

Maatutka näkee pintaa syvemmälle

PEKKA MAIJALA

Geofysiikan laitos, Oulun yliopisto

Monilla eri tutkimusaloilla on tarpeellista saada tietoa välittömästi maan pinnan alla olevista kohteista nopeasti ja vahingoittamatta tutkittavaa kohdetta ja sen ympäristöä. Sovelletun geofysiikan menetelmät tarjoavat tähän useita vaihtoehtoja, joista tässä esitellään viime aikoina voimakkaasti kehittyneitä maatutkaluotausta. Menetelmää on Suomessa käytetty perinteisten geologisten sovelluskohteiden lisäksi esimerkiksi tiesuunnittelussa, ympäristötutkimuksissa ja arkeologisissa tutkimuksissa.

Maatutkan suomenkielinen nimitys vakiintui 1980-luvulla. Muita sovelluskohteen mukaan annettuja nimiä ovat olleet esimerkiksi routatutka, maaperätutka, kalliotutka ja tietutka. Tässä katsauksessa käytetään yleisnimenä »maatutkaa» sovelluskohteesta riippumatta tarkoittamassa tutkaa, jolla selvitetään kiinteän tai nestemäisen väliaineen sisäosien rakennetta. Englanninkielisessä kirjallisuudessa käytetään nimityksiä *impulse radar*, *georadar*, *subsurface radar*, *ground penetrating radar* tai *ground probing radar*. Yleisnimeksi näyttäisi vakiintuvan *ground penetrating radar* ja siitä käytetty lyhenne *GPR*.

Maailmalla maatutkan ensimmäisiä sovelluskohteita 1950- ja 1960-luvuilla olivat mannerjäätikkötutkimukset. Ensimmäiset tekniikan kehityksen mahdollistamat kaupalliset maatutkat tulivat 1970-luvulla, minkä jälkeen sovellusalueet ovat lisääntyneet nopeasti käsittäen tällä hetkellä lähes kaikki tutkimusalat, joissa radiotaajuisilla aalloilla on mahdollista saada tietoa väliaineen sisältä.

Suomeen ensimmäinen maatutka hankittiin vuonna 1981 Teknillisen korkeakoulun (TKK) radiolaboratorioon. Radiolaboratoriossa oli kehitetty ja valmistettu 1970-luvun lopulla routatutka, jota Saarilahti (1982) kokeili suon kulkukelpoisuuden arvioimisessa. Geologian tutkimuskeskus (GTK) selvitteli 1980-luvun alkupuoliskolla maatutkan soveltuvuutta maaperätutuksiin. Selvittelytyön tuloksena GTK hankki ensimmäisen maatutkanssa vuonna 1985. Myöhemmin 1980-luvulla GTK osti toisenkin tutkan. GTK on käyttänyt tutkaa pääasiassa maaperä- (Pekka Hänninen 1990; Sutinen 1992) ja turvetutkimuksissa (Pauli Hänninen 1992). Turvetutkimusta tehtiin 1980-luvun puolivälissä myös TKK:ssa ja Valtion teknillisessä tutkimuskeskuksessa. Tielaitos on käyttänyt maatutkaa tietuotantoon liitty-

vissä kohteissa vuodesta 1985 lähtien ja varsinkin Tielaitoksen oman maatutkan hankinnan jälkeen vuonna 1988. Tällä hetkellä Tielaitoksessa on kaksi maatutkaa. Imatran voima on käyttänyt vuonna 1985 hankkimaansa maatutkaa polttoturvutkimuksissa ja patovauriokartoituksissa. Lisäksi Suomessa on kolmella yksityisellä yritysllä yhteensä neljä maatutkaa.

Vuonna 1989 hankittiin Oulun yliopistoon maatutka geofysiikan, geologian, maantieteen ja historian laitosten sekä rakennustekniikan osaston yhteiskäyttöön. Geofysiikan laitoksella on tutkittu maatutkasignaalin käsittelyä, geologian laitoksella on selvitetty maatutkan käyttöä erilaisissa geologisissa muodostumissa, maantieteen laitoksella tutkaa on käytetty rantamuodostumiin liittyvissä tutkimuksissa, historian laitoksen arkeologian laboratoriossa on selvitetty maatutkan käyttöä hautatutkimuksiin ja rakennustekniikan osastolla on tutkittu maatutkan käyttöä tierakenn- ja siltatutkimuksissa. Keväeseen 1993 mennessä Oulun yliopistossa on tehty 3 tutkielmaa tai diplomityötä (Kerkelä 1990; Maijala 1991; Rönkö 1993) ja tarkastettu 2 väitöskirjaa (Pauli Hänninen 1992; Sutinen 1992), joissa tärkeänä tutkimusvälineenä on ollut maatutka. Lisäksi on tekeillä 3 tutkielmaa ja 2 lisensiaatityötä.

Vuonna 1989 perustettiin Suomeen Maatutkarengas niminen maatutkankäyttäjien yhteistointaorganisaatio. Sen ensimmäisenä hedelmänä oli Maatutkaluotaus-kirjan toimittaminen vuonna 1991. Julkaisijana toimi Suomen geoteknillinen yhdistys. Kirjan tarjoaa perustietoa maatutkaluotauksesta ja sen sovelluskohteista. Se käännettiin keväällä 1992 myös englanniksi ja julkistettiin neljännessä kansainvälisessä maatutkakonferenssissa Rovaniemellä kesäkuussa 1992. Konferenssin esitelmät julkaistiin GTK:n julkaisusarjassa kirjana (Hänninen & Autio 1992), joka on saatavissa Geologian tutkimuskeskuksesta.

Fysikaalinen tausta

Maatutkaluotaus perustuu radiotaajuisien sähkömagneettisten (SM-) aaltojen käyttöön. Käytettävä taajuusalue on 10–1000 MHz. Näillä taajuuksilla SM-aallon voidaan sanoa etenevän aaltolina sähköisesti eristeisessä väliaineessa. Vaukuttavina fysikaalisina parametreina ovat väliainneen sähkönjohtavuus ja dielektrisyys sekä mag-

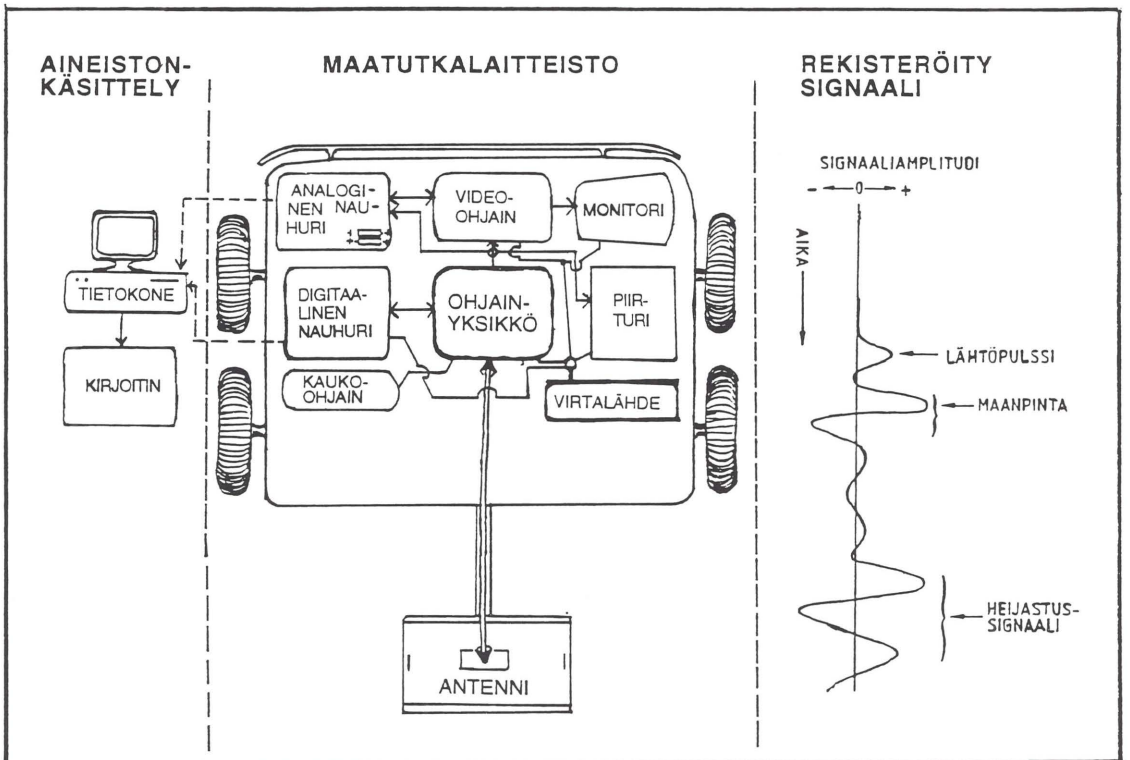
neettinen susceptibiliteetti. Johtavuus vaikuttaa eniten signaalin vaimennukseen – mitä korkeampi arvo sitä suurempi vaimennus – ja riippuu vapaiden ionien ja elektronien määrästä väliaineessa. Dielektrisyysarvo ja magneettinen susceptibiliteetti vaikuttavat sekä aallon etenemisnopeuteen – mitä suurempi arvo sitä hitaampi – että vaimennukseen – dielektrisyysarvon kasvu pienentää vaimennusta ja magneettisen susceptibiliteetin kasvu suurentaa vaimennusta. Dielektrisyysarvon suuruus riippuu pääasiassa veden määrästä materiaalissa, sillä vesipitoisuuden kasvu nostaa suhteellista dielektrisyttä. Magneettisen susceptibiliteetin vaikutus voidaan jättää yleensä huomioimatta magnetoituvia väliaineita, kuten runsaasti magnetiittia sisältäviä kivilajeja, lukuunottamatta.

Väliaineparametrit määräävät sen, missä maatutkaluotausta voidaan käyttää. Lähtökohtana on, että tutka-aallot voivat edetä väliaineessa. Suomen maaperä savikkoalueita lukuunottamatta on eristeistä. Niin ollen maatutkan käyttö on mahdollista hyvin suurella osalla Suomea. Lisäksi maarakentamisessa yleisimmin käytetyt mate-

riaalit päästävät tutka-aaltoja hyvin lävitseen, mikä on mahdollistanut menetelmän laajan käytön geotekniikassa.

Yleisimmin käytetyn maatutkan, ns. impulssitutkan, toimintaperiaate on samantapainen kuin kaikuluotaimen. Väliaineeseen lähetetään pulssi, jonka pituus maatutkalla on muutamia nanosekunteja. Osa pulssien energiasta heijastuu sähköisiltä ominaisuuksiltaan toisistaan poikkeavien aineiden rajapinnalta, osa etenee rajapinnan läpi ja heijastuu seuraavilta rajapinnoilta. Signaali vaimenee kulkuajan funktiona geometrisen vaimennuksen, signaalin sironnan ja lämpöhäviöiden seurauksena. Heijastusten amplitudi ja kulku aika mitataan ja amplitudi esitetään kulkuajan funktiona kuvan 1 rekisteröidyn signaalin mukaisesti. Kun mittauksia tehdään nopeassa tahdissa peräkkäisissä maastopisteissä, saadaan tutkittavasta väliaineesta sen rakenteita kuvaava jatkuva luotausprofiili – tutkakuva.

Maatutkalla saavutettavissa oleva syvyysulotuvuus riippuu väliaineiden sähköisten ominaisuuksien lisäksi käytetystä antennitaajuudesta ja siten signaalin aallonpituudesta. Väliaineen



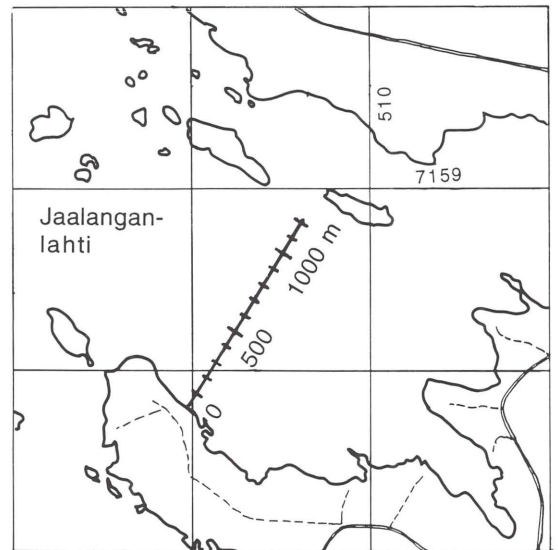
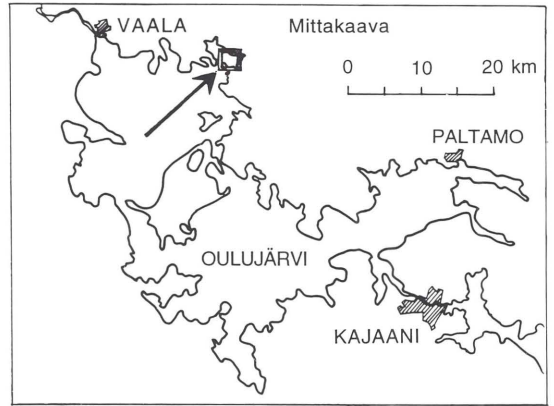
Kuva 1. Maatutkalaitteisto ja rekisteröity signaali. Laitteiston kokoonpano vastaa yhdysvaltalaisen GSSI:n valmistamaa SIR-8 tyyppistä maatutkaa. Uusimmissa tutkissa eri osia on yhdistetty samaan koteloon.

aiheuttama vaimennus suurentuu taajuuden kasvaessa, koska väliaineen johtavuus samalla kasvaa ja koska tutka-aallolle näkyvien ja sen vuoksi signaalin energiaa sirottavien kohteiden määrä lisääntyy aallonpituuden lyhentyessä. Näin tunkeutumissyvyys pienenee taajuuden kasvaessa, mutta toisaalta erotuskyky samalla paranee. Erotuskyky paranee myös dielektrisyysarvon suurentuessa. Matalataajuisia 20–150 MHz:n antenneja käytetään maa- ja kallioperägeologisissa rakennetutkimuksissa ja vesistötutkimuksissa. Näillä tunkeutumissyvyys on väliaineesta riippuen 10–40 metriä ja erotuskyky kalliiossa ja kivennäismaisassa on 0,6–1,5 m. Savikoilla tunkeutumissyvyys on muutamia metrejä. Keskitäajuisilla antennilla, 300–500 MHz, tunkeutumissyvyys on 3–10 metriä ja erotuskyky 0,08–0,3 m. Sovelluskohteina ovat esimerkiksi arkeologiset ja kunnallistekniikan tarvitsemat tutkimukset sekä tierakennetutkimukset. Korkeataajuisantenneja, 900–2500 MHz, käytetään tyypillisesti betonirakennetta tiepäällystetutkimuksissa. Tunkeutumissyvyys on 0,2–1,5 m ja erotuskyky 0,02–0,1 m.

Mittauslaitteet ja mittaus

Tyypillinen maatutkalaitteisto sisältää kuvan 1 mukaisesti ohjausyksikön, tallennin- tai tulostusyksikön ja lähetin- ja vastaanotinantennit. Suomessa on käytössä kahden tyyppisiä kaupallisia maatutkalaitteistoja: kanadalaisen Sensors & Softwaren valmistama PulseEcco ja yhdysvaltalaisen Geophysical Surveys Systems'in valmistamia SIR-tutkia. Nämä tutkat ovat yleiskäyttöisiä – vain antennia vaihdetaan sovelluskohteen mukaan. Uusimmat laitteistot on rakennettu tietokoneohjatuiksi ja laajamassamuistisiksi. Joillakin on mahdollista myös käyttää useata antennia yhtä aikaa. Lisäksi on kehitetty kaupallisia laitteistoja käytettäväksi tietyssä sovelluksessa. Näitä ovat esimerkiksi ruotsalaisen ABEM AB:n markkinoima RAMAC-kairanreikätkä ja yhdysvaltalaisen Penetradarin kehittämä tie- ja siltatutka. Useita kaupallisiksi tähtäviä systeemejä on lisäksi kehitteillä lähinnä tietutkimuksiin liittyen (Saarenketo 1991, 1992).

Mittauspisteet ovat tyypillisesti lähellä toisiaan, mikä asettaa korkeita vaatimuksia paikannussysteemille, jotta hyvä vaakarerotuskyky ei katoaisi. Mittauspisteitä voi olla sovelluksen mukaan 1 pisteestä aina 500 pisteeseen kymmentä metriä kohden. Paikannus on yleensä ratkaistu käyttämällä tasavälistä paalutusta tai matkapyörää. Vesistömittauksissa on käytetty paikannuksessa myös optisia etäisyydenmittauslaitteita. Satelliittipaikannusta ei Suomessa ole vielä käytetty, koska riittävän paikannustarkkuuden



Kuva 2. Esimerkkiaineiston mittauspaikka Oulujärven Jaalanganlahdella

saavuttaminen edes kartoitusluonteisia mittauksia varten vaatii differentiaali GPS:n käyttöä. Maatutkamittauksen maastossa etenemisnopeus on 0,5–20 km/h sovelluksesta ja mittausolosuhteista riippuen.

Maatutkamittaus onnistuu sekä kesällä että talvella. Talvella varsinkin suo- ja vesistömittausten toteuttaminen on paikannuksen ja mittauslaitteiston kuljetuskaluston kannalta yksinkertaisempaa kuin kesällä. Talvella voidaan käyttää moottorikelkkoja ja rekiä; kesällä käytetään maastoajoneuvoa, venettä ja vaikeimmissa paikoissa joudutaan turvautumaan laitteiston kanton. Mittauslaitteisto on kannettavissa 2–4 miehen voimin.

Tutkakuvan sisältö ja tulkinta

Maatutkaluotausaineiston tulkinta on menetelmän vaikein osa-alue. Siinä tutkakuvan synnyn ymmärtäminen ja esitieto siitä, mitä tutkittavassa kohteessa on, on olennaista tulkinnan onnistumisen kannalta. Maatutka antaa tiedon heijastuksista, mutta se ei kerro suoraan aiheuttajia eikä väliaineparametrien arvoja, vaan ne joudutaan usein varmentamaan ja täsmentämään vertailutiedon avulla. Vertailutieto voidaan saada esimerkiksi kairauksista, koekuopista, muista epäsuorista mittauksista tai suorista väliaineparametrimäärittämisistä. Maatutkaa käytetäänkin usein sen nopeuden ja menetelmän kuvailevan luonteen vuoksi muita täsmällisempää tietoa antavien mittausten ohjaamisessa ja kohdentamisessa kulloisenkin tutkimuksen kannalta tärkeisiin kohteisiin.

Maatutka kuvaa antennin näkemän kolmiulotteisen tilan, keilan, yksiulotteiseksi amlitudi-aikakuvaajaksi ns. pyyhkäisyksi. Vierekkäisistä pisteistä mitatut pyyhkäisyt muodostavat väliaineesta kaksiulotteisen tutkakuvan, jossa mittauksen kolmiulotteisuus kuitenkin näkyy. Pistemäiset ja mittaussuunnan suhteen pistemäiset kohteet kuten putket, kaapelit, kalliorakojen risteymäkohdat jne. näkyvät tutkakuvalla alaspäin aukeavina hyperbeleinä. Lisäksi kaltevat kerrosrakenteet näkyvät loivempina, kuin ne todellisudessa ovat.

Kaikki rajapinnat, joissa väliaineiden sähköiset ominaisuudet muuttuvat aiheuttavat signaalin heijastumista, taittumista ja vaimenemista. Mitä epähomogeenisempi tutkittava väliaine on sitä enemmän on heijastuksia ja sitä vaikeampi tutkakuvaa on tulkita. Lisäksi voimakkaasti heijastavat rajapinnat, kuten veden ja ilman sekä veden ja maaperän välinen rajapinta, aiheuttavat moninkertaisia heijastuksia, joiden tunnistaminen muista heijastuksista voi olla vaikeaa. Vaaka- ja pystysuuntaiset muutokset vaimenuksessa ja väliaineen kosteudessa aiheuttavat vielä signaalin heikkenemistä ja pystymittakaavan vääristymistä. Mittauslaitteisto tuo myös omat häiriöheijasteensa ja kohinansa tulokseen.

Helpoimpia kohteita tulkinnan kannalta ovat kohteet, joissa rajapintoja on vähän ja ne ovat jatkuvia hyviä heijastajia. Tällaisia kohteita ovat esimerkiksi suot, vesistöt, kallioalueet ja glasi-fluviaaliset ja eoliset sedimentit. Kuvassa 3 on esimerkki tulkintoineen Oulun yliopiston maantieteen ja geofysiikan laitosten tekemästä mittauksesta Oulujärven jäällä keväällä 1993. Siinä vesikerroksen ja liejun paksuus erottuvat selkeästi. Lisäksi on nähtävissä voimakkaista heijastavista rajapinnoista aiheutuvia moninkertaisia heijastuksia. Hankalia kohteita ovat erilaiset

moreenimuodostumat ja savikot. Viimemainitustakin kohteista on alettu saada maatutkalla entistä enemmän tietoa signaalinprosessointimahdollisuuksien kehittymisen ansiosta.

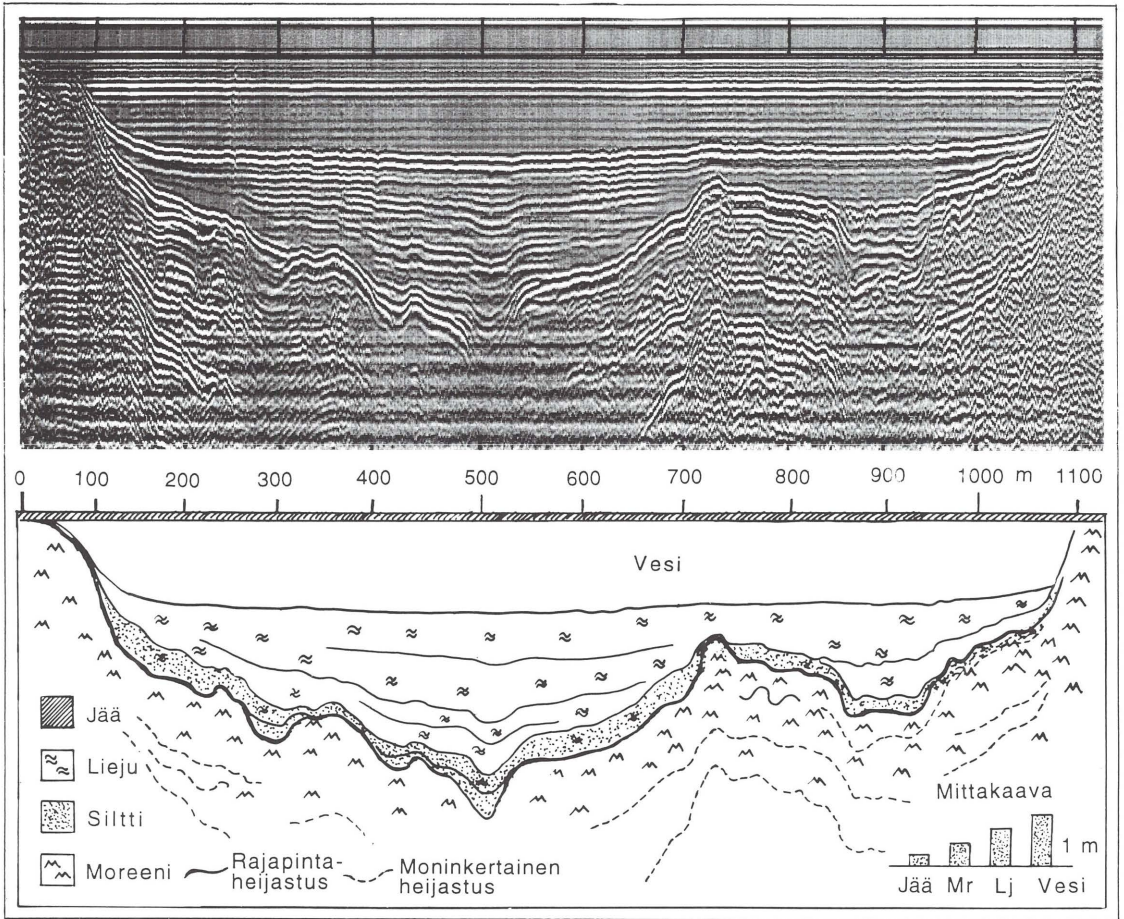
Tutkakuvassa näkyvien rakenteiden tunnistamiseen voidaan käyttää heijastekuvien muotoa ja tekstuuria. Beres ja Haeni (1991) tarjoavat yhden lähestymistavan erilaisten sedimenttien tunnistamiselle heijastekaaviollaan. He jaottelevat tutkakuvan osa-alueet kolmeen luokkaan: sekavien heijastusten alueet, kerroksellisten heijastusten alueet ja heijastuksettomat alueet. Nämä he jakavat vielä useisiin tunnistamista helpottaviin alaluokkiin. Esimerkiksi kerroksellinen rakenne voi olla vaakakerroksellista, aaltoilevaa, kumpuilevaa tai viistokerroksellista. Näillä perusteilla tulkitsija päättelee, onko väliaine hiekkaa, soraa, silttiä vai jotain muuta. Tunnistamisessa on kuitenkin ratkaisevana tekijänä tulkitsijan kokemus. Siinä missä kokematon tulkitsija näkee vain puuromaista sekasotkua, kokenut tulkitsija tunnistaa maalajin moreeniksi heijastetekstuurin perusteella ja kalliopinnan syvyyden kuvassa näkyvien vinojen kalliorakenteiden loppumisen perusteella. Tosin tunnistaminen ei ole yksiselitteistä, koska samanlaisia heijastuksia voi aiheutua eri lähteistä.

Tie- ja siltatutkimukset ovat tällä hetkellä maatutkaluotauksen sovellusalue, johon maailmalla panostetaan voimakkaasti. Yhtenä merkittävänä tavoitteena on erilaisten automaattisten silta- ja tievaurioidenkartoitustekniikoiden ja -algoritmien kehittäminen. (Saarenketo 1992)

Maatutka-aineiston prosessointi

Maatutka-aineiston käsittelyä hallitsi aivan viime vuosiin asti »analogisuus». Rekisteröinti tehtiin paljolti intensiteettiipiirturille, jolloin kaikki signaalin prosessointi oli tehtävä tosiajassa laitteiden analogiasuodattimilla ja varsin vaatimatommilla mikroprosessoreilla. Osa rekisteröinneistä tallennettiin analoginauhureille, mikä mahdollisti aineiston suodattamisen erillisillä suodatusyksiköillä (Pekka Hänninen 1990) tai signaali voitiin digitoita erillisillä digitoilaitteilla tietokoneella käsiteltäväksi. Tänäpäin uusimmat maatutkat perustuvat digitaalitekniikan hyväksikäyttöön laitteiston ohjauksessa ja aineiston tallennuksessa. Prosessointiohjelmilla käsitellyt tutkakuvat tulostetaan mustesuihku- ja lasertulostimilla paperille lopullista tulkintaa varten. Tämän on mahdollistanut tietokonekeskussuorituskykyjen tehon lisäys ja tulostin- ja massatallenninlaitteiden kehittyminen ja halpeneminen.

Digitaalinen signaalinkäsittely tarjoaa mahdollisuuksia muokata aineistoa monipuolisemmilla



Kuva 3. Esimerkkiaineisto mittauksesta Oulujärven jäällä 15. 2. 1993. Mittaus tehtiin SIR-8 maatutkalla käyttäen 100 MHz:n antennia ja 500 ns:n mittausaikaa. Antennia vedettiin moottorikelkalla. Alkuperäisestä aineistosta on poistettu kaistanpäästösuoittimella matalataajuisista värähtelyä ja korkeataajuisista kohinaa, syvältä tulevia heijastuksia on vahvistettu ja vierekkäisistä mittauspisteistä saatuja pyyhkäisyjä on summattu. Summauksella on saatu tutkakuvaa kavennettua ja taustakohinaa vähennettyä. Vaakasuunnassa näkyviä koko kuvan läpi jatkuvia häiriöheijastuksia ei ole poistettu, koska samalla olisi vaimennettu myös vaakasuuntaisia jäästä ja liejun yläpinnasta tulevia todellisia heijastuksia. Mittakaavaa ei ole korjattu tulkintakuvaan. Pystymittakaava on väliainekohtainen. Vedessä tutkasignaali etenee hitaimmin ja jäässä nopeimmin. Moreenissa ja siltissä etenemisnopeus on likimain sama ja liejussa hitaampi.

ja tehokkaammilla suodatus- ja kuvausoperaatioilla kuin analoginen signaalinkäsittely. Suodatimien suunnittelu ja toteutus on yksinkertaisempaa ja operaatiot voidaan kohdistaa tarkemmin haluttuun kohtaan aineistossa. Toisaalta tällä hetkellä pullonkaulana digitaalisessa aineistonkäsittelyssä on tulkintaa varten tehtävän paperikuvan tulostuksen hitaus ja kalleus. Ohjelmistot eivät vielä mahdollista täysdigitaalista aineistonkäsittelyä, jossa tulkintakin tehtäisiin tietokoneen monitorilta. Tällöin tulokset voitaisiin siirtää suo-

raan erilaisille massanlaskenta- ja tie-CAD-ohjelmille.

Signaalinkäsittelyn päämääränä on signaalin varsinaisen halutun informaation sisältävän osan ja sitä peittävän tai hämärtävän osan erottaminen toisistaan. Erottelu tehdään erilaisten suodatus-, vahvistus- ja kuvausoperaatioiden tai yksinkertaisimmillaan erilaisten tutkakuvan esitysmuotojen avulla. Monimutkaiset signaalinkäsittelyoperaatiot eivät kuitenkaan ole tarpeen, jos sama informaatio on nähtävissä jo käsittelemättömästä

aineistosta. Eri operaatiot voivat häiriöiden poiston lisäksi itse luoda uusia todellisten heijastusten näköisiä häiriöitä. Välttämättä ei ole järkevää eikä aina edes mahdollista poistaa kaikkia häiriöheijasteita. Esimerkiksi häiriöiksi laskettavat hyperbelit ja moninkertaiset heijasteet kertovat väliaineen rakenteesta ja laadusta. Käsittely viedään sille tasolle, josta tulkinta voidaan tehdä riittävän luotettavasti tutkimuksen päämäärät huomioon ottaen.

Merkittävimmät edut digitaalinen signaalinkäsittely näyttäisi tuovan väliaineen eri rajapintojen jatkuvuuden seuraamiseen ja väliainemateriaalin tekstuuriin avulla tapahtuvaan materiaalin tunnistamiseen. Lisäksi suodatusten teon helpous ja nopeus samoin kuin signaalin vahvistusoperaatioiden nopeus mahdollistavat useiden eri vaihtoehtoisten operointimahdollisuuksien nopean testaamisen, jolloin voidaan valita kullekin aineistolle parhaiten sopiva käsittely.

Yhteenveto

Maatutka on osoittautunut tehokkaaksi niin perustutkimuksen kuin soveltavan tutkimuksenkin työvälineeksi. Maatutkalla saadaan tutkittavasta väliaineesta nopeasti kaksiulotteinen jatkuva kuva kohdetta vahingoittamatta. Tätä kuvaa voidaan käyttää hyväksi kohteen rakenteen ja ominaisuuksien arvioinnissa sekä jatkotutkimusten kohdentamisessa.

Maatutkaluotausta voidaan soveltaa varsin sujuvasti hyvin monilla eri tutkimusaloilla, kunhan otetaan huomioon menetelmän rajoitukset. Osan rajoituksista asettaa käytettävä laitteisto ja osan tutkittava kohde ja sen ympäristö.

Maatutkaluotaus menetelmänä on varsin nopea ja mittaussaineisto on usein sellaisenaan käyttökelpoista tulkittavaksi. Luotettava tulkinta vaatii kuitenkin sitä, että ymmärretään, mitä tutkakuva sisältää ja että tulkitsijalla on ennakkokäsitys tutkittavasta kohteesta.

Maatutkaluotauksen tulkinnan luotettavuus kasvaa merkittävästi, jos kohteesta on käytettävissä vertailuaineistoa. Ilman vertailutietoa tehty tulkinta on yleensä alustava tulkinta, jonka perusteella voidaan ohjata muita mittaauksia.

KIRJALLISUUS

- Beres, Milan Jr. & Haeni, F.P. (1991). Application of Ground-Penetrating-Radar Methods in Hydrological Studies. *Ground water* 29, 375–386.
- Ground Penetrating Radar. Geophysical Research Methods* (1992). The Finnish Geotechnical Society and The Finnish Building Centre Ltd. 64 s. Tammer-Paino Oy, Tampere.
- Hänninen, Pauli (1992) Application of ground penetrating radar and radio wave moisture probe techniques to peatland investigations. *Geological Survey of Finland, Bulletin* 361, 71 s.
- Hänninen, Pauli. & Autio, Sini (toim.) (1992). Fourth International Conference on Ground Penetrating Radar June 8–13, 1992, Rovaniemi, Finland. *Geophysical Survey of Finland, Special Paper* 16, 365 s.
- Hänninen, Pekka (1990). Maatutkaluotaus maaperägeologisissa tutkimuksissa. Lisensiaatintyö. Teknillinen Korkeakoulu, Materiaali- ja kallioteknikan laitos. 54 s.
- Kerkelä, Simo (1990). Dielektrisyysarvo ja teiden rakennekerrosten mittaaminen maatutkalla. Diplomityö. Oulun yliopisto, Rakentamistekniikan osasto, Geotekniikan laboratorio. 66 + 12 s.
- Maatutkaluotaus. Geofysikaaliset tutkimusmenetelmät, osa I.* (1991). Suomen geoteknillinen yhdistys ry. ja Rakentajain Kustannus Oy. 68 s. Tammer-Paino Oy. Tampere.
- Majjala, Pekka (1991). Maatutkaluotaussaineisto ja sen käsittely. FK Tutkielma. Oulun yliopisto, Geofysiikan laitos, 113 + 7 s.
- Rönkkö Kirsi (1993). Sillan kansirakenteen vauriotarkastelu maatutkan avulla. Diplomityö. Oulun yliopisto Rakentamistekniikan osasto, Rakennetekniikan laboratorio, 100 + 7 s.
- Saarenketo, Timo (1991) *Maatutkan tutkimus- ja kehitystyö tie- ja siltatutkimuksissa. Matkakertomus.* 27 s. Tielaitos, Lapin tiepiiri, Rovaniemi.
- Saarenketo, Timo (1992). Maatutka tietutkimuksissa tänään ja huomenna. *Tierakennusmestari: 2/1992*, 32–36.
- Saarilahti, Martti (1982). Tutkimuksia radioaaltomenetelmien soveltuvuudesta turvemaiden kulkukelpoisuuden arvioimiseen. *Acta Forestalia Fennica* 176. 105 s.
- Sutinen, Raimo (1992). Glacial deposits, their electrical properties and surveying by image interpretation and ground penetrating radar. *Geological Survey of Finland, Bulletin* 359, 123 s.