

TUTKALUOTAUKSEEN PERUSTUVA METSÄAUTOTIEN KANTAVUUDEN ARVIOIMISMENETELMÄ

MARTTI SAARILAHTI

Summary

PREDICTING THE BEARING CAPACITY OF FOREST ROADS
USING A RADAR SOUNDING

Saapunut toimitukselle 15. 2. 1982

Puutavaran tiekuljetusten optimointia voitaisiin tehostaa, mikäli tien laatu pystyttäisiin kuvaamaan jatkuvan linjoittaisen muuttujan avulla. Tien kantavuuden vuodenaikainen vaihtelu on näet erittäin suuri.

Artikkelissa tarkastellaan tutkamenetelmän periaatetta ja sen soveltuvuutta tien kantavuuden arvioimiseen. Tutkamenetelmässä tien suunnattu radioaalto heijastuu sähköisiltä ominaisuuksiltaan erilaisten rakennekerrosten rajapinnoista. On mahdollista, että tien kantavuuteen eniten vaikuttavat märät hienojakoista ainesta sisältävät tien kohdat ja toisaalta routalinssit voidaan erottaa tutkaheijastusten perusteella.

Tutkimuksen empiirisessä osassa verrattiin 500 m pitkällä routivalla kylätiellä talvella tehdyn routaluotauksen profiilissa erottuvan tutka-aallon heijastussyvyyden ja keväällä roudan sulamisen aikana mitatun tien kantavuuden välistä riippuvuutta. Voitiin todeta, että tien kantavuuden ja tutka-aaltojen heijastussyvyyden välillä on merkitsevä riippuvuus. Saaduilla malleilla tutkaheijastuksista laskettujen kantavuusprofiilien ja mitattujen profiilien samankaltaisuus on riittävän hyvä käytännön tarkoituksiin. Kuitenkaan tämän yhden positiivisen kokeen perusteella ei vielä voida tehdä johtopäätöstä, että menetelmä antaa eri olosuhteissa samanlaisia tuloksia. Mikäli jatkotutkimukset osoittavat, että tutkaheijastukset saadaan samoissa olosuhteissa samanlaisina ja että ne ovat tieoloista riippuvia, tutkamenetelmää käyttäen voitaisiin vaivattomasti kartoittaa tien linjoittaiset kantavuuden vaihtelut.

1. JOHDANTO

NSR:n yhteispohjoismaisen "Puunkorjuu turvemailta" -projektin eräessä osaprojektissa tutkitaan elektronisen maaperäluotauksen soveltuvuutta suon kantavuuden määrittämiseen. Koska menetelmien kehittäminen edellyttää testiajoja erilaisissa oloissa, ja koska projektiin kuuluu myös metsätien rakennustekniikan kehittäminen, ohjelmaan on liitetty metsäteiden kantavuuden tutkimukseen liittyviä kokeita. Tässä artikkelissa tarkastellaan yhtä osakoetta, jonka tavoitteena on kehittää tutkamenetelmän sovellutuksia tien kantavuuden arvioimiseksi.

Professori Martti Tiurin mukaantulo projektiin on tehnyt mahdolliseksi uusien maaperän tutkimusmenetelmien kehittämisen. Kokeissa käytetty tutka on rakennettu Helsingin TKK:n Radiolaboratoriossa TkL Pekka Jakkulan suunnittelun pohjalta. DI Pekka Ylinen on hoitanut intensiteettipiirturin tulostuksen. Tutkan kehitytyöhön on saatu varoja Kauppa- ja teollisuusministeriöltä. Prof. Kalle Putkiston tuki koko projektille on merkittävä. Kokeissa käytetyn deflektometrin on kehittänyt ja kantavuusmittaukset suorittanut MMK Reino Pulkki, M.Sc. (For.). Tutkagrammin on tulkinut ja aineiston käsittelyssä avustanut metsät. yliopp. Einari Jämsä. Ekon. Leena Iisalo on kirjoittanut puhtaaksi raportin ja piirtänyt kuvat. Parhaat kiitokset kaikille mukana olleille.

2. LÄHTÖKOHTATARKASTELU

21. Puutavaran kuljetussuunnitelma

Lähtökohtana voimme tarkastella tilannetta, jossa vaihtoehtoina on ajattaa puutavaraa eri varastoista. Varastot ovat kuljetuksen kannalta muutoin samanarvoiset, mutta tien laatu vaihtelee.

Nykyisin käytössä olevien puunkorjuun suunnitteluohjeiden mukaan (Heinämäki ym. 1979) tien laatu tai varaston ajokelpoisuus jaetaan kolmeen luokkaan, jotka määritellään seuraavasti:

- ajo mahdollinen ympäri vuoden,
- ajo mahdollinen kesällä kuivana aikana tai
- ajo mahdollinen vain roudan aikana.

Tien laatuluokka määritetään silmävaraisesti kokemuksen perusteella. Tien laatu tulee mukaan yhtenä arvona koko tienosan pituudelta, ja tällöin luokka määräytyy, tai sen tulisi määräytyä, tienosan heikoimman kohdan mukaan. Kuitenkaan koko tietä ei luokitella aivan lyhyiden heikkojen kohtien perusteella alhaisempaan luokkaan, ja näin luokajako kaikesta huolimatta muodostuu subjektiiviseksi. Kahden tien vertailu on mahdoton, koska ei tiedetä, kuinka paljon heikkoja osuuksia kumpaankin tiehen sisältyy. Täydellisen optimoinnin suorittaminen on mahdotonta tilanteissa, joissa kelirikkoajanakin on pakko yrittää kuljettaa puutavaraa. Varastojen valinta saattaa tulla sattumanvaraiseksi, ja kuljetukset saattavat jopa ohjautua alueille, joilla tiet keskimäärin ovat muita huonompia, mikäli arvioijien välillä on systemaattisia eroja.

Jos tien laatu voitaisiin ainakin kriittisinä vuodenaikoina ottaa kuljetussuunnitelmiin mukaan jatkuvana muuttujana, varastojen ajonjärjestyksen optimointia pystyttäisiin todennäköisesti parantamaan. Tällöin kultakin varastolta lähtevän tien todellinen laatu saataisiin muuttujaksi laskemalla matkalla punnittu tieluokan keskiarvo ja/tai kulkukelpoisen ja kulkukelvottoman pituuden suhde jne. Tietokonekäsitellyssä lisäksi tien laadun painotusarvot voitaisiin tilanteen mukaan vaihtaa.

Kuljetussuunnitelmassa kantavuutta voidaan ajallisesti käsitellä suunnitteluhetken tai

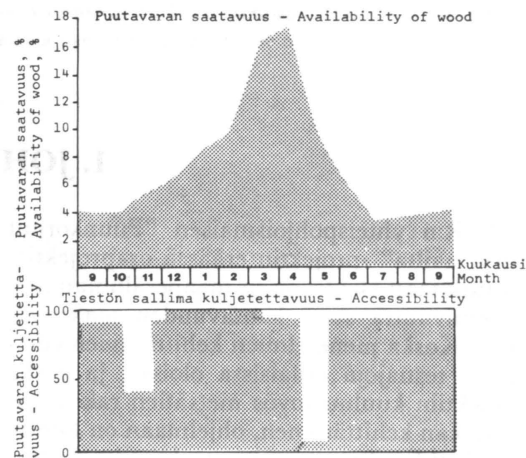
operaatiohetken kantavuutena. Optimaalinen tien kantavuusluokitus olisi dynaaminen, jolloin suunnitteluhetken parametrien ja säätilapäivityksen pohjalta voitaisiin simuloida kantavuuden ajallista vaihtelua.

Kevätkelirikko on osoittautunut puutavarakuljetusten kannalta pahimmaksi kaudeksi sillä tällöin puutavaraa on eniten saatavissa mutta tieverkon kuljetuskyky on pienimmillään, kuten Arvidssonin ym. (1978) Etelä-Ruotsin tilannetta kuvaava piirros osoittaa (kuva 1). Suomessa kelirikko osuu keskimäärin myöhemmäksi, mutta muutoin vuosittainen puutavaran saatavuus/kuljetettavuussuhde lienee Suomessakin samantapainen.

22. Tien kantavuuteen vaikuttavat tekijät

Metsätien kantavuus on pääosin riippuvainen käytetystä rakennusmateriaalista, rakennekerrosten paksuudesta ja kuivatuksen tehokkuudesta.

Maalajin kantavuus perustuu sen tiiviyyteen, raekokoon ja -muotoon ja paranee yleensä raekoon kasvaessa. Kantavuudeltaan parhaita ovat sora ja sora-moreeni ym. kar-



Kuva 1. Puutavaran saatavuuden ja kuljetettavuuden vuosivaihtelu Etelä-Ruotsin yksityisteillä (Arvidsson ym. 1978).

Fig. 1. Comparison between the availability of wood and accessibility of stocks on private roads in Southern Sweden (after Arvidsson et al. 1978).

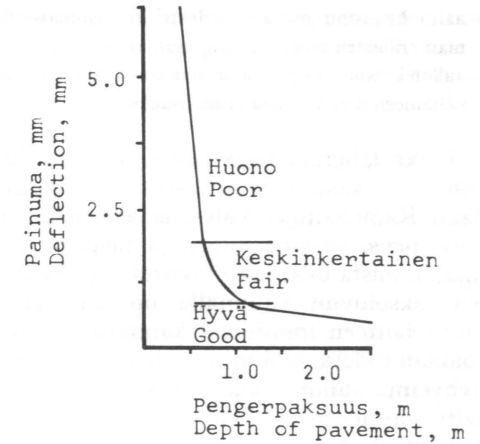
keajakoiset maalajit, joissa rakeet ovat terävässärmäisiä. Tasarakeiset hienojakeiset materiaalit ovat kantavuudeltaan alhaisimpia, ja niiden kantokyky on sitä alhaisempi mitä hieno- ja tasarakeisempi maalaji on (esim. Silvan ja Taivainen 1951). Tällaisia heikosti kantavia maalajeja ovat yleensä runsaasti savi ja/tai hiesulajitteita sisältävät maat.

Paitsi raekoosta maalajin kantavuus on riippuvainen myös sen vesipitoisuudesta. Yleisesti rakeisten kitkamaalajien kantavuus on paras ns. optimikosteudessa ja laskee vesipitoisuuden noustessa tai laskiessa. Kuitenkin vesipitoisuuden vaikutus näihin maalajeihin on pienempi ja märkänäkin niiden kantavuus on yleensä hyvä. Hienojakoisilla koheesiomaalajeilla kantavuus laskee vesipitoisuuden kasvaessa. Vesipitoisuuden vaikutus on sitä merkittävämpi mitä hienojakoisempia maalajit ovat. Yleensä vesipitoisuuden kasvaessa maalajien kantavuus alenee 1. tien kantavuus on sitä huonompi, mitä märempiä sen rakennekerrokset ovat.

Koska kuormituksen aiheuttaman paineen jakautuminen tien rungossa leviää kartiomaisesti, kerrospaksuuden vaikutus voidaan kuvata epälinearisena. Kerrospaksuuden lisäyksen vaikutus kantavuuteen on tietyn rajapaksuuden yläpuolella vähäinen. Lähestyttäessä tätä rajaa kerrospaksuus ja liikennöitävyyden riippuvuus on erittäin selvä. Mikäli kerrospaksuus on rajapaksuutta alhaisempi, kantavuuden huononeminen on erittäin jyrkkä, mutta liikennöitävyysluokkaan (ei-liikennöimiskelpoinen) tällä ei enää ole vaikutusta. Tien rakennepaksuus ja kantavuuden välistä riippuvuutta havainnollistetaan kuvan 2 avulla. Tien kantavuusluokituksen kannalta on oleellista, ettei rakennepaksuus millään kohdalla alita kantavuusrajaa. Rajapaksuus on riippuvainen sekä alustan että tien rakennusmateriaalien ominaisuuksista (Metsätienormit 1972).

Kantavuuden vuodenaikainen vaihtelu johtuu pääosin vesipitoisuuden muutoksista tien rungossa. Kesällä kantavuuteen vaikuttaa mm. sateiden runsaus, ja tällöin hienojakoiset maalajit vettyvät yleensä pahimmin. Kantavuus on heikoimmillaan keväällä roudan sulamisen aikaan, jolloin se on routimattomilla sorateilla 30...50 % ja routivilla sorateilla 20...30 % kesäkantavuudesta (Lehtinen 1965).

Keväisin kantavuus on erittäin huono rou-



Kuva 2. Pengerpaksuuden ja tien kantavuuden välinen riippuvuus (Brawner 1960).

Fig. 2. Dependence between depth of pavement and bearing capacity after Brawner (1960).

tivasta materiaalista rakennetun tien runkoon syntyvien jäälinssien kohdalla. Linssien syntyntapa on seuraava: maan jäätyessä sen tilavuus kasvaa, ja tien runkoon jäätymisrajan läheisyyteen muodostuu huokosia, joissa on alipaine. Tämä imee pohjamaasta lisää vettä, joka taas jäätyessään jatkaa prosessia, ja tiehen voi kehittyä paksuja routakyhmyjä siihen kertyneen jään vaikutuksesta. Keväällä sulassa tien runko vettyy näissä kohdoin yli juoksurajan ja hienojakoinen maa-aines pursuaa pintaan, kuva 3.



Kuva 3. Routapuhkeama.

Fig. 3. Spring break-up.

23. Tutkaluotauksen periaate

Tutkaluotaus perustuu radioaaltojen kulkuun väliaineessa seuraavien sääntöjen mukaan:

- aalto heijastuu osittain dielektrisiltä ominaisuuksiltaan erilaisten aineiden rajapinnasta ja
- aallon kulkunopeus ja vaimeneminen ovat riippuvaisia väliaineen dielektrisistä ominaisuuksista.

Tutka lähettää kohteeseen radioaaltoja ja kohteesta saapuvat heijastukset rekisteröidään. Radioaaltojen kulku, ts. aaltojen etenemisnopeus, vaimeneminen ja heijastuminen rajapinnoista ovat jaksoluvusta riippuvia, joten jaksoluvun valinnalla on huomattava osuus laitteen toiminnan kannalta. Yleisesti voidaan todeta, että mitä suurempi jaksoluku (lyhyempi aallonpituus) on, sitä nopeammin aalto vaimenee. Tällöin tunkeutumissyvyys on pieni. Korkeampaa jaksolukua käytettäessä saadaan parempi erottelukyky, jolloin tutkalla havaitaan pienempiä kohteita. Kuvassa 4 esitetään aallon tunkeutumissyvyys eri jaksoluilla kuivassa hiekassa ja vedessä.

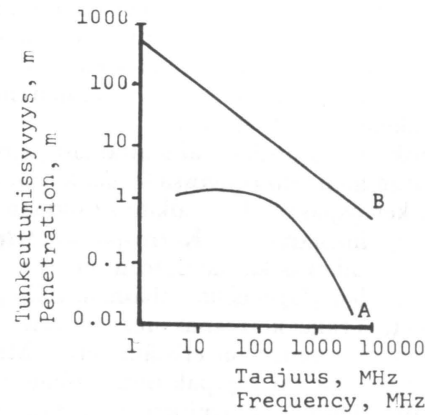
Taulukko 1. Eri aineiden suhteelliset dielektriset vakiot UHF-taajuuksilla (Morey 1974, Scott ym. 1974).
Table 1. Relative dielectric constants at UHF-frequencies for various materials (Morey 1974, Scott et al. 1974).

Väliaine - Material	Suhteellinen dielektrinen vakio - Relative dielectric constant, ϵ_r
Ilma Air	1
Lumi Snow	1.2 ... 1.5
Jää Ice	3.2
Kuiva hiekka Sand, dry	3 ... 6
Märkä hiekka Sand, saturated	... 30
Märkä moreeni Till, saturated	... 30
Märkä siltti Silt, saturated	... 10
Märkä savi Clay, saturated	8 ... 12
Ikirouta Permafrost	4 ... 8
Vesi Water	81

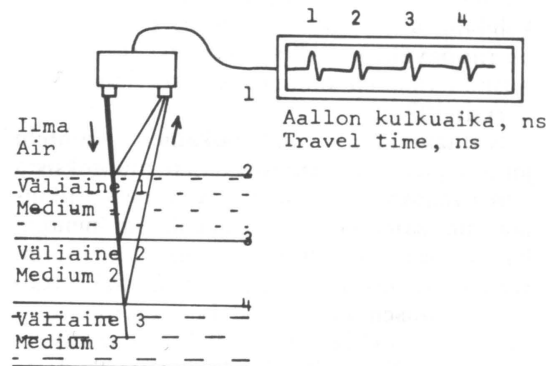
Taulukossa 1 annetaan eri maalajien dielektrisyyssvakioita UHF-taajuuksilla (30 ... 3 000 MHz).

Radioaalto-utauksen periaate esitetään kuvassa 5. Kun maahan lähetetty radioaallo kohtaa dielektrisen rajapinnan osa tehosta heijastuu takaisin, osa jatkaa seuraavaan kerrokseen heijastuen taas osittain seuraavasta pinnasta jne. samalla koko ajan vaimentuen. Heijastuneen ja läpäisseen tehon suhde riippuu rajapinnan materiaalien dielektrisistä ominaisuuksista, ja tehoheijastus voidaan laskea kaavan 1 avulla (Jakkula 1979a).

$$R = \left[\frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \right]^2, \quad (1)$$



Kuva 4. Aallon tunkeutumissyvyys veteen (A) ja kuivaan hiekkaan (B) eri taajuuksilla (Jakkula 1979a).
Fig 4. Penetration vs. frequency in fresh water (A) and in dry sand (B) after Jakkula (1979a).



Kuva 5. Tutkaluotauksen periaate.
Fig. 5. The radar subsurface profiling technique.

jossa

R on heijastuskerroin

ϵ_{r1} 1. kerroksen suhteellinen dielektrisyyssvakio

ϵ_{r2} 2. kerroksen suhteellinen dielektrisyyssvakio

Täten sähköisesti toisistaan eroavien maalajien kerrosrajat aiheuttavat huomattavia heijastuksia. Teoreettisesti esim. kuivan soran ($\epsilon_r = 4$) ja märän moreenin ($\epsilon_r = 25$) välinen rajapinta heijastaa n. 20 % tehosta takaisin. Kun heijastunut aalto saapuu vastaanottimeen sen kulkuajan perusteella on mahdollista laskea aallon kulkema matka kaavan 2 avulla.

$$h = \frac{c}{2 \sqrt{\epsilon_r}} t, \quad (2)$$

jossa

h on kerrospaksuus, m

c valon nopeus tyhjiössä (0.2998 m/ns)

ϵ_r väliaineen suhteellinen dielektrinen vakio

t kulku-aika, ns

Saapuneet heijastukset saadaan tulkittavaan muotoon esim. oskilloskoopilla poik-

3. TUTKALUOTAUSPERIAATTEEN SOVELTAMINEN METSÄTIEN KANTAVUUDEN ARVIOIMISEEN

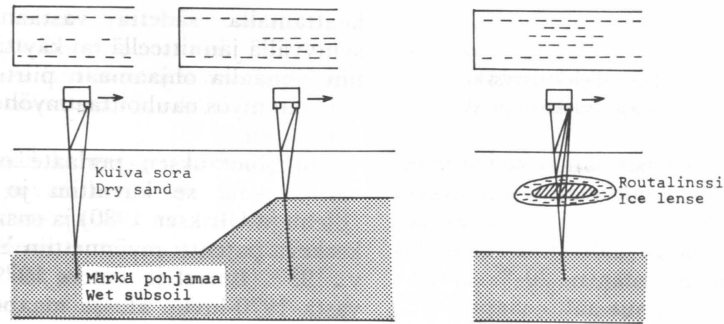
Kuten aikaisemmasta on ilmennyt, useat tutkijat ovat todenneet maan dielektrisen vakion kasvavan maan vesipitoisuuden kohotessa (esim. Morey ja Harrington 1972, Silva ym. 1975, Davies ym. 1977, Nilsson 1978, Jakkula 1979a). Koska hienojakoiset maalajit ovat huonosti vettä läpäiseviä, niiden vesipitoisuus on yleensä korkea. Näin ollen maan dielektrinen vakio yleensä kasvaa tien kantavuuden kannalta negatiivisten ominaisuuksien voimistuessa. Kuivan hiekan tai soran dielektriset vakiot ovat lähempänä ilman vakiota ja ero esim. märkään silttiin on suuri. Märästä maapohjasta saadaan erilainen heijastus kuin kuivasta. Märät kohteet tienrunggossa näkyvät tutkalla tummempina. Maastokokeissa on voitu paikallistaa vesijohtovuoja kostuneen kohdan suuremman heijastuksen vuoksi (Morey ja Harrington 1972, Tolvanen 1980). Samoin eri maalajeista tulevat heijastukset ovat erilaisia, joten joissain tapauksissa myös maalajin identifioiminen on

keuttamalla sädetä vastaanottoantenniin syntyvällä jännitteellä tai käyttämällä antennin signaalia ohjaamaan piirturia. Signaali voidaan myös nauhoittaa myöhempää tulkintaa varten.

Tutkaluotauksen periaate on keksintönä vanha, sillä se kuvattiin jo 1920-luvulla (Bjelm ja Ulriksen 1980) ja ensimmäinen sitä koskeva patentti myönnettiin Yhdysvalloissa v. 1937 (Burrell ja Peters 1979). Kuitenkin vasta 1970-luvun alussa maaperäluotaus on pystytty teknisesti toteuttamaan mikroalotekniikassa tapahtuneen kehityksen ansiosta. Varsinaiset sovellutukset ovat toistaiseksi verraten vähäisiä. Tutkaluotausta on käytetty erilaisissa geoteknisissä pohjatutkimuksissa, vesijohtojen ja niissä olevien vuotojen sekä maassa olevien esineiden paikallistamisessa (Morey ja Harrington 1972, Morey 1974, Clarricoats ym. 1977, Nilsson 1978, Tolvanen 1980), turvevarojen inventoinnissa (Bjelm ja Ulriksen 1980), jääpeitteen paksuuden mitauksissa (Cooper ym. 1976, Saarilahti 1981) ja ikiroudan tutkimuksissa (Scott ym. 1974, Davis ym. 1976).

onnistunut (esim. Morey ja Harrington 1972, Nilsson 1978, Saarilahti ja Rummukainen 1980, 1981). Tätten voidaan olettaa, että seuraamalla tutkalla maan dielektrisissä ominaisuuksissa tapahtuvia muutoksia saataisiin selville tien rungon kosteuden vaihteluita ja näin pystyttäisiin arvioimaan tien kantavuutta. Kesällä kantavuus on eniten riippuvainen tien rakennekerroksen paksuudesta ja tien rungon kuivuudesta. Tällöin lähelle tien pintaa nousevat tummat tutkagrammin vyöhykkeet ennakoivat huonoa kantavuutta. Talvelle roudantuneen tien rungosta voimakkaimmat heijastukset saataisiin roudalinsseistä, jolloin nämä tummana näkyvät alueet ennakoivat, että kantavuus on huono roudan sulamisen aikana (kuva 6).

Koska teoriassa näyttää mahdolliselta, että tutkaheijastusta seuraamalla voitaisiin laatia tiestä jatkuva kantavuusprofiili, tutkaluotauksen soveltuvuutta päätettiin kokeilla myös käytännössä. Ensimmäisissä kokeissa



Kuva 6. Tutkaluotauksen soveltaminen tien kantavuuden arvioimiseen.
Fig. 6 Radar sounding in the bearing capacity of forest roads.

tehtäväksi asetettiin kevätkelirikon aikaisen kantavuuden ja talvella roudasta saatavan tutkaheijastuksen välisen riippuvuuden selvittäminen.

4. KOKEELLINEN OSA

41. Kokeissa käytetyn tutkan rakenne ja toiminta

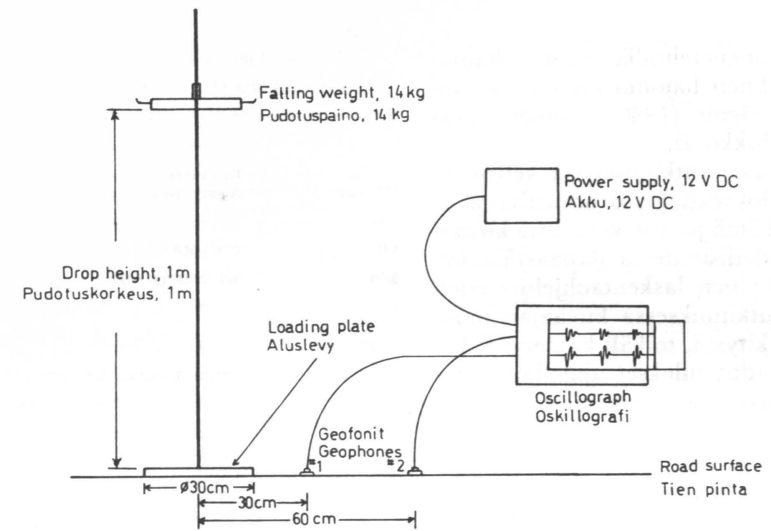
Kokeissa käytetty tutka on suunniteltu jään ja suon routakerroksen paksuuden mittaamiseen, ja sen tekninen rakenne on esitelty Jakkulan (1979b) raportissa. Valittu jaksoluku 1.0 . . . 1,8 GHz on korkea. Näin tutkan erottelukyky on saatu hyväksi, esimerkiksi roudassa se on n. 10 cm. Käytetyllä jaksoluvulla aalto kulkee roudantunneessa maassa lähes vaimenematta. Aallon tunkeutumiskyky sulaan märkään maahan tällä jaksolukualueella sitävästoin on heikko. Tutka koostuu antenniosasta (mitat 450×270×350 mm ja lähetin-vastaanottimesta (350×350×130 mm). Laitteen kokonaispaino on n. 10 kg ja tehon tarve 15 W. Käyttöjännite on 12 V. Laite on siten kevyt ja helppo kuljettaa esim. henkilöautoon asennettuna. Maasta heijastuvia kaikuja voidaan seurata 12×32 LED-matriisin näyttölaitteesta, jossa rivit vastaavat heijastuksen voimakkuutta ja sarakkeet kanavia 1. aallon matkaan käyttämää aikaa. Kun tunnetaan aallon nopeus, pystytään sen kulkema matka laskemaan (ks. kaava 2) ja kerroksen paksuus määrittelemään. Kyseinen näyttölaitte ei kuitenkaan sovellu linjoittaisen profiilin seurantaan, sillä muutokset kaikujen rakenteessa ovat niin nopeita, ettei niitä ehdi-

tä silmävaraisesti tulkita. Tämän vuoksi signaali on nauhoitettava, ja heijastuneet kaiut saatettava tulkittavaan muotoon piirtämällä niiden avulla tutkagrammi. Tässä tutkimuksessa kokeiltiin intensiteettiipiirturitulostusta. Analyysi voidaan tehdä myös tietokoneella.

Periaatteeltaan käytetty tutka on ns. taajuusmodulaatioon perustuva jatkuva-aaltotutka (FM-CW-tutka). Se lähettää maahan jatkuvaa aaltoa, jonka taajuutta muutellaan. Kun verrataan lähetettyä ja saapuvaa taajuutta, niiden erosta voidaan laskea em. aallon kulkeaika. Näin toteutettuna tutkan rakenne on saatu yksinkertaisemmaksi ja kustannukset alhaisemmiksi kuin maaperätutkimuksissa yleisemmin käytetyillä ns. pulssitutilla. Lyhytpulssitutkamenetelmässä maahan lähetetään lyhyitä 1 . . . 5 ns pulsseja, joiden saapumisajat rekisteröidään. Tällaisissa tutkimuksissa vaadittava näyttötekniikka on toteutukseltaan kallis.

42. Kantavuuden mittauksissa käytetyn deflektometrin toimintaperiaate

Yleisessä tienrakennustoiminnassa on käytössä useita erilaisia menetelmiä tien kantavuuden mittaamiseksi. Näissä tarvitaan kui-

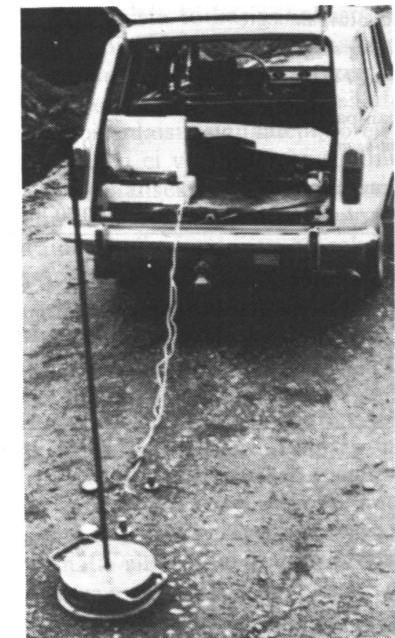


Kuva 7. Pudotuspainodeflektometrin toimintaperiaate (Pulkki 1981).
Fig. 7. Operational principle of the light falling weight deflectometer (Pulkki 1981).

tenkin raskasta ajoneuvoa, jonka tuntivuokra on korkea. Keväällä roudan sulamisen aikaan tien kantavuus saattaa myös joissain kohdissa olla niin alhainen, että se estää raskaan mittausajoneuvon liikkumisen. Tässä tutkimuksessa tien kantavuus jouduttiin sekä teknisistä että taloudellisista syistä mittaamaan yksinkertaisella menetelmällä, vaikka käytettyä laitetta ja menetelmää ei vielä ollut riittävästi tutkimustuloksia. Kantavuutta yritettiin arvioida myös silmävaraisen luokituksen perusteella, mutta se todettiin liian subjektiiviseksi ja epätarkaksi.

Maastomittauksissa käytetty pudotuspainodeflektometri on kehitellyn alainen prototyyppi (ks. Pulkki ja Saarilahti 1981). Sen toiminta esitetään kuvassa 7. Laitteena on halkaisijaltaan 300 mm kuormituslevy, 1 000 mm pituinen ohjaus akseli ja pudotuspaino, jonka massa on 14 kg, sekä kaksi geofonia ja galvanometripiirturi (kuva 8). Tien pintaan aiheutetaan impulssi antamalla pudotuspainon pudota 1 000 mm korkeudelta kuormituslevylle. Impulssi etenee tien rungossa seisimisinä aaltoina. Syntyneet aallot rekisteröidään 300 ja 600 mm etäisyydellä levyn keskipisteestä sijoitetuilla geofoneilla ja tulostetaan piirturilla. Mittaamalla kummankin geofonin rekisteröimän värähtelyn taajuus ja amplitudi voidaan laskea tien kantavuutta kuvaava kimmo-1. E-moduli. Kun laitteella saatuja kantavuuden mittausarvoja (E-modulia) verrattiin sorateillä kesänäikaisissa

oloissa TVH:n ns. standardimenetelmillä saatuihin kantavuuden arvoihin, laitteen voitiin todeta toimivan yhtä luotettavasti kuin vertailumittauslaitteiden. Korrelaatiot tutkitun laitteen ja standardimenetelmien välillä olivat taulukon 2 mukaiset.



Kuva 8. Tien kantavuuden mittaus deflektometrillä. (Pulkki 1981).

Fig. 8. A view of the test apparatus. (Pulkki 1981).

Ns. standardimenetelmillä saatujen kantavuusarvojen välinen hajonta on samaa suuruusluokkaa Tholenin (1980) saamien tulosten kanssa (taulukko 3).

Kuitenkin maastotutkimuksissa kelirikkoilla saatiin tulokseksi myös negatiivisia E-moduliarvoja. Tämä johtuu siitä, että kuvaajan muoto on todellisuudessa alapäästään loivempi kuin nykyinen laskentaohjelma edellyttää. Tässä tutkimuksessa kuvaajan muodolla ei ole merkitystä, mikäli käytetyllä deflektometrillä saadut tulokset ajatellaan suhteelliseksi kantavuutta kuvaaviksi arvoiksi (E_{rel}).

Kevään 1981 mittauksen mukaan kantavuuden ohjearvoina laitteen nykykalibroinnista voidaan antaa seuraavat lukemat, taulukko 4 (Pulkki 1981).

Taulukko 2. Tutkimuksissa käytetyllä pudotuspainodeflektometrillä mitattujen kimmomodulien ja standardimenetelmillä mitattujen kimmomodulien väliset korrelaatiot (Pulkki 1981).

Table 2. Correlation coefficients between FWD-prototype used in this study and standard methods after Pulkki (1981).

Standardimittausmenetelmä Standard method	Korrelaatiokerroin Correlation coefficient
Kevyt pudotuspainolaite Danish falling weight deflectometer, FWD	0.78
Benkelman-palkkimittaus Benkelman-beam	0.88
Levykuormituskoe Plate bearing test	0.70

Taulukko 3. Eri kantavuuden mittausmenetelmien väliset korrelaatiokertoimet Tholenin (1980) mukaan.

Table 3. Correlation coefficients between different standard methods after Tholen (1980).

	FWD	Benkelman	Levy Plate
Kevyt pudotuspainolaite Danish falling weight deflectometer, FWD	-		
Benkelman pankki Benkelman-beam	0.88	-	
Levykuormituskoe Plate bearing test	0.67	0.85	-

Taulukko 4. Tien liikennöitävyys suhteellisella kantavuusasteikolla (E_{rel}) (Pulkki 1981).

Table 4. Relative bearing capacity classes after Pulkki (1981).

E_{rel} -arvo -value	Tien kantavuuskuvauk- Bearing capacity description
yli over 60	Tie kantaa hyvin raskaan liikenteen Good bearing capacity, truck transportation is possible
20...60	Tie kantaa rajoitetun määrän raskaita kuorma-autoja, vauriot mahdollisia. Transportation of some truck loads possible, occasional damages.
alle under 20	Tien murtuminen raskaan ajoneuvon alla todennäköistä Rupture under truck is probable
alle under 5	Ainoastaan henkilöautoliikenne mahdollista Only passenger car traffic possible
alle under 0	Henkilöstöliikenne vaikeutunut Difficulties for passenger car

43. Maastotöiden suoritus

Tämän maastokokeen tavoitteena oli selvittää, onko routaantuneesta tiestä saatavien tutkakaikujen ja keväällä roudan sulamisen aikaan mitatun tien kantavuuden välillä havaittavaa riippuvuutta, joka selittyisi tien muodostuneista routalinsseistä.

Tutkimus tehtiin Vilppulan kunnan Hanhon kylässä sijaitsevalla kylätiellä. Tie on tyypillinen maaseudun tie, joka on kehittynyt vanhasta kärrytiestä. Varsinaisia rakennekerroksia ei ole, mutta tielle on ajoittain tuotu joitakin kuormia soraa. Ojat on uudelleen kaivettu vuonna 1979. Tien profiili esitetään kuvassa 9. Maalajit ovat savi-hiesupitoisia moreeneja. Tie routii keväisin niin pahoin, ettei maitoauto voi liikennöidä. Tien pääasiallinen käyttömuoto on em. maidonkuljetus ja tie pidetään talvisin aurattuna.

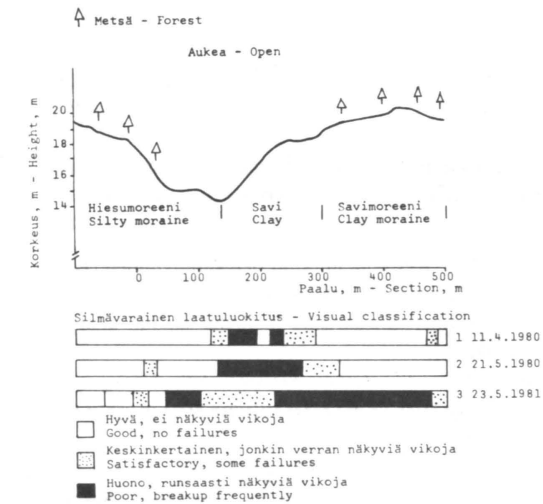
Tutkaluotaus suoritettiin 500 m pituisella tien osalla 11. 3. 1980, jolloin tie oli täysin routaantunut. Signaali nauhoitettiin ja kohdistusmerkkeinä käytettiin tienvierien puhelinpylväitä, joiden kohdalla 2. kanavalle annettiin kohdistuspiste huutamalla pylvään numero. Nauhoitus tehtiin tielinjalla useampaan kertaan ajamalla henkilöautolla no-

peusmittarin näyttäessä 10 tai 20 km/h (ei tarkka, ja nopeus vaihteli hieman). Tutkan antenni oli kiinnitetty auton perään asennettuun telineeseen (kuva 10). Mainittakoon, että tie on luodattu tämän jälkeen useampaan kertaan, mutta koska näitä ei toistaiseksi ole voitu purkaa, tutkimus koskee vain tätä ensimmäistä nauhoituskertaa.

Kevään 1980 kuluessa tie luokiteltiin kahteen kertaan silmävaraisesti käyttäen kolmi-luokkaista arviointia (hyvä, keskinkertainen, huono) tien näkyvien vikojen mukaan.

Silmävaraiset luokitukset, jotka osoittautuivat liian subjektiivisiksi, esitetään kuvassa 9.

Nämä kolme silmävaraista luokitusta eivät ole keskenään vertailukelpoisia, sillä



Kuva 9. Tien profiili.

Fig. 9. Road profile.



Kuva 10. Tutka auton perässä.

Fig. 10. Radar sounding by car.

- kullakin kerralla arvosteluperuste vaihteli, joten luokitus on suhteellinen,
- luokitus koski eri sulamisvaiheessa olevaa routaa ja
- kelirikko vuonna 1981 oli pahempi kuin 1980.

Yleisesti kuitenkin voidaan todeta, että kantavuus oli huonoin tien keskiosan savikon yläosissa, jossa savi pursuaa keväisin tielle. Tie oli paras alkuosaltaan, ja loppuosa oli keskinkertaista... huonoa. Silmävaraisista luokituksista käy ilmi myös roudan sulamisen eteneminen, sillä ensimmäisenä tien laatu on huonontunut aukealla kohdalla, johon aurinko on paistanut esteettömästi.

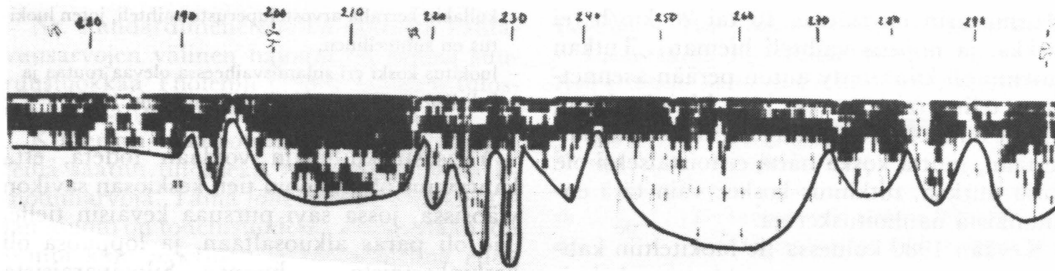
Varsinaiset kantavuusmittaukset tehtiin 23. ja 24. 5. 1981 eli tutkaluotausta seuraavan vuoden keväällä. Mittaus suoritettiin 20 m välein raiteen kohdalla pudottamalla paino neljä kertaa ja laskemalla kolmen viimeisen pudotuskerran antamien E_{rel} -lukemien keskiarvo. Tätä käytetään tutkimuksessa kantavuuden kuvaajana, ja se merkitään E_{rel1} 23. päivän ja E_{rel2} 24. päivän mittauksista.

44. Aineiston käsittely ja tutkimustulokset

Nauhoitetuista tutkasignaaleista piirrettiin tutkagrammit Helsingin yliopistollisen keskussairaalan Honeywell-intensiteetti-piirturilla. Kyseinen laite oli kiinteästi säädetty piirtämään toisenlaisia signaaleja, joten harmaasävyasteikkoa ei voitu säätää tulkinnan kannalta optimaaliseksi. Tämän vuoksi kaikkien tarkempi analyysi on mahdoton, mutta keskimääräinen heijastusvyvyys on selvästi erotettavissa. Kuvassa 11 esitetään pienennöksenä osa intensiteetti-piirturilla piirrettyä tutkagrammia.

Tutkasignaalin tulkinta perustuu vain keskimääräiseen heijastusvyvyyteen. Tällöin hypoteesina on että mitä paksumpi ja jääpitoisempi routakerros tai routalinsse on, sitä syvemältä tutkaheijastuksia saadaan. Keväällä kantavuus on taas sitä huonompi, mitä lähempi tien runko on eli mitä enemmän ja syvemmälle siinä talvella oli routalinssejä.

Analyysia varten tutkagrammiin piirrettiin silmävaraisesti heijastusten pohjataso. Rajana pidettiin harmaasävy loppumista. Yleensä rajakohta oli selvästi ja yksiselitteisesti erotettavissa ja tulkittavissa (kuva 11).



Kuva 11. Tutkagrammi intensiteetti-piirretulla tulkittuna. Tulkittu heijastussyvyys on piirretty näkyviin.
Fig. 11. Radargram drawn by intensity printer. Interpreted radar reflection depth shown by the continuous line.

Tutkagrammi oli piirretty kolmesta luotauksesta, mutta yhdessä niistä vahvistustaso oli ollut liian alhainen eikä tutkagrammissa ollut erotettavissa riittävästi yksityiskohtia. Piiruritulostus onnistui kahdesta vastakkaiseen suuntaan ajetusta luotauksesta, joista toinen oli ajettu nopeudella 20 km/h (tutkagrammi 1) ja toinen 10 km/h (tutkagrammi 2). Tutkagrammeihin piirretyn heijastuksen pohjatason etäisyys pinnasta mitattiin viivoittimella 1 mm tarkkuudella 5 m välein käyttäen kohdistuspisteinä toiselle kanavalle äänitettyjä puhelinpylväiden ohituksia jakamalla kohdistusmerkkien väli tasaisesti mitatun välimatkan suhteessa. Näin saaduista 5 m välein mitatuista heijastussyvyyksistä laskettiin kolmen pisteen liukuva keskiarvo, jota käytetään tilastollisissa analyyseissä. Kyseisen tutkan heijastussyvyys olisi voitu muuttaa aallon kulkuajoiksi lineaarisella muunnoksella, mutta tulosten käsittelyn kannalta tällä ei ole merkitystä.

Ensimmäisessä analyysivaiheessa verrattiin silmävaraisesti tutkagrammeja 1 ja 2 toisiinsa. Niissä todettiin niin selvät yhteensopivuudet, että heijastusten voitiin olettaa johtuneen tien rungossa olevista dielektrisistä rajapinnoista ja toistuvan samanlaisina peräkkäisissä luotauksissa. Kuitenkin linjan alku- ja loppupäässä oli joissain kohdissa vaikeuksia vastaavuuksien löytämisessä. Tähän saattavat olla syynä ajonopeuden vaihtelut, joiden vuoksi kohdistuspisteet eivät osuneet oikeille paikoille.

Varsinaiset analyysit tehtiin tilastomatemattisin menetelmin regressioanalyysillä osittain tietokoneella HYLPS-ohjelmistolla (HYLK 1981), osittain käsinlaskentana TI-51-III taskulaskimella (Texas Instruments).

Heijastussyvyys otettiin muuttujaksi käytämällä (oletettujen) 20 m paalujen kohdalle

sattunutta liukuvaa keskiarvoa. Tästä käytetään tutkimuksessa symboleja:

- h_1 tutkagrammista 1 (20 km/h) mitattu heijastussyvyys
- h_2 tutkagrammista 2 (10 km/h) mitattu heijastussyvyys.

Mitatuista kantavuuksista E_{rel1} ja E_{rel2} ja heijastussyvyyksistä laskettiin myös paaluitaiset keskiarvot, E_{relm} ja h_m .

Lineaarisilla malleilla saadut regressioanalyysien tulokset esitetään taulukossa 5.

Taulukko 5. Keväällä mitatun tien kantavuuden (E_{rel}) ja talvella mitatun tutkaheijastussyvyden (h) välinen riippuvuus (lineaarisilla malleilla saadun analyysin mukaan).

Table 5. Correlations between measured relative bearing capacity of spring break-up and radar reflection depth in winter (when frozen).

Selittävä muuttuja Dependent variable	Selittävä muuttuja Independent variable	Korrelaatio-kerroin Coefficient of correlation, r	Havaintoja, kpl No. of observations	Riskitaso Significance level
E_{rel1}	h_1	0.447	26	*
E_{rel2}	h_1	0.453	26	*
E_{rel1}	h_2	0.549	26	**
E_{rel2}	h_2	0.590	26	**
E_{relm}	h_1	0.493	26	**
E_{relm}	h_2	0.621	26	***
E_{relm}	h_m	0.625	26	***
E_{rel1}	E_{rel2}	0.660	26	***
h_1	h_2	0.581	26	**

E_{rel1} kantavuusmittaus 23. 5. 1981 - Measured relative bearing capacity, day 1

E_{rel2} kantavuusmittaus 24. 5. 1981 - Measured relative bearing capacity, day 2

h_1 heijastussyvyys 10 km/h profiilista (11. 3. 1980) - Radar reflection depth, sounding No. 1

h_2 heijastussyvyys 20 km/h profiilista (11. 3. 1980) - Radar reflection depth, sounding No. 2

Heijastussyvyden ja tien kantavuuden välillä on tilastollisesti jokseenkin merkittävä ... erittäin merkittävä riippuvuus. Lisäksi voidaan todeta, että

- tutkagrammista 2 mitatut heijastussyvydet korreloivat kantavuuden kanssa paremmin kuin tutkagrammista 1 mitatut,
- eri päivinä mitattujen kantavuuksien välillä on myös hajontaa ja korrelatio on samaa luokkaa kuin heijastussyvyden ja kantavuuden välinen.
- erot heijastussyvyyksissä ovat suuremmat kuin kantavuuksissa.

On ilmeistä, että osa alhaisesta selityksasteesta tutkagrammista 1 tehdyssä analyysissä johtuu kohdistusvirheestä, jolloin tutkagrammin ja maastopisteen kohdistaminen ei ole oikea. Ajonopeudella ei ole ollut vaikutusta tutkan toimintaan. Ero johtuu ajonopeudesta vain välillisesti, sillä 20 km/h ajatus tutkagrammissa kohdistusvirheet ovat suuremmat.

Edellä tehty analyysi perustuu lineaarisiin malleihin, ja pääosassa tapauksista korrelaatio oli lineaarinen. Residuaalitarkastelun ja eri muunnosten kokeilun avulla havaittiin että riippuvuus oli joissain tapauksissa epälineaarinen. Paras epälineaarinen malli saatu selityksaste oli $R^2 = 54.2 \%$, kun vastaava lineaarisen mallin selityksaste

$R^2 = 38.2 \%$. Joissain tapauksissa voitiin siis saada taulukossa 5 esitettyjä korkeampia korrelaatiokerroimia, mikä vahvistaa todettua tutkan heijastussyvyden ja tien kantavuuden välistä riippuvuutta. Suhteet kuitenkin pysyvät ennallaan 1. tutkagrammin 1 heijastussyvyden ja päivän 1 kantavuuden korrelaatiot olivat alhaisemmat kuin tutkagrammin 2 heijastussyvydet ja päivän 2 kantavuudet.

Edellä olevissa pistemäisissä analyyseissä voitiin todeta tutkan heijastussyvyden ja mitatun kantavuuden välillä vallitsevan korrelaation, jonka selityksaste vaihteli 20.0 ... 54.2 %:n välillä. Todellisempi kuva tutkamenetelmän soveltuvuudesta tien kantavuuden arvioimiseen saadaan kuitenkin tarkastelemalla tutkagrammin perusteella laadittuja kantavuusprofiileja. Liitteissä 1 ... 3 esitetään joidenkin mallien avulla tutkan heijastussyvydestä laskettujen kantavuuden estimaattien (\hat{E}_{rel}) ja mitattujen kantavuuksien perusteella piirretyjä profiileja. Kaikissa näissä voidaan todeta erittäin hyvä yhteensopivuus ja kuljetusten suunnittelun kannalta olisi sama, kumpaa arvoa käytettäisiin. Vertailun vuoksi liitteeseen 4 on piirretty myös eri päivinä mitatut kantavuus- ja heijastussyvyysprofiilit.

5. TULOSTEN SOVELTAMINEN KÄYTÄNTÖÖN

5.1. Tulosten luotettavuus

Osa alhaisesta selityksasteesta ja profiileissa havaitusta erosta johtuu tutkakaikujen kohdistusvirheestä, jolloin kantavuuden pistemäinen mittauskohde ja vastaavaksi ajateltu tutkagrammin kohta ovat eri paikassa. Koska ero kuitenkin pysyttelee yhden paaluvälin sisällä, tällä ei ole oleellista vaikutusta tuloksiin.

Tien kantavuus sekä pituus- että leveys-suunnassa vaihtelee suuresti, ja paras kantavuus on yleensä raiteen kohdalla, jossa maa on tiivistynyt ja rakennekerros on paksuin. Tutkan antennia kuljetettiin auton perässä, jolloin se yleensä oli tien keskiviivalla, mutta

saattoi liikkua ajolinjan mukaan joskus myös vinosti raiteiden poikki. Myös tämäntapainen kohdistusvirhe alentaa selityksastetta, mutta osoittaa, että tutkakaikujen perusteella on mahdollista saada alueellista keskimääräistä tietoa.

Käytetty kantavuuden kuvaaja E_{rel} on tulkittava suhteelliseksi kantavuuden indikaattoriksi. Tien "todellinen kantavuus" korreloi riittävän hyvin mitatun E_{rel} arvon kanssa, vaikka riippuvuus käytännössä saattaa olla jonkin verran epälineaarinen. Tällä seikalla ei tulosten käyttöarvon kannalta ole merkitystä, sillä tutkaheijastuksen ja "todellisen kantavuuden" välinen malli voidaan laatia epälineaariseksi.

Käytetyt analyysimenetelmät ovat yksinkertaisia, ja analyysit tehtiin useampaan kertaan, joten tässä suhteessa tuloksia voidaan pitää virheettöminä. Tutkakaivun heijastussyvyys oli yksiselitteisesti määrättävissä, joten subjektiivisilla ratkaisuilla ei ole tuloksiin vaikutusta. Tekniset virheet ovat epätodennäköisiä, sillä tutkaa ja intensiteettiipiirturia käytettiin samanaikaisesti jää- ja routamittaustulosten analysointiin, eikä näissä helpommin kontrolloitavissa oloissa voitu todeta esiintyneen häiriöitä. Tätä vahvistaa myös peräkkäisistä eri suuntaisista ajoista saatu samantapaisena toistunut tutkagrammi.

Tutkimus voidaan menetelmänä luokitella "black box"-tekniikaksi, jolloin inputmuuttujana on tutkasignaalia kuvaava heijastussyvyys ja output-muuttujana tien kantavuus. Koska tutkagrammi ei ollut riittävän informatiivinen eivätkä taloudelliset rajoitukset sallineet roudan syvyyden ja laadun mittausten edellyttämiä kairauksia ja kaivauksia, tarkemman analyysitekniikan käyttö ei ollut mahdollinen. Tutkaheijastussyvyys ei todennäköisesti ole routakerroksen alaraja. Olettamalla roudan dielektriseksi vakioksi $\epsilon_r = 4.0 \dots 8.0$ yhtä ledriiviä vastaavaksi heijastussyvyydeksi saadaan 39 \dots 28 mm. Tällöin 32. kanava 1. näytön maksimisyvyys vastaisi 1.26 \dots 0.90 metriä. Oletettavasti roudan syvyys on kuitenkin tätä suurempi. Näin ollen on mahdollista, että heijastukset tulevat joistain tien rungon jääkerroksista tms., kuten hypoteesissa oletettiin.

Tulokset on saatu yhden tien yhden mittausten kahden toiston avulla. Niitä ei siis ole mahdollista yleistää eikä niiden perusteella voida varmasti päätellä, että tutkamenetelmä soveltuu tien kantavuuden ennustamiseen. Suoritettu koe osoitti ainoastaan, että tutkittulla tiellä hypoteesi tutkaheijastuksen ja roudan voimakkuuden välillä lienee oikea, jolloin eniten heijastavia jääkerroksia sisältävät kohdet menettivät keväällä eniten kantavuutta.

52. Menetelmien kehittäminen

Nyt tehty koe on lähinnä suuntaa-antava esitutkimus, jonka positiivisten tulosten perusteella näyttää ilmeiseltä, että koetoimintaa kannattaa jatkaa. Tarvittavat jatkotutkimukset voidaan ryhmitellä laitteiden, tulkintamenetelmien ja sovellutusten kehittämiseksi.

Vaikka kokeiltu tutka jo nykyisellään soveltuu henkilöautolla tehtävään luotaukseen, kehittelyn avulla rakenne voidaan saada jonkin verran pienikokoisemmaksi ja mahdollisesti myös pienentää antennin kokoa ja näin helpottaa laitteen käsittelyä. Laajempi mittaushjelma edellyttää lisäksi, että tiekoodi ja matkaimpulssi lisätään nauhoitukseen ja käsitellään automaattisesti.

Tulkintamenetelmien kehittäminen vaatii sekä teoreettisia laskelmia että riittävän laajoja käytännön kokeita, joilla pyritään selvittämään maan mekaanisten ja sähköisten ominaisuuksien välistä riippuvuutta, jotta tutkaheijastusten todellinen alkuperä voidaan selvittää. Mikäli olosuhteet pystytään tulkitsemaan riittävän yksinkertaisesti tutkagrammin perusteella, on mahdollista muuttaa vastaavien mallien avulla tutkakaivujen informaatio kantavuuden kuvaukseksi.

Sovellutusten kehittäminen edellyttää tien ominaisuuksien ja kantavuuden välisen vuorovaikutuksen sitomista tutkakaivujen tulkinnaan ja tulkinnan soveltamista puun korjuun suunnitteluun.

Puunkorjuun suunnittelussa ollaan menossa kohti hajautettuun tietojenkäsittelyyn perustuvia menetelmiä. Peltonen (1979) pitää kaukokuljetusten suunnittelujärjestelmiä tärkeänä tulevaisuuden kehityskohteena. Tällaiseen suunnittelujärjestelmään siirrettävien tietojen tulee olla luotettavia. Tutkamenetelmässä informaatio tiestä saadaan nopeasti liikkuvaa ajoneuvoa käyttäen jatkuvana profiilina ja valmiiksi sähköisessä muodossa, joten teknisesti menetelmä hyvin soveltuisi hajautettuun tietojen käsittelyyn, jolloin kantavuusanalyysi tehtäisiin tietokoneella. Kuitenkin vasta laajemman tutkimusohjelman jälkeen voidaan päätellä, täyttääkö menetelmä myös sille asetettavat tarkkuusvaatimukset.

- ARVIDSSON, A., JOHANSSON, J., NILSSON, S. & ÖBERG, S. 1978. Tjällossningens inverkan på skogsbrukets virkestransporter. The importance of the spring thaw on the transport of wood within forestry. Sveriges lantbruksuniversitet, Inst. för skogsteknik. Rapport 123. Garpenberg.
- BJELM, L. & ULRIKSEN, P. 1980. Ett system för torvmarksundersökning med radar. Slutrapport Etapp 1(2) Project 3062-281. Engineering Geology Department of Water Resources Engineering. Lund Institute of Technology. University of Lund.
- BRAWNER, C. O. 1960. The practical application of preconsolidation in highway construction over muskeg. Proc. of the 6th Muskeg Research Conference. NRCC, ACSSM. TM 67: 13-28.
- BURRELL, G. A. & PETERS Jr. L. 1979. Pulse propagation in lossy media using the low-frequency window for video-pulse radar. Proc. IEEE 67. 7: 981-990.
- CLARRICOATS, P. J. B., KULARAJAH, R., LENTZ, R. R. & POULTON, G. T. 1977. Detection of buried objects by microwave means. Proc. 7th European Microwave Conference. Copenhagen 1977, s. 409-413.
- COOPER, D. W., MUELLER, R. A. & SCHERTLER, R. J. 1976. Measurement of lake ice thickness with a short-pulse radar system. NASA TN D-8189. Cleveland, Ohio.
- DAVIS, J. L., SCOTT, W. J., MOREY, R. M. & ANNAN, A. P. 1976. Impulse radar experiments on permafrost near Tuktoyaktuk, Northwest Territories. Canadian Journal of Earth Sciences 13. 11: 1584-1590.
- DAVIES, J. L., TOPP, G. C. & ANNAN, A. P. 1977. Measuring soil water content in situ using time-domain reflectometry techniques. Report of activities, Part B. Geological Survey of Canada. Paper 77-1 B (1977): 33-36.
- HEINÄMÄKI, M., LEHTINEN, V., VIRTANEN, E. & LAMPEN, S. 1979. Leimikon suunnittelu. Metsätehon opas.
- HYLK: Käyttäjän käsikirja 1981. Helsingin yliopiston laskentakeskus. Computing Center, University of Helsinki. Päivitettävä käsikirja.
- JAKKULA, P. 1979a. Soiden kaukokartoitus UHF-radiometrillä. Lisensiaattityö. Teknillinen korkeakoulu. Sähköteknillinen osasto. Otaniemi.
- 1979b. FM-tutka jään paksuuden mittaukseen. Helsingin teknillinen korkeakoulu. Radiotekniikan lisensiaattikurssin "Mikroaaltokaukokartoitus" erikoistyö. Espoo 9. 2. 1980. Konekirjoite.
- LEHTINEN, E. 1965. Soratien kantavuus. Helsingin teknillinen korkeakoulu. Lisensiaattityö.
- Metsätienormit 1972. Metsäteiden rakentamista koskevat normit ja ohjeet. Vahvistettu metsähallinnon istunnossa 4. 2. 1972. Voimassa olevat lehdet II/1-5.
- MOREY, R. 1974. Continuous subsurface profiling by impulse radar. American Society of Civil Engineers. Proceedings of Engineering Foundation Conference on Subsurface Exploration for Underground Excavation and Heavy Construction. Henniken N. H. August 1974. s. 213-231.
- & HARRINGTON Jr. W. S. 1972. Feasibility study of electromagnetic subsurface profiling. Office of Research and Monitoring. U. S. Environmental Protection Agency. Washington D. C.
- NILSSON, B. 1978. Two topics in radiation field electromagnetic prospecting. Doct. thesis, Division of Applied Geophysics. University of Luleå, Sweden.
- PELTONEN, J. 1979. Hajautettuun tietojenkäsittelyyn perustuva puunkorjuun suunnittelujärjestelmä. Summary: A planning method for timber harvesting based on decentralized data processing. Metsätehon katsaus 3/1979.
- PULKKI, R. 1981. The development of an economical method for measuring the bearing capacity of forest roads. Tiivistelmä: Kantavuusmittausmenetelmien kehittäminen metsäautoteitä varten. Käsikirjoitus MML-tutkimusta varten.
- & SAARILAHTI, M. 1981. Metsäautoteiden kantavuuden mittaaminen. Metsä ja puu 5: 26-29.
- SAARILAHTI, M. 1981. Mikroaaltotutka jään paksuuden mittaukseen. Summary: Radar measurement of ice thickness on ice roads and landings. Silva Fenn. 15(4): 366-376.
- & RUMMUKAINEN, A. 1980. Maaperätutka suateiden penkereen tutkimuksissa. Summary: Ground radar in survey of marsh road embankments. Tie ja liikenne 8: 371-373.
- & RUMMUKAINEN, A. 1981. Tutka suolla. Metsä ja puu 8: 20-22, 28.
- SCOTT, W. J., CAMPBELL, K. J. & ORANGE, A. S. 1974. EM pulse survey method in permafrost. NRCC, ACGR, TM 113: 92-96.
- SILVA, L. F., SCHULTZ, F. W. & ZALUSKY, J. T. 1975. Electrical methods of determining soil moisture content. NASA-CR-147390. Purdue University.
- SILVAN, L. & TAIVAINEN, O. A. 1951. Metsämiehen tieoppi. Kml. Tapio. Helsinki.
- THOLEN, O. 1980. Falling weight deflectometer. - A device for bearing capacity measurement. Properties and performance. Dept. of Highway Engineering, Royal Institute of Technology. Bulletin 1980: 1. Stockholm.
- Texas Instruments. TI-51-III. Manuel d'utilisation. 1978.
- TOLVANEN, R. 1980. Maaperätutkan kokeilu 4 \dots 5. 8. 1980. DI Tolvasen laatima muistio. Helsingin kaupunki. Vesilaitos.

SUMMARY

PREDICTING THE BEARING CAPACITY OF FOREST ROADS USING A RADAR SOUNDING

In this paper the possibilities of using a radar sounding technique in predicting the variations of bearing capacity of forest road is discussed.

In radar sounding a radio wave is transmitted into the road structure. It is partially reflected at the interfaces between electrically differing materials. The reflected wave is then received by the antenna and analyzed. The dielectric characteristics of soil are very dependent upon their water content. Also the dielectric constant of frozen and unfrozen soils are different. Because of the difference between reflectance from wet or frozen soils it might be possible to differentiate the variations to obtain a continuous profile of forest road bearing capacity.

Field tests were carried out on a 500 m section of very frost susceptible rural road. Radar sounding was made 11. 3. 1980 when the road was completely frozen. A FM-CW radar using 1.0 . . . 1.8 GHz frequency was tested. Two radargrams were drawn with an intensity printer,

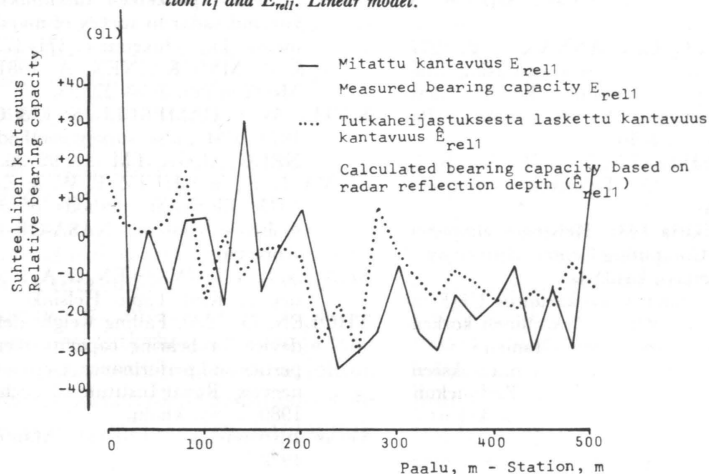
analyzed, and the radar reflection depth (h) was measured. Bearing capacity measurements were carried out the next year, 22nd and 24th May 1981, using a light falling weight deflectometer prototype, which gave relative bearing capacity values (E_{rel}).

Significant to very significant correlations were found between the radar reflection depth and relative bearing capacity. Therefore, the hypothesis that large radar reflection during winter, when the road is frozen, can be used to predict poor bearing capacity locations during spring break-up may be true. This is because the large reflection is most often to frost heave locations in the road structure.

Further investigations are needed to evaluate the correlation in different soil types and conditions before the total judgement of the usefulness of the method can be made.

Liite 1. Huonoimmalla kombinaatiolla h_1 , E_{rel1} laadittu tien kantavuusprofiili. Lineaarinen malli.

Appendix 1. Bearing capacity profile based on the worst combination h_1 and E_{rel1} . Linear model.

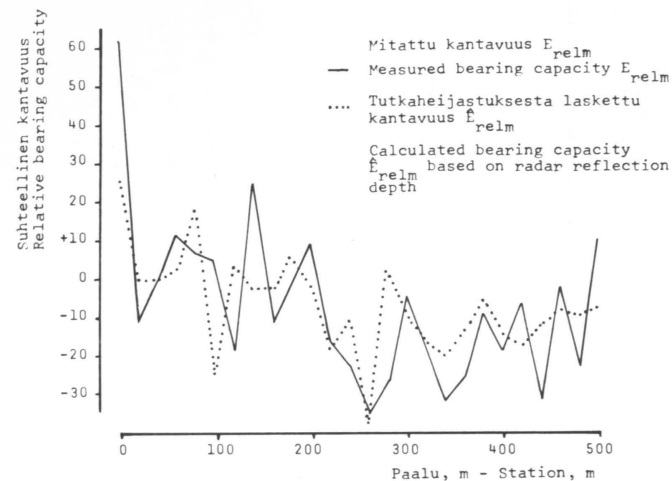


E_{rel1} 23. 5. 1981 mitattu tien suhteellinen kantavuus
relative bearing capacity, measuring day 23. 5. 1981
 h_1 tutkaheijastussyvyys profiilista 1, 20 km/h
radar reflection depth measured on radargram 1.

Malli: $\hat{E}_{rel1} = -0.89h_1 + 25.5$
Model: $N = 26$
 $r = 0.447^*$

Liite 2. Kantavuuden ja heijastussyvyyden keskiarvojen perusteella laadittu tien kantavuusprofiili. Lineaarinen malli.

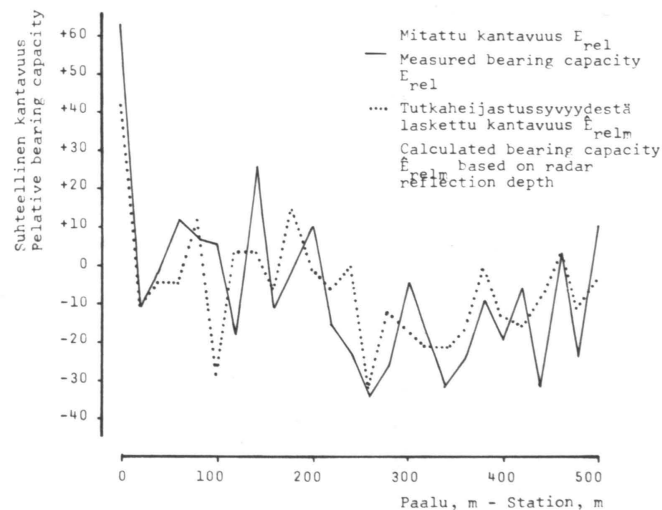
Appendix 2. Bearing capacity profile based on mean values. Linear model.



Malli: $\hat{E}_{relm} = -1.26h_m + 40.26$
Model: $N = 26$
 $r = 0.625^{***}$

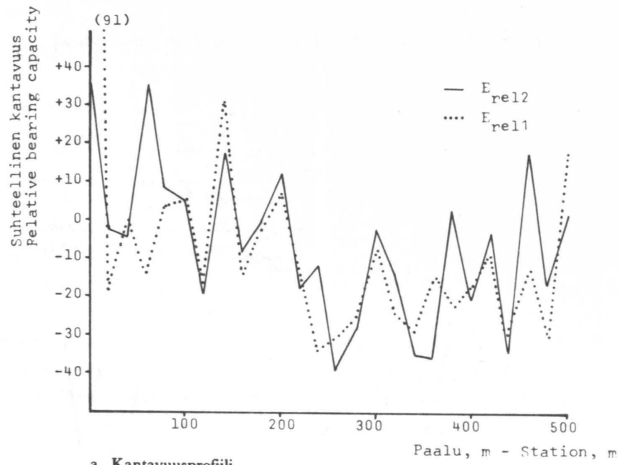
Liite 3. Parhaalla kombinaatiolla epälinearisella mallilla laadittu tien kantavuusprofiili.

Appendix 3. The best combination and semilogarithmic model used in bearing capacity profile.

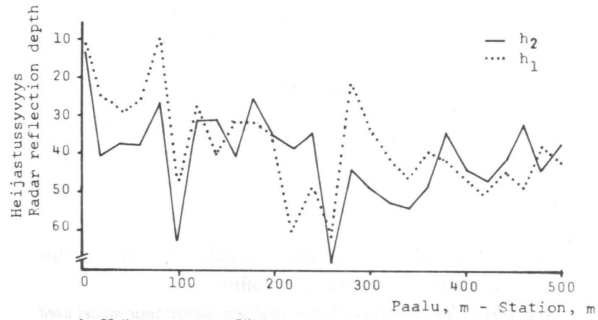


Malli: $E_{relm} = -47.5 \ln(h_2) + 166.2$
Model: $N = 26$
 $r = 0.715^{***}$

Liite 4. Kantavuuden ja heijastussyvyyden profiilit.
 Appendix 4. Bearing capacity and radar reflection depth profiles.



a. Kantavuusprofiili
 a. Bearing capacity profile



b. Heijastussyvyysprofiili
 b. Radar reflection depth profile