements to hydraulic conductivity at the Brantley dam site, New Mexico, Geoexploration 19 (1981), s. 115 - 125.

Sheriff, R-E., A First Course In Geophysical Exploration and Interpretation, Boston 1978. 313 s.

Steffensen, H., Tychsen, J., Erfaringer fra anvendelse of elektromagnetisk måleendstyr ved geotekniske undersøgelser. NGM-84, Nordiska Geoteknikermötet, Lindköping, 2 (1984), s. 863 - 876.

Sutherland, A. A. & al., Long Term Monitoring of Closed Low-Level Waste and Uranium Mill Tailings Disposal Sites, IEE Transactions on Nuclear Science, vol. NS-29, nro 1, s. 242 - 246.

Teemull, F., Crossley D. J., Inversion of VLF Data for Simple Lateral Inhomogeneities. Geophysical Applications of Surface Wave Impedance Measurements. Canada Geological Survey, Paper 81-15. Canada 1982.

Tore, L. B., Assesment of rock quality by means of cross hole seismic. Report from field work. NGM-84. Nordiska Geoteknikermötet, Lindköping Jun 1984 vol. 2, s. 671 - 684.

Turpeinen, M., Helsingin kaupungin kokemuksia väestönsuojien rakentamisesta. Kalliomekaniikan päivä 16 (1985). Rakennusgeologinen yhdistys ry. Helsinki 1985. s. XI/1-5.

Tychsen, J., Steffensen, H., Investigation of selected chemical waste dumps in the Metropolitan region, NGM-84, Nordiska Geoteknikermötet, Lindköping jun 1984 vol. 2, s. 863 - 876.

Wahlstrom, E. E., Tunnelling in Rock, Developments in Geotechnical Engineering 3, Elsevier Scientific Publishing company, Netherlands 1975, s. 135 - 179.

West, G., Comparisons between real and predicted geology in tunnels: examples from recent cases, The Quarterly Journal of Engineering Geology 16 (1983) 2, s, 113 - 126.

White, W. F. & al., Instrumentation for Rock-Mass Measurements - Basalt Waste Isolation Project, IEE Transactions on Nuclear Science, 19, vol. NS-29, nro 1, s. 233 - 235.

Wilson, C. R. & al., Hydrologic Characterization of Repository Sites in Fractured Rock, IEE Transactions on Nuclear Science, vol. NS-29, nro 1, s. 226 - 232.

Wong, J. & al., Crosshole audiofrequency seismology in granitic rocks using piezoelectric transducers as sources and detectors, *Geoexploration* 22 (1984) 3/4, s. 261 - 280.

Yale, D. P., Recent advances in rock physics, *Geophysics*, 50 (1985), s. 2480 - 2491.

Äikäs, T., *Geofysikaaliset tutkimusmenetelmät rakennusgeologiassa*, Luentotilaisuus, Turun Yliopisto, Maaperägeologian laitos 27.11.1982, Saanio & Laine Oy 1982. 49 s.

## GEOTEKNISEN OSASTON TIEDOTTEET

1. Anttikoski, U., Geoteknilliset kartat ja niiden käyttäminen. 1973. 30,-
- \*1 2. Anttikoski, U., Kaupunkisuunnittelun geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu. 1973. 50,-
- \*1 3. Anttikoski, U., Kunnallistekniikan geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu. 1974. 50,-
- \*1 4. Mäkinen, R., Täyttömäkien rakentaminen kaupunkialueella. 1974. 50,-
- \*1 5. Saarelma, M., Melusuojarakenteiden perustamistapaselvitys. 1974. 30,-
6. Saarelma, M., Kitkapaalujen kantavuus. 1976. 30,-
7. Petäjä, J., Putkijohtojen pohjarakenteiden mitoittaminen. 1977. 50,-
- \*1 8. Raudasmaa, P., Metrotunneleiden injektointi. 1977. 120,-
- \*1 9. Anttikoski, U., Kalliotunnelien käyttö varastointiin. 1977. 50,-
10. Tikkanen, H., Rakentamisen vaikutus pohjaveteen Helsingin keskustassa. 1978. 70,-
- \*1 11. Arkima, O., Kluuvin ruhjeen jäädytys. 1978. 120,-
12. Raudasmaa, P., Puiset perustusrakenteet. 1979. 50,-
13. Havukainen, J., Voimalaitostuhkan ja polttolaitoskuonan hyötykäyttö rakentamisessa. 1979. 50,-
14. Vähäaho, I., Pehmeikölle perustettavan pientalon painumien laskeminen. 1979. 50,-
15. Raudasmaa, P., Pohjavesitarkkailu -80. 1980. 50,-
- \*1 16. Anttikoski, U., Katsaus tunnelien rakentamistekniikan nykytilaan Atlantan kansainvälisen tunneli-konferenssin kokemusten perusteella. 1979.
17. Roinisto, J., Matkakertomus tutustumismatkalta Tukholman yhteiskäyttötunneleihin. 1981. 50,-
- \*1 18. Havukainen, J., Kivihiilivoimalan tuhkan käyttö maarakenteissa. 1981. 50,-
19. Roinisto, J., Yhteiskäyttötunneleiden teknis-taloudellinen selvitys. 1981. 50,-
20. Vuola, P., Talonrakennuksen maarakenteet ja niiden laadunvalvonta. 1981. 50,-
21. Havukainen, J., Korhonen, O., Tonttialueiden maarakenteet. 1981. 30,-
22. Havukainen, J., Esimerkkejä jätteiden hyötykäytöstä raaka-aineena ja energianlähteenä. 1981.
23. Havukainen, J., Kivihiilivoimalan tuhkien hyötykäyttöselvitys kunnallistekniikassa. 1982. 50,-
24. Latvala, A., Rakennusjätteen alustava hyötykäyttöselvitys. 1982. 30,-
25. Havukainen, J., Hämäläinen, A., Sulamäki, A., Alustava selvitys polttolaitoskuonan hyötykäyttö-mahdollisuuksista maarakentamisessa. 1982. 30,-
- \*1 26. Halkola, H., Kunnallistekniikan geotekniikkaan liittyvät koerakentamiskohteet Torpparinmäessä. 1982.
27. Paavola, P., Kunnallisteknisten tunneleiden louhintakustannusselvitys. 1982. 50,-
- \*1 28. Vähäaho, I., Maarakennusta koskeva mallityöselvitys. 1982. 70,-
29. Gulin, K., Rakentamisen vaikutus pohjaveden tasoon ja rakennusten painumiin Helsingin Puistolassa. 1982. 50,-
30. Halkola, H., Syvästabiloinnin laadun ja lujuuden valvontamenetelmät. 1982. 50,-
31. Havukainen, J., Kivihiilituhkan käyttö maarakentamisessa, tekniset ohjeet. 1983. 30,-
32. Havukainen, J., Användning av stenkolsaska vid anläggningsarbeten, tekniska anvisningar. 1983. 30,-
33. Havukainen, J., The utilization of coal ash in earth works, technical guidelines. 1983. 30,-
34. Salmelainen, J., Helsingin kallioperän geologiasta ja kivilajien lujuusominaisuuksista porattavuuden kannalta. 1983. 50,-
35. Havukainen, J., Matkakertomus kivihiilituhkien ympäristövaikutuskonferenssista. 1983.
36. Hytti, P., Esi-injektoinnin suoritus ja sen huomioiminen urakka-asiakirjoissa. 1984. 60,-
37. Leinonen, J., Kalliomekaaniset mittaukset Hanasaaren syvävarastossa. 1984. 60,-
38. Pirinen, J., Kelluvan rantapenkereen rakentaminen. 1984. 60,-
39. Latvala, A., Geotekninen kustannustiedosto, Geo-kuti. 1984. 60,-
40. Korpela, J., Schüller, M., Jäykkien liitosjohtojen pohjarakenneselvitys (Jäli-selvitys). 1984. 80,-
41. Lahtinen, E-R., Maanalaiset tilat ja yhdyskuntarakentaminen (MARASU-tutkimus, väliraportti). 1985. 30,-
42. Korpi, J., In Situ-kuormituskoe painumien määrittämiseksi. 1985. 60,-
43. Havukainen, J., Esirakentamisen kehittäminen. 1985. 60,-
44. Vähäaho, I., Jäädytysmenetelmän käyttö. 1987. 60,-
45. Havukainen, J., Hämäläinen, A., Latvala, A., Kivihiilituhkien käyttökokemukset kunnallistekniikan maarakenteissa. 1987. 60,-
46. Julkunen, A., Geofysiikan tutkimusmenetelmät kalliorakentamisessa. 1987. 60,-

\*1 PAINOS LOPPUUNMYTTY