

ACTA FORESTALIA FENNICA

176

TUTKIMUKSIA RADIOAALTOMENETELMIEN SOVELTU-
VUUDESTA TURVEMAIDEN KULKUKELPOISUUDEN ARVI-
OIMISEEN

*STUDIES ON THE POSSIBILITIES OF USING RADAR
TECHNIQUES IN DETECTING THE TRAFFICABILITY
OF PEATLANDS*

Martti Saarilahti



SUOMEN METSÄTIETEELLINEN SEURA 1982

**TUTKIMUKSIA RADIOAALTOMENETELMIEN SOVELTUVUUDESTA
TURVEMAIDEN KULKUKELPOISUUDEN ARVIOIMISEEN**

Martti Saarilahti

Summary:

*STUDIES ON THE POSSIBILITIES OF USING RADAR TECHNIQUES IN DETECTING THE
TRAFFICABILITY OF PEATLANDS*

*Esitetään Helsingin yliopiston maatalous-metsätieteellisen
tiedekunnan suostumuksella julkisesti tarkastettavaksi
14. toukokuuta 1982 klo 12
Metsätalon luentosalissa II.*

Kuuluu yhteispuhjoismaiseen metsätekniseen
tutkimusohjelmaan
Belongs to the Inter-Nordic Research Program in Forest Engineering

Suomen Metsätieteellisen Seuran julkaisusarjat

ACTA FORESTALIA FENNICA. Sisältää etupäässä Suomen metsätaloutta ja sen perusteita käsitteleviä tieteellisiä tutkimuksia. Ilmestyy epäsäännöllisin väliajoin niteinä, joista kukin käsittää yhden tutkimuksen.

SILVA FENNICA. Sisältää etupäässä Suomen metsätaloutta ja sen perusteita käsitteleviä kirjoitelmia ja lyhyehköjä tutkimuksia. Ilmestyy neljästi vuodessa.

Tilaukset ja julkaisuja koskevat tiedustelut osoitetaan seuran toimistoon, Unioninkatu 40 B, 00170 Helsinki 17.

Publications of the Society of Forestry in Finland

ACTA FORESTALIA FENNICA. Contains scientific treatises mainly dealing with Finnish forestry and its foundations. The volumes, which appear at irregular intervals, contain one treatise each.

SILVA FENNICA. Contains essays and short investigations mainly on Finnish forestry and its foundations. Published four times annually.

Orders for back issues of the publications of the Society, and exchange inquiries can be addressed to the office: Unioninkatu 40 B, 00170 Helsinki 17, Finland. The subscriptions should be addressed to: Akateeminen Kirjakauppa, Keskuskatu 1, SF-00100 Helsinki 10, Finland.

SAARILAHTI, Martti, 1982. Tutkimuksia radioaaltojen soveltuvuudesta turvemaiden kulkukelpoisuuden arvioimiseen. Summary: Studies on the possibilities of using radar techniques in detecting the trafficability of peatlands. Acta For. Fenn. 176:1-105

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää radioaaltojen soveltuvuutta suon kulkukelpoisuuden arviointiin. Kulkukelpoisuuteen liittyvät turpeen ominaisuudet ovat voimakkaasti sidoksissa vesipitoisuuteen ja suon kantaavuus on sitä huonompi, mitä märempi suo on. Turpeen sähköiset ominaisuudet riippuvat myös vesipitoisuudesta, koska vesi on hyvin häviöllinen aine. Radioaaltojen kulkeminen väliaineessa määräytyy sen permittiivisyydestä. Tästä periaatteesta tehtiin se hypoteesi, että seuraamalla radioaaltojen kulkua suossa voitaisiin niiden muutosten avulla saada tietoa suon vesipitoisuuden ja siten myös sen kulkukelpoisuuden vaihteluista.

Tutkimuksen empiirisessä osassa kokeiltiin kolmea erilaista radioaaltojen mittausmenetelmää. Taajuusmodulointia jatkuva-aaltotutkaa (FM-CW -tutkaa), jonka taajuus oli 1.0 - 1.8 GHz kokeiltiin talven aikaisen liikennöinnin edellyttämän roudan paksuuden luotaukseen. Kokeen perusteella voitiin todeta, että roudan paksuus voidaan mitata suhteellisen luotettavasti lumikerroksen läpi. Toinen kokeiltu laite oli kaupallinen pulssitutkaa, jonka taajuus on 100 MHz. Sitä kokeiltiin sulan suon ominaisuuksien kartoittamiseen. Saadussa tutkagrammissa oli selvästi erotettavissa suon pohja, ja lisäksi saatiin jonkin asteista informaatiota suossa olevista kerroksista ja pohjamateriaalista. Kolmas kokeiltu laite oli radiometri, jota käytettiin suon kirkkauslämpötilan mittaamiseen. Suon kulkukelpoisuuden ja mitatun kirkkauslämpötilan voitiin todeta yleensä vaihtelevan samalla tavoin ja vaihtelun liittyvän suon kasvipeitteessä tapahtuviin vaihteluihin.

Radioaaltojen luotaus on yksi mahdollinen potentiaalinen menetelmä kulkukelpoisuusanalyysien tekemiseksi, sillä informaatio saadaan jatkuvana linjana ja valmiiksi sähköisessä muodossa.

The possibility of using radar sounding techniques in detecting the trafficability of peatlands is discussed. The trafficability is highly dependent on the water content of peat. The dielectric properties of peat are also correlated with its water content. Thus, by observing the variations in dielectric properties of peat by means of radio-wave propagation it might be possible to detect the changes in water content and trafficability.

Three microwave methods are tested. A FM-CW radar, frequency range from 1.0-1.8 GHz, was used to measure the frost thickness of peat layer. It was possible to follow the variations in frost thickness through the snow cover. Total reflected power might indicate the wetness class of the peatland, which is also a trafficability factor. The second method was a short-pulse radar. It was tested in summer conditions, and the frequency used was 100 MHz. Good profiling of peat layers was obtained, giving basic information for trafficability analysis. The third method was a radiometer using a frequency of 790 MHz. It was also tested in summer conditions. The measured brightness temperature was correlated with vegetation cover, thus giving some information of trafficability.

ODC 114.444:114.1-015

Keywords: microwave, peat, remote sensing
trafficability, muskeg

ISBN 951-651-051-5

Arvi A. Karisto Oy:n kirjapaino
Hämeenlinna 1982

ESIPUHE

Tämä tutkimus kuuluu osana yhteispohjoismaiseen Nordiska Skogsarbetsstudiernas Rådin (NSR) projektiin "Puunkorjuu turvemaiden".

Tutkimus on syntynyt useiden eri henkilöiden ja laitosten välisten kontaktien ja yhteistyön tuloksena. Erityisesti haluan kiittää prof. Kalle Putkistoa henkisesti ja aineellisesti turvattuna työympäristöstä sekä prof. Martti Tiuria ja apul.prof. Sven-Erik Hjeltiä, sillä ilman heidän mukaantuloaan tutkimus ei olisi pystynyt laajentumaan minulle vieraille tieteenaloille. Seuraavat laitokset ja henkilöt ovat osallistuneet tähän tutkimukseen sen eri vaiheissa:

Helsingin yliopiston metsäteknologian laitos
Teknillisen korkeakoulun radiolaboratorio
Geologinen tutkimuslaitos
Oulun yliopiston geofysiikan laitos
Pääesikunnan pioneeriosasto
Valtion polttoainokeskus
Helsingin kaupungin vesilaitos
Skandrad AB

TkL Pekka Jakkula on suunnitellut routatutkan ja osallistunut routatutkakokeisiin sekä tarkastanut käsikirjoituksen radiotekniikkaa koskevan osan. Maastotöihin on osallistunut DI Pekka Ylinen, joka on myös hoitanut intensiteetti- ja roudatutkaintulosten. Maastotöissä ovat avustaneet metsät. yo:t Seppo Ollikainen, Tapio Tikkala ja Taina Veltheim. Metsät. yo. Ari Aalto on tulkinut tutkagrammit ja avustanut laskentavaiheissa. Metsät. yo. Harri Hänninen on avustanut aineiston käsittelyssä. Tutka on rakennettu TKK:n radiolaboratoriossa, ja sen kehittäminen on saatu varoja Kauppa- ja teollisuusministeriöltä.

Maaperätutkakokeisiin ovat osallistuneet seuraavat henkilöt: geologi Hans Bruch Skandrad AB:stä on toiminut tutkan käyttäjänä. Turvelajimääritykset on tehnyt FM Lauri Iäksen johtama Valtion polttoainokeskuksen inventointiryhmä. Maastotyöt on tehty osittain yhteistutkimuksena dos. Kimmo Tolosen kanssa Suomen Akatemian rahoittaman turpeen energiasisältöä ja korjuuteknisiä ominaisuuksia tutkivan projektin yhteydessä. Dos. Tolonen on myös tehnyt turvelajimääritykset. Maastotöissä ovat avustaneet metsät. yo. Tapio Tikkala ja koulul. Ilkka Saarilahti. Turpeen kosteusmääritykset on tehnyt metsät.

yo. Taina Veltheim. MH Arto Rummukainen on muokannut profiilidatteen ja tulkinut tutkagrammit.

Tutkan maastokuljetukset on hoitanut Pääesikunnan pioneeriosasto. FL Pentti Vähäsarja on monin tavoin aktiivisesti osallistunut tutkimuksen maastoliikennöintiä koskevien ongelmien ratkaisuihin myös radiometrimittauksien osalta sekä teoreettisella tasolla että järjestämällä maastokuljetukset ja helikopterilennot.

Tutkakokeen rahoitukseen ovat osallistuneet Helsingin kaupungin vesilaitos ja Valtion polttoainokeskus.

Radiometri on suunniteltu ja rakennettu TKK:n radiolaboratoriossa. TkL Pekka Jakkula on hoitanut lentojen tekniset järjestelyt ja kirkkauslämpötilamittauksien tulosten. Geologinen tutkimuslaitos FT Eino Lappalaisen johdolla on osallistunut tutkimuksiin monin tavoin antamalla asiantuntija-apua sekä aineistoa käytettäväksi. Lisäksi Geologisen tutkimuslaitoksen kenttärhmä on avustanut maastomittauksissa. Siipikairaukset ja pinta- luokituksen on tehnyt tekn. yo. Esa Kohonen. Pääesikunnan pioneeriosasto on järjestänyt helikopterilennot, soiden ilmakuvausten sekä maastotöihin varusmies-aputyövoimaa. Tämän lisäksi aputyövoimaa ja majoitusapua ovat antaneet Ruukin ja Perhon kunnat sekä Turveruukki Oy.

Tutkakokien tietokoneanalyysiä kehitettäessä olivat mukana TkL Raimo Salminen ja tekn. yo. Osmo Moisio. Viimeksi mainittu suunnitteli ja rakensi näyttösoittopiiri-A/D-muunnin -digitaalinauhurin. Tietokonesovituksen osallistuivat FK Heikki Laaksonen ja tekn. yo. Esa Leskinen.

Raportin puhtaaksikirjoituksessa ovat avustaneet ekon. Leena Iisalo ja FK Ulla Parviainen. Englanninkieliset tekstit on kääntänyt MMK Reino Pulkki, B.Sc. (For.). Kuvat on piirtänyt taiteilija Toivo Lindqvist.

Edellä mainittujen lisäksi tutkimuksen suunnittelu- ja kehitysvaiheissa on ollut mukana suuri määrä muita henkilöitä.

Parhaat kiitokset kaikille, jotka ovat olleet mukana tämän tutkimuksen suunnittelu- ja toteutusvaiheissa.

Helsinki, syyskuussa 1981

Martti Saarilahti

SISÄLLYSLUETTELO

KÄYTETTYJEN TERMIEN MÄÄRITELMÄT	5
KÄYTETTYJEN SYMBOLIEN SELITYS	6
1. JOHDANTO	7
2. KATSAUS METSÄTIEEELLISIIN TURVMAIDEN LIKKNÖINTITUTKIMUKSIIN MAASSAMME	9
3. TUTKIMUSTEHTÄVÄN ASETTELU JA RAJAUS	10
4. TUTKIMUSMENETELMÄN VALINTA	11
5. KIRJALLISUUTEEN PERUSTUVA TUTKIMUS	12
51. Koneen liikkumiskyvyn ja suon ominaisuuksien välinen riippuvuus	12
52. Turpeen lujuusominaisuuksien riippuvuus turpeen laadusta	20
521. Turpeen leikkauslujuus	20
522. Tunkeumavastus	22
523. Muodonmuutosmoduli	22
524. Turpeen tilavuuspaino	23
53. Suon stratigrafia liikennöinnin kannalta	24
54. Suon kerrosmalli radioaaltoilla tapahtuvaan maaperän luotaukseen	26
55. Radioaalto menetelmien käyttö maaperän luotauksessa	28
6. KOKEELLINEN OSA. MAASTOKOKEET ROUTA- JA MAAPERÄTUTKALLA SEKÄ RADIOMETRILLÄ	33
61. Routatutkakokeet ja niiden tulokset	33
611. Routatutkan rakenne ja toiminta	33
612. Koejärjestelyt	34
613. Aineiston laajuus ja olosuhteet tutkituilla soilla	36
614. Pistemäisiä mittauksia koskevat tulokset	37
615. Linjoittainen profilointi	39
6151. Tietokonepääteellä piirrettyjen tutkagrammien analysointi	39
6152. Jatkuva profiili intensiteetti-piirturilla tulkituna	49
62. Maaperätutkakokeet ja niiden tulokset	51
621. Maaperätutkan rakenne ja ominaisuudet	52
622. Maastokokeet maaperätutkalla	52
623. Aineiston käsittely ja tutkimustulokset	53
63. Radiometrillä suoritettavat maastokokeet ja niissä saadut tulokset	56
631. Radiometrin rakenne ja toiminta	56
632. Kenttäkokeiden järjestelyt ja aineiston keräys	56
633. Tutkimustulokset radiometrillä suoritetuista mittauksista	58
7. TULOSEN SOVELTAMINEN KÄYTÄNTÖÖN	67
71. Tulosten luotettavuus	67
711. Routatutka	67
712. Maaperätutka	68
713. Radiometri	69
714. Muuttujien validiteetti	69
72. Tulosten soveltaminen suon liikennöitävyyden määrittämiseen	71
721. Routatutka	71
722. Maaperätutka	71
723. Radiometri	72
73. Radioaalto menetelmien käyttömahdollisuudet turvmaiden puunkorjuun suunnittelussa	72
74. Menetelmien kehittäminen	75
KIRJALLISUUSLUETTELO	78
LIIHTEET	87

KÄYTETTYJEN TERMIEN MÄÄRITELMÄT

Tässä tutkimuksessa on pyritty käyttämään (suomennoksina) ISTVS:n¹ (ISTVS Standards 1977) suosittamaa terminologiaa. Tärkeimpien termien määritelmät ovat:

- (Maaston) kulkukelpoisuus [(Terrain) trafficability]
Maaston kyky kestää koneiden kulkemista.
- (Koneen) liikkumiskyky [(Vehicle) mobility]
Koneen kaikkinaisen suoriutumiskyky sen liikkeessä paikasta toiseen kuljetustehtävässään.
- Kantokyky (maksimi), Q_{ult} [Bearing capacity, ultimate]
Keskimääräinen kuormitus pinta-alayksikköä kohti, mikä vaaditaan aiheuttamaan maapohjan murtumisen.
- Kellunta [Belying]
Pyörän tai koneen kyky vastustaa pehmeään maahan painumista.

Seuraavaksi tarkastellaan lyhyesti termejä kantavuus, kantokyky ja kellunta.

Terramekaniikassa termillä kantokyky tarkoitetaan maan murtokuormaa (vrt. esim. Karafiath ja Nowatzki 1978), joka määrätään kuormitetun laatan tasapainoehdon mukaan Terzaghin kaavalla

$$Q_u = c N_c + \gamma z_0 N_q + \frac{1}{2} b \gamma N_\gamma \quad (1)$$

jossa

$$Q_u = \text{maan kantokyky, kN/m}^2$$

N_c, N_q, N_γ = kantavuusvakiot, jotka riippuvat maan kitkakulmasta

z_0 = perustamissyvyys (kuormituspinnan etäisyys maan pinnan tasosta), m

c = maan koheesio, kN/m²

b = laatan leveys, m

γ = maan tilavuuspaino, kN/m³

Geotekniikassa näin määritellystä kantokyvystä käytetään nimitystä kantavuus tai murtolujuus (vrt. Helenelund 1974, s. 173 ja 205), kuva 1.

Kantokyky liittyy lähinnä plastisuusteoriaan, ja sille on ominaista, että kuormituskoetta suoritetaan suorakulmaisella laattalla ja kuormitus voidaan ajatella staattiseksi. Painuman suuruus ei liity oleellisesti tarkasteluun.

Termillä kantavuus, jota siis terramekaniikan termistössä ei ole määritelty, tarkoitetaan tässä tutkimuksessa maamateriaalin muodonmuutosominaisuuksia pystysuoran kuormituksen alla, kuten se määritellään tietekniikassa (esim. Ekström 1979). Metsäntutkimuksessa termiä kantavuus on käytetty kuvaamaan maan kykyä vastaanottaa kuormituksia (esim. Sirén 1971). Kantavuus-käsite liittyy lähinnä kimmoteoriaan, ja se määrätään usein dynaamisesti kuormittamalla pyöreää levyä (jonka standardihalkaisija on 300 mm eli kuorma-auton renkaan kosketuskuvion ala) ja mittaamalla painuman suuruus. Kantavuus voidaan ilmoittaa kimmoo-1. E-modulin avulla, joka määrätään seuraavasti, kuva 2.

$$E = \frac{1.5 p r}{z} \quad (2)$$

jossa

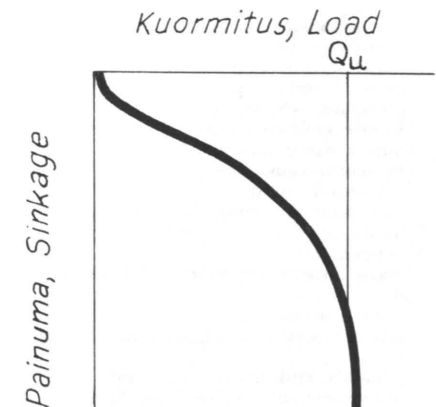
E = kimmomoduli, kN/m²

p = kuormitus, kN/m²

r = kuormituspinnan säde, m

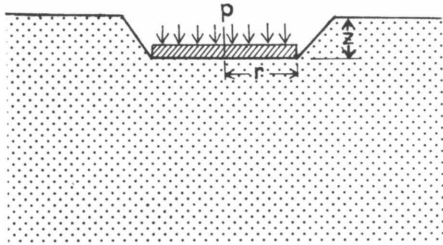
z = painuma, m

Kantokyky ja kantavuus ovat maapohjan ominaisuuksia kuvaavia suureita. Sen sijaan "kelluvuus" on ajoneuvokohtainen. Yleensä koneen liikkumiskykyä kuvaavana parametrinä annetaan pintapaine ja otaksutaan, että sama pintapaine johtaa samaan kelluntaan. Tämä on kuitenkin harhaanjohtavaa (Bekker 1960, s. 51). Puhtailla koheesio-



Kuva 1. Maan kantokyky.
Fig. 1. Soil bearing capacity.

¹ International Society for Terrain-Vehicle Systems.



Kuva 2. Kimmomodulin mittaaminen.
Fig. 2. Measuring modulus of elasticity.

mailla kellunta voitaisiin kuvata pintapaineella, mutta kitkamailla kellunta on pintapaineen ja kuormituspinnan leveyden funktio. Kellunta voidaan kuvata ajoneuvoikohtaisesti esim. pyörän tai telan painuman (kuormitus/painuma) suuruudella esim. seuraavan yhtälön avulla (Bekker 1960):

$$z = \left(\frac{p}{\frac{k_c}{b} + k_\phi} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

jossa

- z = renkaan painuma, m
p = pintapaine, kN/m²
b = kuormituspinnan leveys, m
k_c = muodonmuutosmodulin koheesiokomponentti
k_φ = muodonmuutosmodulin kitkakomponentti
n = muodonmuutosekspONENTTI

Termi kellunta olisikin ehkä soveliaan maapohjaa kuvaava käsite, mutta sen käyttöönottoa rajoittaa mittausmenetelmän monimutkaisuus.

KÄYTETTYJEN SYMBOLIEN SELITYS

a _{CI}	muuntokerroin leikkauslujuuden muuntamiseksi CI-arvoksi	H	tartunta, vetokitka, N
b	kuormittavan pinnan, pyörän, telan leveys, m	H _{max}	koneen tai pyörän kehittämä suurin mahdollinen tartunta, N
c	maan koheesio, kN/m ² (kPa)	MMP	keskimääräinen maksimipintapaine, kN/m ²
c	valon, sähkömagneettisen säteilyn nopeus tyhjiössä, 0.2998 m/ns	N _c N _q N _γ } P	maan kantavuusvakiot
d	renkaan, pyörän, kannatuspyörän ulkohalkaisija, m		
f	taajuus, Hz		
Δf	taajuuspyyhkäisyn kaistaleveys, Hz		
h	erottelukyky, m	Q _u	maan kantokyky, kuormitetun laatan tasapainoehdon mukainen maan maksimikantokyky, kN/m ²
h	kerrospaksuus, korkeus, m	R	ajoneuvon t. pyörän vierimisvastus, kulke-
h _{ML}	mitattu lumen paksuus, cm	R	maatumisprosentti, ks. liite 5.
h _{MR}	mitattu roudan paksuus, cm	R	tehoheijastuskerroin
k _c	muodonmuutosmodulin koheesiokomponentti	S	luisto
k _φ	muodonmuutosmodulin kitkakomponentti	T	lämpötila, K
m	kannatuspyörän lukumäärä 1 telassa	T _B	kirkkauslämpötila, K
n	muodonmuutosekspONENTTI	VCI	koneen liikennöinnin edellyttämä alhaisin CI-arvo (penetrometriarvo, lb/sq. in)
p	paine, kuormitus pinta-alayksikköä kohti, pintapaine, kN/m ² , kPa	W	ajoneuvon massa, kokonaispaino, pyörän dynaaminen kuorma, N
pp	piiri, kehän pituus, m	γ	maan tilavuuspaino, N/m ³
q	tunkeumavastus, penetrometriarvo, kN/m ² (CI-arvo lb/sq. in)	δ	renkaan litistymä, m
r	säde, kuormituspinnan säde, resoluutio, m	tan δ	häviötangentti
s	maan, turpeen leikkauslujuus, kN/m ²	ε	emissiviteetti
v	nopeus, m/s	ε _r	suhteellinen dielektrisyysvakio
w	maan, turpeen vesipitoisuus, % (kosteussuhde)	ε _r ¹	suhteellisen dielektrisyysvakion reaaliosa
z	syvyys, painuma, m	ε _r ²	suhteellisen dielektrisyysvakion imaginaariosa
z _N	kriittinen syvyys, josta CI-arvo tulisi mitata, m	θ	radiometrin antennin keilan leveys, °
A	pinta-ala, kosketuspinnan ala, m ²	λ	aallonpituus, m
CI	penetrometriarvo, Cone-index, lb/sq. in	σ	johtokyky, S/m
E	kimmomoduli, E-moduli, kN/m ²	τ	pulssin leveys, ns
E _c	turpeen muodonmuutosmoduli, kN/m ²	φ	renkaan kosketuskulma, °
H	v. Postin maatumisaste	φ	maan sisäinen kitkakulma, °

1. JOHDANTO

Turvemaiden osuus metsätalouden maasta on Suomessa yli kolmannes (Metsätalostollinen . . . 1979). Alueellisesti suot ovat jakautuneet epätasaisesti. Eniten soita on Keski-Pohjanmaan piirimetsälautakunnan alueella, jossa turvemaiden osuus metsätalouden maasta on 54.3 % ja vähiten Helsingin piirimetsälautakunnan alueella (11.1 %). Metsänparannustoiminnan tuloksena turvemaista oli v. 1974 ojitettu 4.1 milj. ha eli 43.5 % ja kokonaisojituslaksi 1980-luvulla arvioidaan n. 5.3 milj.

ha eli yli puolet suoalasta. 1980-luvulla ojitetaan vielä n. 1 milj. ha, joten ojitettujen suometsien pinta-ala tulee yli 6 milj. ha (Heikurainen 1980a). Taulukossa 1 esitetään metsätalouden maan jakautuminen kankaisiin ja turvemaihin valtakunnan metsien inventoinnin mukaan vuosina 1971–1976. Taulukkoon on lisäksi laskettu sekä turvemaiden kokonaisosuus että ojitettujen turvemaiden osuus kangasmaista. Verrattaessa ojitettujen turvemaiden ja kangasmaiden suhteita päästään

Taulukko 1. Turvemaat ja niiden suhteellinen osuus kivennäismaasta valtakunnan metsien inventoinnissa v. 1971–1976 (Metsätalostollinen . . . 1979).

Table 1. Peatlands and their proportional shares of mineral soils (Metsätalostollinen . . . 1979).

Piirimetsälautakunta Forestry Board District	Kangasmaat (1) Mineral soils	Turvemaat (2) Peatland	Ojitetut turvemaat (3) Drained peatland	100 · $\frac{(2)}{(1)}$	100 · $\frac{(3)}{(1)}$
	1000 ha			%	
Ahvenanmaa	124	5	2	4.0	1.6
Helsinki	415	52	29	12.5	7.0
Lounais-Suomi	436	114	76	26.1	17.0
Satakunta	527	252	163	47.8	30.9
Uusimaa-Häme	460	108	72	23.4	15.7
Pirkka-Häme	658	167	117	25.4	17.8
Itä-Häme	546	83	60	15.2	11.0
Etelä-Savo	660	190	129	28.8	19.5
Etelä-Karjala	540	132	88	24.4	16.3
Itä-Savo	450	74	55	16.4	12.2
Pohjois-Karjala	1015	537	323	52.9	31.8
Pohjois-Savo	996	412	266	41.4	26.7
Keski-Suomi	974	360	248	37.0	25.5
Etelä-Pohjanmaa	575	506	326	88.0	56.7
Vaasa	362	147	81	40.6	22.4
Keski-Pohjanmaa	426	491	288	115.3	67.6
Kainuu	1150	921	471	80.1	41.0
Pohjois-Pohjanmaa	888	1315	610	148.1	68.7
Koillis-Suomi	1520	971	233	63.9	15.3
Lappi	4622	2511	433	54.3	9.6
Koko maa Whole country	17344	9348	4080	53.9	23.5

verrat lähelle turvemaiden painottuneisuutta puun korjuumäärien osalta.

Taulukossa 2 esitetään eri tutkijoiden antamien lukujen pohjalta laadittu ennuste turvemaiden puunkorjuusta (Ervasti ym. 1965, 1969, 1970, Heikurainen 1961, 1980b, Heikurainen ja Laine 1980). Turvemaita korjattaneen puuta siis v. 2015 n. 15–20 milj. m³ eli 20–25 % koko korjuumäärästä.

”Puunkorjuu turvemailta” -projektin tavoitteena on tutkia turvemaiden asettamia erityisvaikeuksia puunkorjuulle sekä keinoja ongelmien ratkaisemiseksi. Pääosa näistä ongelmista keskittyy maastoliikennöintiin, koneen liikkumiseen metsämaastossa puulta tai varastomuodostelmalta toiselle. Tieverkon tiheydessä soiden ylityksistä (kivennäismaalta toiselle suon yli kulkeminen) johtuva liikennöimistarve vähenee. Jonkin verran vähenee myös suolle rakennettujen talviteiden tarve, mutta suometsien puunkorjuun lisääntyessä kokonaisliikennöintimäärä turvemailta kasvaa tulevaisuudessa huomattavasti.

Soiden liikennöinnin ongelmat johtuvat suurelta osalta turvealustan heikosta kantavuudesta. Hanneliuksen (1975) mukaan (vrt. myös Silvennoinen 1980, Saarilahti 1981a)

- nykyisen puunkorjuukaluston pintapaineet ovat liian korkeat sulalla turvealustalla liikennöintiä varten,
- talvikorjuuta haittaa sääsuhteiden epävakaisuus, sillä suot eivät routaannu riittävästi joka talvi ja
- ojitus muuttaa suon routaantumismomenteja ja roudan kantavuutta epäedulliseen suuntaan.

Niinpä eräs tutkija on epäillyt osan ojitusalueista jäävän puunkorjuukelvottomaksi (Eronen 1976).

Maastoliikennöinnissä koneen liikkumiskykyä voidaan tarkastella

- teknisenä tai
- taloudellisenä ongelmana.

Teknisen liikkumiskyvyn kriteerinä voidaan pitää rajaa, jossa koneen liike pysähtyy, esim. suolla heikosta kantavuudesta johtuvan suuren painuman vuoksi. Taloudellinen liikkumiskyky on laajemman maaston ja koneen ominaisuuksien analyysin perusteella määriteltävä taloudellinen kuljetustulos.

Vielä laajempi on kuljetus-ympäristö -tarkastelukulma, jossa otetaan huomioon myös kuljetustavan vaikutus ympäristöön (esim.

Radforth ja Burwash 1973).

Teknistä liikkumiskykyä voidaan parantaa esim. siirtymällä leveätelaisiin ajoneuvoihin (esim. Bryan 1976, Swamp dozer 1979) ja sen kriteerinä voidaan pitää kantavuudeltaan heikointa maastokohtaa. Taloudellisen liikkumiskyvyn määrittelyä edellyttää olosuhteiden luokittelua kulkukelpoisuustekijöiden jakautumien perusteella ja kullekin luokalle parhaiten soveltuvan konetyypin valintaa (esim. Bekker 1961, 1969, 1976, Knight ja Meyer 1961, Fiske ja Fridley 1975, Hassan 1978). Soilla kaltevuudet ovat yleensä pieniä ja mätäiden estevaikutus esim. keskiraskaalle kuormaakantavalle metsätraktorille on vähäinen (vrt. Hemstock 1968, Kaje 1968). Kun lisäksi oijen muoto ja sijainti yleensä tunnetaan eikä useassa tapauksessa puuston estevaikutusta ole (avosuio, aukaistut ajourat), voidaan kulkukelpoisuustekijät tässä tutkimuksessa yksinkertaistaa koskemaan maapohjan kantavuusparametreja.

Sekä teknisen että taloudellisen kulkukelpoisuuden määrittäminen edellyttää kulkualustan keskimääräisen ja minimikantavuuden tuntemista (vrt. Siddall ym. 1965, Hannelius 1975). Luotettavien määritysmenetelmä on jatkuva mittaus, koska tällöin voidaan paikallistaa heikoin kohta sekä sen laajuus. Mikäli heikoin kohta on pienialainen, se voidaan erottaa omaksi (kierrettäväksi) luokakseen, jolloin keskimääräinen minimi pääluokassa nousisi. Yleensä mittaukset suoritetaan pistemäisinä,

jolloin harvaa näytesteistä käytettäessä on sattumanvaraista, löydetäänkö kantavuudeltaan ympäristöään heikommat kohdat. Sulan aikaisen liikennöinnin ongelmakohtia ovat mm. umpeenkasvaneet lammet. Turvemailta tällaista ympäristöään selvästi heikompien kohtien paikallistaminen on vaikeaa yleisesti käytössä olevien geobotaanisten luokitusten avulla (esim. Harrison 1955, Bonmartini 1961). Roudan aikaisen liikennöinnin ongelmakohtia ovat mm. pienet lammet (Macfarlane 1969a) ja sulana pysyvät lähteet. Talvella liikennöintiä koskeva maastotiedustelu on yleensä vaikeaa, koska lumi peittää alleen mahdolliset indikaattorit, eivätkä routaantumattomat lähdepaikat yms. ole erotettavissa.

Vaikka maastoliikennöintiä on tutkittu runsaasti eri tahoilla, ei edes mineraalimaille ole onnistuttu kehittämään metsätalouden tarpeisiin soveltuvaa ihanteellista menetelmää koneen suorituskyvyn arvioimiseksi (Harvesting . . . 1976, vrt. myös Radforth 1975, Raghavan ym. 1976, Golob 1978). Turpeen ja turvemaiden tutkiminen on kivennäismaitakin hankalampaa turpeen eloperäisyyden vuoksi (esim. Ozden ja Wilson 1970, ks. myös esim. Landva ja Macfarlane 1975). Kuitenkin turvemaiden kulkukelpoisuudesta tarvitaan entistä tarkempia tietoja lisääntyvän puunkorjuun suunnittelun ja konekehittelyn apuvälineeksi. Lisäksi kantavuusarviot tarvittaisiin jatkuvana pienialaisten heikkojen kohtien paikallistamiseksi.

Taulukko 2. Arvioitu hakkuusuunnite suometsistä ja sen osuus koko hakkuusuunnitteesta eri metsänparannusvaihtoehtojen mukaan (Ervasti ym. 1965, 1969, 1970; Heikurainen 1961, 1980b; Heikurainen ja Laine 1980).

Table 2. Estimated harvest volume from peatlands and its per cent of total volume harvested for two forest improvement alternatives (Ervasti et al. 1965, 1969, 1970; Heikurainen 1961, 1980b, Heikurainen and Laine 1980).

Vuosi Year	Perusohjelma – Basic program			Maxiohjelma – Optimum program		
	Hakkuusuunnite Planned harvest volume		Osuus kokonais- määrästä Per cent of total	Hakkuusuunnite Planned harvest volume		Osuus kokonais- määrästä Per cent of total
	Suometsät Peatland forests	Koko maa Whole country		Suometsät Peatland forests	Koko maa Whole country	
	milj. m ³ /a – mill. m ³ /a		%	milj. m ³ /a – mill. m ³ /a		%
1980	7.4	53.2	14	9.1	62.1	15
1985	8.3	53.4	15	11.3	65.1	17
1990	9.4	53.6	17	13.0	67.8	19
1995	10.3	55.1	18	14.4	69.5	21
2000	11.1	57.3	19	15.4	71.8	21
2005	12.3	58.2	21	16.6	74.1	22
2010	13.5	59.3	23	17.6	79.0	22
2015	14.5	61.9	23	18.8	87.7	21

2. KATSAUS METSÄTIETEELLISIIN TURVEMAIKEN LIKENNÖINTI-TUTKIMUKSIIN MAASSAMME

Suomessa turvemaiden liikennöintiä koskeva tutkimustoiminta on ollut vähäistä.

Talviteiden rakentamistekniikkaa kehitettiin voimakkaasti 1940-luvun loppupuolella ja tutkimustoiminta sisälsi myös suon kantavuuteen ja kulkukelpoisuuteen liittyviä havaintoja (Putkisto 1948, 1952, Hakkarainen 1949a). Hakkarainen (1949a, 1949b, 1949c) tutki myös roudan murtolujuutta ja antoi routakerroksen paksuutta koskevia ohjeita. Näihin tutkimustuloksiin palataan kirjallisuustarkastelun talvikantavuutta käsittelevässä osassa.

Kesäaikaiseen liikennöintiin liittyviä havaintoja on tehty metsäojitustoiminnan kehitystyön yhteydessä (Pihkala 1949, Huikari 1958). Huikari ym. (1963) käsittelevät ojitusoppaassaan lyhyesti myös turvemaan kantavuustekijöitä. Näihin palataan niin ikään kirjallisuuskatsauksessa.

Koska turvemaita pidetään yleensä kantavuudeltaan liian heikkoina, ei ajotestejä järeille puunkorjuukoneille ole juuri soilla järjestetty. Haarlaan (1971, 1972) mukaan matalat, kapeat suojuotit eivät kesäaikana haitanneet pyörätraktoreiden kulkemista.

3. TUTKIMUSTEHTÄVÄN ASETTELU JA RAJAUS

Tässä tutkimuksessa tehtäväksi asetettiin selvittää radioaalto menetelmien soveltuvuutta turvemaiden kulkukelpoisuuden arviointiin. Ongelma on pelkistettävissä seuraavaksi:

- voidaanko näillä menetelmillä saada suosta sellaista informaatiota, jonka avulla on mahdollista päätellä, eroavatko suon eri osat kulkukelpoisuudeltaan (kantavuudeltaan) toisistaan?

Informaatio voi olla

- laatuasteikollista, jolloin voidaan todeta, että kulkukelpoisuus pisteessä $A \neq B \vee A = B$,
- järjestyksasteikollista, jolloin voidaan päätellä, että

$$A > B \vee A = B \vee A < B$$

- suhdelukuasteikollista, jolloin voidaan päätellä, että kulkukelpoisuus pisteessä $A = m \cdot B$.

Puunkorjuun suunnittelun kannalta optimaalinen menetelmä olisi operaatiohetken

kulkukelpoisuuden ennustaminen t. simuloinnin suunnitteluhetken parametrien ja säätilapäivityksen pohjalta. Tässä tutkimuksessa rajoitutaan kuitenkin mittaushetken kulkukelpoisuuteen. Sää- tai muiden tekijöiden muutoksista johtuvat liikennöitävyyden vaihtelut jätetään tarkastelun ulkopuolelle. Koska suolla yleensä kantavuus on kulkukelpoisuuden minimitekijä (vrt. s. 9), tämän tutkimuksen kohteena kulkukelpoisuus voidaan rinnastaa yleisesti kantavuuteen. Suon kantavuuden ja kulkukelpoisuuden vuodenaikaiset vaihtelut ovat suuria, kuten taulukosta 3 ilmenevät Scholanderin (1974) yhdeltä suolta eri vuodenaikoina mitaamat E-moduli arvot osoittavat. Tutkimuksessa rajoitutaan tarkastelemaan kulkukelpoisuutta satunnaisissa kesä- ja talvikauden olosuhteissa.

Radioaalto menetelmät rajataan VHF–UHF-taajuusalueille, joiden taajuudet ovat 30–3 000 MHz, sekä menetelmiin ja laitteisiin, jotka resurssien puitteissa on ollut mahdollista saada tutkimuksissa käytettäviksi.

Taulukko 3. Suon kantavuuden vuoden aikainen vaihtelu (Scholander 1974).
Table 3. Annual variation in bearing capacity of a peatland after Scholander (1974).

Kantavuus Bearing capacity	Kesällä – In summer		Keväällä roudan sulattua During spring thaw	Talvella routaantuneena In winter, when frozen
	Kuivana aikana Dry period	Sateen jälkeen After rain		
Kimmoduli, kN/m ² Modulus of elasticity, kN/m ²	770	570	510	2 420

4. TUTKIMUSMETELMÄN VALINTA

Radioaalto menetelmä perustuu sähkömagneettisten aaltojen etenemisen ja heijastumisen seuraamiseen maaperässä. Kulkukelpoisuus voidaan kuvata esim. koneen kehittämään nettovetokykyyn vaikuttavien maaston parametrien avulla. Tutkimusongelmaksi muodostuu tällöin

- miten maaperästä vastaanotetut signaalit tulkitaan,
- voidaanko tulkitun signaalin avulla päätellä maapohjan (suon) ominaisuuksissa tapahtuvan muutoksia ja
- voidaanko todeta riippuvuus tulkittujen ominaisuuksien muutosten ja koneen liikkumiseen vaikuttavien maapohjan ominaisuuksien muutosten välillä.

Ideaalinen tutkimusmenetelmä voitaisiin kuvata liikkuvana mittausyksikkönä, jossa olisi radioaalto mittauslaite ja maapohjan liikennöitävyysparametreja mittaava elin. Tällöin riittäisi, kun verrattaisiin laitteen antamaa kahta eri signaalia toisiinsa. Koneiden liikennöitävyyttä kuvaavien muuttujien jatkuvaan mittaamiseen on ehdotettu erilaisia mittausajoneuvoja (esim. Pavlics 1961). Tällaisen maaperän parametreja jatkuvasti mit-

taavan ajoneuvon hankkiminen tähän tutkimukseen oli sekä teknisesti että taloudellisesti mahdotonta. Tämän vuoksi tutkimusmenetelmäksi valittiin tieteiden välinen sovellutustutkimus, jossa voidaan erottaa kolme kirjallisuustutkimuksen luonteista teoreettista osaa sekä empiirinen, luonteeltaan ns. "feasibility study" -osa.

Tutkimuksen teoreettisessa osassa selvitetään

- geotekniikan ja terramekaniikan alaan kuuluvan kirjallisuustutkimuksen avulla suon ominaisuuksien ja koneen liikkumiskyvyn välisiä suhteita,
- geotekniikan ja geologian alaan kuuluvan kirjallisuustutkimuksen avulla suon ja turpeen ominaisuuksien välisiä riippuvuuksia ja
- radiotekniikan ja geofysiikan alaan kuuluvan kirjallisuustutkimuksen avulla radioaalto menetelmän teoriaa ja mittausmekaniikkaa.

Tutkimuksen empiirisessä osassa tutkitaan maastokokein kolmella eri radioaalto menetelmällä suosta saatavaa informaatiota ja selvitetään sen soveltuvuutta liikennöitävyyden arviointiin kirjallisuustutkimuksen antamien viitteiden avulla.

5. KIRJALLISUUTEEN PERUSTUVA TUTKIMUS

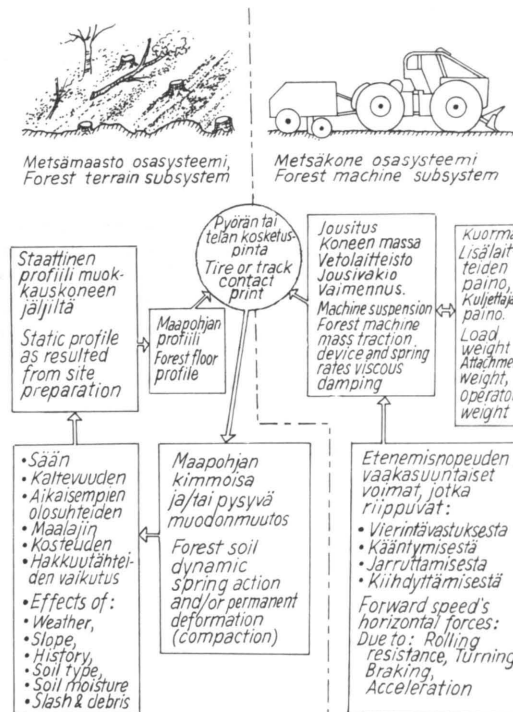
51. Koneen liikkumiskyvyn ja suon ominaisuuksien välinen riippuvuus

Koneen liikkuminen maastossa voidaan kuvata kahdella osajärjestelmällä, jotka välittyvät toisiinsa renkaan tai telan kosketuspinnan kautta, kuva 3 (Hassan 1979). Sekä kone- että maastosysteemi kuvataan yleensä huomattavasti yksinkertaistettuina: kone-osajärjestelmistä jätetään usein esim. kiihtyvyydet ja painopisteen siirtyminen tarkastelun ulkopuolelle. Maastotekijöiden osalta tyydytään tarkastelemaan yleensä vain maapohjaa kuvaavia

parametreja. Tällaisia malleja, niiden alajärjestelmiä ja niissä käytettäviä muuttujia ovat tarkastelleet lukuisat tutkijat. Esimerkkinä yleisesti käytetyistä muuttujista esitetään seuraavat Recen (1966) luettelemat kone-maastojärjestelmien muuttujat:

Ajoneuvoa kuvaavat muuttujat

- koko
- muoto
- massa
- materiaali



Kuva 3. Maasto-kone -järjestelmän muuttujat Hassanin (1979) mukaan.

Fig. 3. Factors affecting the forest terrain-machine system (after Hassan 1979).

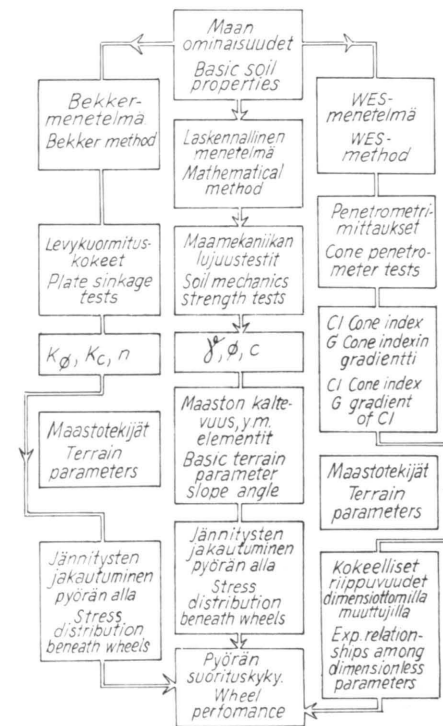
Maata kuvaavat muuttujat

- koheesio
- maan sisäinen kitkakulma
- tiheys
- kokoonpuristuvuus

Ajoneuvon liikkumista kuvaavat muuttujat

- vetokyky
- luisto
- vääntömomentti

Koneen suorituskyvyn ja maapohjan (t. maaston) ominaisuuksien välisen riippuvuuden määrittämiseksi on kehitetty lukuisia eri menetelmiä. Tunnetuimmat niistä ovat Bekker I. Bevametri- ja WES I. Wicksburg-mene-



Kuva 4. Pyörän suorituskyvyn määrittämisen eri menetelmillä (Karafiath 1971).

Fig. 4. Schemes of various approaches to the problem of wheel performance (after Karafiath 1971).

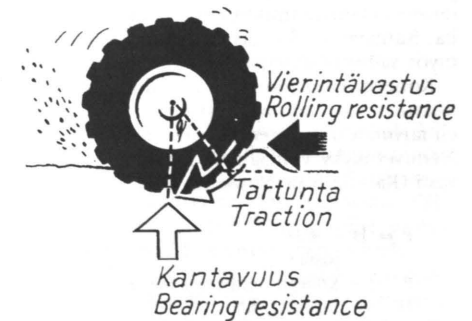
telmät (Trafficability Research Team 1961a, Löffler 1979, Golob 1981a, 1981b).

Bekker-menetelmä perustuu maan muodonmuutosvakioiden ja WES-menetelmä maan tunkeumavastuksen mittaamiseen. Laskennallisia menetelmiä, jotka perustuvat geotekniikan lujuusparametreihin, esitetään Karafiathin (1971) (myös Karafiath ja Nowatzki 1978) plastisuusteoriaan pohjautuva menetelmä. Kuvassa 4 havainnollistetaan näiden menetelmien käyttö pyörän suorituskyvyn määrittämiseksi.

Koska epähomogeenisen ja anisotrooppisen maapohjan jännitys- ja muodonmuutostensoreiden täydellinen kuvaaminen edellyttää 27 parametrin tuntemisen jokaisessa rakenteen pisteessä, on ongelma ratkaistavissa vain yksinkertaistusten avulla (Busch 1980). Täten joudutaan valitsemaan jonkinasteinen approksimaatio. Tässä yhteydessä voidaan käyttää hyvin yksinkertaistettua tarkastelutapaa. Tarkasteltaessa maan pinnalla liikkuvaan pyörään vaikuttavia voimia kolme niistä määrää koneen etenemisen (kuva 5, Definition... 1976, myös Thurner 1976, Ekström 1979), nimittäin

- vierintävästus,
- tartunta ja
- kantavuus.

Seuraavaksi tarkastellaan näiden voimien riippuvuutta maapohjan ominaisuuksista. Vierimisvastus on pääosin riippuvainen renkaan painuman suuruudesta, kuten seuraavan



Kuva 5. Pyörän suorituskyvyn vaikuttavat tekijät (Definition... 1976).

Fig. 5. Factors affecting wheel performance (Definition... 1976).

Kajen (1968) "puolitieteellisesti johtaman" mallin (4) perusteella voidaan todeta.

$$R = W \tan \frac{\varphi}{2} \quad (4)$$

jossa

R = ajoneuvon vierimisvastus, kN
W = ajoneuvon massa, kN
 φ = renkaan kosketuskulma (kuva 5)

Renkaan kosketuskulma suurenee painuman kasvaessa.

Tartunta renkaan alla kosketuskohdassa voi kehittyä korkeintaan maan leikkauslujuuden suuruiseksi, ja se voidaan laskea kosketuspinnan alalle kitka- ja koheesiokomponentin avulla. Reecen (1966) mukaan

$$H_{\max} = A c + W \tan \phi \quad (5)$$

jossa

H_{\max} = suurin mahdollinen tartunta, kN
A = kosketuspinnan ala, m²
c = maan koheesio, kN/m²
W = ajoneuvon massa, kN
 ϕ = maan sisäinen kitkakulma, °

Kolmas turpeella määrääväksi muodostuva voima on maapohjan kyky vastustaa renkaan tunkeutumista maahan eli kantavuus, onhan vierimisvastus pääosin riippuvainen painuman suuruudesta. Ajoneuvon eteneminen on riippuvainen painuman suuruudesta myös silloin, kun painuma kasvaa suuremmaksi kuin ajoneuvon maavara. Kantavuutta kuvataan maapohjan muodonmuutosominaisuuksien, kuormitus-painumasuhteen avulla, joita kuvaavina arvoina voidaan käyttää mitausmenetelmän mukaan esim. kimmomodulia. Kantavuutta kuvaavana arvona käytetään myös sallittua pintapainetta.

Koneen eteneminen on mahdollista ainoastaan, jos nettovetokyky on positiivinen eli tartunta on suurempi kuin vierimisvastus. Nettovetokyky voidaan kuvata esim. seuraavasti (Karafiath ja Nowatzki 1978):

$$P = H - R(H) \quad (6)$$

jossa

P = koneen nettovetokyky, kN
H = tartunta, kN
R(H) = vierimisvastus, kN, joka on riippuvainen painumasta ja tartunnasta

Yhteenvetona voidaan todeta, että maapohjan lujuus- (leikkauslujuus, kantokyky) ja

muodonmuutosominaisuudet ovat liikennöinnin kannalta tärkeimmät. Kivennäismaalla tärkeimmäksi tekijäksi muodostuu leikkauslujuus (esim. Karafiath ja Nowatzki 1978). Turpeella myös muodonmuutosominaisuuksilla on huomattava osa, koska turpeen lujuus mobilisoituu yleensä vasta huomattavien painumien seurauksena (Kostiainen 1972). Seuraavaksi tarkastellaan eri tutkijoiden tuloksia suon kesän ja talven aikaisen kulkukelpoisuuden arvioimisesta.

Kesäaikainen liikennöinti

Huikarin ym. (1963) antamat telaketjutraktoreille soveltuvat suurimmat sallitut pintapaineet eri suotyypeille esitetään taulukossa 4. Putkiston (1952) mukaan jäätymättömän turvemaan kantavuus (~ sallittu pintapaine) on 10–40 kN/m².

Maanrakennustoiminnassa heikosti kantavilla koheesiomailla (savi!) suositeltava koneiden pintapaine on < 3.3 × maan leikkauslujuus (Salaspuro 1963).

Macfarlanen (1964) mukaan pintapaine saa olla enintään 19.5 kN/m² luonnontilaisella (kanadalaisella) suolla. Radforth (1969b) antaa seuraavat ohjeavrot:

- luonnontilaisilla soilla 10.5 kN/m²
- kuivahtaneilla soilla 39.0 kN/m²

Mikäli suolla on avovettä, on käytettävä amfibioajoneuvoa. Kanadassa maastokuljetuksissa tela-ajoneuvoilla suursaratyyppisellä¹ suolla voidaan käyttää jopa 34.5 kN/m²:n pintapaineita (Hemstock 1969).

Green (1963) antaa Irlannin turvetuotannossa käytettävien koneiden pintapaineelle seuraavat ohjeavrot:

- luonnontilaisten soiden (w = 1 150–1 570 %) valmistelu 8.6 kN/m²
- kuivattujen soiden valmistelukoneet 15.2 kN/m²
- turvetuotannossa käytettävät koneet 12.4 kN/m²

Edellä annetut arvot ovat sovellettavissa lähinnä jäykkätela-ajoneuvoille. Rowland (1972, 1975) on kehittänyt menetelmän, joka soveltuu sekä pyörä- että tela-ajoneuvoille. Tällöin on laskettava ensin maksimikeskipintapaine (MMP, ks. liite 2, s. 87), joka saa olla

¹ Radforthin luokituksen (ks. liite 1, s. 87) mukainen luokka FI.

Taulukko 4. Telaketjutraktoreiden suurin sallittu pintapaine eri suotyypeillä (Huikari ym. 1963).
Table 4. Permitted ground pressure of tracked vehicles on different peatland site types (Huikari et al. 1963).

Suotyypin tunnus Site subtype	Suotyypin päämuoto – Main site type		
	Neva Fen	Korpi Spruce swamp	Räme Pine swamp
Sallittu pintapaine, kN/m ² – Permitted ground pressure, kN/m ²			
Letto- ja lehto Rich fen	15	15	20
Ruoho- Herb-rich	30	30	30
Suursara- Sedge	30	40	40
Mustikka- Myrtillus		30	
Puolukka- Vitis idea		30	
Pallosara- Carex globulus		40	40
Piensara- Small sedge	25	30	30
Tupasvilla- Eriophorum	25	30	30
Rahka- Sphagnum	15		15
Rimpinen Rimpi bog	5		5

– kanadalaisilla soilla

- 45–50 kN/m² yhtä kulkukertaa varten,
30 kN/m² jatkuvaa toimintaa varten,
mutta vain
10 kN/m² mikäli suon pintakerroksen
alla on heikompia kerroksia

– eurooppalaisilla soilla

- 10 kN/m².

Metsäkoneiden liikennöintiä varten turvemaiden kantavuutta kuvaavana arvona annetaan ruotsalaisessa käsikirjassa seuraavat arvot (Terrängmaskinen . . . 1971):

- metsää kasvava suo 40–70 kN/m²
- muut suot 10–40 kN/m².

Ajokokein tai kokemuksen perusteella kerätty tieto eri suotyypeille soveltuvista pintapaineista on yksinkertaisuutensa vuoksi usein riittävä karkeaan konetyypin valintaan. Tällöin myös pienialaiset kuviot tulisi pystyä erottamaan. Kaikki kantavuuden vaihtelut eivät kuitenkaan erotu kasvillisuuden perusteella (vrt. s. 9). Koneen painopisteen sijainnista johtuen todellinen pintapaine voi erota laskennallisesta keskimääräisestä pintapaineesta, mikä varsinkin turvealustalla vaikuttaa koneen ominaisuuksiin (esim. Thomson 1961, Tsunematsu ja Matsui 1961, Wilson 1968,

Bekker 1975, vrt. myös Haarlaa 1972 ja Vuori 1976). Ilmiön teoreettista taustaa selittää Meyerhofin (1961) havainto, että maapohjan kantokyky pienenee kaltevan kuormituksen alla.

Kirjallisuudesta poimittu aineisto on riittämätön laajan analyysin tekemiseksi sallituista pintapaineista eri olosuhteissa. Kuitenkin voidaan todeta, että

- rimpisillä ja sellaisilla soilla, missä pintakerroksen alla on heikompia kerroksia, pintapaine saolla 5–10 kN/m²,
- märillä nevoilla 30 kN/m² ja
- kuivilla rämeillä ja saraisilla nevoilla 40 kN/m² sekä
- puustoisilla soilla yli 40 kN/m² aina 70 kN/m²:iin saakka.

Penetrometri- l. WES-menetelmä, jossa maan kantavuutta ja leikkauslujuutta arvioidaan tunkeumavastuksen perusteella, soveltuu myös turvemaille (Hemstock 1969, Radforth 1969c, 1969d). Penetrometrissä on jouksuormitettu kartio, jonka pinta-ala on 3.23 cm² ja kärkikulma 30°. Kartiota painetaan maahan ja asteikolta luetaan tarvittava voima. Tunkeumavastuksen arvosta (lb/sq.in.) käytetään nimitystä Cone-index (CI). Kulkukelpoisuus voidaan arvioida kokeellisesti vertaamalla maan CI-arvoa koneen liikkumiskykyyn tai puolikokeellisesti siten, että pyörän tai telan dimensioiden perusteella lasketaan koneen suoritusarvot.

Penetrometrin käyttöohjeiden (Soil assessment . . .) mukaiset CI-arvot ovat seuraavat:

Ajoneuvotyyppi	CI-arvo
4 x 4 maastoauto	40
Raskas pyörätraktori	45
Henkilöauto	75

Murfittin ym. (1975) antamat ohjearvot kanadalaiselle siltimaille ovat:

Kantavuuskuvaus	CI-arvo
Juoksurasja, käytännössä ei kantava	0– 3
Käveleminen vaikeaa	6– 9
Erikoisajoneuvo (WEASEL), 50 kulkukertaa	15– 24
D4 telatraktori, 50 ajokertaa	27– 33
D7 telatraktori, 50 ajokertaa	40– 51

Maastoauto ja 5 t kuorma-auto, 50 ajokertaa	54– 72
Raskaat maansiirtokoneet	75– 96
Henkilöauto	99–135
Ei ongelmia	150–

Schreiner (1967) antaa CI-arvon laske-
miseksi telakoneille turvemaille seuraavan yhtälön (7):

$$VCI = 14 + 0.0086 \frac{W}{pp} \quad (7)$$

jossa

VCI = alhaisin koneelle sallittava CI-arvo
W = ajoneuvon massa, N
pp = molempien telojen piirin pituus, m

Rowlandin (1972) mukaan CI-arvon turvemaille tulisi olla vähintään

$$VCI = \frac{0.58 \text{ MMP}}{1000} \text{ yhtä ajokertaa varten} \quad (8)$$

ja

$$VCI = \frac{1.0 \text{ MMP}}{1000} \text{ viittä ajokertaa varten} \quad (9)$$

joissa

VCI = alhaisin koneelle sallittava CI-arvo
MMP = ajoneuvon maksimikeskipintapaine, N/m² (ks. liite 2, s. 87).

Testiajoissa maastoradalla kuormatraktoreiden kiinnijuuttuminen tapahtui kohdassa, jossa CI-arvot 10–30 cm syvyydellä olivat 38–59 (Areskoug 1972).

Liitteessä 3 (s. 88) on laskettu esimerkkejä joidenkin tutkijoiden (Knight ja Rula 1961, Turnage 1972, Wismer ja Luth 1973) esittämällä menetelmällä metsäkoneen liikennöinnin edellyttämistä CI-arvoista.

Laajaa aineistoa mitatuista CI-arvoista soillamme ei ole. Haarlaa (1972) on mitannut kapeassa matalassa suojuotissa, joka ei estänyt kuormatraktorin etenemistä, CI-arvoksi 51–116.

Ruotsissa Scholander (1976a, 1976b) on saanut eri tyyppisillä soilla taulukosta 5 ilmeviä arvoja.

Rowlandin (1972) mukaan Kanadan soilla CI-arvot 0.15 m:n syvyydellä ovat yleensä 30–60 välillä.

Knight ja Meyer (1961) antavat CI:n moodiarvon 45 amerikkalaisille turpeille.

Koska laajempaa aineistoa soiden CI-arvoista ei ole, suoritettiin liitteessä 4 (s. 93)

Taulukko 5. Keskimääräinen CI-arvo erilaisilla soilla (Scholander 1976a).

Table 5. Mean Cone Index -readings of typical peatlands (after Scholander 1976a).

Suon tyyppi Type of peatland	Syvyys, cm – Depth, cm		
	10	20	30
CI-arvo – CI reading			
Rahkasuo Sphagnum type	27	44	57
Juotti Trough	50	52	56
Rimpisuo Rimpi fen	27	21	23
Silmäkeneva Hollow bog	35	42	50

osoitetulla tavalla sarja laskelmia, joiden perusteella voidaan arvioida, että Suomessa luonnontilaisilla soilla CI-arvot ovat suuruusluokaltaan 20.

WES-menetelmä on yleisesti käytössä yksinkertaisuutensa vuoksi. Kivennäismaalla sitä ovat käyttäneet maa- ja metsätalouden maaliikennöntutkimuksissa mm. Richardson ja Cooper (1970), Aldabagh ja Beer (1975), Fiske ja Fridley (1975), Hassan (1977) sekä Murillo-Soto ja Smith (1978) ja testitulokset ovat yleensä sopineet hyvin yhteen laskennallisten arvojen kanssa. Myös kritiikkiä on esitetty, mm. Bekker (1969) huomauttaa, että penetrometrin lukematarkkuus on huono ja lukemavirhe mahdollinen. Haarlaan (1972) mukaan suomalaisilla moreenimailla ei koneen liikkumiskykyyn ja mitatun CI-arvon välillä ollut riippuvuutta. Karafiath ja Nowatzki (1978) toteavat, että penetrometrillä saadaan hyviä tuloksia, mikäli maa ominaisuuksiltaan muistuttaa testimaalajeja (esim. kitkamaata tai koheesiomaata), mutta saattaa johtaa virheisiin välimaalajeissa samoin kuin epähomogeenisissa, kosteudeltaan syvyyssuunnassa vaihtelevissa olosuhteissa.

Yhteenvetona penetrometrimenetelmästä voidaan todeta, että sillä saadaan verraten yksinkertaisesti kohtalaisen luotettavaa pistemäistä perustietoa suon kulkukelpoisuusanalyysiä varten ja käytettävissä on myös useita kokeellisia laskentamenetelmiä koneen suorituskykyyn arvioimiseksi. CI-arvoa voitaisiin näin ollen käyttää yhtenä suon kulkukel-

poisuutta kuvaavana muuttujana myös tässä tutkimuksessa.

Ns. Bekker-menetelmää, jossa mitataan turpeen kantavuusvakiot, on turvemaille telajoneuvon suorituskykyyn laskemiseksi esitelty Bekker (1975). Maan kantavuusvakioiden mittaaminen edellyttää erikoisajoneuvoa, ja lisäksi laskentavaihe on monimutkainen, joten menetelmää ei voida pitää yksinkertaisena. Turvepohjan kantavuusvakioita ovat mitanneet Söhne ja Sonnen (1961), Söhne (1969) ja Niemi ja Bayer (1970).

Bekker-menetelmää on usein kritisoitu. Karafiath ja Nowatzki (1978) ovat sitä mieltä, että koko menetelmä on teorialtaan väärä ja saadut tulokset ovat vain sattumalta oikeita (esim. sivut 272, 283, 374, 375, 434, 470). Wismer ja Smith (1961) huomauttavat, että useat tutkijat ovat kohdanneet vaikeuksia yrittäessään laskea levykuormituskokeiden tuloksista Bekker-menetelmässä tarvittavia kantavuusvakioita. Menetelmä voi antaa virheellisiä tuloksia suurten painumien alla, eikä menetelmän edellyttämä paineenjakautuma vastaa renkaan alle muodostuvaa painepiiriä (esim. Reece 1970, Gee-Clough 1976).

Kuitenkin Bekker-menetelmä on eräiden tutkijoiden mukaan osoittautunut käytännössä luotettavaksi (esim. Holm 1970, 1972, Golob 1978). Sitä voidaan pitää luonteeltaan paremmin soveltuvana tutkimus- ja kehitystyöhön kuin puunkorjuun suunnittelun apuvälineeksi. Tässä tutkimuksessa menetelmän sovellutusyrityksiä haittaa se, ettei kirjallisuus-

desta ole löydettävissä riittävästi aineistoa arviointien perustaksi.

Siipikairalla mitattua turpeen leikkauslujuutta voidaan käyttää apuna koneen suorituskäytön arvioimiseen (esim. Thomson 1960, 1961). Tältä pohjalta ei kuitenkaan ole kehitetty varsinaisia menetelmiä.

Suuntaa-antava leikkauslujuuden arvo voidaan päätellä ns. haitallisten painumien (vrt. Saarilahti 1978 ja Salaspuron kaava s. 14) perusteella. Koska turpeen kokoonpuristuvuus on n. 10-kertainen saveen verrattuna (Helenelund 1974), koneen liikennöintiä rajoittavaksi tekijäksi tulee painuma eikä murta. Näin ollen haitallisten painumien perusteella voidaan asettaa

$$P_{sall} = 2c \quad (10)$$

jossa

P_{sall} = sallittu koneen pintapaine, kN/m²
 c = turpeen koheesio (leikkauslujuus), kN/m²

eli koneen pintapaineen tulisi olla enintään kaksinkertainen turpeen leikkauslujuuteen nähden. Vaikka menetelmä ei olekaan tarkka, voidaan kirjoittajan julkaisemattoman aineiston keskiarvojen perusteella laskea eri suotyyppeille taulukossa 6 mainitut suuntaa-antavat leikkauslujuudet ja pintapaineet. Voidaan todeta määrätty yhteensopivuus Huikarin antamien pintapainesuosituksen kanssa (ks. taulukko 5, s. 17).

Yhteenvedona voidaan todeta, että koneen suorituskäyttö turvemaidilla voidaan verraten luotettavasti määrittää mittaamalla turpeen lujuusparametrejä, leikkauslujuutta ja/tai kokoonpuristuvuutta. Näin saatujen arvojen käyttökelpoisuus konetyypin valintaan on riittävä, mutta haittana on mittausmenetelmien pistemäisyys. Luotettavan kuvan saaminen suon heikoimmista kantavista kohdista jää sattumanvaraiseksi.

Jotta keskiraskaat metsäkoneet voisivat liikennöidä suolla keskimääräisten arvojen tulisi olla vähintään seuraavat:

Taulukko 6. Eri suotyypin keskimääräinen minimileikkauslujuus 0.25–1.0 m syvyydellä ja sen perusteella arvioitu suurin sallittu pintapaine.

Table 6. Mean minimum vane shear strengths and permitted ground pressures based on them.

Suotyyppi Site type	Mitattu keskimääräinen leikkauslujuuden minimi	Arvioitu sallittu pintapaine
	Measured vane shear minimum	Calculated permitted ground pressure
kN/m ²		
Rimpineva, RiN	9.2	18
Lyhytkortinen neva, LKN	10.8	22
Kalvakkaneva, KN	12.2	24
Saraneva, SN	13.0	26
Rahkaneva, RN	15.5	31
Rahkaräme, RR	12.0	24
Sararäme, SR	12.9	26
Isovarpuinen räme, IR	14.1	28
Tupasvillaräme, TR	15.0	30
Korpi, K	20.0	40
Turvekangas, tk	17.5	35

English names, see Appendix 9 (page 104)

- CI-arvojen n. 50–75
- leikkauslujuuden n. 25–35 kN/m²
- eikä turpeen lujuusominaisuuksissa syvempiä kerroksia kohti saa olla nopeaa alenemista.

Paitsi mittaamalla suoraan suon t. turpeen lujuusominaisuuksia kulkukelpoisuus voidaan määrittää myös epäsuorasti mittaamalla tai arvioimalla turpeen ominaisuuksia, joista lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet ovat riippuvaisia. Luvussa 52 (s. 20) tarkastellaan turpeen lujuus- ja kokoonpuristuvuusominaisuuksien riippuvuutta turpeen fysikaalisista ominaisuuksista.

Talviliikennöinti

Suon talviaikainen kantavuus riippuu routakerroksen paksuudesta, routaantuneen turpeen murtolujuudesta sekä alla olevan kerroksen ominaisuuksista (esim. Assur 1961, Bekker 1969). Näistä routakerroksen ominaisuudet ovat määräävät (esim. Väisänen 1964).

Routan murtolujuus on riippuvainen paitsi turpeen kosteudesta, maatumisuudesta ja rakenteesta, myös lämpötilasta ja kuormitusnopeudesta Macfarlanen (1968) mukaan. Koneen liikennöinnissä kuormitusajat ovat melko lyhyitä, joten kuormitusnopeuden merkitys on vähäinen. Edelleen Macfarlane toteaa, että routaantuneen turpeen puristuslujuus on 350–400 -kertainen sulan turpeen lujuuteen verrattuna.

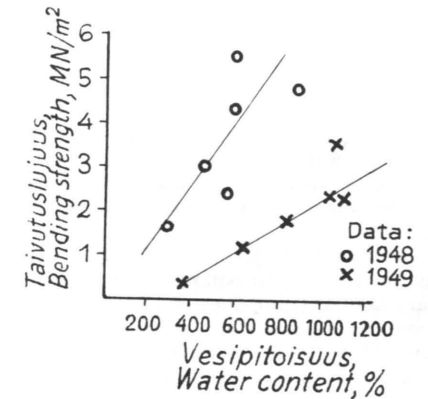
Hakkarainen (1949c) on mitannut routaantuneen turpeen murtolujuuksia, ja niissä on todettavissa selvä riippuvuus turpeen taivutuslujuuden ja vesipitoisuuden välillä, kuva 6.

Terwel (1977) totesi taivutusmurtolujuutta mitattaessa suuremmista kappaleista, että tulosten hajonta oli erittäin suurta eikä turvelajilla ja kosteudella ollut merkittävää vaikutusta koekappaleiden lujuuteen.

Hakkaraisen (1949a) mukaan routaantuneen turvekroksen kantavuus lisääntyy turpeen

- vesipitoisuuden kasvaessa ja
- maatumisasteen aletessa.

Routakerroksen paksuus, joka kantaa 10 t autokuorman selviää taulukosta 7 (Hakkarainen 1949c). Eri painoisille ajoneuvoille Hakkarainen (1949b) antaa taulukossa 8 mainitut routakerroksen minimiarvot.



Kuva 6. Routan taivutusmurtolujuuden riippuvuus vesipitoisuudesta (Hakkarainen 1949c).
 Fig. 6. Dependence of frost bending strength on water content after Hakkarainen (1949c).

Taulukko 7. 10 t autokuorman kantava routakerroksen paksuus eri tyyppisissä olosuhteissa (Hakkarainen 1949c).

Table 7. Minimum frost layer thickness for a 10 t truck (Hakkarainen 1949c).

Suotyyppi Site type	Turpeen vesipitoisuus, % Water content, %	Routakerroksen paksuus, cm Frozen layer, cm
Neva Sedge fen	420–604	35–26
Räme Pine bog	530–860	41–28
Rämeojikko Drained pine bog	290–600	48–30

Taulukko 8. Routakerroksen kantavuus Hakkaraisen (1949b) mukaan.

Table 8. Bearing strength of frozen peat (after Hakkarainen 1949b).

Kuivan routaantuneen pintaturpeen paksuus, cm <i>Dry frozen peat layer, cm</i>	Kostean routaantuneen pintaturpeen paksuus, cm <i>Wet frozen peat layer, cm</i>	Kantavuuskuvaus <i>Description of bearing capacity</i>
10	5	Kantaa hevosen <i>Will bear a horse</i>
15–20	10	Kantaa 6 t hevoskuorman <i>Will bear 6 t horse sledge traffic</i>
20–35	15–25	Kantaa tyhjän 4 t kuorma-auton <i>Will bear a 4 t lorry, empty</i>
35–50	25–40	Kantaa 10 t kuorma-autoliikenteen <i>Will bear 10 t lorry traffic</i>

Huikari (1958) toteaa upottavienkin soiden kantavan kohtalaisen hyvin ojituskoneita, jos routakerros on 5 cm paksuinen. Macfarlane (1969a) mukaan märillä soilla 25–30 cm paksuinen routa kantaa yleensä raskaimmatkin ajoneuvot.

Hannelius (1975) totesi ojitetuilla soilla suuria vaihteluja roudan paksuudessa ja ominaisuuksissa. Ojitusalueiden huono routaantuminen ja heikko kantavuus on havaittu myös käytännössä (vrt. Saarilahti 1981a).

Roudan paksuus on siis talviliikennöinnin määräävä tekijä, mutta routakerroksen kantavuuteen vaikuttavat myös turpeen kosteus ja maatumisuus. Ojitusalueilla roudanaikaisen liikennöinnin kantavuuden arvioiminen on vaikeampaa kuin luonnontilaisilla soilla, koska ominaisuuksien, lähinnä vesipitoisuuden, vaihtelu on ojitusalueilla suurempaa.

52. Turpeen lujuusominaisuuksien riippuvuus turpeen laadusta

Epäsuorissa menetelmissä kulkukelpoisuutta päätellään turpeen lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien mittaamisen sijasta muiden ominaisuuksien perusteella. Arvioinnin tarkkuus on suuresti riippuvainen näiden lujuus- ja laatuominaisuuksien välisistä korrelaatioista. Etuna on, että usein turpeen muiden ominaisuuksien mittaaminen tai arvi-

oiminen on helpompaa kuin lujuustestit. Seuraavaksi tarkastellaan lyhyesti turpeen lujuusominaisuuksien ja metsätalouden piirissä yleisesti käytettyjen turpeen ominaisuuksia kuvaavien parametrien välisiä riippuvuuksia.

521. Turpeen leikkauslujuus

Maan leikkauslujuus on maan ominaisuus vastustaa maamassan sisäistä liukumista (Hanson ym. 1967). Käytännöllisesti katsoen kaikki maan teknisiin ominaisuuksiin liittyvät ongelmat edellyttävät maan leikkauslujuuden tuntemista. Myös koneiden liikkumisen kannalta leikkauslujuutta voidaan yleisesti ottaen pitää maan tärkeimpänä ominaisuutena (Karafiath ja Nowatzki 1978, s. 270, 285, 395 jne.).

Turpeen leikkauslujuus (geotekniikassa) voidaan määrittää monin eri tavoin, ja tulokset ovat suuresti riippuvaisia määrittämismenetelmästä, lähinnä kuormitusnopeudesta, ts. ehtiikö huokosvesi kuormitettaessa poistua (hidas l. d-koe, drained) vai onko kuormitusnopeuden lisäys niin suuri, ettei vesi ehdi poistua huokosista (nopea l. u-koe, undrained). Yleensä leikkauslujuus kasvaa normaalijännityksen (kuormituksen) lisääntyessä. Kuormitus aiheuttaa myös leikkausjännityksiä, ja jos ne kasvavat suuremmiksi kuin leikkauslujuus, maa murtuu. Yleensä oletetaan, että maan leikkauslujuus koostuu

- sisäisestä kitkasta, joka aiheutuu maarakeiden hankauksesta toisiaan vastaan ja
- koheesiosta, joka aiheutuu maarakeiden molekyyli- ym. voimista (Helenelund 1974).

Leikkauslujuuden kasvu voidaan laskea ns. Coulombin lujuslain (esim. Helenelund 1974) mukaisesti

$$s = c p \tan \phi \quad (11)$$

jossa

$$s = \text{maan leikkauslujuus, kN/m}^2$$

$$c = \text{maan koheesio, kN/m}^2$$

$$p = \text{normaalijännitys, kN/m}^2 \text{ (~pintapaine)}$$

$$\phi = \text{maan sisäinen kitkakulma}$$

Yhtälöstä huomataan, että koheesio on normaalijännityksestä riippumaton. Leikkauslujuus sen sijaan kasvaa kuormituksen johdosta maan kitkaominaisuuksista riippuen. Maalajit jaetaan usein koheesiomaihin (esim. savi) ja kitkamaihin (esim. hiekka) sen mukaan, kumpi komponentti on määräävä, sekä välimaalajeihin.

Turpeen kitkakomponentin määrittäminen on suuresti kuormitusnopeudesta riippuvainen. Varhaisemmissa tutkimuksissa turvetta on pidetty koheesiomaana, myöhemmissä sen sijaan kitkamaana todettujen suurten kitkakulmien johdosta (Adams 1961, Macfarlane 1969 b). Hitain kokein määrättyillä turpeen lujuusparametreillä ei koneiden liikkumisen kannalta ole samaa merkitystä kuin esimerkiksi tienrakennuksessa, koska koneiden liikkeessä huokosvesi ei ehdi poistua turpeen huonon vedenläpäisevyyden vuoksi. Suuri kitkakulma kehittyi vasta suurten kuormitusten alaisena. Nämä aiheuttavat turpeen kokoonpuristuvuuden vuoksi huomattavan painuman (Nurmento 1969).

Amarjan (1972) on todennut, että pienten kuormitusten alaisena turpeen leikkauslujuus koostuu lähinnä koheesiosta, mutta suurempien jännitysten alaisena lähinnä kitkasta. Nopeassa kuormituksessa, jos vesipitoisuus ei ehdi muuttua, leikkauslujuus on riippumaton normaalijännityksestä l. näennäinen kitkakulma on 0 (Korhonen ja Helenelund 1963, Amarjan 1972). Näin ollen, vaikka turpeelle onkin mitattu hämmästyttävän korkeita kitkakulman arvoja, jopa 53° (Adams 1961), sitä voidaan koneiden liikennöimisen kannalta tarkastella koheesiomaalajina. Turpeen leik-

kauslujuus *in situ* (nopea l. u-koe) voidaan mitata yksinkertaisesti siipikairalla. Näin mitattu leikkauslujuus vastaa lähinnä turpeen koheesiokomponenttia. Todettakoon, että muista maalajeista poiketen turpeella on kuituisuutensa vuoksi myös huomattava vetolujuus.

Siipikairan soveltuvuudesta turpeen lujuusominaisuuksien mittauksiin tutkijat ovat eri mieltä (Radforth 1969 b). Eräät tutkijat toteavat, että siipikaira on epäluotettava tai että sillä saatuja mittaustuloksia ei voi suoraan käyttää hyväksi geoteknisiin suunnitelmiin (vrt. esim. Ripley ja Leonoff 1961, Landva ja Macfarlane 1975, Wiesel 1975, Gardemeister 1977). Hyviä tuloksia raportoivat puolestaan mm. Lea (1962) ja Hardy (1964). Macfarlane (1964) kuvaa sekä hyviä että epävarmoja tuloksia.

Siipikairan soveltuvuutta maastoliikennöintitutkimuksiin on kritikoitunut Bekker (1969). Thomson (1961) toteaa turpeen siipikairalla mitatun leikkauslujuuden korreloivan hyvin ajoneuvon liikkumiskyvyn kanssa. Schreiner (1967) raportoi niin ikään positiivisista tuloksista. Käsillä olevan tutkimuksen tavoitteiden kannalta turpeen siipikairalla mitattua leikkauslujuutta voidaan pitää riittävän luotettavana turpeen lujuuden kuvaajana.

Tärkeimmät leikkauslujuuteen vaikuttavat turpeen ominaisuudet ovat (esim. Macfarlane 1963, 1964, 1969b, Radforth 1969c)

- turpeen rakenne,
- vesipitoisuus ja
- tuhkapitoisuus l. epäorgaanisen aineen määrä,

joista vesipitoisuus on merkittävin (Ozden ja Wilson 1970). Harwood (1964) totesi, että vesipitoisuus antaa vähän viitteitä leikkauslujuudesta, jolleivät maatumisuus ja tuhkapitoisuus ole tunnettuja. Amarjanin ym. (1972a) mukaan turpeen leikkauslujuuden ja maatumisuuden sekä vesipitoisuuden välillä vallitsee seuraava riippuvuus:

$$s = \frac{140}{w} (100 - 1.1 R) \quad (12)$$

jossa

$$s = \text{turpeen leikkauslujuus, kN/m}^2$$

$$w = \text{turpeen vesipitoisuus, \%}$$

$$R = \text{maatumisprosentti (ks. liite 5)}$$

Taulukkoon 9 on kaavalla (12) laskettu kosteudeltaan ja maatumisasteeltaan erilaisten turpeiden leikkauslujuuksia, ja vertailun vuoksi samaan taulukkoon on otettu myös muiden tutkijoiden esittämiä tuloksia (Amarjan 1972, Anderson ja Hemstock 1959, Saarilahti 1980).

Taulukossa on paksummalla ympäröity keskimääräiset heikosti maatuneen-maatuneen turpeen vesipitoisuuden esiintymisalueet (Assarsson 1944). Vertailun vuoksi taulukossa 10 annetaan Mäkilän (1980a) ja Tolosen (1981) aineistosta lasketut turpeen keskimääräiset vesipitoisuudet maatumisasteittain. Voidaan todeta, että vaikka leikkauslujuus pienenee maatumisasteen kasvaessa, niin yleensä maatuneempien turvekerrosten leikkauslujuus on suurempi niiden alhaisemman vesipitoisuuden vuoksi.

522. Tunkeumavastus

Myös turpeen tunkeumavastus I penetrometriarvo on turpeen maatuneisuudesta ja vesipitoisuudesta riippuvainen, kuten seuraavasta Amarjanin ym. (1972a) yhtälöstä voidaan todeta.

$$q = \frac{2500}{w} (100 - 1.4 R) \quad (13)$$

jossa

$$q = \text{turpeen tunkeumavastus, kN/m}^2$$

$$w = \text{turpeen vesipitoisuus, \%}$$

$$R = \text{maatumisprosentti (ks. liite 5, s. 95)}$$

523. Muodonmuutosmoduli

Turpeen muodonmuutosmodulille on Tkačenko (1972) esittänyt seuraavan yhtälön,

$$E_c \mathcal{K} = 4 R^{0.77} + \frac{690}{1.80 + 0.0059 w} \quad (14)$$

jossa

$$E_c \mathcal{K} = \text{muodonmuutosmoduli, kN/m}^2$$

$$R = \text{maatumisprosentti}$$

$$w = \text{vesipitoisuus, \%}$$

josta voidaan todeta muodonmuutosmodulin olevan riippuvainen turpeen vesipitoisuudesta ja maatuneisuudesta. Muodonmuutosominaisuuksien ja maatuneisuuden sekä vesipi-

toisuuden välinen riippuvuus todetaan useissa muissakin tutkimuksissa, (esim. Radforth ja Roe 1968, Solopov ym. 1968).

524. Turpeen tilavuuspaino

Turpeen perusominaisuutena voidaan yleensä pitää turpeen (todellista) tilavuuspainoa (bulk density), joka on 105°C lämmössä vakiopainoon kuivatun turpeen massa luonnontilaista tilavuusyksikköä kohti (kg/m³) (esim. Peatland terminology ... 1977). Varsinkin, jos tuhkapitoisuus on "normaali" (< 20 %), ts. turve ei sisällä sanottavammin tulvasien tuomaa kivennäisainetta, tilavuuspaino ilmaisee melko hyvin, paljonko kiinteää ainetta on tilavuusyksikössä, sillä turpeen kiintoteiheys on melko vakio 1.30–1.50 (esim. Päivänen 1973a). Mitä vähemmän kiinteää ainetta on tilavuusyksikössä, sitä kokoonpuristuvampaa ja heikompaa turve on, sillä vastaavasti veden ja kaasujen määrä on korkeampi I huokosluku, e_0 , on suurempi.

Kuvassa 7 esitetään kolmen tutkijan tuloksia tilavuuspainon ja turpeen maatumisasteen välisestä riippuvuudesta. Tolosen ja Saarenmaan (1979) aineisto on kerätty eri syvyyksiltä luonnontilaisilta soilta. Päivänen (1969) ensimmäisen tätä koskevan tutkimuksen aineistoon sisältyy sekä ojitettujen että luonnontilaisten ja toisen tutkimuksen (1973) aineistoon vain ojitettujen soiden pintakerroksesta

(< 0.45 m) otettuja näytteitä. Korpijaakon ym. (1981) aineistoon sisältyy sekä ojitetuilta että luonnontilaisilta soilta eri syvyyksiltä otettuja näytteitä. Selvästi poikkeavaksi osoittautuvat Päivänen aineistojen saraturpeet. Johtopäätöksenä em. tutkimuksista voidaan todeta, että

- rahkaturpeessa tilavuuspaino lisääntyy maatumisasteen noustessa, mutta saraturpeessa kuivatilavuuspaino on maatumisasteesta riippumaton ja
- ojitetuilla soilla tilavuuspaino on korkeampi kuin luonnontilaisilla.

Nämä johtopäätökset ovat vääriä, mikäli eri tutkijoiden näytteenottomenetelmät poikkeavat systemaattisesti toisistaan (vrt. Korpijaako ym. 1981). Kuitenkin esim. Karesniemen (1972) tutkimuksesta voidaan saada tukea em. päätelmille. Hän on tutkimuksessaan verrannut v. 1954–1956 luonnontilaisten ja v. 1970 15 v. ojitettuna olleiden soiden turpeiden ominaisuuksia. Tuloksista on todettavissa, että samaa maatumisastetta olevien turvenäytteiden tilavuuspaino oli korkeampi v. 1970 (ojitettu) kuin v. 1954–1956 ja huokoslavuus on vastaavasti pienempi. Myös turpeen kokoonpuristuvuudessa ero on selvästi havaittavissa, kuten kuva 8 osoittaa. Ojitetuilta soilta otettujen turvenäytteiden kokoonpuristuminen on huomattavasti pienempi kuin

Taulukko 9. Turpeen leikkauslujuus maatuneisuuden ja vesipitoisuuden funktiona (Amarjan 1972 (A), Amarjan ym. 1972 (B), Anderson ja Hemstock 1959 (C) ja Saarilahti 1980 (D)).¹

Table 9. Peat vane shear strength as a function of extent of humification and water content (Amarjan 1972 (A), Amarjan et. al. 1972 (B), Anderson and Hemstock 1959 (C) and Saarilahti 1980 (D)).¹

Vesipitoisuus w, % Water content, w, %	Turpeen maatuneisuus – Extent of humification							
	Raaka Raw		Keskinert. Partially humified		Maatunut Humified		Keskim. Average	Keskim. Average
	H=2, R=15	H=5, R=35	H=8, R=47					
	A	B	A	B	A	B	C	D
	Turpeen leikkauslujuus, kN/m ² – Vane shear strength, kN/m ²							
400	36.7	29.9	28.6	21.5	22.7	16.9		22
600	24.9	19.5	19.1	14.4	15.4	11.3	13.2	20
800	18.7	14.6	14.3	10.8	11.7	8.5	11.2	18
1 000	15.0	11.7	11.4	8.6	9.5	6.8	9.0	16
1 250	11.7	9.4	8.8	6.9	8.4	5.4	6.8	14
1 500	9.5	7.8	7.3	5.7	7.3	4.5	4.0	12
2 000	7.3	5.8	6.6	4.3	6.6	3.4		9

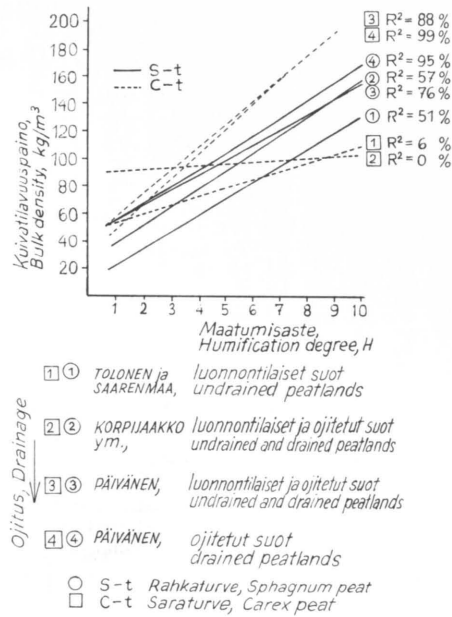
¹ Arvot on saatu merkitsemällä kaavoilla (3) ja (5) saatavat m_t -arvot yhtäsuuriksi ja ratkaisemalla näin saadusta yhtälöstä leikkauslujuuden riippuvuus vesipitoisuudesta.

¹ Obtained combining equation (3) and (5) and solving the equation.

Taulukko 10. Eri maatumisastetta olevien turpeiden keskimääräinen vesipitoisuus Mäkilän (1980a) (1) ja Tolosen (1981) (2) mukaan.

Table 10. Water content of peat at different degrees of humification after Mäkilä (1980a) (1) and Tolonen (1981) (2).

Maatumisaste, H Humification degrec, H	Vesipitoisuus, % – Water content, %	
	Mäkilä (1)	Tolonen (2)
1	2 050	1 900
2	1 610	1 570
3	1 320	1 330
4	1 115	1 150
5	960	1 010
6	840	900
7	745	810
8	670	730
9	600	670
10	550	610



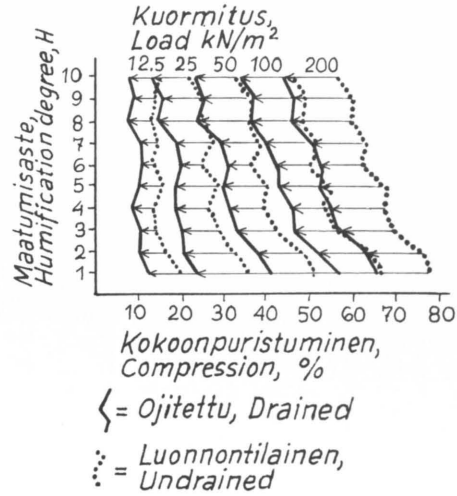
Kuva 7. Tilavuuspainon riippuvuus maatumisas- teesta luonnontilaisilla (Tolonen ja Saarenmaa 1980), sekä luonnontilaisilla että ojitetuilla (Päivänen 1969, Korpijaakko 1981) ja ojitetuilla (Päivänen 1973) soilla.

Fig. 7. Dependence of bulk density of humification degree for natural (Tolonen and Saarenmaa 1980), as well as natural and drained (Päivänen 1969, Korpijaakko 1981), and drained (Päivänen 1973) peatlands.

luonnontilaisten soiden turvenäytteistä mitat- tu.¹

Yhteenvetona turpeen laatu- ja lujus- sekä muodonmuutosominaisuuksien välisistä riip- puvuuksista voidaan todeta, että niissä vesipi- toisuus ja maatuneisuus näyttelevät huomattavinta osaa vesipitoisuuden muutosten olles- sa määrääviä. Kuivatus vaikuttaa turpeen lii- kennöitävyyteen paitsi alentamalla turpeen vesipitoisuutta myös muuttamalla turpeen fy- sikaalisia ominaisuuksia.

¹ Huom. Ödometrikokoiden mukainen turpeen kokoon- puristuminen ei suoranaisesti sovellu liikennöintitutki- muksiin, sillä ödometrissä kuormitus on hidas ja huokos- vesi ehtii poistua. Kuitenkin kokoonpuristuvuus indikoi turpeen rakenteen kiinteyttä, joten ominaisuus siltä osin korreloi myös liikennöitävyyden kanssa.



Kuva 8. Luonnontilaiselta ja ojitetulta suolta otet- tujen turvenäytteiden kokoonpuristuminen Ka- resniemen (1972) mukaan.

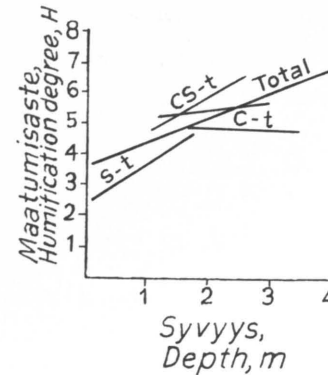
Fig. 8. Correlation between von Post's humification degree and compression under different loads in peat samples taken from undrained and drained peatlands (after Karesniemi 1972).

53. Suon stratigrafia liikennöinnin kannalta

Suossa turvekerrokset ja niiden ominaisuu- det vaihtelevat sekä pysty- että vaakasuunnas- sa (esim. Heikurainen 1960, Tolonen 1966, 1979). Kerrosjärjestys, stratigrafia, on riippu- vainen soistumistavasta, maaperän ravini- teisuudesta, alueen reliefistä ja ilmastossa sekä suon vesitaloudessa tapahtuneista muu- toksista (Lappalainen ym. 1978b). Vaihtelu voi olla makrotasoista, suoyhdistelmien, suo- tyyppien, maantieteellisten alueiden jne. vä- listä ja mikrotasoista, suon pinnan pienmuo- doista johtuvaa.

- Suon syntyvän mukaan suot jaetaan
- vesistöjen umpeenkasvamisen,
 - primaarisen soistumisen I. jääkauden jälkeisen paljaan maan,
 - sekundaarisen I. metsämaan soistumisen, ja jos- kus myös
 - tulvamaiden soistumisen

johdosta syntyneisiin (esim. Heikurainen 1960). Liikennöinnin kannalta primaarisesti



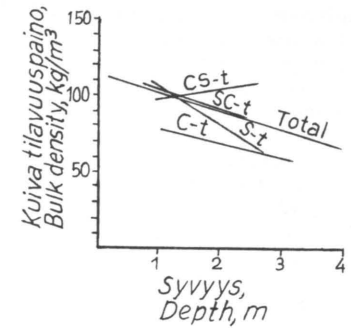
Kuva 9. Turpeen maatumisasteen riippuvuus näytesyvyydestä Mäki- län (1980a) mukaan.

Fig. 9. Relationship between humification degree and sample depth (after Mäki- lä 1980a).

ja sekundaarisesti syntyneitä soita voidaan pitää samanlaisina, sillä niissä turvekerrosten kasvu tapahtuu pinnassa ja stratigrafia on säännöllinen. Sen sijaan vesistöjen umpeen- kasvun, varsinkin pinnanmyötäisen, tulokse- na syntyy liikennöinnin kannalta epäedulli- nen rakenne, jossa suon pintakerroksen, elä- vän maton, alla on heikosti kantavia viskoot- tisesti käyttäytyviä liejukerroksia ja/tai puh- dada vettä. Pintakerros voi olla hyvinkin ohut. Vesikerroksia ja heikosti kantavia lieju- kerroksia voidaan tavata myös primaarisesti ja sekundaarisesti syntyneiden soiden alem- missä kerroksissa, mutta niiden merkitys lii- kennöitävyydelle on vähäisempi, sillä yläpuo- lisen turvekerros on yleensä paksu, vrt. esim. Kurkisuon profiili (liite 7, s. 103). Matalilla soilla saattaa olla kapeita syvänteitä, joiden pintakerroksen alaiset kerrokset ovat heikkoja lieju- ja savimuodostelmia, ja näitä voidaan niin ikään pitää liikennöinnin ongelmakohti- na.

Soissamme erotetaan yleensä kaksi suoyh- distelmätyyppiä, nimittäin koho- ja aapasuot. Edellisten yleisstratigrafia on keskeltä koholla oleva rahkaturpeesta koostuva rahkakakku, jonka alla on usein maatunutta saraturvetta. Yleisimmissä aapasuotyypeissä turve on sara- valtaista ja hyvin maatunutta myös pintaosis- sa.

Yleistä liikennöitävyyttä voidaan arvioida



Kuva 10. Kuivatilavuuspaino eri näy- tesyvyyksissä (Mäkilä 1980a).

Fig. 10. Relationship between bulk density and sample depth (after Mäkilä 1980a)

keskimääräisen stratigrafian perusteella. Mä- kilän (1980 a, b) mukaan Toholammin soita koskevan inventoinnin mukaan

- maatuneisuuden ja näytesyvyyden välillä oli positiivinen korrelaatio koko aineistossa ja muissa turvelajeissa paitsi saraturpeessa (kuva 9) ja
- kuivatilavuuspainon ja näytesyvyyden välillä oli selvä negatiivinen korrelaatio koko aineistossa ja muissa turvelajeissa paitsi saraturpeessa (kuva 10).

Tolosen ja Saarenmaan (1979) ja Saaren- maan (1980) tutkimusten perusteella on to- dettavissa, että saraturpeilla kuivatilavuuspai- no on syvyydestä riippumaton, kun sen sijaan rahkaturpeissa tilavuuspaino kasvoi hiukan näytesyvyyden lisääntyessä. Tolosen (1979, ku- va 7, s. 292) tutkimuksesta voidaan päätellä kohosoiden yleispiirteeksi, että kuivatilavuus- paino suon pintaosissa on alhainen (< 50 kg/m³) ja kasvaa pohjaa kohti (> 50 < 100 kg/m³), sen sijaan aapasoilla kuivatilavuus- paino on syvyydestä lähes riippumaton (~ 100 kg/m³). Ero Mäkilän tutkimuksiin voi se- littyä alueellisisa vaihteluista johtuvaksi.

Liikennöitävyyttä ajatellen tulokset voidaan yleistää siten, että rahkasoilla kerrosten sy- vyyssuuntainen vaihtelu (tiivimmät-hei- kommat) on suurempaa ja epämääräisempää kuin sarasoilla ja kuivatilavuuspaino voi joko lisääntyä tai alentua syvempiä kerroksia kohti. Sarasoilla kuivatilavuuspaino laskee lievästi syvempiä kerroksia kohti tai pysyy vakiona.

Kuivatilavuuspainon pienentymisestä johtuen, tuhkapitoisuuden pysyessä lähes muuttumattomana, turpeen vesipitoisuus kasvaa syvempiä kerroksia kohti. Näin ollen kerrosten ominaisuudet kulkukelpoisuuden kannalta yleensä huononevat syvempiä kerroksia kohti. Saarilahden (1981c) tutkimuksissa on todettavissa, että turpeen leikkauslujuus laskee syvempiä kerroksia kohti. Näin ollen suomalaiset suot poikkeavat kanadalaisista "muskegeista", joissa yleisenä piirteenä on leikkauslujuuden kasvu pohjaa kohti (Radforth 1969 a, myös Adams 1961, Anderson ja Haas 1962, Lea 1962). Tosin myös päinvastaisia olosuhteita esiintyy (esim. Macfarlane ja Rutka 1959, Ripley ja Leonoff 1961, Bekker 1969). Neuvostoliitossa on tutkittu systemaattisesti suon stratigrafian ja kulkukelpoisuuteen vaikuttavien muuttujien, kuten leikkauslujuuden ja tunkeumavastuksen, välisiä riippuvuuksia. Yleispiirteinä on, että leikkauslujuus on pinnassa korkein, ja se alentuu syvempiä kerroksia kohti. Pohjaosissa arvot voivat kohota esim. kivennäismaapohjan kuivattavan vaikutuksen johdosta (Amarjan ym. 1972b).

Leikkauslujuuden aleneva syvyysuuntainen gradientti näyttäisi vallitsevalta myös japanilaisissa soissa (Tsunematsu ja Matsui 1961). Aleneva leikkauslujuuden gradientti eurooppalaisissa soissa selittää myös Rowlandin (ks. s. 15) alhaisen pintapainesuosituksen eurooppalaisille soille.

Suomessa myös suuralueiden välillä on eroja, esim. Lapin suot ovat keskimäärin muita märempiä (Kaitera 1968) ja siten myös kantavuudeltaan heikompia.

Mikrovaihtelu johtuu suon pinnan pienimuotoisista tasoeroista: painanteista, tasopinnasta ja kohoumista, joissa kasvillisuus on erilaista. Koska turve on muodostunut sitä muodostavista kasvilajeista, sen laatu on erilaista eri mikromuotojen alla. Esimerkiksi sekundaarisesti syntyneissä kuljuissa kasvaa merkittäviä suosivia lajeja, ja näissä syntyvä turve on kantavuudeltaan heikkoa. Koska kuljut ovat myöhäissyntyisiä, voi alla olla kantavuudeltaan parempia kerroksia. Mättäiden ja jänteiden turve sisältää usein mm. lujuutta lisäävän N-(varpu) turvetekijän, ja se on yleensä keskimäärin muuta suota kantavampaa. Täten mikromuotojen perusteella voidaan tehdä joitain päätelmiä suon liikennöitävyydestä. Suossa tapahtuu jatkuva sekä

laaja- että pienialaista etenevää tai taantuvaa kehitystä, joka voi olla varsin nopeaa, joten kulkukelpoisuuden yksityiskohtainen analysointi pintakasvillisuuden perusteella voi antaa epäluotettavan kuvan. Kuitenkin nykyisin käytössä olevat menetelmät ovat lähes yksinomaan geobotaanisia, kasvillisuuden perusteella tehtäviä päätelmiä suon kosteudesta ja kantavuudesta (esim. Vähäsarja 1978).

Myös puunkorjuun nykyisessä suunnittelussa kantavuuden määrittäminen perustuu kasvillisuuden ja kosteuden arviointiin, kuten liitteessä 6 (s. 96) esitetyn tiedustelun tuloksista voidaan päätellä.

Suomessa ei varsinaisia eri suotyyppien keskimääräisiä lujuusparametrien luokittelututkimuksia ole tehty. Kanadassa useat tutkijat ovat koettaneet määrittellä turpeen lujuusominaisuuksien ja Radforthin (1952) suotyyppiluokituksen¹ välisiä riippuvuuksia esim. siipikairaa (Thomson 1955, Wyld 1956, Macfarlane 1963), ruuvattavaa repimislujuuden mittauslaitetta (Radforth 1969 a) tai penetrometriä (Rush ym. 1965, Niemi ja Bayer 1970) käyttäen. Kuitenkin tällaisia riippuvuuksia on ollut vaikea löytää, ja hajonta on muodostunut suureksi kasvipeiteluokan ja turpeen lujuusominaisuuksien välille, jollei esim. vesipitoisuutta ole otettu huomioon (Radforth 1969a). Periaatteessa luokitukset tulisikin suorittaa keräämällä ensin aineisto, joka ryhmitettäisiin kantavuusluokiksi. Sitten yritettäisiin löytää näille ulkoiset luokittelumuuttujat (esim. Bekker 1969). Toisena mahdollisuutena on pyrkiä kehittämään suoria menetelmiä, joilla vaivattomasti saataisiin riittävän tarkasti suo luokitelluksi esim. vesipitoisuuden perusteella, jolloin geobotaanista luokiteltua ei tarvittaisi.

54. Suon kerrosmalli radioaalloilla tapahtuvaan maaperän luotaukseen

Pyörän t. telan alle syntyvän painepiirin muoto ja syvyys riippuvat maapohjan ominaisuuksista ja kuormituspinnan leveydestä (esim. Wong 1978). Yleisesti pääjännitys kuormituspinnan keskiviivan alla on pudonnut puoleen pintapaineesta kuormituspinnan (pyörän t. telan) leveyttä vastaavalla syvyydellä ja on nolla kaksinkertaisessa syvyudessa (esim.

¹ Radforthin luokitus perustuu pintakasvillisuusluokintaan, jotka on esitetty liitteessä 1 (s. 87).

Bekker 1969). Jos metsäkoneiden pyörän tai telan leveys on n. 0.5 m, painepiiri ulottuu verraten syvälle, joten myös syvempien kerrosten ominaisuudet vaikuttavat liikennöitävyyteen. Ns. kriittisten kerrosten syvyudet, joista esim. CI-arvot olisi mitattava, ovat penetrometrin valmistajan suosituksen mukaan seuraavat (Soil assessment . . . , vrt. myös Schreiner 1967):

Ajoneuvon massa, kN	Kriittisten kerrosten syvyys, m
- 15	0 -0.15
15- 40	0.07-0.25
40- 70	0.15-0.30
70-110	0.25-0.40

Rowlandin (1972) mukaan CI-arvo tulee mitata syvyydeltä, joka lasketaan seuraavasti, kaava (15):

$$z_N = 0.075 + 0.0025 W \pm 0.075 \quad (15)$$

jossa

$$z_N = \text{kriittisten kerrosten syvyys, m}$$

$$W = \text{ajoneuvon massa, kN}$$

eli keskiraskaan metsätraktorin ($W = 168 \text{ kN}$) liikennöintimääritystä varten n. 0.5 m syvyydeltä. Kulkukelpoisuuden arvioiminen edellyttää siis syvyysuuntaista informaatiota suon ominaisuuksista.

Kasvillisuuskerroksen merkitys maa-kone-systeemissä on huomattava. Sen ovat todenneet useat tutkijat (Scholander 1970, 1973a, b, 1974, Björkhem ym. 1975, Hassan 1978, vrt. myös Harvesting . . . 1976). Kasvillisuuskerrosten veto- ja repimislujuus on korkea, mikä johdosta renkaan tartunta muodostuu suureksi. Tämä kerros jakaa myös pyöräpaineen tasaisemmin varsinaiseen maapohjaan. Erityisen merkittävästi kasvillisuuskerros vaikuttaa soilla, joissa elävistä juurista ja kuolleista lahoamattomista kasvinosista muodostuneen pintakerroksen lujuus on huomattavan suuri (esim. Jarret 1975, Jarret ym. 1977).

Luonnontilaisilla soilla, joissa pohjavesi on lähellä pintaa, tämän elävän kasvillisuusjuurikerroksen alaisina ovat varsinaiset turvekerrokset, joiden ominaisuudet ovat riippuvaisia pääasiassa turpeen vesipitoisuudesta ja ominaisuuksien muutokset ovat sidoksissa vesipitoisuuden muutoksiin (vrt. luku 52, s. 20).

Ojitetuille soille syntyy ojituksen seurauk-

senä kuivakuori, joka pääsääntöisesti parantaa kesän aikaista kantavuutta (esim. Lemke 1961, Radforth 1961b, vrt. myös Lukkala 1940, Harwood 1964). Huikari ym. (1963) ovat edellämainitun yleisen kantavuuden lisäyksen ohella havainneet joissakin tapauksissa ojituksen heikentäneen kantavuutta, nimittäin silloin, kun sarakasvillisuus kuolee ja juuristo lahoaa. Erityisesti heikosti metsittyneillä, vanhoilla ojitusalueilla voi kantavuus olla huono (Huikari 1958). Kuivakuoren paksumuoto ja kantavuusominaisuuksiin vaikuttaa pääosin kuivatuksen tehokkuus, siis pohjaveden pinnan syvyys. Kuivakuori on yleensä ohut ja kuivatus eri osissa sarkaa ja ojitusaluetta vaihtelee, joten kulkukelpoisuuden vaihtelu on voimakasta.

Kerroksellisuutensa ja kerrosten välisten suurten vaihteluiden vuoksi suo voidaan kulkukelpoisuuden analysointia varten kuvata kerrosmallilla. Yleensä suota pidetään kaksikerrossysteeminä, jossa koneen liikkumiskykyyn eniten vaikuttaa pintakerroksen lujuus. Leikkauslujuudeltaan korkeampi pohjakerros voi lisätä (esim. Ashdown ja Radforth 1965) tai viskoottisesti käyttäytyvä mutautunut pohjakerros vähentää (esim. Bekker 1969) yhteisvaikutusta. Tätä turpeen syvyysuuntaisen vaihtelun gradienttia voitaneen parhaiten kuvata vesipitoisuuden syvyysuuntaisen vaihtelun avulla (esim. Radforth 1961a).

Erittäin tärkeää olisi tietää turpeen (leikkaus-) lujuuden gradientin, l. kasvaako vai pieneneekö turpeen lujuus syvempiä kerroksia kohti. Mikäli leikkauslujuuden syvyysuuntainen aleneminen on määrättyä raja-arvoa suurempi, niin plastisuusteorian mukaan päädytään "ei-kulkukelpoiseen" tilanteeseen (Karafiath ja Nowatzki 1978). Samantapaiseen laskennalliseen tulokseen päästään kimmoteorian soveltuksen mukaan, mikäli maapohjan kimmomoduli laskee syvempiä kerroksia kohti. Leikkausjännitykset pintakerroksessa nousevat sitä suuremmiksi, mitä suurempi on ylemmän ja alemman kerroksen kimmomodulien suhde (esim. Lehtinen 1965).

Talvella kulkukelpoisuus voidaan yksinkertaistaa kaksikerrosmalliksi, jossa routakerros edustaa kulkemisen kannalta kriittistä kerrosta.

Kerrosmallin soveltaminen kulkukelpoisuuden arviointiin edellyttäisi, että vaaka-

informaatio syvyyssuunnassa saataisiin jatkuvana kerroksittain rekisteröimällä kerroksissa tapahtuvat kulkukelpoisuuteen vaikuttavat muutokset suon pinnalta tehtävänä luotauksena.

Seuraavaksi tarkastellaan yhtä mahdollista luotausmenetelmää, nimittäin radioaaltoihin perustuvaa maaperän luotauksia ja sen nykyhetken sovellutuksia suon ominaisuuksien mittaukseen.

55. Radioaaltojen käyttö maaperän luotauksessa

Geotekniikassa ja geofysiikassa on kehitetty erilaisia luotausmenetelmiä, joilla voidaan saada tietoa maapohjan ominaisuuksista. Radioaalloilla tapahtuvat maaperän tutkimiseen käytetyt menetelmät voidaan jakaa

- aktiivisiin menetelmiin l. tutkamenetelmiin ja
- passiivisiin menetelmiin l. radiometrimenetelmiin.

Tutkamenetelmissä maaperään lähetetään radioaaltoja joko lyhyin pulsein (lyhytpulssitutka) tai jatkuvana aaltona (jatkuva-aaltotutka) ja vastaanottimella seurataan maaperästä saatavia heijastuksia. Passiivisessa l. radiometrimenetelmässä on vain vastaanotin, joka mittaa maasta tulevaa termistä radiosäteilyä.

Radioaalloilla tapahtuva maaperän luotausperiaate on tunnettu kauan, sillä menetelmä kuvattiin jo 1920-luvulla (Nilsson 1978) ja ensimmäinen pulssitutka perustuva maaperän luotausmenetelmä patentoitiin v. 1937 (Burrell ja Peters 1979). Teknisesti maaperäluotaus on voitu toteuttaa kuitenkin vasta 1960-luvulla.

Terramekaniikassa ja maastoliikennöinnissä tutkakokeita tehtiin 1960-luvun alussa (Knight ja Rula 1961), mutta varsinaisia sovellutuksia ei toistaiseksi ole tietävästi kehitetty (esim. Karafiath ja Nowatzki 1978), vaikka joissakin kokeissa onkin saavutettu positiivisia tuloksia (Phase III 1965). Radioaaltoja on kokeiltu Kanadassa soiden tutkimiseen, mutta tulokset olivat negatiivisia, sillä aaltojen tunkeutuminen syvempiin kerroksiin oli huono (Korpijaakko ja Woolnough 1978). Maaperätutkimuksiin kehitettiin 1970-luvun alussa pulssitutka (Morey 1974), jota on menestyksellisesti käytetty myös maakaapelin ja vesi-

johtojen sekä niiden vuotokohtien paikallistamiseen (Morey ja Harrington 1972), maassa olevien esineiden paikallistamiseen (Chan ym. 1979), sekä turvevarojen inventointiin (Bjelm ja Ulriksen 1980). Nilsson (1978) pitää maaperäluotauksessa tutkimenetelmän mahdollisuuksia erittäin suurina. Useita metrejä paksun ikeroutakerroksen tutkimiseen ovat pulssitutkaa käyttäneet Scott ym. (1974) ja Davis ym. (1976). Pulssitutkaa on käytetty jään paksuuden mittauksiin sekä kilometrien paksuisilla napajäätiköillä (Evans ym. 1972) että alle metrin paksuisilla järvien (Cooper ym. 1976) ja meren (Campbell ja Orange 1974) jäällä. Jatkuva-aaltotutkaa on käytetty maahan haudattujen esineiden etsimiseen (Clarricoats ym. 1977) sekä jään paksuuden mittaamiseen (Venier ja Cross 1975).

Radiometriluotauksena on käytetty merijään paksuuden mittaukseen (Tiuri ym. 1976, 1978, Apinis ja Peake 1977) sekä kokeiltu kaukokartoituksessa kivennäismaiden kosteuden mittauksiin (Schmugge ym. 1976) ja soilla turvevarojen inventointiin (Jakkula 1979a, Tiuri 1979).

Seuraavaksi tarkastellaan lyhyesti radioaaltoihin perustuvan maaperäluotauksen teoriaa.

Radioaallon eteneminen väliaineessa on riippuvainen väliaineen dielektrisestä ominaisuudesta, jotka ovat riippuvia käytetyn aallon taajuudesta. Suhteellinen dielektrisyysvakio (ϵ_r) voidaan määrittää kaavan (16) avulla (Morey 1974) mittaamalla aallon nopeus väliaineessa.

$$\epsilon_r = \left(\frac{c}{v}\right)^2 \quad (16)$$

jossa

- ϵ_r = suhteellinen dielektrisyysvakio
- c = sähkömagneettisen säteilyn (valon) nopeus tyhjiössä, 0.2998 m/ns
- v = mitattu nopeus väliaineessa, m/ns

Kun aalto etenee maaperässä, osa sen energiasta muuttuu lämmöksi, jolloin aalto vaimenee. Vaimeneminen on riippuvainen väliaineen häviöistä, joita voidaan kuvata dielektrisyysvakion imaginääriosalla, ja se ilmaistaan usein häviötangenttina (Morey 1974)

$$\tan \delta = \frac{\sigma}{2 \pi f \epsilon_0 \epsilon_r} \quad (17)$$

tai (Jakkula 1979a)

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad (18)$$

jossa

- $\tan \delta$ = häviötangentti
- σ = johtavuus, S/m
- f = taajuus, Hz
- ϵ_0 = tyhjiön dielektrisyysvakio, 8.85×10^{-12} As/Vm
- ϵ_r' = suhteellinen dielektrisyysvakio
- ϵ_r'' = dielektrisyysvakion reaali-osa
- ϵ_r''' = dielektrisyysvakion imaginääriosia

Yleensä korkeammilla taajuuksilla radioaallon vaimeneminen on suurempi eli pitkät aallot tunkeutuvat yleensä syvemmälle maaperään kuin lyhyet (ks. kuva 12).

Eri maalajien dielektriset ominaisuudet ovat pääosin riippuvia maalajin vesipitoisuudesta, kuten taulukko 11 osoittaa (esim. Morey ja Harrington 1972, Morey 1974, Davies ym. 1977). Myös turpeessa vesipitoisuus määrittää sen dielektriset ominaisuudet¹ (kuva 11, Jakkula 1979a, Mattila 1981).

Yksinkertaistetusti voidaan ajatella, että kuiva turve muistuttaa dielektrisiltä ominaisuuksiltaan kivennäismaalajeja ja täysin märkä heikosti maaton turve vettä. Tällöin turpeessa eri jaksoluvuilla etenevien aaltojen tunkeutumissyvytyt sijoittuisivat kuvan 12 käyrien väliin (Jakkula 1979a). Jäätynne määrän turpeen dielektristen ominaisuuksien voidaan olettaa olevan lähellä jään ominaisuuksia.

Seuraavaksi tarkastellaan pulssitutkamenetelmän periaatetta, joka esitetään kuvassa 13 (Morey ja Harrington 1972).

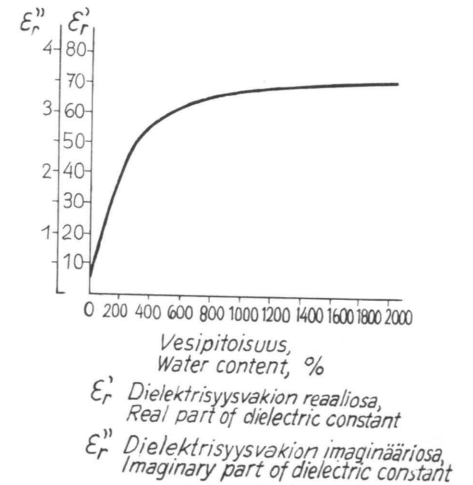
Lähetysantennista lähetetään maata kohti lyhyt muutaman nanosekunnin mittainen pulssi. Kun aalto kohtaa dielektrisiltä ominaisuuksiltaan erilaisten väliaineiden rajapinnan, osa tehosta heijastuu, osa tunkeutuu rajapinnasta läpi. Tehoheijastuskertoimen tasaisesta rajapinnasta voidaan laskea kaavalla (19) (Jakkula 1979a)

$$R = \left[\frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \right]^2 \quad (19)$$

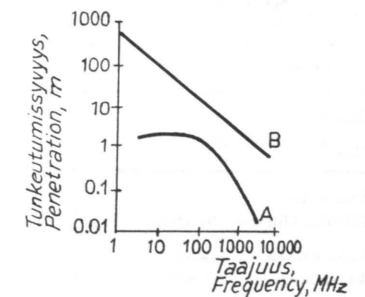
¹ Turpeen vaimennusominaisuudet saattavat riippua turvelajista ja maatumisasteesta ym. laatuvaavista ominaisuuksista ja täten dielektrisen vakion imaginääriosaa saattaa olla niistä riippuvainen.

jossa

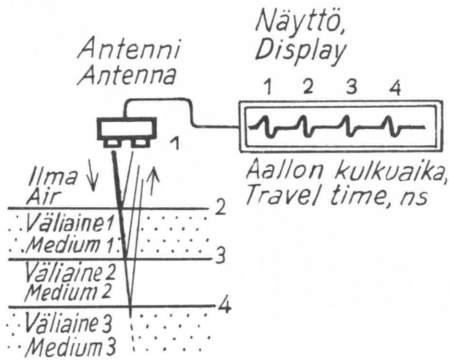
- R = radioaallon tehoheijastuskertoimen
- ϵ_{r1} = 1. kerroksen suhteellinen dielektrisyysvakio
- ϵ_{r2} = 2. kerroksen suhteellinen dielektrisyysvakio



Kuva 11. Turpeen suhteellisen dielektrisen vakion riippuvuus vesipitoisuudesta Jakkulan (1979a) mukaan ($f = 800$ MHz).
Fig. 11. Relative dielectric constant vs. water content in peat ($f = 800$ MHz) (after Jakkula 1979a).



Kuva 12. Aallon tunkeutumissyvyys veteen (A) ja kuivaan hiekkaan (B) eri taajuuksilla (Jakkula 1979a).
Fig. 12. Wave penetration vs. wave frequency in fresh water (A) and in dry sand (B) (after Jakkula 1979a).



Kuva 13. Tutkaluotauksen periaate.

Fig. 13. The radar subsurface profiling technique.

josta voidaan todeta, että tehoheijastus määrytösten dielektristen ominaisuuksien välisestä erosta. Täten osa maahan suunnattua pulsista heijastuu ilman ja maan rajapinnasta, osa jatkaa alempiin kerroksiin heijastuen aina osittain dielektrisesti eroavista rajapinnoista koko ajan myös vaimentuen.

Koska vesipitoisuuden muutos tai routaantuminen muuttaa väliaineen dielektrisiä ominaisuuksia, muodostuu maapohjaan heijastava rajapinta kohtiin, joissa vesipitoisuuden muutokset ovat suuria. Myös märän sulan ja routaantuneen turpeen sähköiset ominaisuudet poikkeavat toisistaan, joten heijastus tällaisesta rajapinnasta on suuri. Teoreettiset te-

Taulukko 11. Eri aineiden suhteelliset dielektrisyysvakiot (ϵ_r) UHF-taajuuksilla (Morey 1974, Jakkula 1979a).

Table 11. Relative dielectric constants at UHF-frequencies for various materials (after Morey 1974, Jakkula 1979a).

Väliaine Medium	Suhteellinen dielektrisyysvakio, ϵ_r Relative dielectric constant, ϵ_r
Ilma – Air	1
Kuivahko lumi – Dry Snow	1.2–1.5
Kuiva hiekka – Dry sand	2.5–
Märkä hiekka – Wet sand	–30
Kuiva turve – Dry peat	20 –30
Märkä turve – Wet peat	60 –80
Ikirouta – Permafrost	5 – 9
Jää – Lake ice	3.2
Vesi – Water	81

hoheijastuskertoimet kaavalla (19) laskettuna ovat

- lumi/routaantunut turve -rajapinnasta 0.057
- routaantunut/sula turve -rajapinnasta 0.405 ja
- sula turve/moreeni -rajapinnasta 0.055,

jolloin esim. edellä mainittujen rajapintojen voidaan olettaa näkyvän tutkaheijastuksissa.

Heijastuneet kaiut otetaan vastaan antenin avulla ja johdetaan tulostettaviksi esim. oskilloskoopille. Heijastukset näkyvät oskilloskoopin kuvapinnalla perättäisinä pulsseina, joiden välinen etäisyys kuvaa heijastavien kohteiden välistä etäisyyttä.

Kun tunnetaan aallon nopeus (joka riippuu ϵ_r :stä), voidaan heijastusten aikaerosta laskea aallon kulkema matka ja näin määrätä väliainekerrosten paksuudet.

Pulssitutkan erottelukyky, eli pienin tutkalla havaittava kahden kohteen välinen etäisyys voidaan laskea kaavalla

$$h = \frac{\tau c}{2\sqrt{\epsilon_r}} \quad (20)$$

jossa

h = pulssitutkan erottelukyky, m

 τ = pulssin leveys, ns

c = sähkömagneettisen säteilyn nopeus tyhjiössä, 0.2998 m/ns

 ϵ_r = väliaineen suhteellinen dielektrisyysvakio

Taajuusmoduloidussa jatkuva-aaltotutkassa (FM-CW -tutka) maahan lähetetään lyhyiden pulssien asemesta jatkuvaa radioaaltoa, jonka taajuutta muutetaan. Tutka vastaanottaa heijastuneet kaiut, joiden taajuutta verrataan sillä hetkellä lähetettävään taajuuteen. Taajuusero on sitä suurempi, mitä kauempaa kaiu on tullut, joten taajuuksien eron perusteella voidaan määrätä aallon kulku-aika, ja näin määrittää kerrospaksuuksia. Jatkuva-aaltotutkan erottelukyky voidaan laskea kaavalla (21) (Jakkula ym. 1980)

$$h = \frac{c}{2\Delta f \sqrt{\epsilon_r}} \quad (21)$$

jossa

h = jatkuva-aaltotutkan erottelukyky, m

c = sähkömagneettisen säteilyn nopeus tyhjiössä, 0.2998 m/ns

 Δf = taajuuspyyhkäisyn kaistaleveys, GHz
 ϵ_r = väliaineen suhteellinen dielektrisyysvakio

Radiometrimenetelmässä mitataan maasta tulevaa termistä säteilyä, jonka intensiteetti ilmaistaan kirkkauslämpötilalla (T_B). Kirkkauslämpötila riippuu kohteen emissiviteetistä ja fyysikaalisesta lämpötilasta seuraavasti (Jakkula 1979a)

$$T_B = \epsilon T \quad (22)$$

jossa

 T_B = mitattu kirkkauslämpötila ϵ = emissiviteetti

T = fyysikaalinen lämpötila

Taulukko 12. Luonnon esiintyvien kohteiden kirkkauslämpötilat taajuuksella 790 MHz ilman lämpötilan ollessa 289 K (Jakkula 1979a).

Table 12. Brightness temperatures at 790 MHz, $T_{air} = 289$ K (after Jakkula 1979a).

Kohde Object	Kirkkauslämpötila Brightness temperature T_B , K
Metsä – Forest	~ 280
Viljapelto – Grain field	~ 250
Asfaltti – Asphalt	~ 230
Ruoho – Grassland	~ 210
Vesi – Water	~ 110

Tasaisen ja huokaisen väliainepinnan emissiviteetti voidaan laskea kaavalla (23)

$$\epsilon = 1 - R \quad (23)$$

jossa

 ϵ = emissiviteetti

R = tehoheijastuskertoimen (ks. kaava (19))

Vaimenemisesta johtuen (ks. s. 29) ainoastaan tunkeutumissyvyyteen asti ulottuva kerrospaksuus vaikuttaa kirkkauslämpötilaan.

Emissiviteetti riippuu

- säteilyvälin pinnan karheudesta ja
- säteilyvälin pinnan dielektrisistä ominaisuuksista.

Näin ollen, jos pinnan karheus ja lämpötila pysyvät vakioina, radiometrin signaalin muutokset johtuvat suoraan dielektristen ominaisuuksien muutoksista, joiden voidaan ajatella kuvaavan suoraan kosteusvaihteluita (vrt. kuva 11). Koska vaimeneminen riippuu aallon taajuudesta, reagoivat eri taajuuksilla saatavat signaalit eri syvyisissä kerroksissa tapahtuviin dielektristen ominaisuuksien muutoksiin. Taulukossa 12 annetaan joidenkin tyyppisten kohteiden kirkkauslämpötiloja.

Radiometrin resoluutio määräytyy antennin keilan leveydestä ja antennin korkeudesta, ja voidaan määrätä kaavalla (24) (Jakkula 1979a)

$$r = 2h \tan \frac{\theta}{2} \quad (24)$$

jossa

r = radiometrin resoluutio l. antennin kuvaaman alueen halkaisija, m

h = mittauskorkeus, m

 θ = antennin keilan leveys, °

Radiometrin herkkyys, eli pienin havaittava kirkkauslämpötilan muutos on riippuvainen laitteen ominaisuuksista ja integrointiajan pituudesta. Koska antennia luodattaessa kuljetaan kohteen yli, optimiherkkyys saavutetaan silloin kun integrointiaika on sama kuin se aika, jossa antenni kulkee kuvaamansa alueen yli.

Kulkukelpoisuusparametrien muutokset näyttävät yleensä olevan sidoksissa turpeen ja/tai suon vesipitoisuuden muutoksiin (ks. s. 20, 54). Koska turpeen vesipitoisuuden toettiin määräävän radioaaltojen etenemisen

turpeessa, voidaan ajatella, että seuraamalla radioaaltojen etenemisessä tapahtuvien muutosten avulla dielektristen ominaisuuksien vaihteluita suossa saataisiin rekisteröidyksi kulkukelpoisuuteen vaikuttavia vesipitoisuuden muutoksia. Talvella taas routaantuneen ja sulan turpeen dielektriset ominaisuudet poikkeavat toisistaan, joten seuraamalla radioaaltojen etenemisessä tapahtuvia muutoksia voitaisiin havaita routaantuneessa pintakerroksessa tapahtuvia paksuus- ja laatuvarhenteita.

6. KOKEELLINEN OSA. MAASTOKOKEET ROUTA- JA MAAPERÄTUTKALLA SEKÄ RADIOMETRILLÄ

Koska teoreettisen tarkastelun ja kirjallisuustutkimuksen perusteella näytti ilmeiseltä, että radiosignaalin avulla suosta saadaan informaatiota, joka soveltuu suon kesä- ja/tai talviaikaisen liikennöitävyyden arviointiin, päätettiin suorittaa sarja maastokokeita. Näissä pyrittiin tutkimaan eri radioaaltojen toimintaa käytännössä. Maastokokeita tehtiin kolmella eri periaatteella toimivalla laitteella, nimittäin jatkuva-aalto- ja lyhytpulssitutkalla sekä radiometrillä. Tutkimuksen empiirisessä osassa tarkastellaan näitä maastokokeita ja niissä saatuja tuloksia. Kutakin koetta tarkastellaan erillisenä, ensin koejärjestelyä ja sen jälkeen kokeissa saatuja tuloksia.

6.1. Routatutkakokeet ja niiden tulokset

6.1.1. Routatutkan rakenne ja toiminta

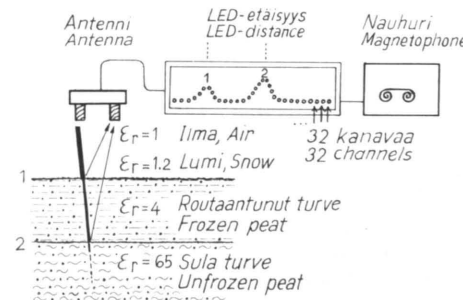
Tutkittua taajuusmodulointua jatkuva-aaltoa (FM-CW -tutkaa) nimitetään tässä yhteydessä routatutkaksi. Kokeiltu laite on suunniteltu ja rakennettu Teknillisen korkeakoulun radiolaboratoriossa. Koska tutkan teoria ja rakenne kuuluvat mikroaaltotekniikan piiriin, ja niitä on kuvattu tarkemmin Radiolaboratorion julkaisuissa (esim. Jakkula 1979b, Jakkula ym. 1980, Ylinen 1980a,

1980b, Ylinen ym. 1980), niitä tarkastellaan tässä vain lyhyesti.

Laite toimii 1–1.8 GHz:n taajuudella ja pyyhkäisytaajuus on 800 MHz. Erottelukykyä voidaan laskea (kaava (21), s. 31)

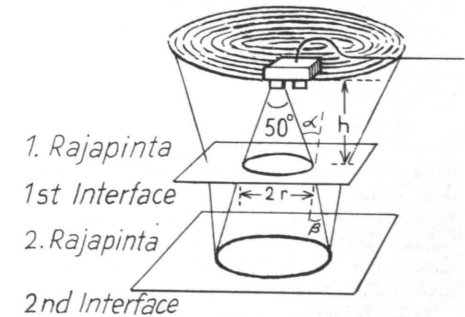
– ilmassa	n. 0.19 m
– routaantuneessa turpeessa	n. 0.10 m
– sulassa määrässä turpeessa	n. 0.02 m

Käytetty taajuusalue soveltuu vain routaantuneen turpeen ja jään ominaisuuksien kartoitukseen, sillä ko. taajuudella aallon vaimeneminen vedessä ja määrässä turpeessa on suuri, joten tunkeutumissyvyys sulaan turpeeseen on vain muutamia senttimetrejä (vrt. kuva 12, s. 29). Tulosten analysoinnin kannalta oleelliset tutkan toiminnan piirteet esitetään kuvassa 14. Antennin korkeus maan pinnasta on n. 0.7 m. Antenni suuntaa aallon n. 50° kärkiikulmaisena kartiona maata kohti, jolloin heijastusalue 0.7 m etäisyydellä on lähes 0.7 m halkaisijaltaan oleva ympyrä (kuva 15). Tunkeutuessaan väliaineeseen, jonka dielektrisyysvakio on korkeampi, aalto taittuu, jolloin taitekulma β on pienempi kuin tulokulma α . Täten esim. roudassa keilan leveneminen on pienempi kuin sen yläpuolisissa ilma-



Kuva 14. Routatutkan toimintaperiaate.

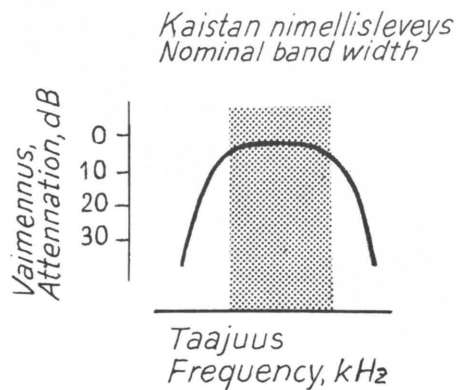
Fig. 14. Operating principle of the frost radar (FM-CW-Radar).



$$2r = h \cdot \tan 25$$

Kuva 15. Routatutkan antennin suuntauskuvio.

Fig. 15. Radiation pattern of the frost radar antenna.



Kuva 16. Kaistanpäästösuodattimen toiminta.
Fig. 16. Band width of the active filters.

tilassa. Koska tasopinnasta heijastuneen aallon kulkema matka eri osista heijastusalueelta on eri pitkä, saadaan kohteesta jonkin verran levinnyt kaiku. Käytetty taajuusanalysaattori, jolla vastaanotetut taajuuserot jaetaan suodattimilla eri kanaville aiheuttaa myös näyttöpäätteellä näkyvän kaiun leviämistä, koska suodin läpäisee leveämpää kaistaa kuin kanavan nimellisleveys (kuva 16). Näin ollen koh-tisuorasta tasaisesta rajapinnasta näyttöpäät-teellä näkyvä kaiun heijastuskuvio muistuttaa muodoltaan Gaussin käyrää, jolloin keski-kohta on tulkittavissa heijastushuipuksi, josta aallon kulkuaika voidaan mitata.

Tutkan vastaanottama signaali voidaan kä-sitellä tulkittavaan muotoon usealla eri taval-la. Kokeilussa laitteessa on näyttöpäate, joka koostuu 32×12 LEDin matriisista. Signaali jaetaan suotimilla 32 kanavaksi, joista saata-van signaalin amplitudien avulla ohjataan kutakin LED-pylvästä.

Tutkimuksessa aallon kulkuajan asemesta käytettiin ns. LED-etäisyyttä, joka laskettiin heijastushuippujen välisenä LED-sarakkeiden (kanavien) lukumääränä. Yksi LED-väli vastaa n. 0.62 ns, ja vastaava kerrospaksuus (=kaksinkertainen kulkumatka) jäässä (rou-dassa) on n. 5.2 cm.¹ Mitatut signaalit voidaan myös nauhoittaa ja käsitellä myöhemmin.

Koko laitteisto painaa käyttökunnonssa n. 10 kg ja se toimii sisäänrakennetun 12 V akun

¹ Tutkan rakennetta muuteltiin kokeen aikana hieman, joten em. arvot vaihtelivat jonkin verran.

avulla n. kolme tuntia, mutta sitä voidaan käyttää myös ulkopuolisella akulla. Tehon tarve on n. 15 W. Antenniosan mitat ovat $450 \times 270 \times 350$ mm ja lähetin vastaanottimen $350 \times 350 \times 130$ mm. Tutkan komponenttikustannukset olivat n. 15 000 mk.

Koska tutkamenetelmässä tutkittavaa kohdetta kuvaava signaali saadaan sähköisessä muodossa, jossa informaatio sisältyy signaalin amplitudissa ja taajuudessa tapahtuviin muutoksiin, on signaalin tulkinnalla tulosten käytön kannalta ratkaiseva osuus. Tässä tutki-muksessa kokeiltiin kolmea tulkintamenetelmää, jotka olivat

- pistemäisissä mittauksissa reaaliaikainen tutkan näyttöpäätteeltä luettu heijastushuippujen vä-lisen etäisyyden (LED-etäisyys) avulla laskettu kulkuajasta perustuva matkan määrittäminen ja kak-sikerrosmallioletus,
- jatkuissa linjoittaisissa profiileissa nauhoitetun signaalin tulkinta tietokonepäätteellä piirrettyjen tutkagrammien avulla ja
- jatkuissa linjoittaisissa profiileissa nauhoitetun signaalin tulkinta intensiteetti-piirurilla laadit-tujen tutkagrammien avulla.

6.12. Koejärjestelyt

Osakokeen tavoitteena oli selvittää, voi-daanko taajuusmoduloidulla jatkuva-aalto-tutkalla saada tietoja turvemaan suon talviai-kaiseen kantavuuteen vaikuttavista tekijöistä,

- roudan paksuudesta ja
- roudan laadusta,

eli testata kaksikerrosmallihypoteesia käytän-nössä. Todellinen tilanne suolla poikkeaa ihannemallista ainakin seuraavasti:

- routakerroksen ylä- ja alapinta ovat epätasaisia,
- routakerros ei ole tasalaatuinen,
- kuivan, sulan ja routaantuneen turpeen dielek-triset ominaisuudet ovat lähellä toisiaan, jolloin heijastus rajapinnasta on heikko.

Lisäksi oli tarkoituksena selvittää, toimiiko tutka suunnitellulla tavalla.

Routatutkan maastokokeet suoritettiin ke-vättälvällä 1980, jolloin sitä kokeiltiin 4 vesis-tön jäällä ja 5 suon roudassa. Järven ja meren jäällä tehtyjen kokeiden tuloksia käsitellään erikseen toisessa raportissa (Saarilahti 1981b),

joten tässä rajoitetaan vain roudalla tehtyihin kokeisiin ja niistä saatuihin tuloksiin.

Tutkimuskohteiksi valittiin kolme suota Helsingin yliopiston metsäseman Hyytiälän läheisyydestä. Routaantumisen edistämiseksi niille aurattiin lyhyet talvitiet, jotka pidettiin lumettomina. Kohteista yksi oli luonnontilai-nen märkä ja kaksi ojitettua kuivaa suota. Tä-män lisäksi tutkaa kokeiltiin kahdella puuta-varan kuljetuksia varten rakennetulla talvitiel-lä. Tutkimussuot olivat seuraavat:

Varsinainen aineisto

Suo	Suotyyppi	Sijaintikunta
1. Viheriäisenneva	räme, ojitettu	Ruovesi
2. Lapinneva	neva, * luonnontilainen	Juupajoki
3. Nuijaneva	räme, ojitettu	Juupajoki

Lisäaineisto

4. Rutajärvi	räme, ojitettu	Ruovesi
5. Tenntärsk	lampi, neva, korpi luonnontilainen	Pernaja

*2 koelinjaa alkoi selvältä korpityypiltä, joka omi-naisuusiltaan (mm. vesipitoisuus) poikkesi muusta suos-ta.

Näistä märkiä kohteita edustivat Lapinneva (2) ja Tenntärsk (5). Viimeksi mainitulla oli tielinjalla myös pieni lampi. Kuivia ojitettuja kohteita edustivat Viheriäisenneva (1), Nuija-neva (3) ja Rutajärvi (4).

Roudan paksuuden mittausta jaetaan ulottu-vuudeltaan kahteen tyyppiin:

- pistemäiset ja
- linjoittaiset mittaukset,

joista ensinmainitussa tarkastellaan yhdestä pisteestä mitattua tulosta. Pinta ja pohja kuvi-tellaan tällöin yhdensuuntaisiksi tasoina, joi-den etäisyys mitataan. Linjoittaisissa mittauk-sissa pyritään tutkimaan kahden käyrän viivan välistä etäisyyttä eli roudan paksuuden vaihte-lua mittalinjan eri kohdissa. Tällöin pinta ja pohja ovat käyräviivaisia pintoja.

Menetelmältään mittaukset jaetaan tässä tutkimuksessa niin ikään kahteen luokkaan, nimittäin

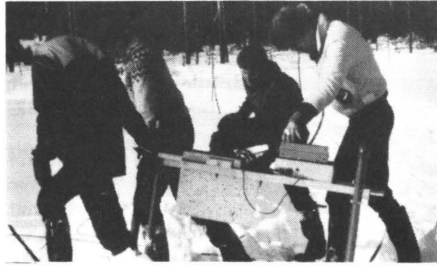
- mekaanisiin ja
- elektronisiin mittauksiin.

Mekaanisilla mittauksilla saaduista tulok-sista käytetään nimitystä mitattu paksuus (h_v). Elektronisilla mittauksilla saatua, siis tutkakaiun kulkuajan mittauksen perusteella lasketta paksuutta nimitetään lasketuksi paksuudeksi (h_L).

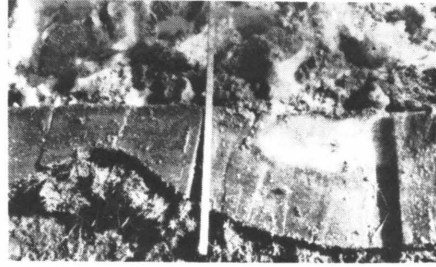
Maastosta tutkaa kuljetettiin kevyessä kel-kassa (kuva 17). Elektronisissa pistemäisissä mittauksissa tutka pysäytettiin mittauskohdal-la ja näyttöpäätteen matriisilta luettiin LED-etäisyys. Tulkinta perustui kaksikerros hypo-teesiin, jolloin 2-huippuisessa kuviossa en-simmäisen huipun oletettiin tulevan roudan ylä- ja toisen huipun roudan alapinnasta. Joissakin kohteissa ei kuvapinnalle muodostunut ”järkevää” kuviota. Tällöin antennin suuntausta hieman muuttamalla ja/tai vahvis-tusta lisäämällä saatiin yleensä näkyviin yksi-tai useampi huippuinen kuvio. Mikäli anten-nin suuntausta uudelleen muuttamalla ei saa-tu 1- tai 2-huippuista kuviota vaan moni-huippuinen, valittiin näistä harkinnan mu-kaan roudan etu- ja takapulssi. Etupulssin va-linta perustui lumen paksuuden perusteella luotuun oletukseen etupulssin paikasta. Huo-mautussarakkeeseen tulos kirjattiin moni-huippuisena.

Tämän jälkeen suoritettiin mekaaninen roudan paksuuden pistemäinen mittausta vetä-mällä tutka sivuun. Kairaamalla tai mootto-risahalla tehtiin routaan reikä, josta mittake-pin avulla mitattiin roudan paksuus 1 cm ale-nevin luokin. Mikäli roudan pinta tai pohja reiän kohdalla oli kalteva, roudan paksuus ilmoitettiin keskiarvona. Roudan paksuuteen kuuluvaksi luettiin kovaksi jäänyt kastunut lumi (hohkajää), sen sijaan irtonaisempi jää-tyntynyt lumi, samoin kuin jäätyntynyt, helposti koo-koonpuristuva, elävä sammal luettiin routaan kuulumattomaksi. Tutkimuksen aikana todettiin, että rajanveto muodostui subjektiiviseksi, sillä tällaisten pintakerrosten omi-naisuuksien muutokset olivat joskus jatkuva, eikä selvää kerrosrajaa ollut.

Elektroninen linjoittainen mittausta suoritettiin työntämällä tutkaa kelkassa mittauslinjal-le poljettua rataa pitkin hitaalla kävelynopeudella 0.6–0.8 m/s. Koeratojen pituus oli 20 m (Nuijanevalla myös 10 ja 30 m), ja ne kulkivat kohtisuoraan talvitien poikki. Signaali nauhoitettiin 1. kanavalle, ja 2. kanavalle nauhoitettiin huutamalla annetut kohdennusmerkit metrin välein (lähtö, 1, 2, . . . , loppu). Kävely-nopeus pyrittiin pitämään tasaisena, ja kukin



Kuva 17. Tutkaluotaus maastossa.
Fig. 17. Subsurface profiling in terrain.



Kuva 18. Roudan paksuuden mittausta.
Fig. 18. Frost thickness measurement.

rata nauhoitettiin kolmeen kertaan. Nauhoituksessa todettiin joskus häiriöitä, sillä nauhuri ei toiminut pakkasessa aina luotettavasti. Nauhoituksen jälkeen moottorisahalla sahattiin mittauslinjan roudasta n. 10 cm leveä viilu, joka nostettiin linjan sivuun (kuva 18). Tästä mitattiin mittakepin avulla 10 cm välein roudan paksuus 1 cm alenevin luokin, ja tulokset kirjattiin. Kaikkien mittauslinjojen koko roudan paksuutta ei ehditty varatun ajan puitteissa mitata. Roudan laatu määritettiin silmävaraisesti kaksiluokkaisena: tiivis, hohkainen. Roudan yläpinta (suon pinta) vaaittiin 10 cm välein, ja luonnontilaisen lumen paksuus mitattiin 1 m välein. Tuloksia analysoitaessa todettiin maastotöiden jääneen sikäli puutteellisiksi, että poljetun radan yläpintaa

ei vaaittu eikä poljetun lumikerroksen paksuutta mitattu. Poljetun lumen paksuudet perustuvat siten jälkeensä tehtyihin arvioihin. Joiltain linjoilta otettiin myös routa- ja turvenäytteitä, joista laboratoriossa määritettiin turpeen vesipitoisuus punnitsemalla ne tuoreina ja 105°C kuivattuina gravimetrimenetelmän mukaisesti (esim. Peat testing manual 1979).

Seuraavaksi esitetään joitakin aineiston määrään, laatuun ja soiden ominaisuuksiin liittyviä mittaus tuloksia.

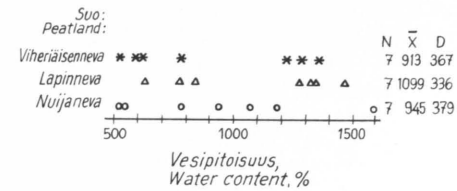
613. Aineiston laajuus ja olosuhteet tutkituilla soilla

Pistemäisiä roudan paksuuden mittauksia tehtiin yhteensä 107 ja ne jakaantuvat soittain

Taulukko 13. Aineiston laajuus pistemäisissä mittauksissa sekä havaitut roudan minimi- ja maksimipaksuudet. Minimi 1 on kohde, jossa ei ollut routaa laisinkaan ja Minimi 2 on ohuin roudan paksuus, jossa routaa tavattiin.

Table 13. Extent of the data for point samples of frost minimum and maximum thicknesses. Minimum 1 is for points where there was no frost and Minimum 2 is for points where frost was encountered.

Suo Peatland	Havaintoja, kpl Observations, no.	Minimi 1	Minimi 2	Maksimi
		Minimum 1	Minimum 2	Maximum
Roudan paksuus, cm Thickness of frost layer, cm				
Viheriäisenneva	23	0	7	23
Lapinneva	34	0	4	37
Nuijaneva	17	0	10	27
Rutajärvi	12	0	10	35
Tennträsk, lampi, pond	10		26	82
—”— suo, bog	11		13	48
Koko aineisto All observations	107	0	4	48 (82)



Kuva 19. Routanäytteiden vesipitoisuudet soittain.
Fig. 19. Water content of frozen peat samples by peatland.

taulukon 13 mukaisesti. Samaan taulukkoon on lisäksi kirjattu pistemäisissä mittauksissa tavatut roudan minimi- ja maksimipaksuudet. Varsinaiseen aineistoon sisältyvien soiden keskimääräiset lumen ja roudan paksuudet on esitetty taulukossa 16 (s. 42).

Mitattujen 20 m koeratujen yhteinen pituus oli

- Viheriäisennevalla 60 m (3 kpl)
- Lapinnevalla 100 m (5 kpl)
- Nuijanevalla 40 m (2 kpl)

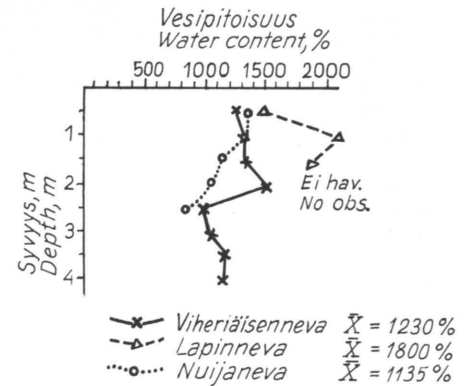
eli kaikkiaan 200 m. Tämän lisäksi aineistosta piirrettiin yksi Tennträskin tutkagrammi, jossa roudan paksuus oli kontrolloitu vain kolmesta pisteestä kairaamalla.

Routanäytteistä mitatut kosteudet esitetään kuvassa 19. Vastoin odotuksia erot eivät olleet merkittäviä. Syynä on mm., että

- Viheriäisennevalla ja Nuijanevalla mukana on myös painanteista otettuja näytteitä ja
- Lapinnevalla mukana on myös kuivemman korpisuuden näytteet.

Näin ollen keskiarvot eivät kuvaa luotettavasti koko suon keskimääräisiä olosuhteita, koska näytteiden lukumäärä on riittämätön. Myös kesän aikaiset pintakosteudet näyttävät olevan verraten lähellä toisiaan (vrt. kuva 20). On huomattava, että routanäytteet ovat 0–15 cm syvyydeltä, kun taas kesän aikaiset näytteet on otettu 0.5 m syvyydeltä lähtien.

Pohjaveden pinta oli Lapinnevalla roudan alarajassa (roudan yläpinnassa routaan tehdystä rei'istä mitattuna). Ojitetuilla Viheriäisennevalla ja Nuijanevalla se oli 20–40 cm roudan alapuolella.



Kuva 20. Turpeen kosteus kesällä suoritettujen mittausten mukaan.

Fig. 20. Peat water content based on summer measurements.

614. Pistemäisiä mittauksia koskevat tulokset.

Pistemäisten mittausten tulokset (107 havaintoa, ks. taulukko 13) lävistettiin reikäkorkeille ja aineisto käsiteltiin HYLPS-ohjelmistolla (HYLK 1981) LED-etäsytydet muutettiin laskemalla vastaaviksi roudan (jään) paksuudeksi käyttäen teräsjään dielektristä vakiota $\epsilon^r = 3.2$. Näin ollen, mikäli routaantuneen turpeen dielektrinen vakio on erilainen, lasketulle roudanpaksuudelle (h_L) saadaan systemaattisesti virheellinen tulos. Tulosten analysoinnissa käytettiin sekä tilastomatemattisia menetelmiä että visuaalista tarkastelua. Ensimmäisessä vaiheessa tutkittiin regressioanalyysillä koko aineistosta saatujen mittaustulosten välistä riippuvuutta asettamalla selitettäväksi muuttujaksi (y) mitattu roudan paksuus (h_M) ja selittäväksi muuttujaksi (x) laskettu roudan paksuus (h_L). Tulokset esitetään taulukossa 14.

Tuloksia tarkasteltaessa todetaan, että Rutajärvelle saatu malli ei ole oikea, sillä teoriasa kuvaajan tulisi kulkea origon kautta. Syynä on se, että aineistoon sisältyy virhetulkintoja, joissa mitattu roudan paksuus on alle 10 cm (alle tutkan erottelukyvyn) ja näyttöpäätteelle saatu kaiku on tullut jostain muusta kerroksesta. Tennträskin kohdalla kyseessä saattaa myös olla virhetulkinta, mutta ero on ”mahdollisen” rajalla, koska Tennträskillä oli useita suotyyppejä. Tulokset voidaan tulkita seuraavasti:

- mitattujen ja laskettujen arvojen välillä saatu merkitsevä korrelaatio siten, että tutkalla on onnistuttu mittaamaan roudan paksuutta tai roudan kanssa korreloivien rajapintojen välistä etäisyyttä,
- korkeammat selityssasteet märemmille soille siten, että kiat on sitä helpompi tulkita oikein, mitä mämpi suo on ja
- suurimmat kulmakertoimen (a) arvot märimillä soilla siten, että dielektrinen vakio lähenee sijoitettua arvoa ($\epsilon_r = 3.2$) turpeen kosteuden lisääntyessä.

Myös suotyyppeittäisten ja kosteusluokittaisen analyysin perusteella voidaan tehdä samansuuntaiset johtopäätökset. Taulukossa 15 esitetään kosteusluokittaiset tulokset.

Edellä saadut tulokset koskivat koko aineistoa ja sisälsivät myös virhetulkintoja, esim. tapauksissa, joissa näyttöpäätteelle oli saatu useampihiipuinen kuvio. Kaiut saattoivat tulla paitsi roudan pinnasta myös lumen rajapinnoista, muista suossa olevista kerroksista, tai laite saattoi mitata antennin ja roudan pinnan välillä syntyvää seisovaa aaltoa. Koska tutkan erottelukyky oli n. 10 cm ja roudan paksuus luonnontilaisilla kohteilla vaihteli yleensä 0–15 cm, osa luonnontilaisien osuukien roudasta oli tutkan erottelukyvyn alapuolella. Virhettä saattoi syntyä myös talvi-teillä esim. siitä, että rajapinnat eivät olleet yhdensuuntaiset, vaan roudan paksuus vaihteli, jolloin heijastuksia saattoi tulla eri kohdista, olihan antennin keila n. 50°. Tämän vuoksi silmävaraisen x-y -piirturitulostuksen tarkastelun perusteella arvioitiin, mitkä havainnot saattoivat olla oikeita, roudan pak-

suutta kuvaavia” ja mitkä ”vääriä, tulkintavirheitä” asettamalla ”oikealle” havainnolle seuraavat kriteerit: sen tuli kuulua

- normaalijakautuneeseen pisteparveen, jonka – kuvaaja kulkee origon kautta.

”Oikeat” ja ”virheelliset” tulokset jakautuivat suotyyppeittäin seuraavasti:

	Oikea	Virheel- linen	Yht.
Puhdas jää (märällä nevala)	100 %	0 %	100 %
Märkä neva	87 %	13 %	100 %
Märkä korpi	100 %	0 %	100 %
Kuiva räme 1	52 %	48 %	100 %
Kuiva räme 2	54 %	46 %	100 %

Koska ”virheellisten tulkintojen” osuus kuivilla soilla on suurempi, voidaan todeta, että mittaus onnistuu paremmin märillä soilla. Syyinä on, että märillä soilla kiat ovat selvempiä, koska sulan ja routaantuneen turpeen dielektrisyysvakiot poikkeavat enemmän toisistaan. Olosuhteilla on täten huomattava vaikutus tutkan toimintaan.

Suuntaa-antavat dielektriset vakiot laskettiin sekä

- ottamalla mukaan vain em. ”oikeat” havainnot että
- käyttämällä koko aineistossa regressioyhtälöä, joka pakottaa kuvaajan kulkemaan origon kautta.

Molemmista tapauksissa saatujen mallien regressioyhtälöiden kulmakertoimet olivat samaa suuruusluokkaa ja niiden perusteella laskettiin vastaava suhteellinen dielektrisyysvakio ϵ_r . Saadut dielektrisyysvakiot olivat seuraavat:

- jää $\epsilon_r = 3.2$ (sijoitettu arvo)
- märkien soiden routa $\epsilon_r = 4.4-5.7$
- kuivien soiden routa $\epsilon_r = 9.2-15.1$

Jäätyneen turpeen dielektrisistä ominaisuuksista ei läpikäydyssä kirjallisuudessa ollut mainintoja. Voidaan kuitenkin epäillä, että ainakin kuivilla soilla saatu arvo on liian korkea, jos sitä verrataan esim. permafrostiin tai jäätyneen maan arvoihin (taulukko 11, s. 30). Tällöin, koska korrelaatio kuitenkin näytti merkitsevältä, on oletettava, että tutkalla mitattiin jotain roudan paksuuden kanssa korreloivaa ominaisuutta eli syvempää tai pinnallisempaa rajapintaa. Tällaisia rajapintoja voi ojitetun suon roudan alle tiivistyä mm. pohjaveden tai vesihöyryn liikkeiden seurauksena (esim. Rapeli 1968, Hannelius 1975), tai lumeen voi suojailman aikana syntyä jääkuori.

615. Linjoittainen profilointi

Edellä kuvatussa pistemäisessä luotauksessa ja sen tulkinnassa pyrittiin tutkalla suosta saatava informaatio pukemaan kaksikerrosmalliksi, jossa heijastaviksi kerroksiksi oletettiin roudan ylä- ja alapinta. Kuitenkin erityisesti kuivemmillä soilla voitiin todeta, että suossa saattoi olla useita heijastavia kerroksia, joiden tulkinta edellyttää linjoittaista profilointia.

Seuraavaksi esitellään kahdella erilaisella linjoittaisella tulkintamenetelmällä saatuja tuloksia, nimittäin tietokonepääteellä ja intensiteetti-piirturilla laadittujen tutkagrammien analysointia. Linjoittaisten profiilitarkastelujen tilastolliset testit on suoritettu TI-51-111 taskulaskimella (Texas Instruments 1978).

6151. Tietokonepääteellä piirrettyjen tutkagrammien analysointi

Tutkimusta varten rakennettiin Teknillisen korkeakoulun sovelletun elektroniikan laboratoriossa näyttöpiiri-A/D-muunnindigitaalinauhuri.

Tässä tutkimuksessa tutkakaikujen perusteella piirretystä kuvasta käytetään nimitystä tutkagrammi. Yksinkertaistettu kaavio tutkagrammin piirtämisestä tietokonepääteellä esitetään kuvassa 21.

Jatkuvasta tutkasignaalista otetaan näyttöä joko matkaan tai aikaan perustuvan pulssin käynnistämällä näyttöpiirillä. Saatu näyte jaetaan taajuuskaistoihin (kanaviin), joille saapuneet taajuudet ilmaistaan kanavien jännitteillä. Heijastuksen voimakkuutta kuvaava jännite voidaan käsitellä varten muuttaa digitaalimuotoon. Käytetyssä laitteessa signaali jaetaan 32 kanavaan ja kunkin kanavan jännite ilmaistaan heksadesimaalilukuna (0–9, A–F). Koska laitteella purettiin jo nauhoitettuja signaaleja, tapahtui näyttönotto aikapulssin perusteella. Nauhoitusta purettaessa mitattiin sekuntikellolla kohdistusmerkkien välinen aika, jonka perusteella tutkagrammeihin merkittiin vastaavat lasketut matkat.

Taulukko 14. Mitatun ja lasketun roudan paksuuden välinen riippuvuus soittain. Koko aineisto.

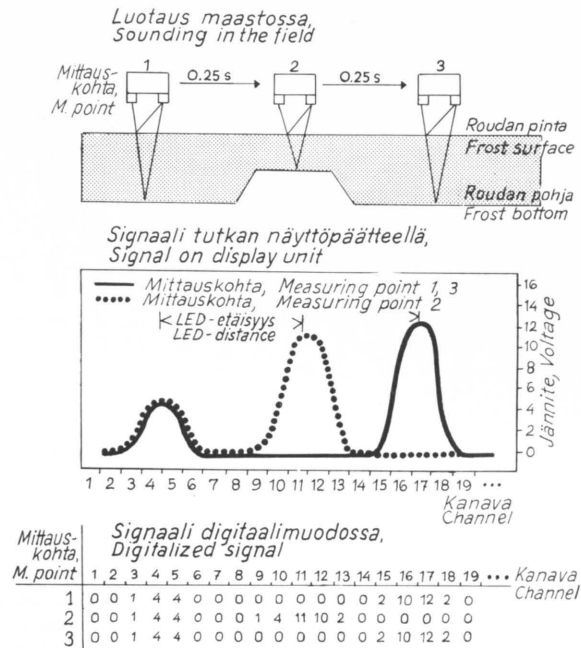
Table 14. Correlation between actual and calculated frost thickness.

Suo Peatland	Havainnoja, kpl Observations, no.	Yhtälö Equation	Selitysaste 100 R ²	Korrelaatio- kerroin Correlation coefficient	Merkitsevyys Significance
1. Viheriäisenneva	23	$y = 0.42x - 1.08$	23.9	$r = 0.49$	*
2. Lapinneva	34	$y = 0.66x - 1.60$	61.8	$r = 0.79$	***
3. Nuijaneva	17	$y = 0.34x + 0.94$	56.3	$r = 0.75$	***
4. Rutajärvi	12	$y = 0.96x - 19.75$	35.8	$r = 0.60$	*
5. Tennträsk	21	$y = 0.89x + 5.13$	84.0	$r = 0.92$	***
Yhteensä – Total	107	$y = 0.71x - 3.30$	51.1	$r = 0.71$	***

Taulukko 15. Mitatun ja lasketun roudan paksuuden välinen riippuvuus kosteusluokittain.

Table 15. Correlation between actual and calculated frost thickness by moisture classes.

Kosteusluokka Moisture class	Havainnoja, kpl Observations, no.	Yhtälö Equation	Selitysaste 100 R ²	Merkitsevyys Significance
Lampi Pond	10	$y = 1.06x - 1.29$	86.5	***
Märät suot Wet peatlands	45	$y = 0.67x + 0.85$	58.9	***
Kuivat suot Dry peatlands	52	$y = 0.42x - 0.56$	39.0	***



Kuva 21. Linjoittainen näytteenotto ja signaalin muuntaminen digitaalimuotoon.
Fig. 21 Outline of the computer analysis system.

Kyseinen näytteenotto-A/D-muunnin-nauhuri on tarkoitettu tietokoneella tapahtuvaan tutkakaikujen analysointiin. Koska nauhurin ja tietokoneen synkronoinnissa esiintyi joitakin häiriöitä, päätettiin ensi vaiheen analyysit suorittaa manuaalisesti. Näin saatua analysointikokemusta voidaan myöhemmin soveltaa tietokoneohjelmien laatimiseen. Toisaalta kyseessä on ns. "feasibility study", jolloin pääpaino on tutkimusmenetelmän soveltuvuudessa eikä sovellutuksessa, johon tulkintamenetelmien kehittäminen jo periaatteessa kuuluu. Tämän vuoksi manuaalisesti suoritettu tutkagrammien analyysi katsottiin riittäväksi eikä resursseja käytetty nauhuri-tietokone-laitteiston ja ohjelmien parantamiseen.¹

Tutkagrammien analysointi voidaan ongelman asettelultaan esittää seuraavasti:

— mikä on tutkakaikujen alkuperä?

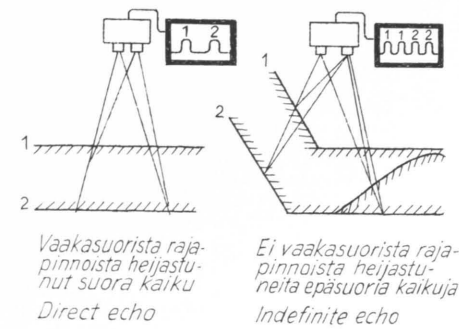
Tutkagrammi voi koostua joko

- häiriökaiuista tai
- todellisista kaiuista taikka
- todellisten ja häiriökaiujen kombinaatiosta, kombinoituista kaiuista,

jolloin häiriökaiuilla tarkoitetaan joko laitteen toimintahäiriöstä tai jostain suon ulkopuolisesta kohteesta tulevaa kaikua ja todellisella kaiulla jostain suossa olevasta kohteesta saatua heijastusta. Häiriökaiut ovat joko täysin satunnaista kohinaa tai säännöllisesti toistuvia suon ominaisuuksien muutoksista riippumattomia kaiuja.

Kombinoidut kaiut voivat syntyä esim. joissakin olosuhteissa antennin ja heijastavan pinnan välille muodostuvista kaksoisheijastuksista, ja tällöin suon ominaisuuksien ja kaikujen välillä on jonkinasteinen riippuvuus.

Todelliset kaiut ovat suossa olevista koh-



Kuva 22. Routatutkan kaikujen tulkintamalli.
Fig. 22. Frost radar echo interpretation model.

teista heijastuneita, joten ne korreloivat tiettyjen suon ominaisuuksien kanssa. Tutkimuksen kannalta todelliset kaiut voidaan jakaa kahteen tyyppiin, nimittäin

- vaakasuorista laajoista rajapinnoista heijastuneisiin, joita tässä tutkimuksessa nimitetään suoriksi kaiuiksi ja
- ei-vaakasuorista pienemmistä heijastuspinnosta lähteneisiin, joita kutsutaan epäsuoriksi kaiuiksi (kuva 22).

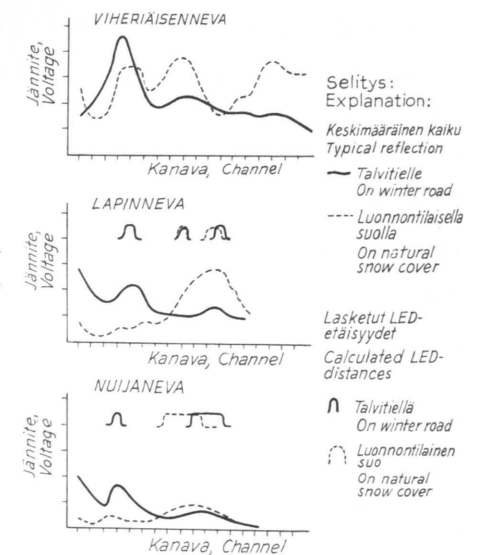
Tutkagrammin analysoinnin ensimmäisenä vaiheena pyrittiin selvittämään, ovatko kaiut todellisia vai häiriökaiuja. Tätä varten laskettiin kultakin koesuolta talvitien ja luonnontilaisen osuuden tutkagrammista satunnaisesti valitun $3 \times 6-10$ havainnon keskimääräinen kullekin kanavalle saapunut jännite. Näin saadut keskiarvot esitetään kuvassa 23, joka siis havainnollistaa päätteellä näkyvää keskimääräistä heijastusta eri soilla.

Tuloksia tarkasteltaessa on huomattava, että

- Viheriäisennevalla nauhoitusnopeus on virheellinen. Tästä johtuu, että taajuudet (kanavat) ovat muuttuneet ja
- vahvistus eri soilla on erilainen ja saattaa erota jopa saman suon talvitien ja luonnontilaisen osan nauhoituksen välillä.

Kullakin suolla on todettavissa, että

- talvitiellä pintapulssi on voimakas ja pohjapulssi heikko, kun taas
- luonnontilaisella osuudella pintapulssi on heikompi kuin pohjapulssi.



Kuva 23. Keskimääräinen routatutkalla saatu kaikku talvitiellä ja luonnontilaisella suolla.

Fig. 23. Typical frost radar reflections from winter roads and natural snow cover.

Kaiut ovat siis todellisia tai kombinoituja, koska "häiriökaiut" -hypoteesin mukaan olosuhteiden muutos ei aiheuta kaiuissa säännönmukaisia muutoksia.

Koska tutkakaiut näyttivät olevan todellisia, analyysia jatkettiin selvittämällä suon rakenteen ja tutkagrammin välisiä riippuvuuksia. Analyysi on periaatteessa nelivaiheinen, jolloin tutkittiin

- onko tutkagrammissa havaittavissa kerrosrajoja, ja kuinka helposti tulkittavia kerrosrajat ovat, ja vastaavtko kerrosrajat luonnossa havaittuja kerrosrajoja ainakin siten, että roudan alapinta voidaan paikallistaa sekä
- sisältyykö tutkagrammiin myös häiriökaiuja ja kombinoituja kaiuja.

Edellä mainittuja riippuvuuksia tutkittiin usealla eri tavalla, ja osa tuloksista esitetään vain esimerkin avulla, vaikka samantapainen analyysi olisi tehty useammastakin profiilista.

Kuvaan 23 on piirretty mitattujen lumen ja roudan paksuuksien (taulukko 16) perusteella laskettu kaikuhiippujen teoreettinen

¹ Käsikirjoituksen valmistumisen jälkeen on laitteisto kehitetty toimintakuntoon ja tietokoneella piirretty tutkagrammi esitetään liitteessä 10 (s. 105).

sijainti käyttäen lumelle dielektristä vakiota $\epsilon_r = 1.5$ ja roudalle $\epsilon_r = 3.2$.

Koska Viheriäisennevalle nauhoitusnopeus oli virheellinen ei laskettuja huippuja piirretty näkyviin. Lapinnevalle ja Nuijanevalle kaikujen LED-etäisyydet (= kanavat, joille heijastu huiput osuvat) ja mitatusta paksuudesta edellä lasketut saapumiskanavat täsmäivät melko hyvin. Luonnontilaisen suon roudan paksuus on tutkan erottelukyvyn suurusluokkaa ja usein allekin, joten molempien raja-pintojen erottuminen tässä keskiarvokuviossa on teoreettisestikin epätodennäköistä. Ne näkyvätkin vain yhtenä leventyneenä huippuna. Sen sijaan paksuroutaisella talvitiellä sekä roudan ylä- että alapinta erottuvat oletetuilla kohdilla. Näin ollen kerrosrajat ainakin osittain vastaavat kaksikerroshypoteesia. Kuvasta voidaan kuitenkin todeta, että kaikuprofiili yleensä on useampihiippuinen, ts. suossa saattaa olla useampiakin heijastavia kohteita kuin roudan ylä- ja alapinta.

Varsinaiset analyysit suoritettiin tutkagrammeille kuultopaperille piirretyistä profiileista. Kerrosten erottumista tutkittiin merkitsemällä päätteellä piirretyihin tutkagrammeihin heijastuhuippu kanaville, joissa jännite oli korkeampi kuin viereisillä kanavilla. Mikäli huippu oli laakea eli usealla rinnakkaisella kanavalla oli sama jännite, huipuksi merkittiin keskimäinen kanava tai parillisille näiden väli. Selvyyden vuoksi ylin 1. kaiku piirrettiin vihreällä, seuraava eli 2. kaiku punaisella ja alemmat sinisellä tussilla ilmaimalla suhteellisesti korkea jännite leveällä ja matalampi kapealla merkillä. Kaikkia profiileja ei tulkittu, vaan tutkitut 21 tutkagrammia valittiin sattumanvaraisesti. Paitsi kaikujen rakennetta analyysissa verrattiin myös saman radan eri ajokertoja keskenään sekä eri ajokertojen profiileja maastomittausten perusteella piirretyihin profiileihin.

Taulukko 16. Keskimääräinen lumen ja roudan mitattu paksuus koesoilla (N = 15).

Table 16. Average snow and frost thicknesses measured on various peatlands (N = 15).

Suo Peatland	Talvitie Winter road section		Luonnontilainen Section in natural state	
	Lumi, cm Snow, cm	Routa, cm Frost, cm	Lumi, cm Snow, cm	Routa, cm Frost, cm
	1. Viheriäisenneva	17.3±5.3	38.7±2.7	50.1±4.7
2. Lapinneva	18.3±5.2	37.2±4.3	49.1±4.0	9.6±1.9
3. Nuijaneva	18.9±5.0	30.8±3.1	44.5±14.7	5.2±2.6

Kaikurakennetta analysoitaessa tutkagrammista piirretyt profiilit luokiteltiin silmävaraisesti tarkastellen

- pintakerroksen,
- pohjakerroksen ja
- hajakaikujen

selvyyden ja rakenteen perusteella. Käytetyt luokat kerrosten selvyyden osalta olivat seuraavat:

luokka 0, kerrosta ei voida havaita
luokka 1, kerros voidaan havaita
luokka 2, kerros selvästi havaittavissa.

Eri kerrosten selvyyden, eli kuinka hyvin kerros voitiin silmävaraisen tarkastelun perusteella erottaa, ilmenee taulukosta 17.

Tutkagrammissa voitiin yleensä erottaa kolme selvää kerrosta sekä syvemmltä tulevia hajakaikuja. Erittäin selvästi erottui pohjaku luonnontilaisilla linjan osilla ($\bar{x} = 1.81$). Talvitiellä vastaavasti selvin rajapinta oli pinnassa. (Vrt. myös kuva 23, s. 41).

Tulkinnan kannalta kaikujen selvyyttä merkittävämpi piirre on kerrosten rakenne.

Kerrosten rakenne luokiteltiin neliluokkaisena seuraavasti:

- suora - - - - -
- kalteva - - - - -
- kumpumainen - - - - -
- hajanainen - - - - -

Suora rakenne on tulkinnan kannalta helppoin. Kaltevaan, kumpuilevaan ja hajanaiseen rakenteeseen saattaa sisältyä harhakaikuja, joten tulkinta on subjektiivista.

Eri soista saatujen kaikujen rakenteessa oli havaittavissa eroa. Vaikeimmin tulkittavat tutkagrammit olivat Viheriäisennevalle. Yleisesti helpoimmin tulkittavat tutkagram-

Taulukko 17. Kaikujen selvyyden silmävaraisen luokituksen (0 = ei havaittava, 1 = havaittava, 2 = selvä) mukaan.

Table 17. Echo clearness by ocular classification (0 = not observable, 1 = observable, 2 = clearly observable).

Kerros Layer	Talvitiellä On winter road section				Talvitien ulkopuolella Beyond the winter road section			
	VIH	LAP	NUI	Keskim. Average	VIH	LAP	NUI	Keskim. Average
1 Pintakaiku Surface echo	1.00	1.56	2.00	1.53	0.80	1.28	1.14	1.09
2 Välikaiku Intermediate echo	1.20	0.89	1.40	1.15	1.00	1.17	1.71	1.31
3 Pohjakaiku Bottom echo	1.20	1.44	1.60	1.42	2.00	1.84	1.64	1.81
4 Syvät hajakaiut Deep echoes	0.80	0.33	0.60	0.58	1.10	1.06	0.93	1.03

Taulukko 18. Kaikujen jakaantuminen suoriin ja hajanaisiin rakenneluokkiin eri soilla.

Table 18. Distribution of echo layers by layers in various peatlands.

Kerros Layer	Talvitiellä On winter road section			Talvitien ulkopuolella Beyond winter road section		
	VIH	LAP	NUI	VIH	LAP	NUI
Suoria kerroksia % tapauksista - Straight echo layer detected, %						
Pinta Surface	86	80	82	50	56	100
Väli Intermediate	14	21	36	33	80	40
Pohja Bottom	0	28	23	25	38	40
Hajanaisia kerroksia % tapauksista - Indefinite echo layer detected, %						
Pinta Surface	0	13	9	25	22	0
Väli Intermediate	71	64	57	67	20	60
Pohja Bottom	60	56	69	50	38	60

mit saatiin märillä soilla, Lapinnevalle ja erityisesti Tenntärskillä, josta kokeeksi piirrettiin yksi tutkagrammi. Nuijanevan kerrokset vaikuttivat säännöllisiltä. Profiilin jakaantumista rakenneluokkiin (% tapauksista) havainnollistetaan taulukolla 18.

Koska tutkagrammeissa voitiin erottaa ainakin kolme selvää kerrosrajaa sekä lisäksi alempia hajakaikuja ja selvästi tunnistaa talvitie ja luonnontilainen osuus, tulkintaa jatkettiin pyrkimällä tarkemmin selvittämään kaikujen alkuperää.

VIHERIÄISENNEVA, Rata 2, Ajoj 1...3
Track 2, Soundings 1...3

Piste, Station, m	Kanava, Channel																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	...
A 4.1	/	≡	-	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡
B 6.3	/	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡
C 7.5	/	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡
D 8.8	/	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡
E 11.7	/	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡
F 13.5	/	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡
G 16.6	/	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡
H 18.1	/	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡

LAPINNEVA, Rata 2, Ajoj 1...2
Track 2, Soundings 1...3

Piste, Station, m	Kanava, Channel																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	...
A 1.0	/	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡
B 3.0	/	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡
C 5.0	/	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡
D 6.0	/	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡
E 9.0	/	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡
F 10.0	/	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡
G 15.0	/	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡
H 16.0	/	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡
I 18.0	/	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡

NUIJANEVA, Rata 1, Ajoj 1...3
Track 1, Soundings 1...3

Piste, Station, m	Kanava, Channel																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	...
A 1.0	/	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡
B 3.0	/	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡
C 5.0	/	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡
D 6.0	/	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡
E 9.0	/	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡
F 10.0	/	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡
G 15.0	/	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡
H 16.0	/	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡
I 18.0	/	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡	≡

Kuva 24. Kolmen ajon heijastushuiput kanavittain.

Fig. 24. LED-distances of three frost soundings on the same test track.

Kaikujen todellisuutta tutkittiin vertaamalla saman radan kolmen eri ajon profiileja toisiinsa. Yhteensopivuutta tutkittiin sekä linjoittaisena asettamalla profiilit päällekkäin että pistemäisenä vertaamalla 8–10 pisteestä kolmen peräkkäisen havainnon keskimääräistä jännitettä kanavittain. Päälekkäistä ja laskennallista yhteensopivuusvertailua hahtasivat sekä

- kohdistusvirhe, koska täysin varmasti ei vastin pistettä voitu paikallistaa että
- työntönopeuden vaihtelu eri ajojen välillä ja saman ajon aikana.

Kuitenkin päällekkäisissä vertailuissa voitiin todeta, että profiilien samankaltaisuus oli hyvä eri ajojen välillä.

Pisteittäisten heijastushuippujen sijainti kanavoittain esitetään kuvassa 24. Huiput ovat yleensä osuneet samalle kanavalle eli profiili on ollut samanlainen, joskin kussakin ajossa on esiintynyt myös yksittäisiä kaukuja. Osa pintakerroksista tulevista heijastuksista esiintyy vain yhdessä ajossa, ja siinäkin epäsäännöllisesti, joten nämä heijastukset lienevät lähtöisin joistain pienialaisista "satunnaisista" rajapinnoista ja ei-vaakasuurista pinnois-

ta. Syviä hajakaikuja esiintyy niin ikään satunnaisesti, ja niihin palataan myöhemmin (ks. s. 48). Routakerroksesta heijastuneet kaiut ovat yleensä tulleet samalle kanavalle, joten suurehkoja rajapintoja tutka on mitannut yhtäläisesti.

Analyysejä jatkettiin laskemalla näiden kolmen ajon yhteisiä heijastushuippuja vastaavat LED-etäisyydet maastossa mitatuista kerrospaksuuksista käyttämällä lumelle dielektristä vakiota $\epsilon_r = 1.5$ ja roudalle $\epsilon_r = 3.2$. Laskenta suoritettiin kaavalla (25), joka on määrätty kokeellisesti jäänpaksuusmittausaineistosta (Saarilahti 1981b)

$$LED_{eq} = \frac{h_{MR} \sqrt{3.2} + h_{ML} \sqrt{1.5}}{7.5} \quad (25)$$

jossa

LED_{eq} = mekaanisista mittauksista laskettu LED-etäisyys

h_{MR} = mekaanisesti mitattu routakerroksen paksuus

h_{ML} = mekaanisesti mitattu lumikerroksen paksuus (Koska poljetun radan lumen paksuutta ei ollut mitattu, tässä käytetään arvioitua lumen paksuutta (ks. s. 36).

Kuvassa 25 esitetään näin laskettujen LED-etäisyyksien (LED_{eq}) ja kuvassa 24 esiintyvien kolmen ajon yhteisten heijastushuippujen LED-etäisyyksien välinen korrelaatio soittain. Korrelaatiokertoimet ovat erittäin merkitseviä, joten kuvan 24 heijastushuippujen vaihtelu kanavilla johtuu lumi- ja routakerrospaksuuksissa tapahtuneista vaihteluista.

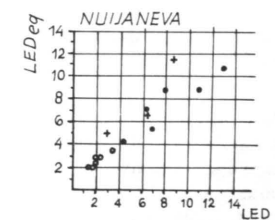
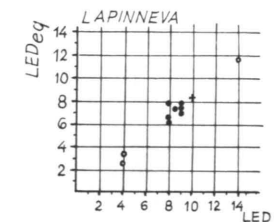
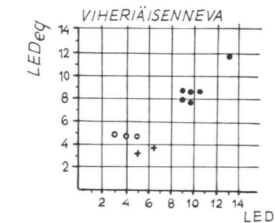
Tutkagrammien tulkintaa jatkettiin piirtämällä kerrosrajat yhtenäisiksi ja tasoittamalla eri kerrosten huiput. Tämän jälkeen tulkittiin kerrosrajat olettamalla alin kerros roudan pohjaksi. Usein selvästi erottuva välikerros tulkittiin luonnontilaisella osuudella roudan yläpinnaksi ja pintakaiku, mikäli sitä esiintyi, lumikerroksessa olevaksi heijastavaksi rajapinnaksi. Talvitiellä voimakas ylin pinta tulkittiin roudan yläpinnaksi. Kerrospaksuudet laskettiin ja profiilit piirrettiin 0.5 m välein. Niiden tulkinta esitetään kuvassa 26. Samaan kuvaan on piirretty myös maastossa mekaanisesti mitatut kerrospaksuudet.

Voidaan todeta hyvä yhteensopivuus maasto- ja tutkimittausprofiilien kanssa. Eni-

ten tulkintavirheitä näyttää olleen Viheriäisennevalle, esim. välillä 15–18 m alempi roustaraja on ilmeisesti virhetulkinta, koska ylempi rajapinta osuu hyvin yhteen mitatun roudan paksuuden kanssa. Välillä 7–12 m on myös ilmeinen ero, joka johtuu

- sekä kohdistusvirheestä
- että tutkan mittaamasta leveämmästä keilasta.

Erittäin hyvä yhteensopivuus on Lapinnevalle, jossa rajapinnat erottuivat selvästi. Myös Nuijanevan profiilien yhteensopivuus

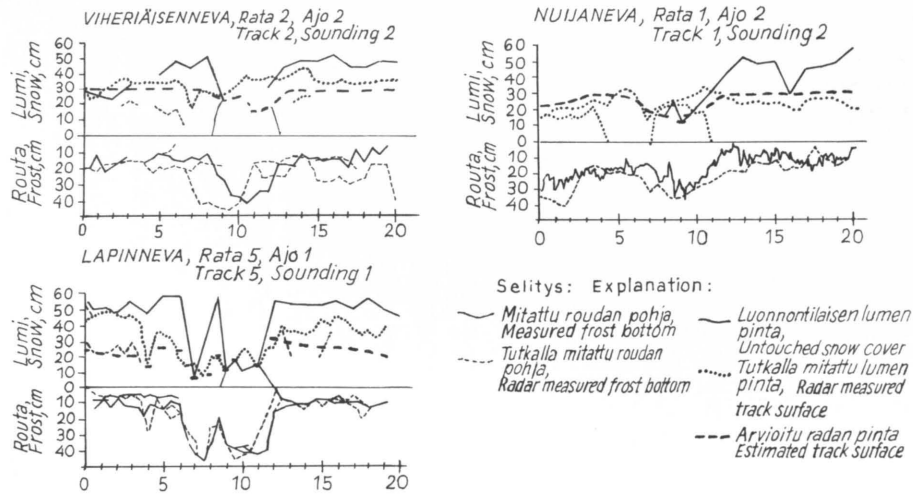


SELITYS: EXPLANATION:

- Lumi, Snow layer
- + Routa, Frost layer
- Roudan pohja, Frost bottom

Kuva 25. Kuvan 24 yhteisten LED-etäisyyksien (LED) ja mekaanisesti mitatuista kerrospaksuuksista laskettujen LED-etäisyyksien (LED_{eq}) välinen korrelaatio.

Fig. 25. Correlation between LED-distances from Figure 24 (LED) and calculated LED-distances (LED_{eq}) based on measured layer thicknesses.



Kuva 26. Mekaanisten ja routatutkamittausten perusteella laadittujen profiilien vertailu.
Fig. 26. Comparison between mechanically and frost radar measured profiles.

on hyvä, tosin välillä 0–2 m tutkamittausten perusteella saatu arvo on todellista korkeampi.

Yhteenvedona näistä profiilivertailuista voidaan todeta, että tutkamittausten perusteella laadittu profiili vastaa hyvin maastomittausten perusteella laadittua, ja sitä paremmin, mitä selvemmat rajapinnat ovat tutkagrammissa. Tulkitsija voi siis jo etukäteen arvioida myös tulkinnan luotettavuutta.

Tämän jälkeen pyrittiin määrittämään mitattujen ja lasketujen kerrospaksuuksien avulla lumen ja roudan dielektriset vakiot soittain. Tulkintaa vaikeuttivat

- Kohdistusvirhe. Kohdistuspisteet nauhoitettiin metreittäin ja purettaessa sekuntikellolla mitattiin aika huutojen välillä. Pyrkimyksenä oli jakaa matka ajan suhteen ja näin eliminoida työn nopeuden vaihtelut. Koska alku- ja lopetus-pisteiden paikallistaminen oli vaikeaa ja ajanototarkkuus 1 s, muodostui kohdistusvirhe suureksi.
- Lumipeitteen paksuuden mittauksessa todetut puutteellisuudet (s. 36). Myöskään lumen ominaisuuksiin ei osattu kiinnittää riittävästi huomiota, eikä esim. lumen sisäisiä rajapintoja koskevia havaintoja tehty.

Edellä mainituista syistä luotettavaa vertailupisteistöä ei saatu, joten laskelmista luovuttiin. Yleisesti todettiin käytettyjen dielek-

trisyysvakioiden arvojen (s. 45) antaman roudan paksuudet riittävän tarkasti, mutta todelliset dielektriset vakiot todennäköisesti vaihtelevat. Koska kulmakertoimet yhtälöissä (ks. kuva 25, s. 45) olivat alle 1.0, voidaan kuitenkin tehdä johtopäätös, että kaikilla kolmella suolla dielektrisyysvakio saattaa olla suurempi kuin 3.2, ja laskelmissa arvoksi näytti tulevan 4.2–4.6.

Jos verrataan profiilitarkastelun avulla saatuja tuloksia pistemäisissä mittauksissa saatuihin (s. 38), voidaan todeta, että dielektrinen vakio on huomattavasti alempi kuin pistemäisissä mittauksissa näytty tulokseksi tulevan. Koska kaksikerrosmallioletus pitää paikansa vain osittain, ts. roudaantuneessa suossa onkin useampia kerroksia kuin kaksi, on ilmeistä, että pistemäisissä mittauksissa on kerrosrajat paikoin oletettu väärin. Joissakin tapauksissa on mitattu roudan pohjan ja jonkin lumikerrosrajapinnan välistä etäisyyttä. Toisinaan virhettä on saattanut olla kummankin rajan määrityksessä varsinkin, kun näyttöpäätteellä oli useampihiipuinen kuvio. Kun tuloksia tulkitaan profiilitarkastelun avulla jatkuvana näyttävät tulkintavirheet vähenevän, sillä selityksasteet linjoittaisissa analyysissa olivat korkeampia kuin pistemäisissä mittauksissa. Seuraavat samankaltaisuudet linjoittaisten ja pistemäisten analyysien tulosten välillä ovat ilmeiset:

- mitattua paksuutta selittävien mallien kulmakertoimen arvo on märillä soilla lähempänä jään kulmakertoimta kuin kuivilla soilla ja
- märillä soilla mallien selityksaste on korkeampi kuin kuivilla.

Nauhoitettu signaali on siten samankaltainen kuin pistemäisissä mittauksissa reaaliaikaisena näyttöpäätteellä saatu.

Syväksi hajakaiuiksi luokiteltiin roudan alarajaksi tulkittua (kolmatta) tasoa korkeammille kanaville saapuneet kaiut, koska ne eivät enää muodostaneet yhtenäiseksi hahmottuvaa rajapintaa ja koska ne näyttivät tulevan syvemmistä kerroksista. Näiden esiintymisessä voitiin todeta tiettyä säännönmukaisuutta, mm.

- ne olivat luonnontilaisella osuudella yleisempiä kuin talvitiellä (ks. taulukko 17, s. 43), ja
- ne olivat yleisempiä kuivemmillä soilla.

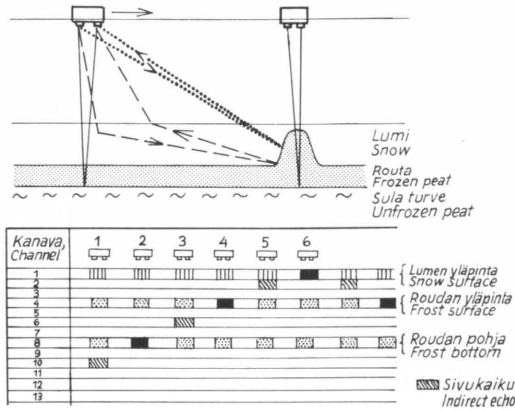
Viimeksi mainittuun seikkaan vaikuttaa mm. se, että vahvistus kuivilla soilla oli suurempi (vrt. s. 49).

Koska aallon vaimeneminen sulassa märässä turpeessa on erittäin suuri (eli tunkeumisyys vähäinen, kuva 12, s. 29), on oletettavissa, etteivät nämä syvät hajakaiut saada olla roudan alapuolisista kerroksista heijastuneita. Ojitetuilla soilla tällaiseksi voimakkaaksi heijastavaksi roudan alaiseksi pinnaksi voidaan ajatella ns. pohjaveden pintaa. Koska kapillaarisuuden vuoksi tällainen pinta itse asiassa lienee asteittainen muutosvyöhyke, ei varmasti voida olettaa selvää syvällä sijaitsevaa rajapintaa ojitetuillekaan soille. Lisäksi tällaisia syviä hajakaiuja näyttäisi ojitetulla suolla tulevan vielä ns. pohjavesipinnan alaisista kerroksista. Koska syväksi hajakaiuiksi luokitellut kaiut tuskin tulevat vaaka-suorista syvällä olevista kohteista, ne eivät alkuperältään ole suorita kaukuja, vaan todennäköisesti epäsuoria, jolloin niiden alkuperänä olisivat ei – vaaka-suorat (pientalaiset) dielektriset rajapinnat. Harhakaikutulkinta ainakin voidaan todeta vaihtelevan suon ominaisuuksien rytmisissä. Nämä syvät hajakaiut saattavat olla alkuperältään myös kombinoituja, jolloin ne syntyisivät kaksoisheijastuksina antennin ja jonkin voimakkaan rajapinnan välillä. Tällöin niiden tulisi olla kaksint. useampikertaisella syvyydellä suoraan kaukuun

nähdessä. Käsinalaskentana näiden mahdollisten kombinaatioiden etsiminen olisi ollut liiaksi resurssoja vaativa saadun tiedon arvoo verrattuna, joten systemaattiseen analyysiin ei ryhdytty. Todettakoon vain, että osa syvistä hajakaiuista voi olla suorien kaukujen kaksoisheijastuksia. Päosa näistä syvistä hajakaiuista voidaan tulkita epäsuoriksi ns. sivukaiuiksi, jotka heijastuvat jostain edessä (t. takana t. sivussa) olevasta voimakkaasta pinnallisesta pystysuorasta heijastuspinnasta. Tällaisen sivukaiun muodostumista tarkastellaan kuvan 27 avulla.

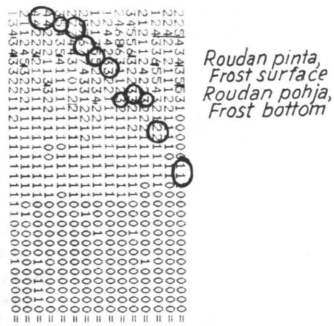
Antennista lähtevä aalto etenee joko ilmassa tai lumen kautta heijastuen sivulla oleviin kohteisiin ja heijastuu takaisin vastaanottoantenniin. Koska aallon nopeus lumessa on n. 1.5- ja ilmassa n. 1.8-kertainen (vrt. kaava (16) s. 28) verrattuna nopeuteen roudassa, näyttää kohde sijaitsevan 0.5–0.7 -kertaisen etäisyyden päässä syvyyssuunnassa. Kun tutka lähtee kohdetta, näyttää heijastuva kerros nousevan korkeammalle ja vastaavasti tutkan etääläntyyssä laskevan alemmaksi. Tutkagrammissa oli todettavissa tällaisia ”portaita” ja ”viiksikiä”, siis nousevia, laskevia tai kumpumaisia kauun syvyyssvaihteluita. Osa niistä näytti ilmeisen selvästi päättävän pinnalliseen kohteeseen, esim. mättäeseen tai lumivalliin. Usein syvät hajakaiut voitiin yhdistää tällaisiin linjoihin, kuva 28. Kaiut esiintyivät yleensä epäjatkuvina ja näkyivät usein yhdistyneenä toisista rajapinnoista tulleisiin suoriin kauuihin. Tällaisia ”portaita” ja ”viiksikiä” tavattiin usein talviten ja luonnontilaisen suon rajakohdissa. Osa tutkagrammissa näkyvistä kauuista on siis todellisia sivukaiuja, jotka oikein tulkittuina saattavat sisältää informaatiota suon pintaosien ominaisuuksista kuten mättäisyydestä, lumivalleista tms.

Todellisten kaukujen lisäksi tutkagrammiin saattaa sisältyä häiriökaukuja. Laitehäiriöistä syntyvät kaiut muodostuvat tietyille taajuuksille, jolloin ne näkyisivät profiileissa samalle kanavalle syntyneenä jatkuvana tasaisena huippuna. Tällaisia kaikissa profiileissa esiintyviä suorita linjoja ei silmävaraisessa tarkastelussa kuitenkaan havaittu. Tällaisten kaukujen paikallistaminen edellyttäisi kuitenkin oman testisarjansa, jossa esim. muutettaisiin antennin korkeutta. Koska kenttäkokeiden aikana ei tällaista testiä ollut suunniteltu, ei mahdollisia piileviä häiriökaukuja voida todeta. Ulkopuolisia häiriökaukuja saattaa syntyä kelkkaa



Kuva 27. Syvien hajakaikujen mahdollinen syntyminen routatutkauksessa.

Fig. 27. Probable explanation for the occurrence of deep random frost radar echoes (indirect echoes).



Kuva 28. Syvä hajakaiku routatutkan tutkagrammissa.

Fig. 28. A deep random echo on the frost radar radargram.

työnnettäessä, esimerkiksi jos työntäjän saapas osuu tutkan kenttään. Tällaiset häiriöt aiheuttavat tutkagrammiin selittämätöntä kohinaa. Testeissä, joissa saapasta työnnettiin tutkan kenttään, voitiin todeta pientä "värinä" näyttöpäätteellä, mutta saattaa olla, ettei tämä aiheuta tutkagrammin heijastushuippuja.

Yhteenvetona kaikujen alkuperästä todetaan, että pääosa kaiuista on todellisia eli sisältää informaatiota suossa olevista kerrok-

sista. Niiden perusteella voidaan suon routaja lumikerroksen paksuus määrittää sekä saada mahdollisesti informaatiota suon pinnan esteistä.

Edellä käsitellyt manuaalisesti suoritettujen analyysien perustuvat lähes yksinomaan heijastushuippujen tarkasteluun kerrossmallitusta vasten. Jo tällä perusmenetelmällä todettiin saatavan suon kerrosrajat riittävän tulkittavaan muotoon. Analyysia voitaneen vielä parantaa ottamalla huomioon myös kaiun muoto ja suhteellinen heijastusteho l. kaiun voimakkuus. Koska kaikkien näiden kombinaatioiden (pulssin huipun sijainti, kaiun leveys, kokonaisteho jakautuneena kerroksittain) mukaanottaminen manuaaliseen tarkasteluun osoittautui ylivoimaisen työlääksi, tarkastellaan seuraavaksi esimerkinomaisesti mahdollisuuksia, joilla signaalista saatavan informaation määrää voidaan lisätä.

Kaiun muoto ihanteellisissa 2-kerrosolosuhteissa, esimerkiksi kerroksettomalla jäällä, oli säännöllinen 2-huippuinen, jolloin etukaiku oli heikompi ja takakaiku voimakkaampi, kuten heijastuskertoimien perusteella tulisi ollakin (ks. s. 30). Routamittauksissa huippujen väliset suhteet vaihtelivat, kuten esim. kuvasta 23 (s. 41) voidaan todeta. Yleispiirteinä oli, että talviteillä heijastavin pinta oli yläkerroksissa ja luonnontilaisilla osuuksilla syvemmällä. Voimakas heijastus lumen ja rou-

dan välisestä rajapinnasta talviteillä johtuu mahdollisesti siitä, että tähän rajapintaan oli kevätauringon sulattamana kertynyt vesihöyryä ja kostea lumi on dielektrisiltä ominaisuuksiltaan kuivasta selvästi poikkeava. Pääosan tehosta heijastuessa jo pintaosista syvemmältä saatavat kaiut jäävät heikoiksi. Kuitenkin talviteillä oli paikoin havaittavissa, että pintakaiku jäi heikoksi, ts. aallot lävistivät pinnan helposti ja tällöin pohjakaiku oli voimakas. Koska kohdistusvirhe oli huomattava, ei voida sanoa, tapahtuiko tämä raiteiden kohdalla. Joka tapauksessa heijastustehojen tarkempi analyysi antaa mahdollisesti viitteitä rajapintojen ominaisuuksista.

Heijastussuhteiden ja heijastuneen/vaimentuneen (= suohon imeytyneen) tehon suhteiden voitiin todeta vaihtelevan radan sisällä. Esimerkiksi Lapinnevan 2. radalla korvesta nevalle siirtyessä heijastusteho kasvoi huomattavasti, kuva 31 (s. 51). Samoin havaittiin vaihtelua ratojen ja varsinkin soiden välillä. Tarkempi heijastustehojen analysointi osoittautui mahdolliseksi, koska signaalia nauhoitettaessa vahvistustasosäätimen (gain) asentoa muutettiin kokeen aikana. Parhaan tuloksen saamiseksi tutkan vahvistus kullakin radalla säädettiin ennen ajoa sellaiseksi, että korkein heijastushuippu näytti arvoa n. 10. Maastotöiden alussa ei vastaavaa vahvistustasoa voitu kirjata, ennen kuin tutkaa täydennettiin siten, että säätimen asento (= vahvistuksen voimakkuus) voitiin lukea asteikolta. Tällöinkin kirjanpito jäi epätäydelliseksi. Vasta kenttäkokeiden loppupuolella alkoi näet näyttää ilmeiseltä, että kokonaisvahvistustasosta voitaisiin saada suon kosteutta kuvaavaa informaatiota. Myös nauhoja purettaessa jouduttiin vahvistusta muuttamaan, sillä piirtäminen onnistui parhaiten silloin, kun korkein huippu jäi jonkin verran alle maksimitason.

Edellä mainituista syistä esitetään vain kenttäkokeiden yhteydessä tehdyt subjektiiviset havainnot, jotka ovat seuraavat:

- jäällä ja erittäin märällä suolla (Tennträsk) saatiin alhaisella vahvistustasolla selvät kaksi kaikua,
- märällä suolla, esim. Lapinnevalla, saatiin verraten alhaisella vahvistustasolla selvät kaiut tai yksi huippu ja pienellä vahvistuksen lisäyksellä koko signaali tulkittavaan muotoon,

- kuivilla soilla pientä vahvistusta käyttäen näyttöpäätteelle ei syntynyt kuviota, vaan vahvistusta oli lisättävä huomattavasti ennen kuin kaiut saatiin näkyviin.
- Kokonaishajastustehon ja suon kosteuden välillä näyttää siis olevan riippuvuus.

Kaiun muoto ihanneolosuhteissa muistuttaa normaalijakautuman tiheysfunktioita (vrt. s. 34). Tutkagrammissa pulssin muoto poikkesi usein tästä ollen matala ja leveä tai jompaankumpaan suuntaan vino. Syynä voi olla, että

- rajapinta on kalteva tai
- osassa pintaa on voimakkaampi heijastuskohde, esim. mätä, tai
- pulssi koostuu kahdesta yhteensulautuneesta heijastuksesta (kuva 29).

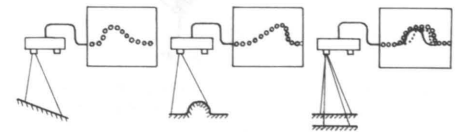
Tällaiset analyysit edellyttäisivät tietokoneen tulkinnan hyväksikäyttöä, mihin ei ollut mahdollisuutta. Todettakoon vain, että joissakin tapauksissa näytti ilmeiseltä, että esim. pulssin leveneminen johtui kahdesta lähekkäin olevasta huipusta, vrt. esim. kuva 23 (s. 41).

Yhteenvetona tietokonepäätteellä piirretyistä tutkagrammeista voidaan todeta, että niiden perusteella on mahdollista

- piirtää lumi- ja routakerrosprofiili, josta yleensä ilmenevät kerrosten muodot ja vähintään suhteelliset paksuudet,
- selvittää suon kosteuden vaihtelua, mikäli vahvistus nauhoituksen ja tulkinnan aikana tunnetaan, sekä
- saada jonkinasteista informaatiota mättäisyydestä ja muista pintamuodoista.

6152. Jatkuva profiili intensiteetti- ja vaihteluvälillä tulkittuna

Tutkasignaali voidaan muuttaa tulkittavaan muotoon myös intensiteetti- ja vaihteluvälillä, jolloin piirintä (kynää, valolähdettä) ohjataan sig-



Kuva 29. Kaiun muoto erilaisissa olosuhteissa.

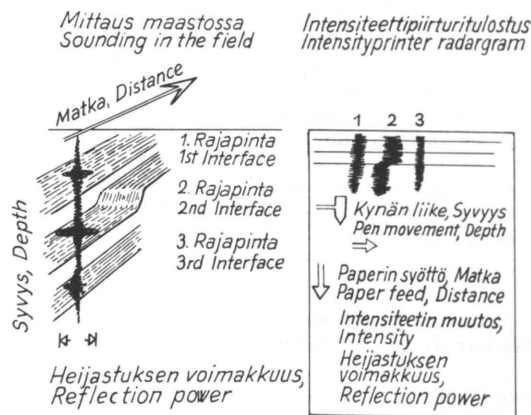
Fig. 29. Frost radar echo form in various conditions.

naalin jännitteellä siten, että jäljen tummuusaste on verrannollinen signaalin jännitteeseen. Tällöin, kun piirrin liikkuu vaakatasossa aallon kulkuajan suhteessa ja paperi etenee piirtimeen nähden tutkan maanopeuden suhteessa, saadaan paperille syntymään jatkuva tutkagrammi. Periaate esitetään kuvassa 30.

Kuusi Lapinnevan koeratojen tutkagrammia piirrettiin Helsingin Yliopistollisen Keskussairaalan Honeywell-intensiteetti-piirturilla. Piirrosojälki ei vastannut valmistajan esitteiden mukaista tasoa, mikä johtuu siitä, että laite on säädetty kiinteästi toisenlaisen signaalien käsittelyä varten, eikä tässä kokeilussa ollut mahdollista säätää harmaasävyasteikkoa l. muuttaa signaalin voimakkuuden ja piirtäjäljen tummuuden suhdetta. Niinpä tutkagrammissa on todettavissa vain 2 tai 3 sävyä. Tästä syystä koko kaiun leveys näkyy lähes yhtä tummana eikä kaiun huippu (t. huiput) erotu riittävän mustana. Erottelukyky on riittämätön tutkasignaalin todellisen informaatioarvon määrittämiseksi.

Kuvassa 31 esitetään pienennös Lapinnevan rata 3:n intensiteetti-piirturiprofiilista. Samaan kuvaan on piirretty tulkinta, joka perustuu kaikissa kuudessa profiilissa todettuihin säännönmukaisuuksiin (kirjaimet viittavat kuvaan 31).

- a) luonnontilainen osuus näkyy tummana leveänä häiriövyönä kanavilla 5–11; a_1, a_2
 b) talvitiien kohta näkyy tummana tasaisena vyönä kanavilla 1–6; b_1, b_2



Kuva 30. Intensiteetti-piirturitulostuksen toimintakaavio.
 Fig. 30. Outline of the recording of the intensity printer radargram.

- c) talvitiellä erottui kaksi tummaa piikkiä kanavilla 11–16; c
 d) osassa profiileja erottui selvä "olkapää" talvitiien ja luonnontilaisen suon rajakohdalla; d
 e) nevalta (märkä) korpeen (kuivempi) siirtyessä tummuussävy väheni; e.

Tutkasignaali on siis vaihdellut säännönmukaisesti olosuhteiden muuttuessa, l. tutkalla on saatu todellisia tai kombinoituja kuvia.

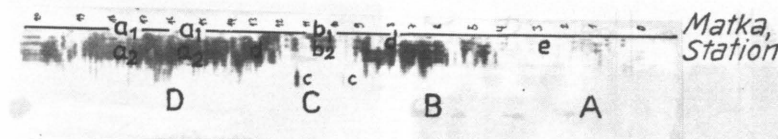
Yksityiskohtaisemmassa analyysissä voitiin todeta paikoin profiilissa näkyvien mättäiden erottuvan tutkagrammissa heijastuksina. Kuitenkaan täydellistä varmuutta tästä ei voitu saada, koska

- kohdistus oli epätarkka (kohdistusvirhe muodostui suureksi) ja
- tutkan heijastuskuvio tulee n. 1 m levyiseltä alueelta ja profiilikartoitus koski n. 0.1 m levyistä aluetta.

Kerrospaksuuksien absoluuttinen määrittäminen ei myöskään onnistunut, koska

- heijastushuiput eivät erottuneet riittävän tummin tutkagrammissa
- eikä lumikerroksen todellista paksuutta ollut mitattu.

Todettakoon, että tutkagrammissa näkyvä valkoinen vyöhyke (a_1) ei ole lumikerros, sillä laskelmien mukaan sen tulisi olla paksumpi. Harmaa vyöhyke ei myöskään ole routaker-



Selitys – Explanation

- a_1, a_2 Luonnontilainen osuus – Half packed snow cover
 b_1, b_2 Talvitiie – Winter road
 c Piikki oletetun roudan syvyydessä – A peak of the expected depth of frost penetration on a winter road
 d "Olkapää", lumikerros paksunee – "Shoulder", snow cover changes
 e Kuivempi korpiosuus – Drier spruce-bog section

Kuva 31. Intensiteetti-piirturitulostus Lapinnevan 3. koeradon routatutkan 2. ajosta.
 Fig. 31. The intensity printer radargram of frost radar for test track 3, run 2, from Lapinneva.

ros, vaan em. kerrosrajat ovat tämän harmaan heijastavan kerroksen sisällä.

Koneiden kulkukelpoisuusanalyysia varten ainakin seuraavat päätelmät voidaan tutkagrammin perusteella tehdä (kirjaimet viittavat kuvaan 31):

1. Radassa on neljä erilaista aluetta (A–D), joista alueet B ja D ovat samaa kulkukelpoisuusluokkaa.
2. Alue A on kuivempi kuin alueet B–D, ts. roudan murtolujuus todennäköisesti heikompi.
3. Kerrosrakenteet alueilla A, B ja D ovat samat, alue C poikkeaa.
4. Lumikerros (l. kerrosrakenteet) on alueella A, B ja D paksumpi kuin alueella C.
5. Talvitiie on kohdassa C, ja kohdat A, B ja D ovat luonnontilaista suota.

Nykyisen analyysikokemuksen mukaan (tältä yhdeltä suolta) voitaisiin tehdä vielä tarkemmat johtopäätökset:

Yhdeltä suolta piirretyn kuuden tutkagrammin analyysin perusteella tehtyjen johtopäätösten mukaan intensiteetti-piirturilla piirrettyistä tutkagrammeista voidaan vaivattomasti laatia ainakin laatuasteikollinen ja jonkinasteinen järjestysasteikollinen kantavuusanalyysi routaantuneesta suosta. Tämän pidemmälle meneviä varmoja johtopäätöksiä ei käytetystä laitteesta talven 1980 aineiston perusteella voida tehdä.

Kun verrattiin tietokonepääteellä ja intensiteetti-piirturilla piirrettyjä tutkagrammeja

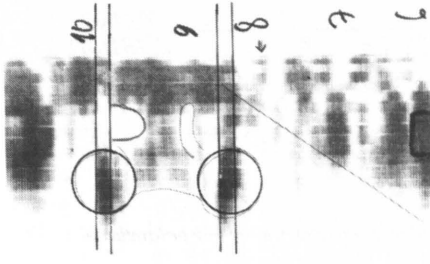
keskenään, voitiin niiden todeta hyvin vastaa- van toisiaan, sillä

- korkeat heijastuneet tehot näkyivät mustina intensiteetti-piirturilla ja korkeina arvoina tutkagrammissa
- informaatio näytti saapuvan samoille kanaville samanlaisena.

Esimerkkinä esitetään osa tietokonepääte-tutkagrammia ja vastaava kohta intensiteetti-piirturituloksesta (kuva 32). Heijastushuiput ovat samoilla kanavilla, ja tehon suhteet kanavilla täsmäivät muutoinkin hyvin. Tutkasignaali tulostuu siis samanlaisena molemmissa tulkintalaitteissa. Tulkinnan helpottamiseksi tietokonepääte vaatii tietokonekäsittelyn siten, että numeroarvojen asemesta heijastus voidaan plotata tummuusasteellisenä ja jatkossa vieläkin pidemmälle prosessoituna. Intensiteetti-piirturitulostus edellyttää laitetta, jonka harmaasävyasteikko voidaan säätää tutkakaikujen tulkinnan kannalta optimaaliseksi. Tällöin myös kerrokset ja kerrosrajat voitanevat tulkita entistä paljon tarkemmin ja vaivattomammin.

62. Maaperätutkakokeet ja niiden tulokset

Kokeiltua ESP (Electromagnetic Subsurface Profiling) -lyhytpulssitutkaa nimitetään tässä maaperätutkaksi. Tutkimuksessa käytettiin yhdysvaltalaisen Geophysical Survey Systems Inc:n rakentamaa kaupallista laitetta, joka vuokrattiin ruotsalaiselta Skanrad Ab:ltä. Maaperätutkaa kokeiltiin yhteensä neljän päi-



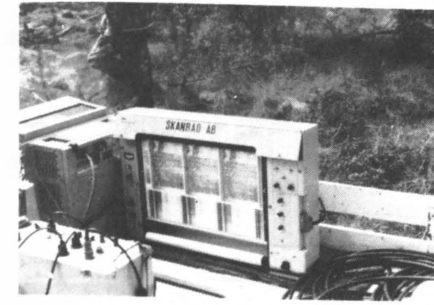
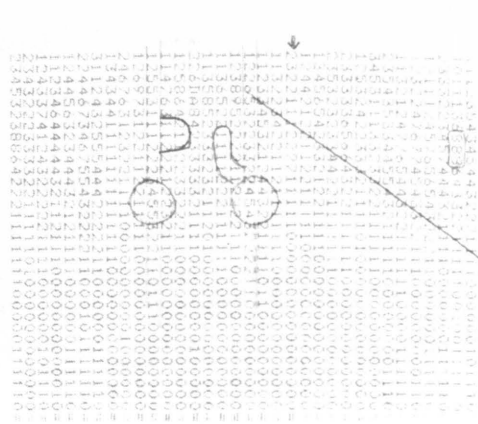
Kuva 32. Intensiteettiipiirturi- ja tietokonepäätetutkagrammin vertailu.
Fig. 32. Comparison of the intensity printer and computer printed radargrams.

vän ajan Helsingissä ja Ähtärissä useassa eri kohteessa kunnallistekniikan ja soiden tutkimuksen alalla. Tässä raportissa tarkastellaan vain soiden liikennöintiin liittyvää osaa koeohjelmasta.

621. Maaperätutkan rakenne ja ominaisuudet

Pulssitutkan periaate on kuvattu sivulla 29. Yhden pulssin asemesta tutka käytännössä lähettää noin puolentoista jakson pituinen vaimenevan värähtelyn, jonka taajuus määräytyy käytetyn antennin mukaan. Käytetyssä laitteessa taajuusalueeksi voidaan valita kuusi eri pulssin keskitaajuutta väliltä 80–900 MHz. Vastaavat pulssin pituudet ovat n. 6–1 ns. Korkeampia taajuuksia käytetään yleensä pinnallisten kohteiden tutkimiseen, jolloin saatetaan parempi erottelukyky, mutta tunkeutumissyvyys jää vähäisemmäksi. Suotutkimuksissa käytettiin 100 MHz keskitaajuutta, jolloin lähetyspulssin efektiivinen pituus on n. 15 ns. Erottelukykyksi saadaan määrässä sulas- turpeessa (ks. kaava (20), s. 30) n. 0.28 m.

Tutka koostuu elektroniikkaosasta, johon kuuluu lähetin-antenni-vastaanotinyksikkö, prosessointiyksikkö, nauhurista, intensiteettiipiirturista ja ulkopuolisesta virtalähteestä (kuva 33). Kaikkiaan laitteisto painaa n. 80 kg ja tehontarve on n. 1 000 W. Laitteen hankintahinta on suuruusluokaltaan 200 000 mk.



Kuva 33. Kokeissa käytetty maaperätutka.
Fig. 33. Short-pulse radar used in the tests.



Kuva 34. Tutkaluotaus Suolamminnevalla.
Fig. 34. Short-pulse radar subsurface profiling at Suolamminneva.

622. Maastokokeet maaperätutkalla

Kokeen tavoitteeksi asetettiin selvittää, saadanko suosta tutkakaikuja, ts.

- onko suon dielektrissä ominaisuuksissa tutkalla havaittavissa muutoksia ja
- sopivatko nämä ominaisuuksien muutosten rajat yhteen mekaanisen näyteenoton perusteella suon ominaisuuksista muodostettujen muutosrajojen kanssa.

Tutkimuskohde sijaitsi Ähtärin kunnassa Suolamminnevalla. Tutkimuslinjoja oli 3, joista kahdessa tutkimuskohteena oli syvä laaja-alainen suo ja yhdessä kapea suojuotti kivennäismaan välissä. Näistä 2 ensimmäistä edustaa varsinaisen turvemaiden puunkorjuun suo-olosuhteita ja kolmas kivennäismaan puunkorjuun yhteydessä esiintyvää tilannetta, jolloin on tehtävä päätös, erotetaan-ko pienialainen turvemaata omaksi korjuulohkokseen vai voitavko kivennäismaiden liikennöintiin suunnitellut metsäkoneet liikkua myös sillä. Suolamminneva edustaa satunnaisnäytettä soista, sillä valintaperusteena olivat koejärjestelyjen vaatimukset.

Kullakin tutkimuslinjalla luotaus suoritettiin 1–3 kertaa ja tulokset rekisteröitiin jatkuvina suoraa intensiteettiipiirturilla tutkagrammiksi. Kokeissa laite oli sijoitettu Territelamaasturin perärekeen ja antennia hinat-

tiin reen perässä (kuva 34). Virtalähteenä oli 1 000 W bensiinikäyttöinen 220 V vaihtovirtageneraattori. Käytetyt jaksoluvut olivat 80 tai 100 MHz. Ajonopeus mittalinjoilla oli n. 0.8–1.1 m/s (3–4 km/h).

Suon ominaisuuksista kerättiin tietoja

- pliktaamalla mittalinja 2 m:n välein,
- ottamalla tilavuusnäytteet 11 pisteestä 10 cm korkein näytein pohjaan saakka. Näistä määrättiin laboratoriossa märkä- ja kuivatilavuuspainot ja vesipitoisuus normaalimenetelmillä (Peat testing manual 1979),
- määrittämällä turvenäytteiden perusteella turpeen maatumisaste ja turvelaji, ja
- mittaamalla siipikairalla turpeen leikkauslujuus 20 m etäisyyksin 0.25 m syvyysittain.

Lisäksi määritettiin suotyyppejä ym. suon ominaisuuksia.

Koska tutkimus kuuluu osana laajempaan soiden tutkimusmenetelmien kehittämiseen ja koeohjelmaa tullaan tarkemmin kuvaamaan myöhemmin julkaistavissa raporteissa, ei aineiston keruun ja käsittelyn yksityiskohtaista esittelyä tässä yhteydessä suoriteta.

623. Aineiston käsittely ja tutkimustulokset

Maaperätutkalla saatu intensiteettiipiirturitulosten pienennös Suolamminnevan päälinjasta esitetään kuvassa 35. Silmävaraisen tarkastelun perusteella voidaan erottaa (kirjaimet viittaavat kuvaan 35):

- suon pintakerros, josta tutkan mittauskykyyn vuoksi ei saada tietoja; A. Tämä kerros on alle 0.5 m paksuinen.

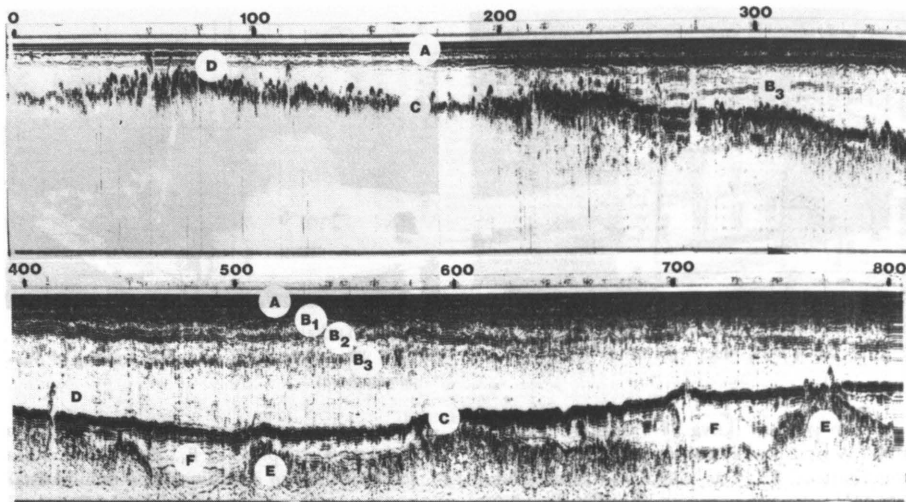
- suossa olevia voimakkaasti heijastavia dielektrisiä rajapintoja; B₁, B₂, B₃ jne., jotka johtuvat turpeen ominaisuuksien muutoksista.
- turpeen ja kivennäismaan rajapinta; C
- kiviä ja/tai kantoja; D
- moreenipohjamaa; E
- siltipohjamaa; F.

Pliktauksen ja tutkagrammilta mitattujen aallon kuluaikojen välinen korrelaatio oli erittäin merkitsevä, kuten voidaan todeta seuraavasta mallista (26)

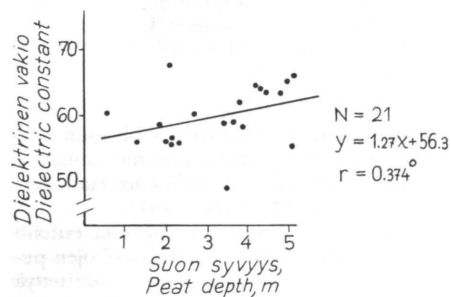
$$y = 0.0175x + 0.36, \quad (26)$$

jossa selitettävänä muuttujana y oli suon pliktattu syvyys (m) ja selittäjänä muuttujana x oli aallon kuluaika (ns), sillä korrelaatiokerroin oli r = 0.984*** (N = 401).

Suon syvyys voidaan siis määrätä erittäin tarkasti yksinomaan aallon kuluaikojen perusteella käyttäen kokeellisesti määritettyä riippuvuutta. Vakion arvosta yhtälössä (26) voidaan kuitenkin päätellä, että saatu malli on osittain virheellinen, koska kuluaikaa 0 tulisi vastata suon syvyys 0. Ero johtunee pääosin turpeen kosteuden ja suon syvyyden korreloituneisuudesta. Turve on määrittä suon syvimmissä osissa ja kuivinta matalilla osuiksilla. Dielektrinen vakio on vesipitoisuudesta riippuva, ja näin ollen sen tulisi kasvaa suon syvyyden kasvaessa. Kerätyn aineiston perusteella näin näyttäisi käyvän (kuva 36). Kulukelpoisuusanalyysissä tällä ei ole suurta merkitystä, sillä dielektristen vakioiden muutokset näytävät pieniltä. Niiden tarkempi selvitys jätetään tutkimuksen jatkotutkimuksiin kuuluvana pois. Käytännön sovellutuksiin suon pohjan suhteellinen syvyys on riittävän oikea.



Kuva 35. Tutkagrammi Suolamminnevasta.
Fig. 35. Short-pulse radargram from Suolamminneva.



Kuva 36. Dielektrisen vakion riippuvuus suon syvyydestä.
Fig. 36. Dielectric constant vs. peat depth.

Verrattaessa suossa olevia ja tutkagrammissa näkyviä kerrosrajoja tulkinta osoittautui vaikeaksi, sillä suossa on useita kerroksia, joissa

- turpeen maatumisaste,
- vesipitoisuus ja/tai
- turvelaji

muuttuivat, eikä täysin yksiselitteisiä yhteisiä kerrosrajoja voitu alustavissa analyyseissa löytää, koska dielektristen vakioiden erojen

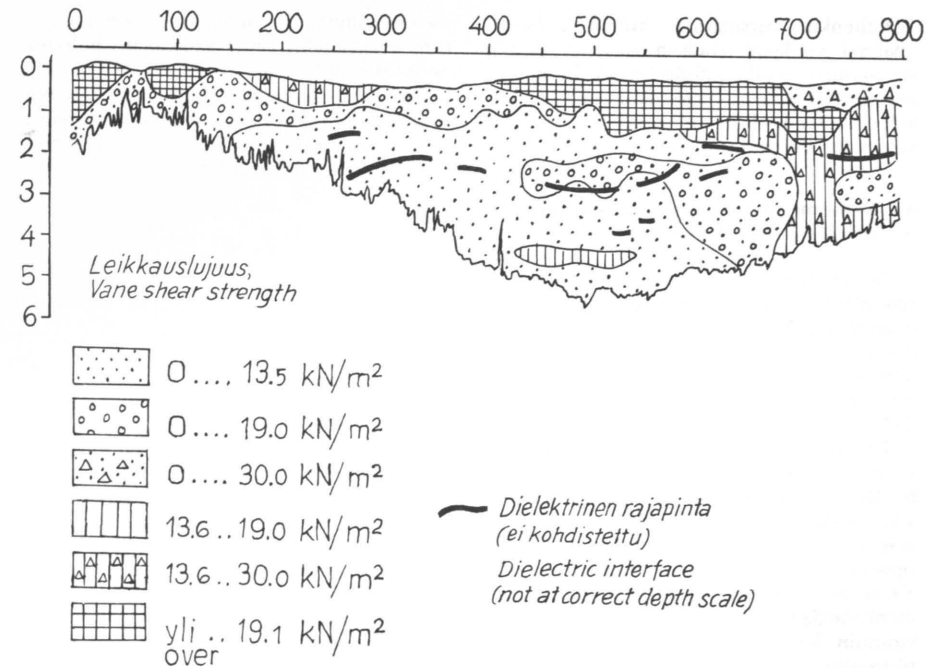
vuoksi kerrospaksuudet eivät täsmää tarkasti kulkuajan kanssa. Tutkagrammissa esiintyvät kerrosrajat ovat kuitenkin todellisia eli heijastuneita dielektrisistä rajapinnoista, joihin liittyy turpeen ominaisuuksien muutos (vrt. Bjelm 1980).

Verrattaessa tutkagrammia 20 m välein laadittuun siipikairausprofiiliin on nähtävissä, että kerrosrajat yhtyvät osittain suon keskiosan erittäin heikon alueen rajoihin (kuva 37). Kuitenkaan varsinaista kantavuusanalyysia ei yksinomaan tutkagrammin perusteella pystytä laatimaan ainakaan nykyisen kokemuksen perusteella.

Kuvassa 38 esitetään tutkagrammi hiekkakankaalla sijaitsevasta matalan rämejuotin ylittävästä mittalinjasta. Suon pohjamuoto erottuu erittäin hyvin, joten suon syvyys on selvästi tulkittavissa. Kuvassa syvemmällä näkyvää toista rajapintaa ei maastomittauksin tutkittu tarkemmin. Se saattaa olla pohjaveden pintaan tai maalajin muutokseen liittyvä.

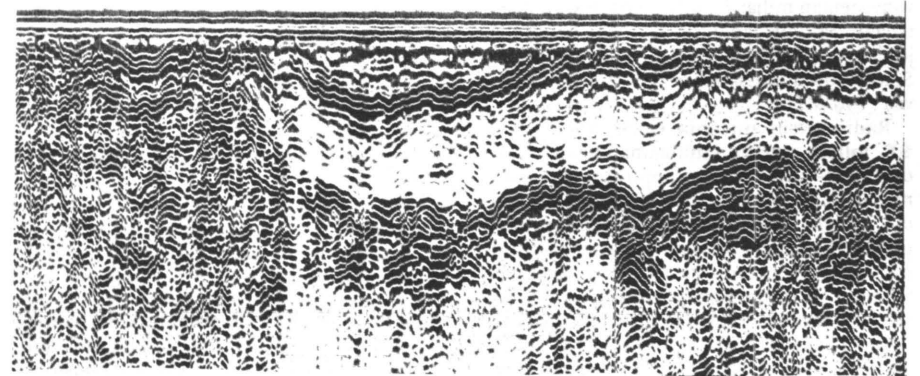
Yhteenvetona tästä maaperätutkakokeesta voidaan todeta, että tutka-aallot etenevät hyvin turpeessa ja niiden avulla saadaan

- erittäin tarkka ja yksityiskohtainen suon pohjaprofiili (turvekerroksen paksuusprofiili),
- jonkinasteista tietoa suon kerroksellisuudesta ja
- viitteitä pohjamaasta.



Kuva 37. Turpeen leikkauslujuus ja pulssitutkalla luodatussa tutkagrammissa selvästi erottuvat dielektriset rajapinnat.
Fig. 37. Peat shear vane strength and dielectric interfaces clearly evident on the radargram obtained with the short-pulse radar.

(RÄME, BOG)



Kuva 38. Pulssitutkaman tutkagrammi hiekkamaalla sijaitsevasta matalasta rämejuotista.
Fig. 38. Short-pulse radargram of a shallow peat area in a gully on sandy soil.

Kuitenkin varsinainen kulkukelpoisuus-analyysi voidaan tehdä ainoastaan yleisen stratigrafian avulla, jolloin kerroksille sijoitetaan keskimääräisiä oletettuja arvoja. Kulkukelpoisuutta koskeva informaatio on tällöin vähintään järjestysasteikollista.

63. Radiometrillä suoritettavat maastokokeet ja niissä saadut tulokset

Radiometri on alunperin suunniteltu merenkulkuun liittyviin merijään paksuuden mittauksiin (Tiuri ym. 1976, 1978). Sen soveltuvuutta turvevarojen inventointiin on selvitetty Radiolaboratorion ja Geologisen tutkimuslaitoksen toimesta (Jakkula 1979a, Tiuri 1979).

Tutkimuksen maastotyöt suoritettiin yhteistyönä Teknillisen korkeakoulun radiolaboratorion, Geologisen tutkimuslaitoksen, Pääesikunnan pioneeriosaston, Oulun yliopiston geofysiikan laitoksen ja Helsingin yliopiston metsäteknologian laitoksen kesken. Tässä tutkimuksessa tarkastellaan radiometrimenetelmää suon kulkukelpoisuuden arvioinnin kannalta. Suon kulkukelpoisuutta päätettiin arvioida resurssirajoitusten vuoksi geobotaanisena tekemällä havaintoja kasvipeitteestä ja suon pinnan ominaisuuksista sekä mittaamalla turpeen leikkauksuuuuta.

63.1. Radiometrin rakenne ja toiminta

Radiometri koostuu antennista, joka vastaanottaa maasta lähtevää säteilyä, herkästä vahvistinosasta ja ilmaisimesta, jossa signaali vahvistetaan miljardi (10⁹) -kertaiseksi ja käsitellään. Mittaus tapahtuu kolmella kanavalla, joiden taajuudet ovat 610, 790 ja 930 MHz. Soiden mittauksissa käytettiin vain yhtä kanavaa (790 MHz).

Radiometrin antennin keilan leveys on n. 40°, jolloin antennin mittaaman alueen koko on (lento-)korkeudesta riippuvainen. Radiometrin integrointiajan pituutta voidaan säätää, ja näin lentokorkeuden ja maanopeuden perusteella valita erottelukyvyn kannalta optimaalisen integrointiaika. Laitteen tekninen rakenne ja integrointiajan määräytyminen on tarkemmin kuvattu Jakkulan (1979a) tutkimuksessa. Käytetyn laitteen herkkyys on 0.7 K. Radiometrin mittaama kirkkauslämpötilan vaihtelua kuvaava signaali voidaan nauhoittaa ja purkaa myöhemmin piirturilla.

teen mittaama hetkellinen (integrointiajan pituinen) signaalin arvo saadaan myös halutussa digitaalisena.

Radiometrin antennin halkaisija on n. 600 mm ja korkeus 300 mm. Vahvistin-ilmaisinosan mitat ovat n. 325 × 330 × 150 mm. Laitteisto painaa käyttökunnossa n. 20 kg, ja tarvittava käyttöjännite on 24 V.

Radiometriluotauksen periaate esitetään kuvassa 39.

63.2. Kenttäkoekäiden järjestely ja aineiston keräys

Tutkimuskohteiksi valittiin 5 suota, joista 4 kuuluu Pohjanmaan aapasoihin ja 1 Etelä-Suomen keidasoihin. Tutkimussuot valittiin sattumanvaraisesti Geologisen tutkimuslaitoksen turvevarojen inventoinnissa tutkituista soista. Valintaan vaikuttivat eniten tutkimusten järjestelyjen asettamat vaatimukset. Kullakin suolla kohteeksi valittiin suon pituus-suuntainen selkälinja, jonka lisäksi tavoitteena oli mitata myös yksi poikittaislinja. Resurssien puutteen vuoksi poikittaislinjoja mitattiin vain kaksi. Myös jonkin verran Palonevan selkälinjasta jäi mittaamatta. Kaikkiaan aineistoon sisältyy 20.4 km mittalinjaa, joka jakaantui soittain taulukon 19 osoittamalla tavalla.

Mittauslinjoilla suoritettiin maastomittauksia ja suon kirkkauslämpötilan mittaus helikopterilentona. Lisäksi tutkimussuot ilmalokuvattiin.

Maastomittaukset tehtiin heinäkuussa 1978 ja kirkkauslämpötilan mittauslennot syyskuun 2. ja 3. päivänä 1977 sekä elokuun 14. ja 15. päivänä 1978. Tutkimusryhmä suoritti mittauslinjoilla 25 m välein seuraavat arvioinnit ja mittaukset:

Olosuhdetiedot

- vetisyys (ks. seur. sivu)
- mättäisyys ja rimpisyys, %, sekä mättäiden korkeus, dm
- puusto ja kasvu
- kasvipeite
- opaskasvit: paju, raate
- ojitushavainnot

kirjattiin lähinnä Geologisen tutkimuslaitoksen Turvetutkimusten maasto-oppaan mukaisesti (Lappalainen ym. 1978a). Puusto ja kasvu arvioitiin kuitenkin muutetuina luokina (ks. liite 7, s. 97).

Turpeen leikkauksuuuuta mitattiin Borron turvesiipikairalla (4-siipinen, 160 × 80 mm) 0.25–1.0 m syvyydeltä 0.25 m välein ja 1.0 m lähtien 0.5 m välein.

Helikopterin lentonopeus oli n. 70 km/h ja lentokorkeus n. 30 m. Tällöin antennin keilan halkaisija maan pinnalla on n. 22 m eli lähes paaluväli. Signaali nauhoitettiin 1. kanavalle ja 2. kanavalle annettiin kohdistustieto maastoon merkittyjen 100 m paalujen perusteella sekä olosuhteita koskevia kommentteja. Paikoin kohdistusmerkit eivät kuitenkaan näkyneet maastossa. Nauhoitusta purettaessa piirturilla kohdistuspisteet lisättiin käsin 2. kanavalla kuuluvan sanelun perusteella.

Kirkkauslämpötila saatiin osittain suoraan piirturitulosuksesta, osittain valmiiksi piirretyistä Jakkulan (1979a) profiileista. Radiometrisignaali koodattiin mitattuna pistemäisenä kirkkauslämpötilana ottamalla kirkkausläm-

Vetisyysluokat:

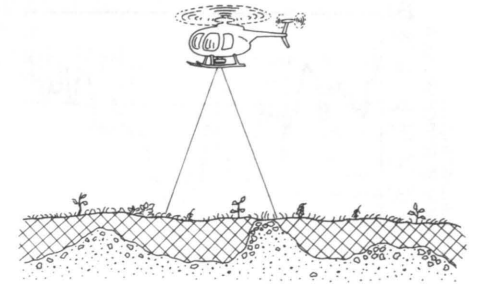
1. Kuiva, kun vesi ei tirsku saappaan pohjan alla
2. Normaali, kun saappaan pohja kastuu
3. Vetinen, kun saappaan kärki peitty vedellä
4. Hyllyvä, kun saappaan varsi on vedessä, suon pinta hylly
5. Rimpinen, kun saappaan varsi ei riitä.

Taulukko 19. Radiometriluotausaineistoon sisältyvien mittauslinjojen pituus.
Table 19. Length of the test lines in the radiometer sounding.

Suo <i>Peatland</i>	Sijaintikunta <i>Community</i>	Päähdistelmä- tyyppi <i>Main peatland type</i>	Mitattu selkä- linjan pituus, m <i>Measured base line length, m</i>	Mitattu poikkilinan pituus, m <i>Measured secondary line length, m</i>	Mittalinjojen ¹ kokonaispituus, m <i>Total line length,¹ m</i>
1. Paloneva	Rantsila	Aapasuo <i>Fen</i>	3 800		3 800
2. Matoneva	Ruukki	Aapasuo <i>Fen</i>	4 625		4 625
3. Isoneva	Perho	Aapasuo <i>Fen</i>	2 950	1 000	3 950
4. Savilamminneva	Perho	Aapasuo <i>Fen</i>	4 700	1 150	5 850
5. Kurkisuo	Hyvinkää	Kohosuo <i>Raised bog</i>	2 200		2 200
Yhteensä – Total			18 275	2 150	20 425

¹ Mitattuun pituuteen kuuluvat vain ne linjan osat, joilla on tehty sekä radiometri- että maastomittaukset.

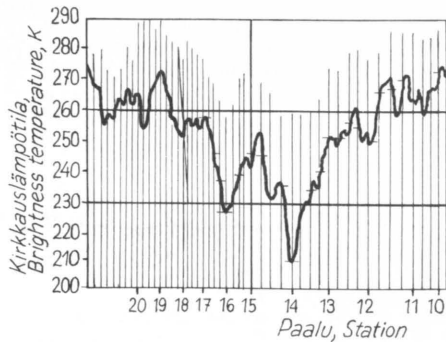
¹ Includes only those lines for which both radiometer sounding and manual measurements were made.



Kuva 39. Radiometriluotaus helikopterista.
Fig. 39. Radiometer measurement of brightness temperature from helicopter.

pötilan jatkuvasta kuvaajasta näyte 25 m välein (kuva 40). Tämä tapahtui jakamalla kohdistusmerkkien väli neljään osaan ja mittaamalla kirkkauslämpötila merkin kohdalta. Aineistoon liitettiin Jakkulan tutkimuksessa esitetyt v. 1977 radiometrilentojen kirkkauslämpötilamittaukset.

Em. maastomittauksia tai arvioiteja koskevaa tiedostoa täydennettiin liittämällä siihen Geologisen tutkimuslaitoksen turvevarojen inventoinnin mukaiset tiedot pääpaaluilta



Kuva 40. Kirkkauslämpötilan näytteenottomenetelmä.

Fig. 40. Brightness temperature sampling method.

(100 m paalut). Näihin sisältyivät seuraavat pintaa ja turvekerrosta koskevat havainnot

- suotyyppi,
- pinnan vaarake korkeustaso,
- koodattu turvekaava 0.5 m syvyys ja
- suon syvyys.

Pinnan korkeus ja suon syvyys merkittiin interpoloituina myös välipaaluille.

Peruskartan kulkukelpoisuusluokka kirjattiin muuttujaksi (ks. liite 7, s. 97). Tämän lisäksi tiedostoa täydennettiin mm. ojitusta ja lannoitusta koskevilla tiedoilla, jotka saatiin KML Tapiolta ja Metsähallituksesta.

Tutkimuksen muuttujaluettelo esitetään liitteessä 7 (s. 97). Kaikkiaan aineistoon sisältyi 864 hyväksyttyä tietuetta (paalua), eli seläistä tietuetta, jossa mukana olivat sekä maasto- että kirkkauslämpötilamittaukset.

Aineistoon liittyvien linjojen profiilit esitetään liitteessä 8 (s. 100). Mittalinjoilla tavattiin 16 erilaista suotyyppiä, ja lisäksi Palonevalla linja ylitti sekä tuotannossa että valmistusvaiheessa olevia turvetuotantokenttiä. Yksikään soista ei ollut kokonaisuudessaan luonnontilassa, mutta kokonaisuudessaan ojitettua Isonevaa lukuunottamatta linjoilla tavattiin myös luonnontilaisia, ojitamattomia osuuksia. Suon syvyys vaihteli 0–7 m:n välillä.

633. Tutkimustulokset radiometrillä suoritetuista mittauksista

Analyytit tehtiin kahdella eri tavalla, pistemäisinä käyttäen apuna tilastollisia testejä se-

kä linjoittaisina, jolloin pääpaino oli silmävärisesti suoritetuilla profiilien yhteensopivuusien vertailuilla. Analyyseissa käytettiin HYLPS-ohjelmistoa (HYLK 1981), joissakin laskutoimituksissa myös TI-51-III taskulaskinta (Texas Instruments 1978).

Ensimmäisessä vaiheessa korrelaatio- ja regressioanalyysin tarkoituksena oli selvittää kirkkauslämpötilan ja suon ominaisuuksien välisiä riippuvuuksia. Analyytit tehtiin pistemäisinä, ja tietueena oli paalu. Palonevan turvetyömaa poikkesi kirkkauslämpötilaltaan merkittävästi muusta aineistosta. Turvetyömaan kirkkauslämpötila oli erittäin alhainen, vaikka tuotantokentän pinta oli kuiva ja paikoin pinnalla oli vielä ohut kerros kuivaa jyrsinturvetta. Syvemmät kerrokset olivat märkiä, sillä ojitus oli nuorta ja tuotanto oli aloitettu vasta edellisenä kesänä. Kasvipeitteen ja pinnan karheuden voidaan todeta vaikuttavan kirkkauslämpötilaan erittäin merkittävästi. Koska turvetyömaa poikkesi muusta aineistosta, jatkoanalyyseista poistettiin tätä koskevat havainnot, joten tulokset koskevat aineiston kasvipeitteistä osaa.

Parhaiten kirkkauslämpötilan kanssa korreloi muuttuja ”Karttaluokitus”, joka oli peruskartan luokituksen perustava järjestysasteikollinen muuttuja (vrt. liite 7, s. 97). Todettakoon tässä yhteydessä, että luokkiin 1 ja 2 (kivennäismaa ja soistunut kangas) kuuluvia havaintoja oli vähän. Korrelaatiokerroimet koko aineiston kasvipeitteisessä osassa ilmenevät taulukosta 20.

Karttaluokitus on luonteeltaan kulkukelpoisuusluokitus, joten kirkkauslämpötilan ja kulkukelpoisuuden välillä vallitsee erittäin merkittävä riippuvuus.

Taulukossa 21 esitetään soittain korkeimmat korrelaatiokerroimet eri muuttujien ja kirkkauslämpötilan välillä. Suon mättäisyys-riippuvuus on suon kirkkauslämpötilan kanssa voimakkaasti korreloiva tekijä, samoin useilla soilla myös syvyys. Puustomuuttujat, puusto ja/tai kasvu ovat niin ikään voimakkaasti korreloituneet kirkkauslämpötilan kanssa. Raateen esiintyminen on kirkkauslämpötilan kanssa korreloiva ominaisuus. Kun otetaan huomioon korrelaation suunta, voidaan päätellä, että

- kirkkauslämpötila on alhainen puuttomilla kohteilla, joilla on korkea rimpisyysprosentti ja joilla kasvaa raatetta. Usein nämä kohdat ovat keskimääräistä syvempiäkin.

Taulukko 20. Kirkkauslämpötilan ja karttaluokituksen mukaisen kulkukelpoisuuden väliset korrelaatiokerroimet soittain.

Table 20. Correlation between brightness temperature and map-based trafficability classification by peatland.

Suo Peatland	Korrelaatiokerroin Correlation coefficient	Havaintoja, kpl Observations, no.	Merkitsevyys Significance
Paloneva	0.890	54	***
Matoneva	0.421	186	***
Isoneva	0.209	160	**
Savilaminneva	0.440	235	***
Kurkisuo	0.369	89	***
Koko aineisto Total	0.475	724	***

Taulukko 21. Kirkkauslämpötilan ja eri muuttujien korkeimmat korrelaatiokerroimet soittain.

Table 21. Correlation coefficients between brightness temperature and various variables by peatland.

Suo – Peatland	1	2	3	Havaintoja Observations
Paloneva	$x_{49}, (-.890)$	$x_{90}, (-.765)$	$x_7, (-.743)$	54
Matoneva	$x_{19}, (-.487)$	$x_8, (.467)$	$x_{49}, (-.421)$	186
Isoneva	$x_{19}, (-.375)$	$x_8, (.322)$	$x_{90}, (-.277)$	160
Savilaminneva	$x_{49}, (-.440)$	$x_{19}, (.227)$	$x_6, (-.200)$	235
Kurkisuo	$x_{15}, (.388)$	$x_{49}, (.369)$	$x_{90}, (-.312)$	89
Koko aineisto – total	$x_{49}, (-.475)$	$x_8, (.328)$	$x_7, (-.312)$	724

x_6 mättäisyys, % – hummock coverage, %

x_7 rimpisyys, % – rimp, %

x_8 puusto (lk 0–9) – tree cover (classes 0–9)

x_{15} kasvu, cm/a – increment, cm/a

x_{19} dummy muuttuja ”Raate” – dummy factor ”Mennythes”.

x_{90} suon syvyys, dm – peatland depth, dm

x_{49} karttaluokitus – map-based classification

– miinusmerkki tarkoittaa negatiivista korrelaatiota – negative correlation

Vastoin oletusta pinnan vetisyys (x_4) (ks. s. 56) ei korreloinut merkittävästi kirkkauslämpötilan kanssa. Sen sijaan turpeen leikkauksella, (kokonaan ojitettua) Isonevaa lukuunottamatta, oli merkittävä – erittäin merkittävä negatiivinen korrelaatio, joten edellä mainittuun alhaisen kirkkauslämpötilan pisteeseen liittyy yleensä alhainen turpeen leikkauksuus.

Aineistosta suoritettiin faktorianalyysi, jonka tulokset olivat samansuuntaiset. Korkeimpien faktorilatausten perusteella voidaan kuvata

- kuiva
- rimmetön

- puinen, lähinnä mäntyinen, hyvin kasvava
- varpuiteeltaan tiheä, muttei ruuhoinen
- karttaluokitukseltaan heppokulkuinen, puinen
- ojitettu ja
- leikkauksuukseltaan korkea

faktori, jonka lataus kirkkauslämpötilan kanssa on 0.600, ts. tällaiset kohteet ovat kirkkauslämpötilaltaan korkeita. Omaksi faktorikseen näytti muodostuvan (Kurkisuo) kuusikko, joka erottuu muuta kylmempänä (negatiivinen faktorilataus).

Kirkkauslämpötilaltaan korkeiksi osoittautuivat metsänparannuskohteet, sillä tämä faktori korreloi positiivisesti kirkkauslämpötilan kanssa. Osittain vaikutus näkyi jo 1. faktoris-

sa, yleensä kuivalla, puustoisella suolla tavattavassa korkeassa kirkkauslämpötilassa, mutta erikoisen lämpimiä olisivat siis metsänparannuskohteet (Isoneva?).

Samanlaiset johtopäätökset voidaan tehdä myös regressioanalyysin pohjalta. Analyysissä käytettiin valikoivaa askeltavaa regressioanalyysia päävaikutusten selvittämiseksi. Parhaaseen kirkkauslämpötilaa selittävään malliin saatiin t-testin mukaan 10 erittäin merkitsevästi selittävää muuttujaa. Kuitenkin mallin selitysaste koko aineistossa on alhainen, $R^2 = 33.3\%$ (yhteiskorrelaatiokerroin $r = 0.577$), joten suuri osa kirkkauslämpötilan vaihteluista jäi selittämättä. Merkitsevimmän ja eniten selitystasetta nostavat muuttujat olivat

- x_5 ja x_6 , mättäisyys, %, ja mätäskorkeus, dm,
- x_8 , puustoluokka (0-9, aukea - järeä tukkipuu),
- x_{15} ja x_{16} , ruohopeitto ja sammalpeitto, %
- x_{49} , karttaluokitus (1-6, kantava - ylipääsemätön).

Koska mukana oli myös keskenään korreloivia muuttujia ja järjestysasteikollisia luokamuuttujia, eivät regressioanalyysin matemaattiset oletukset olleet täysin voimassa. Analyysivaiheen tulos on kuitenkin päävaikutusten suhteen merkitsevä. Yhteenvetona eri regressioanalyysistä voidaan todeta

- selitystasasteet jäävät yleensä alhaisiksi ($R^2 < 40\%$), joten kirkkauslämpötilaan vaikuttavat muutkin kuin tutkitut tekijät,
- paras kirkkauslämpötilaa selittävä muuttuja oli karttaluokitus,
- mätäiden korkeus ja/tai rimpisyys-% vaikuttivat erittäin merkitsevästi,
- puustomuuttuja tuli yleensä mukaan merkitsevässä ja
- ruoho- ja sammalpeitto olivat myös pääsääntöisesti merkitsevästi mukana malleissa.

Syynä alhaisiin selitystasasteisiin ovat osittain seuraavat laskentamenetelmän puutteellisuudet:

- tietueen kuvaus on pienialaisempi kuin radiometrin mitta-alue,
- kohdistusvirhe l. maastopisteen ja kirkkauslämpötilasignaalin eroaminen paikallisesti toisistaan ja
- tasoitusvirhe, joka aiheutuu signaalin muuntamisesta pistemäiseksi radiometrin lukemaksi.

Mitattujen maastotunnusten perusteella kirkkauslämpötilan vaihtelun selittäminen ei siis onnistunut kovinkaan tarkasti. Kuitenkin tulosten perusteella voidaan todeta radiometrisignaalin riippuvan suon kulkukelpoisuuteen liittyvistä parametreista, joten kirkkauslämpötilaa mittaamalla voidaan saada järjestysasteikollista tietoa suon kulkukelpoisuudesta. Yleisesti voidaan informaatio tulkita seuraavasti:

- korkea kirkkauslämpötila \Leftrightarrow hyvä kantavuus tai kulkukelpoisuus
- alhainen kirkkauslämpötila \Leftrightarrow huono kantavuus tai kulkukelpoisuus

Analyysia jatkettiin tekemällä uusi suon kulkukelpoisuutta kuvaava muuttuja "Kulkukelpoisuusindeksi" suon pinnan vetisyyden (x_4) ja turpeen leikkauslujuuden perusteella taulukon 22 mukaisesti. Keskimääräistä leikkauslujuutta kuvattiin neljän eri keskiarvon (0.25-pohja, 0.25-0.50, 0.25-0.75 ja 0.25-1.00 m) avulla, kuitenkin siten, että jos suon syvyys oli alle keskiarvosyvyyden, matalampien syvyyskeskiarvo siirrettiin myös suuremmille syvyyksille. Kaikkien neljän keskiarvon tuli olla korkeampia kuin taulukossa 22 annettu keskiarvoraja. Kulkukelpoisuus siis huononee indeksin kasvaessa ja luokkia 1-(2) voidaan pitää hyvänä ja 8-9 huonoina.

Pintakasvillisuuden yhteisvaikutusta kuvaamaan muodostettiin uusi muuttuja "Kasvipintaluokka" seuraavasti:

$$\text{kasvipintaluokka} = \text{puustoluokka} + \frac{\text{varpupeitto-\%}}{10}$$

Muuttujan voidaan ajatella korreloivan sekä kirkkauslämpötilan että liikennöitävyyden kanssa. Yksinkertaistettu kirkkauslämpötilan käyttäytyminen voidaan kuvata seuraavasti:

- jos pinta on tasainen (kasvipintaluokka = 0), kirkkauslämpötila on riippuvainen turpeen dielektrisestä ominaisuudesta, ja
- jos varpupeitto alkaa tihentyä, pinnan karheus kasvaa ja kirkkauslämpötila kohoaa, vaikka turpeen ominaisuudet pysyisivätkin vakiona, sekä
- myös puustoverhon tihentyminen lisää kirkkauslämpötilaa, joten pintakasvillisuuden yhteisvaikutus saadaan summaamalla kasvipite-

Taulukko 22. Liikennöitävyyttä kuvaavan "kulkukelpoisuusindeksin" määrittely.
Table 22. Index of trafficability used in this study.

Turpeen leikkauslujuus keskimäärin, kN/m ² (0.25, 0.50, 0.75 ja 1 m syvyyksillä)	Pinnan vetisyyden luokka - Surface wetness class				
	1	2	3	4	5
Mean vane shear strength, kN/m ² (0.25, 0.50, 0.75 and 1 m depths)	Kulkukelpoisuusindeksi - Index of trafficability				
20.0 -	1	3	6	8	9
17.5 - 19.9	2	4	7	8	9
15.0 - 17.4	3	5	7	8	9
12.5 - 14.9	4	6	7	9	9
- 12.4	5	7	7	9	9

vaikutus. On huomattava, että kyseessä on erittäin voimakas yksinkertaistus ja että todellinen riippuvuus on komplisoidumpi. Todettakoon, että komplisoidumpaa mallia (27) ei kokeiltu.

$$T_B = a x_4^n + b x_4^m \quad (27)$$

jossa
 T_B = kirkkauslämpötila
 x_8 = puustoluokka
 x_{14} = varpupeitto, %
 a, b, n, m = vakioita

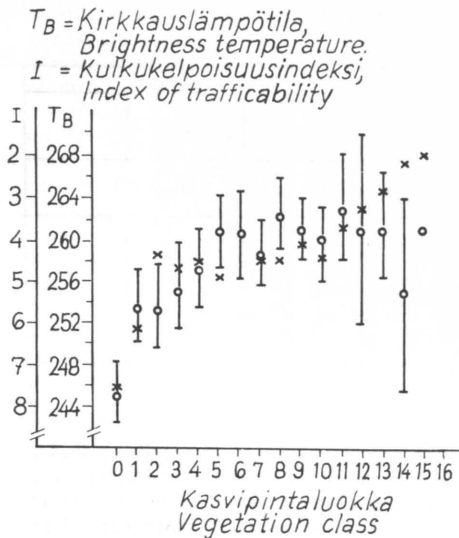
Kirkkauslämpötilan, kasvipingintaluokan ja kulkukelpoisuusindeksin välillä oli todettavissa riippuvuus (kuva 41). Kulkukelpoisuus on paras korkeimmassa kasvipingintaluokissa, joissa myös tavataan korkeimmat kirkkauslämpötilat. Tosin kirkkauslämpötila näyttää lievästi laskevalta luokasta 11 lähtien. Tähän on ainakin osittain vaikuttamassa Kurkisuon alkuosan kuusikko, jonka kirkkauslämpötila oli alhainen, vaikka suo oli puustoinen, kuiva ja matala sekä turpeen leikkauslujuus korkea (vrt. faktorianalyysi s. 59 ja profiili liite 8, s. 103). Erittäin selvä kirkkauslämpötilan aleneminen on alempiin kasvipingintaluokkiin siirtyäessä, ja samoin näissä luokissa voidaan todeta selvä kulkukelpoisuuden aleneminen (kulkukelpoisuusindeksi kasvaa). Analyysissä tutkittiin lisäksi kulkukelpoisuusindeksin riippuvuutta kirkkauslämpötilasta kasvillisuusluokittain. Kasvipintaluokan sisällä kirkkauslämpötilan ja kulkukelpoisuuden välillä ei ollut kuitenkaan havaittavaa riippuvuutta. Päävaikutus on siis kasvipingintaluokasta aiheutuva.

Yhteenvetona kirkkauslämpötilan ja kulkukelpoisuuden välisestä riippuvuudesta voidaan sanoa, että se johtuu näiden molempien sidonnaisuudesta pintakasvillisuuteen. Alhainen kirkkauslämpötila liittyy alhaiseen pintakasvillisuuteen, jolloin myös kulkukelpoisuus on huono, tai kääntäen korkea kirkkauslämpötila indikoii korkeaa pintakasvillisuutta. Kulkukelpoisuusindeksiltään heikoimmat ja parhaimmat alueet voidaan siis erottaa kirkkauslämpötilan perusteella (kuva 42).

Pistemäisten analyysien lisäksi radiometrisignaalin ja maaston ominaisuuksia kuvaavien muuttujien välisiä riippuvuuksia tutkittiin linjoittaisina piirtämällä muuttujien arvot diagrammeiksi, joissa vaaka-akselina oli havaintopisteen etäisyys. Tutkittavina ominaisuuksina olivat: turpeen keskimääräinen leikkauslujuus, kulkukelpoisuusindeksi, puustoluokka, varpupeitto-%, suon syvyys ja pinnan vetisyys. Profiileja laadittiin sekä käsin piirtäen että tietokoneohjelmilla (HYLPS; PI).

Yhteensovitus analysoitiin subjektiivisen silmävaraisen tarkastelun perusteella. Tarkastelussa kiinnitettiin huomio

- kuvaajien yleiseen muotoon eri kohdilla profiilia, lähinnä vertailemalla nouseva-laskeva-tasainen-huippu-laakso-osia,
- kuvaajien yleiseen tasoon saman profiilin sisällä ja
- selvästi erottuviin yksittäisiin profiilien ominaisuuksiin (piikki).



T_B Kirkkauslämpötilän keskiarvo 99% luotettavuusväleineen
Mean value of brightness temperature with 99% confidence.

I Kulkukelpoisuusindeksin keskiarvo,
Mean value of index of trafficability

Kuva 41. Kirkkauslämpötilän ja kulkukelpoisuusindeksin keskiarvo pintakasviluokittain.

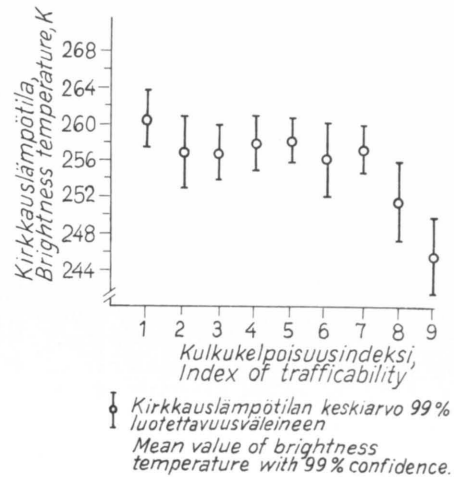
Fig. 41. Brightness temperature and average index of trafficability by vegetation class.

Tarkastelu suoritettiin linjoittain, jolloin vertailu koski linjan sisäistä vaihtelua. Tällöin kiinnitettiin huomio ensisijaisesti muutoksen suuntaan ja toissijaisesti voimakkuuteen.

Linjoittaisten profiilitarkastelujen perusteella on havaittavissa erittäin selvä kirkkauslämpötilän ja leikkauslujuuden vaihteluiden rytmin samankaltaisuus, kuten liitteestä 8 (s. 100) voidaan todeta. Pääpiirteissään vertailun tulokset olivat seuraavat:

Paloneva: Kirkkauslämpötilän ja leikkauslujuuden välillä hyvä yhteensopivuus.

Matoneva: Erinomainen yhteensopivuus koko profiilin pituudella. Välillä 800–1 600 m saattaa olla kohdistusvirhettä.



Kuva 42. Keskimääräinen kirkkauslämpötilä kulkukelpoisuusindeksiluokittain.

Fig. 42. Average brightness temperature by index of trafficability class.

Isoneva: Selkälinjan alussa 0–500 m jonkinasteinen yhteensopivuus v. 1978 ja hyvä yhteensopivuus v. 1977 kirkkauslämpötilamittausten kanssa. Välillä 600–1 400 m ei todettavaa yhteensopivuutta. Paalulta 1 400 m lähtien jonkinasteinen yhteensopivuus. Poikkilinjalta A400 ei todettavissa yhteensopivuutta, ja erikoisesti välillä –200–+100 m selvä epäso-
pivuus.

Savilaminneva: Selkälinjalla erittäin hyvä yhteensopivuus v. 1977 kirkkauslämpötilaprofiilin kanssa käytännöllisesti katsoen koko profiilin pituuden kanssa, tasoeroja havaittavissa. Vuoden 1978 kirkkauslämpötilan kanssa yhteensopivuus on huonompi erityisesti linjan alkupäässä 0–200 m, keskivaiheilla 1 500–1 900 m ja linjan loppuosan syvällä nevaosuudella 4 000 m paalusta eteenpäin. Poikkilinjalta A3900 verraten hyvä yhteensopivuus paalulle ± 0 m saakka, mutta siitä eteenpäin trendit ovat päinvastaiset.

Kurkisuo: Ei havaittavaa yhteensopivuutta, trendit välillä 0–1 200 m päinvastaiset. Jotkut huiput täsmäävät hyvin.

Yhdistettyinä tulokset esitetään taulukossa 23. Noin 75 %:lla linjan kokonaispituudesta on todettavissa yhteensopivuutta, ja 25 %:lla yhteensopivuus on huono tai negatiivinen.

Taulukko 23. Kirkkauslämpötila- ja turpeen leikkauslujuusprofiilin yhteensopivuus silmävaraisen tarkastelun perusteella.

Table 23. Dependence between brightness temperature and vane shear strength of peat based on ocular examination.

Suo, linja Reatland	Yhteensopivuusluokka – Dependence class					Yhteensä Total
	Erinomainen Excellent	Hyvä Good	Kohtalainen Fair	Huono Poor	Negatiivinen Negative	
Linjan pituus, m – Line length, m						
Paloneva		1 700				1 700
Matoneva	4 625					4 625
Isoneva			2 100	850		2 950
–”– A				700	300	1 000
Savilaminneva	3 400	1 300				4 700
–”– A			700		450	1 150
Kurkisuo				1 000	1 200	2 200
Yhteensä, m Total, m	8 025	3 000	2 800	2 550	1 950	18 325
Yhteensä, % Total, %	44	16	15	14	11	100

Verrattaessa kulkukelpoisuusindeksin ja kirkkauslämpötilan profiilien yhteensopivuutta olivat tulokset seuraavat (ks. liite 8):

Paloneva: Suon pinnan silmäkeisyys näky selvemmin kulkukelpoisuusindeksin kuin leikkauslujuuden vaihteluissa. Kirkkauslämpötilan ja kulkukelpoisuusindeksin välillä on enintään kohtalainen yhteensopivuus.

Matoneva: Yhteensopivuus hyvä koko profiilin osalla. Välillä 2 700–3 700 m selvä tasoero, joka johtuu vetisyysluokasta 3.

Isoneva: Selkälinjalla kulkukelpoisuusindeksin ja kirkkauslämpötilan yhteensopivuus samaa luokkaa kuin leikkauslujuuden, kuitenkin tasoero välillä 600–1 600 m on pienempi. Kohdilla 1 700 m ja 3 500 m indeksi ei korreloi kirkkauslämpötilan kanssa. Poikkilinjalta A400 yhteensopivuus on hyvä.

Savilaminneva: Selkälinjalla kulkukelpoisuusindeksin ja kirkkauslämpötilan välillä samanlainen yhteensopivuus kuin leikkauslujuuden ja kirkkauslämpötilan välillä. Tasoero välillä 1 600–2 200 m kuitenkin oleellisesti suurempi. Poikkilinjalta A3900 yhteensopivuus hyvä.

Kurkisuo: Ei selvää yhteensopivuutta, mutta ei selviä vastakkaisiakaan trendejä paalulle 1 600 m.

Hyvä yhteensopivuus 1 600 m eteenpäin. Yksityiskohtien yhteensopivuus parempi kuin leikkauslujuuden vertailussa.

Kulkukelpoisuusindeksi ja kirkkauslämpötila vaihtelivat verraten säännöllisen samankaltaisesti, sillä vain 11 % linjanpituudesta yhteensopivuus oli huono tai negatiivinen, kuten taulukko 24 osoittaa.

Sekä leikkauslujuuden että kulkukelpoisuusindeksin ja kirkkauslämpötilan muutosten välillä on yleensä todettavissa selviä säännön mukaisuuksia. Kuitenkin kulkukelpoisuuden absoluuttisen tason määrittäminen on vaikeampaa, koska osalla linjoista oli tasoero, vaikka yhteensopivuus olikin hyvä. Lisäksi arviointivirhettä lisää se, että osassa linjaa ei edes rytmin samansuuntaisuutta voitu havaita. Sama johtopäätös, eli vaikeus määrittää liikennöitävyyden absoluuttinen taso kirkkauslämpötilan perusteella, voitiin tehdä jo pistemäisten analyysien alhaisten selitystasojen perusteella. Merkittävä korrelaatio osoitti kuitenkin, että näillä ilmiöillä on yhteisiä piirteitä. Profiilitarkastelun perusteella voidaan sanoa, että alueellisten arvioiden absoluuttinen taso pystytään arvioimaan pistemäistä tarkemmin.

Taulukko 24. Kirkkauslämpötila- ja kulkukelpoisuusindeksiprofiilin yhteensopivuus silmävaraisen tarkastelun perusteella.

Table 24. Dependence of brightness temperature and trafficability index based on ocular examination.

Suo, linja Peatland	Yhteensopivuuksluokka – Dependence class					
	Erinomainen Excellent	Hyvä Good	Kohtalainen Fair	Huono Poor	Negatiivinen Negative	Yhteensä Total
	Linjan pituus, m – Line length, m					
Paloneva			1 700			1 700
Matoneva		4 625				4 625
Isoneva			2 550		400	2 950
—”— A		1 000				1 000
Savilaminneva	4 100	600				4 700
—”— A		1 150				1 150
Kurkisuo		600		1 600		2 200
Yhteensä, m Total, m	4 100	7 975	4 250	1 600	400	18 325
Yhteensä, % Total, %	22	44	23	9	2	100

Taulukko 25. Kirkkauslämpötilan (T_B) ja kulkukelpoisuusparametrien minimi- ja maksimiarvojen osuinen samalle kohdille linjaa.Table 25. The concurrence between the maximum and minimum values of the brightness temperature (T_B) and the trafficability parameters.

Kulkukelpoisuusparametri Trafficability parameter	Maksimiarvo – Maximum value		Minimiarvo – Minimum value	
	T_B maksimin kohdalla	Eri kohdalla kuin T_B maksimi	T_B minimin kohdalla	Eri kohdalla kuin T_B minimi
	Location same as T_B maximum	Location different from T_B maximum	Location same as T_B minimum	Location different from T_B minimum
Leikkauslujuus Vane shear strength	5	2	6	1
Kulkukelpoisuusindeksi Index of trafficability	5	2	5	2
	Oikean arvion osuus, % – Per cent of correct values			
Leikkauslujuus Vane shear strength	71		86	
Kulkukelpoisuusindeksi Index of trafficability	71		71	

Kun tutkittiin kirkkauslämpötilan, kulkukelpoisuusindeksin ja leikkauslujuuden minimi- ja maksimiarvojen esiintymiskohdista linjoittain, voitiin todeta, että ne osuvat samoille linjan kohdille yli 70 % havainnoista (taulukko 25). Kirkkauslämpötilan perusteella on mahdollista useimmissa tapauksissa paikallistaa linjan heikoin ja kantavin alue.

Jo korrelaatio- ja regressioanalyysien tulosten perusteella voitiin olettaa, että suon syvyyden ja kirkkauslämpötilan vaihteluiden välillä olisi yhteensopivuus. Tämä todettiin myös profilitarkastelussa. Suon syvyyden ja turpeen leikkauslujuuden välillä vallitsee yleensä negatiivinen korrelaatio (esim. Saarilahti 1978). Tämä oli myös tutkimuksen aineistossa havaittavissa, sillä korrelaatiokerroin oli $r = 0.364^{***}$ ($N = 764$)¹. Useissa linjan osissa kirkkauslämpötila reagoi puuston ja varpuisuuden muutoksiin, mutta nämä muutokset eivät aina olleet selvästi tulkittavissa. Myös profilitarkastelussa voitiin todeta, ettei kirkkauslämpötilan vaihteluilla ollut oletettua samankaltaisuutta pinnan vetäytyneiden vaihteluiden kanssa.

Linjoittaisissa yhteensopivuusvertailuissa kävi selvästi ilmi kulkukelpoisuusparametrien profiilien parempi yhteensopivuus v. 1977 kuin vuoden 1978 kirkkauslämpötilaprofiilin kanssa. Koska kesällä 1978 lennot suoritettiin elokuussa pitkään jatkuneella poutakaudella, on ilmeistä, että suon pinta oli tällöin kuivempi kuin syyskuussa 1977 ja että kirkkauslämpötilan erot johtuvat enemmän suon pinnallisesta kuivumisesta kuin antennin keilan leveydessä tapahtuneesta muutoksesta (kesällä 1977 käytettiin kapeampikeilaista antennia kuin vuoden 1978 lennoilla). Päätelmää tukee havainto, että huomattavimmat erot ovat ojitetuilla soilla ja laajalla aukealla nevan osuudella. Vuoden 1977 tila vastanneekin paremmin ”normaalitilaa”, ts. sellaista, jossa turpeen kosteusprofiili pinnassa on ”keskimääräinen”. Voidaan olettaa, että sääsuhteilla ennen mittauksia on huomattava vaikutus radiometriluotauksen tuloksiin, ainakin absoluuttisella kirkkauslämpötilan tasolla. Sen sijaan ero kantavusarvioinneissa saattaa jäädä pie-

¹ Soittaiset korrelaatiot olivat

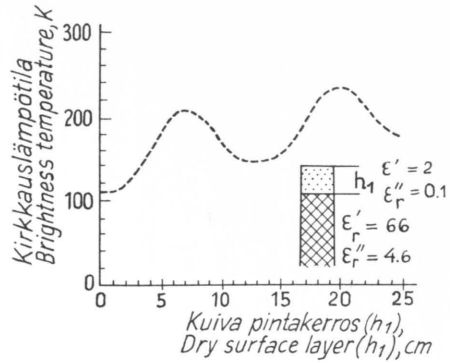
1.	.212	N.S.	N = 54
2.	.355	***	N = 186
3.	.200	*	N = 200
4.	.420	***	N = 235
5.	.804	***	N = 89

nemmäksi, sillä kantavuudeltaan parhaimmat alueet ovat yleensä korkealla, josta pintaveden valuminen on nopeaa, ja heikko kantavuus liittyy yleensä suon märkiin painanteisiin, joihin vettä valuu. Sateen jälkeen kulkukelpoisuus on yleensä alhaisempi, koska märkä kerros suon pinnassa pienentää tartuntaa.

Radiometrissä signaali saadaan yhtenä arvona, kirkkauslämpötilana. Paitsi kirkkauslämpötilan absoluuttista hetkellistä arvoa lisäinformaatiota voidaan saada kirkkauslämpötilan vaihtelusta. Mahdollisuutena olisi tällöin vaihtelun laajuuden ja/tai taajuuden perusteella identifioida olosuhteita. Nykyisessä muodossaan analyysitekniikka on liian alkeellista tällaisten ”ominaiskuvien” havaitsemiseksi, ja näyttää epätodennäköiseltä, että tällaisia suon mikrovahteluiden aiheuttamia säännöllisyyksiä, ”ominaiskuvioita”, voitaisiin löytää siinä määrin, että tulkinnan oleellinen parantaminen tulisi mahdolliseksi. Esimerkkinä ajatellaan ojitettua sarkaa, jossa kasvipeite pysyy muuttumattomana. Tällöin yleisessä tapauksessa pohjavesi ja myös turpeen kosteus on korkein saran keskiosassa ja laskee ojaa kohti ja kohoaa sen jälkeen seuraavan saran keskustaa kohti. Tällöin kirkkauslämpötila nousisi ojaa kohti. Mikäli ojas sa olisi vettä, oja näkyisi piikkinä alaspäin ja kirkkauslämpötila nousisi, ja laskisi jälleen kohti saran keskustaa jne. Ojien suunnan ja tiheyden muutokset särkevät kuitenkin rakennetta, mikä vaikeuttaa analyysien tekoa. Eri suotyypin rakenne, mm. jänteiden ja rimpien rytmin vaihtelu, on siksi epäsäännöllistä, että ”ominaiskuvien” löytyminen on epätodennäköistä. Paikoin ojitus ilmeisesti näkyy radiometrillä mitatuissa profiileissa säännöllisinä piikkeinä, mutta niiden tulkinta edellyttää tietoa ojien olemassaolosta.

Teoreettisten laskelmien perusteella Jakkula (1979a) on päätenyt seuraaviin johtopäätöksiin:

1. Suon kirkkauslämpötila riippuu voimakkaasti suon kosteudesta. Kirkkauslämpötila laskee kosteuden lisääntyessä.
2. Luonnossa esiintyvät turpeet ovat niin häviöllisiä, että radioaallon ($f = 800$ MHz) tunkeutumisyyvyys suohon on vain 10–20 cm turpeen kosteudesta riippuen.
3. Edellisestä seuraa, että pintaturpeen ominaisuudet ja pintakasvillisuus määräävät suon kirkkauslämpötilan.



Kuva 43. Suon pinnalla olevan kuivan kerroksen paksuuden vaikutus kirkkauslämpötilaan (Jakkula 1979a).

Fig. 43. The effect of dry peat surface layer thickness on brightness temperature (after Jakkula 1979a).

4. Kosteaa turpeen päällä olevan kuivemman turvekerroksen paksuudella on suuri vaikutus suon kirkkauslämpötilaan. Kirkkauslämpötila heilahtelee jaksollisesti kuivemman turpeen paksuuden kasvaessa (kuva 43).

5. Jos turpeessa ei ole teräviä rajapintoja sen eri kerrosten välillä, vaan kosteus muuttuu vähitellen syvyyden funktiona, saadaan suuri kirkkauslämpötila, koska radioaaltoit pääsevät helpommin suosta vapaaseen tilaan.

Nämä sopivat hyvin myös maastokokeiden tuloksiin. Esimerkiksi 5. kohdan teoreettisen tuloksen avulla voidaan selittää luontevasti Isonivan ja metsänparannuskohteiden (vrt. s. 60) kohonnut kirkkauslämpötila. Näin ollen osa alhaisesta selityksasteesta ja tasoerosta eri analyyseissa on säteilyn syntymekanismiin liittyvää. Joissakin tapauksissa on myös mahdollista, että radiometrin informaatio kulkukelpoisuudesta on oikeampaa kuin maastotöiden parametrien perusteella saatu. Alhaisen selityksaste saattaa siis johtua myös siitä, että käytettyjen kulkukelpoisuutta kuvaavien muuttujien reliabiliteetti ja validiteetti ovat huonot.

Yhteenvetona radiometrillä suoritetun suon kirkkauslämpötilan soveltuvuudesta suon kulkukelpoisuuden arviointiin voidaan todeta, että kirkkauslämpötilan perusteella on mahdollista paikallistaa kantavuudeltaan heikoimmat ja kantavimmat alueet, sekä yleensä saada järjestysasteikollista informaatiota kulkukelpoisuudesta.

7. TULOSTEN SOVELTAMINEN KÄYTÄNTÖÖN

7.1. Tulosten luotettavuus

7.1.1. Routatutka

Inhimilliset virheet

Vaikka roudan paksuuden jakautuma näyttää jatkuvalta 0–48 cm, voidaan aineistoa pitää myös kaksiluokkaisena, nimittäin ohutroutaisena paksulumisena luonnontilaisena suona tai ohutlumisena paksuroutaisena talvitienä. Pistemäisissä mittauksissa, mikäli näyttöpäätteelle ei syntynyt tulkittavaa kuviota tai kuvio oli 1-huippuinen, antennin asentoa muutettiin ja/tai vahvistusta lisättiin siten, että näyttöpäätteelle saatiin syntymään ”looginen kuvio”. Koska luotausta suorittavalla tutkijalla oli kokemukseen perustuva ennako-odotus siitä, millaisissa rajoissa roudan paksuuden tulisi olla, saattoi alitajunnallinen ”odotusarvo” vaikuttaa tutkan käsittelyyn johdattelevasti. Myös tutkagrammeja tulkittaessa tiedettiin linjan kulkeeneen talvitiien yli ja tiedettiin talvitiien sijainti. Tulokset saattavat sisältää tällaista alitajunnallista manipulointia. Tulosten sovellettavuuteen tällä ei liene vaikutusta, koska

- pääosassa mittauksista ei tällaista mahdollisuutta ollut,
- sekä pistemäisten että linjoittaisten analyysien tulokset ovat samantapaiset,
- tulevaisuissa sovellutuksissa lumen paksuus voidaan mitata (ja tulisikin mitata) ja
- käyttökäytökunta tulisi olemaan ammattimiehiä, joilla on olosuhteista ja niiden mahdollisista vaihteluista vielä parempi kuva kuin tämän tutkimuksen tekijöillä.

Inhimillisiä satunnaisvirheitä pistemäisiin ja profiilien mittauksiin voi syntyä laskettaessa LED-etäisyyksiä näyttöpäätteeltä ja mitattaessa kerrospaksuuksia. Näillä satunnaisvirheillä ei johtopäätösten kannalta ole merkitystä. Tulosten käsittelyvirheet lienevät niin ikään merkitysettömiä, koska käytetyt muunnokset olivat vähäisiä, analyysimenetelmät yksinkertaisia eikä HYLPS-ohjelman ole todettu toimivan väärin. Lisäksi analyysit suo-

ritettiin useaan kertaan eri variaatioina. Mahdollisten virheellisten havaintojen mahdollisuus tutkittiin (ts. se, että jollain yksittäisellä virheellisellä havainnolla suuren momentin vuoksi olisi tuloksiin vääristävä vaikutus), mm. käyttäen aineistossa visuaalista tarkastelua.

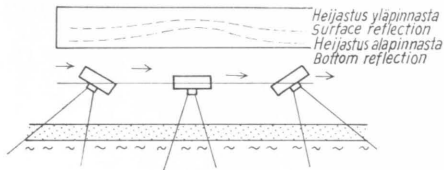
Tietokoneella piirrettyihin tutkagrammeihin heijastushuiput merkittiin käsin. Koska varsinkin pienten huippujen löytäminen oli hankalaa jokin huippu saattoi jäädä piirtämättä tai piirrokseen saattoi tulla vahingossa ylimääräinen huippu. Tulosten kannalta näillä inhimillisillä piirrosvirheillä ei ole merkitystä, koska analyysit perustuivat tasoitettuihin kerrosrajoihin ja tulkinta käsivaraisine tasoituksineen sisältää jo suuremman subjektiivisen tulkintavirhemahdollisuuden.

Kohdistusvirhe

Kohdistusvirhe I. virhe, joka syntyy siitä, että mittauskohta ja tulkintakohta eivät ole paikallisesti samat, on yleinen jatkuva profiilitulkinnoissa. Vaikka signaalia nauhoitettaessa toiselle kanavalle annettiin kohdistusmerkit, jäi tulkinnassa mahdollisuus yli 1 m pituussuuntaisiin virheisiin. Kohdistusvirhe haittasi profiilien tarkkaa analysointia, mutta ei vaikuta oleellisesti yleisiin johtopäätöksiin. Kohdistusvirheenä voidaan pitää myös tilannetta, joka syntyy pistemäisissä mittauksissa ja linjoittaisissa profiiloinneissa, jos jätetään huomioon ottamatta, että tutka mittaa halkaisijaltaan n. 1 m ympyrän muotoista aluetta, eikä kairausreian kokoista alaa sen keskipisteestä. Yleisesti kohdistusvirhe siis heikentää tilastollisia testejä ja profiilien yhteensopivuutta, mutta ei vaikuta johtopäätösten luotettavuuteen.

Tekniset virheet

Eräs tuloksiin mahdollisesti vaikuttava tekijä on antennin heilumisesta johtuva suuntausvirhe. Suuntausvirhe johtuu siitä, että antenni ei ole kohtisuorassa suon pintaa vastaan (kuva 44). Antenni saattoi hiukan heilua, ja osa kerrosten ”aaltoilusta” voi alkuperältään



Kuva 44. Routatutkan antennin heilumisesta johtuva suuntausvirhe.

Fig. 44. Effect of antenna swaying on frost radar signal.

olla suuntausvirhettä. Tätä ei ainakaan käsinlaskennassa varmuudella voitu todeta, vaikka muutamasta pisteestä yritettiinkin laskea "kuoppien" kohdalta roudan pinnan ja pohjan välistä siirtymää. Roudan pinnan ja pohjan välinen ero ei kasvanut samassa suhteessa kuin pintakaiku syveni, kuten olisi pitänyt tapahtua, jos roudan paksuus pysyisi vakiona ja antennia kallistetaan. Jäällä suoritetuissa antennin kallistuskokeissa ilmiö oli havaittavissa. Voitiin myös todeta, että antenni pystyy mittaamaan jään paksuutta vielä suuremmasta kulmasta, kuin mihin se pystyi heilumaan kelkassa.

Teknisiä virheitä voi syntyä tutkan tai siihen liitettyjen laitteiden toimintojen epätäydellisyyden vuoksi. Varsinaiset radiotekniikan piiriin kuuluvat virheet jätetään tämän tarkastelun ulkopuolelle. Tällöin laitteen ajattelaaan samoissa olosuhteissa toimivan aina samalla tavalla (vaikka se saattaisikin toimia virheellisesti). Tutkassa ei todettu käyttöhäiriöitä. Samanaikaisesti jäällä suoritetuissa tutkakoikeissa, joissa olosuhteet ja mittaustulokset olivat helpommin kontrolloitavissa ei lämpötilan tai muiden olosuhteiden muutosten havaittu vaikuttavan tutkan toimintaan. Sen sijaan tutkaan liitettyssä nauhurissa varsinkin Viheriäisennellä oli käyntihäiriöitä silloin, kun pakkasella paristojen jännite aleni, ja nauhurin toiminnat jäykistyivät. Tällöin nauhanopeus hidastui. Nauhaa purettaessa normaalinopeudella taajuudet saadaan korkeampina. Suuret virheet taajuuksissa voidaan erottaa kohdistusmerkkien äänenkorkeuden ja puherytmin muutoksen perusteella, mutta pieniä taajuusvirheitä ei näin havaita. Aineiston käsittelyssä poistettiin nauhoitukset, joissa nopeus oli selvästi virheellinen (kuvasa 23 esitetty Viheriäisennän tulos on poikkeus, koska yhtään onnistunutta luonnontilaisen koskemattoman lumen nauhoitusta ei ollut

saatavissa). Tulosten luotettavuuteen nauhurin teknisillä virheillä ei ole oleellista merkitystä.

Intensiteettiirtutustulostuksessa ei teknisiä virheitä havaittu, jollei sellaisena pidetä harmaasävyasteikon riittämättömyyttä. Tietokonepääteellä tutkagrammeja piirrettäessä joillakin ajokerroilla voitiin AD-muuntimen todeta toimineen sikäli virheellisesti, että kaiut tulostuivat vain parittomien numeroarvojen. Tämä tekninen virhe alentaa erottelukykä, jolloin pienimmät huiput ja hajakaiut eivät ehkä erotu. Varsinaisiin tuloksiin ne eivät vaikuta, koska käytetty analyysimenetelmä on karkeampi. Verrattaessa intensiteettiirtutustulostusta ja tietokoneella piirrettyä tutkagrammia samasta nauhoituksesta ne vastasivat toisiaan, joten kumpikin laite on piirtänyt samaa signaalia samanlaisesti. Myös piirrettäessä sama nauhoitus uudelleen tutkagrammi toistui samanlaisena.

Teknisten virheiden vaikutus tuloksiin on pienempi kuin analyysimenetelmän tulkintakynnyks. Vähäisiä teknisiä virheitä siis sisältyi tuloksiin, mutta ne eivät vaikuta tehtyihin johtopäätöksiin.

Aineiston laajuus

Tutkimustehtävän asettelun kannalta aineiston laajuus on katsottava riittäväksi, koska siihen sisältyi erilaisia tyyppisiä suo-olosuhteita. Tuloksia voidaan tältä osin pitää riittävän luotettavina yleisten johtopäätösten tekoon.

712. Maaperätutka

Käytetty maaperätutka on kaupallinen laite, jota kokeiden aikana käytti harjaantunut geologi, eikä tutkan toiminnassa voitu todeta tilapäisiä virheitä ei tuloksiin sisälly. Mahdollisilla satunnaisvirheillä siipikairauksissa, turpeen ominaisuuksien määrittelyssä jne. ei ole merkitystä tuloksiin. Keskimääräiset arvot sopivat hyvin yhteen aikaisempien tutkimustulosten kanssa. Turvelajimääritykset on tehnyt Valtion polttoainokeskuksen turveinventointiryhmä, siis ammattitaitoinen keskenut tutkimusryhmä yhdessä harjaantuneen suontutkijan kanssa.

Analyysit ovat yksinkertaisia ja vain päävaikutuksiin kohdistuvia. Tulokset ovat siis käy-

täntöön soveltamisen kannalta luotettavia. Käytetty analyysimenetelmä voidaan pitää riittävänä, vaikka tutkimus kohdistui vain tutkagrammissa silmävaraisesti näkyviin kerrosrajoihin. Enempiä johtopäätöksiä tutkagrammin informaatiosta ei yhden linjan perusteella voida tehdä. Vasta suuri aineisto yhdistettynä soiden yleisstratigrafiaan saattaa mahdollistaa yksityiskohtaisemmat analyysit. Tämä kuuluu luonteeltaan kuitenkin sovellutusten tutkimukseen.

713. Radiometri

Radiometriluotauksissa tekniset virheet pyrittiin minimoimaan lämmitämällä laite käyttölämpötilaan ennen luotausta ja suorittamalla kalibrointi ennen luotausta ja sen jälkeen metsän ja järven yllä. Näiden kohteiden kirkkauslämpötiloja voidaan pitää vakioina (vrt. taulukko 12, s. 31). Kaikissa kohteissa ei ollut vesistöä riittävän lähellä kalibroinnin suorittamiseksi. Lisäksi linjat lennettiin kahteen tai kolmeen kertaan peräkkäin. Varsinaisia teknisiä virheitä käsitellään lähemmin Jakkulan (1979a) tutkimuksessa.

Soiden mitattuun kirkkauslämpötilaan voi aiheuttaa soiden välistä tasoeroa

- radiometrin säädöissä olevasta erosta, mikä em. kalibrointi huomioonottaen on epätodennäköistä ja
- tulkinnassa tapahtuneista virheistä. Osa kirkkauslämpötiloista mitattiin Jakkulan (1979a) tutkimuksiaan varten laatimista pienennöskistä, ja mittaustarkkuus näistä on erilainen kuin suorista piirtutustulostuksista. Lisäksi käytetty siirtotekniikka, jossa kirkkauslämpötila mitattiin profiilista millimetrin tarkkuudella viivoittimella ja tulokset muunnettiin asteikon mittauksen avulla kirkkauslämpötilaksi, on herkkä mittavirheille. Esim. puolen mm:n virhe perusviivan tasossa aiheuttaa jo systemaattisen virheen. Tutkimuksen analyysissa voitiin todeta, että tällainen tasoero soiden välillä on mahdollinen, mutta tulokset eivät olleet riittävän yksiselitteisiä, jotta ero olisi ollut mahdollista määrittää teknisestä virheestä johtuvaksi.

Kurkisuolla linjan alkupäässä oli tiheä kuuksikko, josta syystä maamerkkien erottaminen helikopterista oli vaikeaa. Linjaa esittäessä kuljettaja on kaartanut ja tällöin helikopterin kaartaessa osa antennin suuntauskuviosta on

saattanut mitata taivaan kirkkauslämpötilaa, joka on alhainen. Kuusikon osuudelle mitattu kirkkauslämpötila on lähes varmasti todellista alhaisempi, sillä metsän yllä mitatut kirkkauslämpötilat ovat yleensä merkitsevästi korkeampia (vrt. taulukko 12, s. 31) kuin Kurkisuon kuusikossa mitattu 260 K. Mikäli Kurkisuon kuusikossa saatu mittaustulos on virheellinen analyysissa saadut selitysasasteet ovat todellista heikompia, eli oikea (korkeampi) kirkkauslämpötila nostaisi selitysasastetta.

Maastossa tehdyt luokitukset ja mittaukset sisältävät jossain määrin inhimillistä satunnaisvirhettä, mahdollisesti myös subjektiivisen tasoeron, jolla ei kuitenkaan liene olennaista merkitystä, koska Matonevan alkuosaa lukuun ottamatta luokituksien on tehnyt sama henkilö.

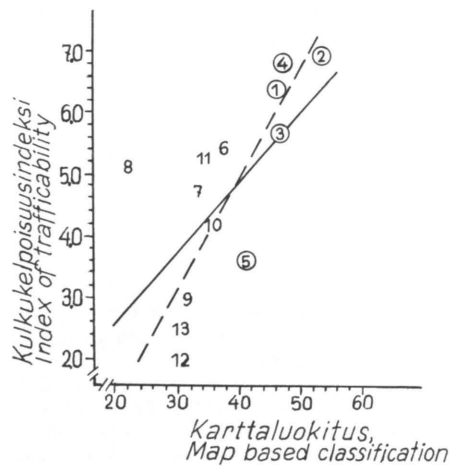
Yleistettävyyden kannalta aineisto on laajuudeltaan katsottava riittäväksi, sillä siihen sisältyi 16 erilaista suotyyppeä, sekä luonnontilaisia että ojitettuja soita, joiden puusto vaihteli täysin puuttomasta järeään, täystiheään kuusikkoon. Koska tuloksiin sisältyi kahtena vuonna suoritettuja luotauksia, joiden tulokset olivat samansuuntaiset, voidaan tulokset ajallisesti yleistää koskemaan kesän kuivia jaksoja.

714. Muuttujien validiteetti

Muuttujien validiteettiä tarkasteltaessa voidaan todeta, että roudan aikaisen kulkukelpoisuuden kuvaamiseen käytetty muuttuja, roudan paksuus, riittää jo yksinään hyvin kuvaamaan tutkittavaa ilmiötä. Kesän aikaista kulkukelpoisuutta tarkasteltiin neljän muuttujan, nimittäin karttaluokituksen, pinnan vetisyyden, turpeen leikkauksisuuden ja kulkukelpoisuusindeksin sekä geobotaanisessa luokituksessa käytettyjen kasvillisuus-puustomärkyyss- (syvyys) -muuttujien ja niiden kombinaatioiden avulla. Koska kulkukelpoisuuden vaihtelut johtuvat pääosin em. tekijöissä tapahtuvista muutoksista, voidaan mukaan otettua muuttujajoukkoa pitää riittävänä. Puutteena saatetaan ehkä pitää sitä, että turpeen todellista vesipitoisuutta ei mitattu, joten tämän kulkukelpoisuuteen voimakkaasti vaikuttavan tekijän ja radiometrisignaalin välinen todellinen riippuvuus jäi mikrotasolla selvittämättä. Tällainen turpeen kosteuden mittaaminen gravimetrimenetelmällä oli kuitenkin liiaksi resurssija vaativa. Makrotasolla

pinnan vetisyyttä voidaan pitää kohtalaisena suon kosteustason kuvaajana, joka lisäksi antaa viitteitä turpeen kokoonpuristuvuudesta. Näin myös kulkukelpoisuusindeksin, joka on täysin laskennallinen arvo ja jonka soveltuvuutta kulkukelpoisuuden arviointiin ei käytännössä ole testattu, voidaan katsoa koostuvan kokoonpuristuvuutta kuvaavasta komponentista ja leikkauslujuutta kuvaavasta komponentista, jossa kokoonpuristuvuudella on suurempi paino (vrt. esim. Perina 1979). Esimerkkinä käytettyjen kesän aikaisten kulkukelpoisuutta kuvaavien muuttujien välisestä yhteensopivuudesta esitetään kuva 45, jossa on suotyypittäisten keskiarvojen¹ perusteella ver-

¹ Suotyypittäisten keskiarvojen soveltuvuudesta eivät kaikki tutkijat ole yksimielisiä, ks. s. 26.



Selitys, Explanation:

SUOTYYPPI, PEATLAND SITE TYPES

- | | |
|---------------------------|--------------------------|
| 1 Saraneva, SN | 8 Korpinäre, KR |
| 2 Rimpineva, RiN | 9 Kangasräme, KgR |
| 3 Kalvakaneva, KN | 10 Isovarpuinen räme, IR |
| 4 Lyhytkortinen nevä, LkN | 11 Rahkaräme, RR |
| 5 Rahkaneva, RN | 12 Korpi, VK |
| 6 Saraneva, SR | 13 Turvekangas Tk |
| 7 Tupasvillaräme, TR | |

Kuva 45. Karttaluokituksen ja kulkukelpoisuusindeksin keskiarvot suotyypittäin.

Fig. 45. Map based classification and average index of trafficability values by peatland site type. (See p. 104)

rattu karttaluokituksen ja kulkukelpoisuusindeksin välistä riippuvuutta. Voidaan todeta jokseenkin merkitsevä korrelaatio näiden kahden muuttujan välillä. (Vain kolme havaintoa käsittäneen korpirämeen (8) keskiarvo heikentää testitulosta). Kuvasta näkyy myös nevojen huonompi kulkukelpoisuus.

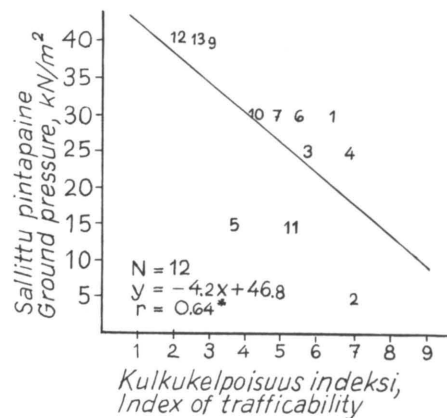
Kulkukelpoisuusindeksin suotyypittäisten keskiarvojen ja Huikarin (vrt. taulukko 4, s. 15) pintapainesuositusten välinen korrelaatio on jokseenkin merkitsevä, kuten kuvasta 46 käy ilmi. Rahkaisilla soilla, erityisesti rahkanevalla (n:o 5) indeksi näyttää kuitenkin alhaisemmalta (kulkukelpoisuus paremmalta) kuin pintapainesuositusten mukaisen arvon tulisi olla. Syyinä on, että maatumattomassa kuituisessa rahkaturpeessa leikkauslujuus on korkea. Tällaisen rahkaturpeen kokoonpuristuvuus on kuitenkin suuri, mikä alentaa kulkukelpoisuutta ehkä enemmän kuin pintavetisyyden vaikutus tuntuu kulkukelpoisuusindeksissä. Käytännön laskelmissa voitane sallittu pintapaine laskea kulkukelpoisuusindeksistä kaavan (28) avulla.

$$y = -5x + 50 \quad (28)$$

jossa

y = sallittu pintapaine, kN/m²

x = kulkukelpoisuusindeksi



Kuva 46. Eri suotyypien pintapainesuositukset Huikarin ym. (1963) mukaan ja vastaava kulkukelpoisuusindeksi.

Fig. 46. Ground pressure recommendations for different peatland types according to Huikari et al. (1963) and the corresponding indices of trafficability.

Kulkukelpoisuusindeksi korreloi siis eri kulkukelpoisuusluokitusten kanssa, joten sitä voidaan pitää kulkukelpoisuuden kuvaajana.

72. Tulosten soveltaminen suon liikennöitävyyden määrittämiseen

Maastokokeissa tutkimuksen kohteena oli selvittää erilaisten tutkimuksen antamien signaalien ja turvealustan parametrien välistä riippuvuutta. Seuraavaksi käsitellään maastokokeiden tuloksia tutkimuksen päätavoitteen, liikennöitävyyden arvioimisen kannalta. Koska tutkitut laitteet ja niiden sovellutusalueet ovat verraten erilaiset, tarkastellaan kutakin osakoetta erillisenä ja sen jälkeen menetelmien yleisiä käyttösovellutuksia.

721. Routatutka

Kuten luvussa 51 (s. 20) todettiin, järeillä puunkorjuukoneilla talvikauden liikennöintin määrääväksi tekijäksi muodostuu roudan kantavuus, joka on kolmen tekijän,

- routakerroksen paksuuden,
- jäätyneen kerroksen murtolujuuden ja
- alla olevan kerroksen visko-elastisten ominaisuuksien

yhteisvaikutuksesta riippuva. Koska resurssirajoitusten vuoksi roudan paksuutta lukuunottamatta muita ominaisuuksia ei voitu mitata, tarkastelu suoritetaan kirjallisuusviitteiden pohjalta.

Roudan murtolujuus saadaan tutkalla ainakin järjestysasteikollista tietoa. Dielektriset vakiot näyttävät vaihtelevan vain vähän, koska tutkimuksessa nämä erot eivät tulleet esiin. Kerrosrakenteita voidaan siis pitää myös absoluutisilta paksuuksiltaan riittävän tarkkoina.

Roudan murtolujuus on ainakin osittain vesipitoisuudesta riippuva (kuva 6, s. 19). Koska heijastusteho korreloi suon märkyyden kanssa, voidaan vahvistustason suuruutta käyttää todennäköisen murtolujuuden estimoimiseen, jolloin päästäneen oikeampaan tulokseen kuin käyttämällä keskimääräistä murtolujuuden arvoa.

Kolmas tekijä, alustan laatu, on myös merkitsevä. Havainnollisuuden vuoksi tarkastellaan äärimmäistä tilannetta, jolloin suolla on

lampi. Kun 30–40 cm routa kantaa yleensä raskaimmatkin koneet, on vastaavan pakuisella jäällä turvallisuusohjeiden mukainen sallittu kuorma vain 45–70 kN (Puutavaran jällevarastoinnin... 1976). Huomautettakoon tässä yhteydessä, että turvallisuusohjeiden ohjepaksuus ei ole sama kuin jään murtokuorma, vaan sisältää erittäin suuren varmuuskertoimen. Kuitenkin suolla olevan lammen jäällä uppoamisriski on suurempi kuin turpeella olevan samankalaisen roudan kohdalla. Jää on helppo erottaa roudasta selvän rakenteensa ja tasaisten heijastuspintojen perusteella. Koska ojitettujen turvaimiden roudan alaisen kerrosten ominaisuudet poikkeavat luonnontilaisten soiden kerrosten ominaisuuksista, kulkukelpoisuutta voidaan todennäköisesti estimoida tarkemmin, jos alempien kerrosten viskoelastiset ominaisuudet otetaan huomioon roudan paksuuden ja murtolaajuuden ohella. Nämä tekijät korreloivat sekä tutkan vahvistustason (gain) että tutkagrammin yleisrakenteen kanssa. Märkien soiden kaikurakenne on säännöllisempi kuin kuivien soiden.

Koska lumipeitteen paksuus erottuu tutkagrammissa, voitaneen kulkukelpoisuusanalyysiä edelleen tarkentaa ottamalla mukaan tarkasteluun myös lumipeitteen paksuus, jolla myös on vaikutusta metsäkoneiden etenemiseen (Silvennoinen ja Haarlaa 1971, 1972). Kenttäkokeiden tulosten perusteella näyttäisi mahdolliselta saada tietoa myös pinnan mätäisyydestä, joten kulkukelpoisuusanalyysiä voitaisiin sen avulla edelleen parantaa.

722. Maaperätutka

Suppeat maastokokeet osoittivat, että maaperätutkalla saadaan vähintään laatuasteikollista tietoa suon kulkukelpoisuudesta, sillä tutka antoi erinomaisen kuvan turvekerroksen paksuudesta, jonkinasteisen kuvan kerrosrajoista suon sisällä ja hyvän kuvan pohjan laadusta ja pohjamaalajista. Suon kosteus-suhteita tai muita kantavuuteen liittyviä tekijöitä ei sen avulla voitu kuitenkaan suoraan selvittää. Liikennöitävyyden vaihtelu pystytään arvioimaan suon stratigrafiassa ja syvyydessä tapahtuvien muutosten avulla. Keskimääräinen liikennöitävyys voidaan päätellä geobotaanisen luokituksen avulla, ja tutkalla voidaan erottaa liikenteelliset ongelmakohdat, kuten umpeenkasvaneet vesistöt, syvän-

teet, kapeiden juottien liejukerrokset ym. Kesäaikaisen kulkukelpoisuuden arviointia voitaneen myös parantaa yhdistämällä tulkin-taan joitain mekaanisia mittauksia, joilla tul-kinta sidottaisiin tarkemmin todellisiin ker-rosten ominaisuuksiin. Tällöin laskemalla dielektrisen vakion arvo saataisiin viitteitä kerrosten ominaisuuksista.

Lyhytpulssitutkassa tarvitaan pinnan olo-suhteista (mm. kasvipeitteen ominaisuuksista) riippuvaa signaalin vahvistusta. Täten todellisen liikennöitävyyden määrittäminen saattaa onnistua paremmin laitteella, joka on ni-menomaan kehitetty maastoliikennöinnin edellyttämiin mittauksiin, ja joissa mm. vahvistus- tai heijastusteho saadaan muuttu-jana mukaan.

Maaperätutkassa on käytössä myös korkeammalla taajuudella toimivia kanavia, jotka soveltuvat maaperän pintaosien luotaukseen. Laitte soveltuu myös roudan paksuuden mittaukseen, sillä käytettävissä on 900 MHz taajuus (vrt. 1 GHz routatutkassa). Tul-kinta on samantapainen kuin routatutkassa ja perustuu tutkagrammin analysoinnista saata-vaan informaatioon.

723. Radiometri

Radiometrillä mitattu suon kirkkausläm-pötila korreloi merkitsevästi kulkukelpoi-suusparametrien kanssa. Kirkkauslämpötilan muutokset noudattavat suon kulkukelpoisuu-dessa tapahtuvien muutosten suuntaa, mutta absoluuttisen tason määrittäminen ei aina on-nistu. Radiometrisignaalin saadaan suoraan verraten luotettavaa laatuasteikollista infor-maatiota, ts. radiometrisignaalin perusteella on mahdollista erottaa kulkukelpoisuudeltaan eriarvoiset linjanosat toisistaan. Signaa-liin liittyy myös järjestysasteikollista tietoa, sillä kirkkauslämpötilan kohotessa yleensä myös kulkukelpoisuusparametreissa tapahtuu muutoksia positiiviseen suuntaan ja laskiessa päinvastoin. Liikenteelliset ongelmakohdat ja edullisimmat vaihtoehdot voidaan paikallista todennäköisyydellä, joka lienee yli 75 %. Kuitenkin tulkintavirheet ovat mahdollisia, il-meisesti pidempien pouta- ja/tai sadekausien jälkeen. Järjestysasteikollisen informaation luotettavuuden lisäksi ja suhdelukausteikol-liseen informaatioon pääseminen edellyttää jo lisäinformaation (2. kanavan) saamista olo-suhteista. Esimerkiksi turvetuotantokenttä on

kokonaisuudessaan "kylmä" eli se luokitel-taisiin erittäin kantamattomaksi pelkän ra-diometrisignaalin perusteella. Jos sen sijaan käytettävissä on lisäinformaatio "turvekent-tä" tai "ei kasvipeitettä" tms. niin kantavuuden perustaso voidaan asettaa korkeammalle ja turvekentän sisällä olevat keskimääräistä alhaisemmat "kylmät kuopat" voidaan tulki-ta oikein eli huonosti kantaviksi silmäkkeiksi ja ojiksi (vrt. liite 8, s. 100, Palonevan turve-tuotantokenttä). Yleisesti olosuhteisiin liittyvä tieto yhdistettynä kirkkauslämpötilaan lisää informaatiota kulkukelpoisuudesta.

Radiometri soveltuu myös talviaikaisen roudan paksuuden määrityksiin, sillä sitä on käytetty mm. merijään paksuuden mittauksiin (Tiuri ym. 1976), mutta tutkamenetelmät tar-joavat paremmat mahdollisuudet, koska saa-tavaan signaaliin sisältyy tietoa eri kerroksista eikä ainoastaan niiden yhdysvaikutus kuten radiometrisignaaliin.

73. Radioaalto menetelmien käyttömahdol-lisuudet turvemaiden puunkorjuun suun-nittelussa

Pääosan puutavarasta korjaavat metsäteol-lisuuden ja Metsähallituksen suuret korjuu-organisaatiot kuten taulukosta 26 ilmenevä (Mikkonen ym. 1975) laskelma osoittaa.

Jatkuva puunkorjuun rationalisointi, jo-hon kuuluvat korjuun

- suunnittelun ja seurannan,
- korjuuolosuhteiden,
- työmenetelmien ja
- kaluston

kehittäminen, alentaa korjuukustannuksia, mutta edellyttää suuria työmaita. Puunkor-juun suunnittelussa kehitys on menossa kohti yhä täydellisempiä atk-sovellutuksia, joissa etäspäätteiden avulla alueelliset korjuutiedot syötetään keskusyksiköiden rekistereihin, joi-den pohjalta toiminnan suunnittelu ja seu-ranta tapahtuu (Peltonen 1979). Käyttöön tu-levat myös suunnittelumallit leimikkoreser-vien rationaalisen käytön optimoimiseksi (Es-kelinen ja Peltonen 1977).

Puunkorjuun kausivaihtelu aiheuttaa läs-kustannuksia, ja tavoitteena on kesäajokel-poisten leimikoiden osuuden lisääminen. Kausivaihtelua voidaan vähentää pyrkimällä

Taulukko 26. Metsäteollisuuden ja Metsähallituksen korjaama puumäärä ja sen osuus markkinahakkui-den kokonaismäärästä (Mikkonen ym. 1975).

Table 26. The wood volumes harvested by the forest industry and the National Board of Forestry and its per cent of total commercial fellings (Mikkonen et al. 1975).

	Vuosi - Year	
	1975	1984
Korjuumäärä, milj. m ³ Volume harvested, mill. m ³	27.9	42.7
Osuus markkinahakkuista, % Per cent of commercial fellings	77	85

oikea-aikaiseen ja tasaiseen korjuuseen täh-tävään korjuusuunnitteluun (Vesikallio 1975).

Koneiden kehityksessä oli 1970-luvulla luonteenomaista siirtyminen harvempien ja kalliimpien koneyksiköiden käyttöön (Rysä ym. 1972). Tulevaisuudessa korjuun todennä-köinen koneellistuminen lisää hyvin suunnit-tellun korjuuohjelman merkitystä (Peltonen ja Vesikallio 1974).

Koska kehitys johtanee yhä kehittyneem-pien suunnittelumenetelmien käyttöön suur-alueiden tehokkaiden konekettujen ohjailu-sa, on tärkeää, että järjestelmään siirrettävät tiedot ovat luotettavia (vrt. Peltonen 1979). Tämä koskee myös leimikon korjuu- ja kau-kokuljetuskelpoisuusluokitusta. Tällä hetkellä leimikon suunnittelun yhteydessä käytettävä luokitus on 3-luokkainen (Heinämäki ym. 1979): Korjuu on mahdollinen

- jäätyneellä maalla,
- kuivalla maalla ja
- myös kelirikon aikana.

Suot kuuluvat pehmeikköjen ryhmään, ja niiden korjuu luokitellaan talvikorjuuluok-kaan. Nykyinen luokitus on siksi karkea ja suurpiirteinen sekä subjektiivinen, ettei se täytä kehittyvän atk-pohjaisen luokituksen tarpeita. Erityisesti tämä koskee turvemaita.

Siirtyminen yksityiskohtaisempiin maasto-luokitusohjeisiin (esim. Eriksson ym. 1978), joissa käytettäisiin maalaji- ja kosteusluokkia, merkitsi parannusta kivinäismaiden osalta, mutta senkin toteutus vaatii korkeaa am-mattitaitoa (vrt. Wellving 1980), eikä paran-taisi oleellisesti tilannetta turvemaiden osalta.

Seuraavaksi tarkastellaan radioaalto mene-telmien sovellutusmahdollisuuksia puunkor-

juun suunnitteluun. Mahdollisina sovellu-tusalueina ajatellaan olevan tutkimus-, kehitys- ja puunhankinnan kenttätoiminta.

Kaikilla tutkituilla laitteilla oli yhteisinä etuina seuraavat ominaisuudet: informaatio tutkittavasta linjasta saadaan

- jatkuvana ja
- sähköisessä muodossa, joka voidaan tulostaa ja prosessoida usealla eri tavalla tarpeen mukaan.

Radioaalloilla tapahtuva kulkukelpoisuu-den arvioiminen edellyttämä luotaus voidaan suorittaa

- maan pinnalta,
- ilmasta tai
- avaruudesta.

Viimeksi mainittu kuitenkin toteutusmah-dollisuuksiltaan poikkeaa tässä tutkimuksessa käsitellyistä, ja tämäntyyppinen kaukokartoi-tus jätetään tarkastelun ulkopuolelle.

Sekä jatkuva-aalto- että pulssitutkaperiaate soveltuvat myös ilma-alueesta tapahtuvaan luokitukseen. Jään paksuuden mittaus lento-koneesta on onnistunut hyvin sekä jatkuva-aaltotutkalla (Venier ja Cross 1975) että pulssitutkalla (Vickers ym. 1973). Bjelm ja Ulrik-sen (1980) ovat kokeilleet helikopterista pulssitutkaluotauksen soveltuvuutta turpeen pak-suuden mittaukseen, mutta tulokset olivat negatiivisia. Maltererin (1981) mukaan turveker-roksen luotaus helikopterista on onnistunut. Routamittauksia ilmasta käsin ei liene kokeil-tu, ja menetelmä saattaa osoittautua toteutta-miskelvottomaksi. Radiometriluotaus, jota tässä tutkimuksessa kokeiltiin ilmasta, sovel-tuu myös suon pinnalta tapahtuvaan luotaukseen, sillä antennin minimiäisyyden suon

pinnasta on oltava n. 2 m. Todennäköisesti näiden menetelmien ensimmäisinä sovellutuskohteina tulevat olemaan maan pinnalta tapahtuvat luotaukset.

Tutkitut radiometri ja routatutka ovat

- pienikokoisia,
- kevyitä ja
- energian kulutukseltaan alhaisia,

joten niitä voidaan vaivatta kuljettaa joko

- järeässä metsäkoneessa tai
- kevyessä tiedusteluajoneuvossa, esim. lumikelkassa.

Tutkitun maaperätutkan antenniyksikkö on kooltaan ja tulostusyksikkö virrankulutukseltaan metsätalouden kenttätutkimuksiin huonosti soveltuva. Lisähaittana on vielä, että antennia on hinattava maan pinnassa. Pulssitutkaperiaatteella toimivaa laitetta voidaan kuitenkin kehittää kenttäkelpoisemmaksi, ja käyttöön on kehitetty myös kannettavia maaperätutkia. Tosin niiden jaksoluku on korkea, 2–4 GHz, joten tunkeutumissyvyys on pieni (Clarricoats ym. 1977).

Antennin koko on riippuvainen jaksoluvusta, ja yleensä tarvitaan suurempi antenni käytettäessä alempia taajuuksia (maaperätutka) kuin korkeita (routatutka). Kehittämällä erikoisantenneja rakennetta voitaneekin vielä pienentää.

Käyttöön soveliaimmalta tällä hetkellä näyttää talviliikennöinnin kulkukelpoisuuden määrittämiseen tarkoitettu routatutka, joka voidaan toteuttaa sekä jatkuva-aalto- että pulssitutkaperiaatteella. Varsinainen sovellutuskohde olisi ajoneuvolla suoritettu tiedustelu, jolloin signaali nauhoitettaisiin ja purettaisiin myöhemmin etäispäätteen avulla keskustietokoneella prosessoitavaksi kulkukelpoisuus(kantavuus)-analyysiksi. Koska routaantumisen on riippuvainen

- lumikerroksen paksuudesta,
- suon ominaisuuksista, mm. turpeen kosteudesta ja pohjavesipinnan syvyydestä sekä
- ilman lämpötilasta (esim. Mustonen 1965, Päivänen 1973b),

voitaisiin ilmeisesti menetelmää kehittää pidemmälle siten, että nauhoituksen perusteella laadittua tutkagrammia hyväksi käyttäen teh-

täisiin lyhytaikaisia ennusteita eri soiden kulkukelpoisuuden kehityksestä (ks. esim. Radforth ja Burwash 1973). Tietoa voitaisiin käyttää yhden suon toiminnan aloitusajankohdan estimointiin tai useamman suon ketjutukseen siten, että routaantumisosinuuksiltaan parhaat leimikot tulisivat ensimmäisinä ohjelmaan.

Enemmän laitekehittelyä vaatisi routatutkan soveltaminen metsätraktorin operaatiohetken kantavuuden määrittämiseen. Menetelmä edellyttää tulkinnan kehitettäväksi siten, että kuljettaja voisi televisiotyyppiseltä kuvaputkelta suoraan seurata lumi- ja routakerroksen paksuuksissa ja suon kosteudessa tapahtuvia muutoksia. Näin kuljettaja ajaessaan kuormattomalla koneella palstalle voisi päättää, onko suo riittävästi routaantunut, jotta paluu täydellä kuormalla on mahdollinen. Teknisesti laitekehittely on mahdollinen, ja signaali näyttää sisältävän riittävästi informaatiota luotettavan kantavuusarvion pohjaksi. Eräänä ongelmana saattaa olla antennin heiluminen, mutta tuskin tämäntapaisen luokituksen tekeminen tutkalla näyttää kuitenkin epärealistiselta.

Kustannuksiltaan routatutka näyttää jäävän siksi alhaiseksi, että sillä saatavan informaation arvo voi tulla positiiviseksi. Kuitenkaan yhden prototyyppitestauksen perusteella ei tarkempiin kustannusanalyysiin ole syytä ryhtyä. Hyödyiksi voidaan kirjata sekä

- uppoamisten ja kiinnijuttumisten vähene- misestä johtuva tuotoksen nousu, että
- kokonaiskäyttöasteen ja toimitusvarmuuden kohoaminen, joka saavutetaan oikealla ajoituksen ajoituksella ja optimaalisella soiden ketjutuksella.

Konekohtaisen kantavuuden määrittämiseen perustuvasta menetelmästä saatava hyöty jää pienemmäksi, koska tällöin ainoastaan kuorman koko olisi optimoitavissa.

Kesän aikaisen kulkukelpoisuuden arvioiminen voidaan erottaa kahdeksi ryhmäksi, nimittäin

- kivennäismaiden puunkorjuuseen suunnitelluille koneille ja
- varsinaisille turvemaan puunkorjuukoneille tehtävään luokitukseen.

Kuten jo kirjallisuustarkastelusta kävi ilmi, nykyisten metsäkoneiden pintapaineet ovat

siksi korkeat, etteivät ne sovellu turvemaille joitain matalia juotteja, soiden laiteita tms. erityiskohteita lukuun ottamatta. Tällaisissa-kin kohteissa työskentely saattaa olla vaikeaa ja maastolle syntyvät vauriot (joita ei useinkaan oteta huomioon) muodostuvat usein suuriksi. Suon ja kivennäismaan raja on tulkinnan varainen, sillä selvää rajaa paksukuntaisen kivennäismaan – soistuneen kankaan – matalan suon – syvän suon välille on vaikea vetää. Ainoaksi keinoksi jää pohjan pliktaus suorassilla. Yleensä kulkukelpoisuuden rajapaksuutena pidetään 50 cm turvekerrosta (Tehdaspuu...), jota paksuturpeisemmat alueet luetaan turvemaiden korjuuluokkaan. Maaperätutkalla ohuiden turvekerrosten paksuus on helposti määritettävissä samoin kuin kovan pohjan muoto. Pohjamaan laadusta saadaan niin ikään tietoa, ja esim. savi, silti tai hiekka voidaan erottaa toisistaan. Objektiviivinen kulkukelpoisuusluokitus kivennäis- ja turvemaan puunkorjuulohkojen erottamiseksi toisistaan on mahdollinen tutkagrammin pohjalta. Yksinomaaisesti tämäntapaisen luokituksen tekeminen tutkalla näyttää kuitenkin epärealistiselta.

Mikäli metsätraktoreiden kulkukelpoisuutta parannetaan tms. siirtymällä kevyempiin koneisiin ja/tai kehittämällä pyörävarustusta, voidaan osa soista luokitella kesäajokelpoisiksi. Jo nykyäänkin turvemailta korjataan puuta myös kesällä (esim. Saarihahti 1981a). Tällöin olisi erittäin tärkeää saada suon kantavuusvaihtelut rekisteröidyiksi, jotta vain todella kesäajokelpoiset palstat poimittaisiin leimikkovarannosta ja kulkukelpoisuudeltaan eriaisteiset koneet ohjattaisiin kukin niille parhaiten soveltuviin olosuhteisiin. Menetelmän tulisi siis olla tiedustelutyyppinen ja kattaa vähintään koko turvemaiden puunkorjuun kulkukelpoisuusluokitus. Todella käyttökelpoinen tutkamenetelmä olisi vasta silloin, jos sitä voitaisiin soveltaa sekä turve- että kivennäismaille.

Edellä hahmoteltujen mahdollisuuksien toteuttamista sekä ilmasta että myös maasta käsin suoritettuna saattaa haitata puusto. Tutkimus suoritettiin yleensä vähäpuustoisilla soilla ja koeradoilla lyhyin linjoin. Varsinaisia luokituksen teknisiä suoritusmahdollisuuksia järeäpuustoisissa olosuhteissa ei tutkittu. Vähiten puusto haittaa metsäkoneista suoritettavaa operaatiohetken kantavuuden mittausta, mutta myös saatava hyöty jää vähäisimmäksi.

74. Menetelmien kehittäminen

Tutkimus osoitti, että radioaaltoja käyttäen suoritettu maaperän luotaus on eräs potentiaalinen keino tehostaa turvemaiden puunkorjuun suunnittelun edellyttämää maastoluokitusta. Jo tutkimuksen maastokokeiden aikana todettiin, että sekä laitteet että menetelmien sovellutukset kaipaavat jatkotutkimuksia ja edelleen kehittämistä. Kehitellyt voidaan jakaa

- mittaustekniikan ja laitteiden,
- tulkintamenetelmien ja
- sovellutusten

kehittelyyn.

Mittaustekniikan kehittelyä, joka kuuluu sähkötekniikan piiriin, tarvitaan edelleen mm. antennin heilumisesta johtuvien haittojen minimoimiseksi sekä yleiseen laitekehittelyyn, jota tullaan tarvitsemaan kenttämenetelmiä edelleen parannettaessa. Sen sijaan aktiivitutkien yleinen toimintaperiaate, jaksoluvut jne. näyttävät jo riittävän hyvin soveltuilta, joten näiden osalta varsinaisen perustutkimuksen tasoa voidaan pitää riittävänä.

Tulkintamenetelmät vaativat runsaasti kehittelytyötä. Sekä routa- että maaperätutkaan tarvitaan riittävän herkkää ja nopeaa intensiteettiirturia, jotta signaaleihin sisältyvän informaation koko sisältö saataisiin tulkittavaan muotoon. Tällaisia intensiteettiirtureita on kaupallisessa valmistuksessa. Rajoittavana tekijänä on ollut varojen saaminen näiden hankintaan. Myös videonäyttölaitteen kokeilu tulisi aloittaa. Tietokonetulostus ja tietokoneella tapahtuva kaikkujen prosessointi tarvitsee lisätutkimuspanoksen ja tarjoaa runsaasti kehitysmahdollisuuksia. Suon dielektristen ja mekaanisten ominaisuuksien välisestä riippuvuuksista tarvitaan enemmän tietoa, jotta myös laskennallisia malleja voitaisiin käyttää hyväksi.

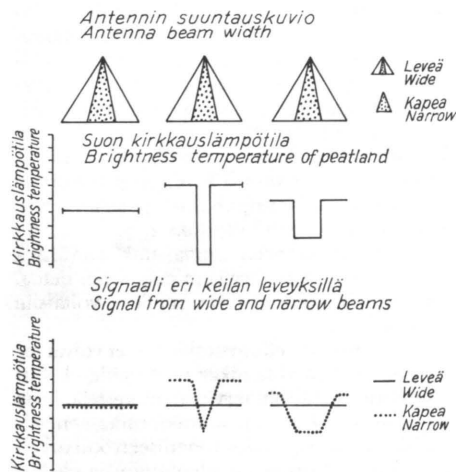
Varsinaiset sovellutustutkimukset voivat tapahtua osittain yhtä aikaa perusteiden kehittelyn kanssa. Tällöin tarvitaan ajotestejä, jossa käytännössä verrataan suoraan tutkamenetelmällä saatua signaalia todelliseen kulkukelpoisuuteen. Erityisen mielenkiintoisia olisivat maan pinnan kirkkauslämpötilan ja koneen nettovetokyvyn muutosten suoran riippuvuuden vertailu, koska tällöin jäisivät pois nykyisessä menetelmässä tapahtuva välillisten

muuttujien satunnaisvirheistä johtuva tulosten huononeminen.

Radiometrin mittaustekniikkaa on mahdollista kehittää ottamalla mukaan useampia taajuuksia (kanavia), suorittamalla mittaus eri polarisaatioilla sekä käyttäen kahta keilan leveyttä. Schmutge ym. (1976) totesi kivennäismailla suoritetujen radiometrilentojen perusteella, että

- kosteuden ja pinnan karheuden vaikutus voidaan erottaa vertaamalla kahdella eri taajuudella (1.4 ja 10.2 GHz) mitattuja kirkkauslämpötiloja ja
- alueen pintakerroksen kosteuden vaikutus on merkittävin. Kosteuden syvyysuuntaista gradienttia ei saatu näkyviin, vaikka teoriassa pienemmän taajuuden olisi pitänyt reagoida syvempien kerrosten kosteuteen voimakkaammin kuin pintakosteuteen.

Kuvassa 47 esitetään periaatteessa kahden eri keilan leveyden käyttäminen suon pinnan todellisten kosteusvaihteluiden analysoimiseksi. Mikäli käytetään yhtä keilan leveyttä, saataisiin leveämmällä keilalla kolmessa eri tilanteessa sama kirkkauslämpötila. Sen sijaan kapeamman keilan vaihtelu antaisi paremman kuvan suon todellisista muutoksista.



Kuva 47. Radiometrin keilan leveyden vaikutus mitattuun kirkkauslämpötilaan.

Fig. 47. The effect of radiometer antenna beam width on measured brightness temperature.

Mittaamalla molempien kanavien lämpötilat ja laskemalla näiden erotus voitaisiin saada huomattavasti enemmän informaatiota suon pinnan ominaisuuksista. Jos lisäksi mittaus suoritettaisiin kahdella eri taajuudella, informaation määrä todennäköisesti sallisi pinnan karheuden ja kasvipeitteen vaikutusten erottamisen ja mahdollistaisi edelleen huomattavasti tarkempien kantavuusanalyysien teon.

Radioaaltojen menetelmillä saadaan suosta runsaasti silmälle näkymätöntä informaatiota, jota voidaan käyttää kulkukelpoisuusanalyysien tekoon. Suorittamalla luotaus eri taajuuksilla ja eri menetelmiä käyttäen yhtäaikaisesti on mahdollista saada yksityiskohtaista tietoa

- suon pinnan kasvipeitteestä,
- suon sisäisistä turvekerroksista, turvekerroksen paksuudesta ja roudasta sekä
- suon pohjan muodoista ja pohjamaalajista,

ja yhdistämällä eri jaksoluvuilla saatua tietoa lienee mahdollista laatia tarkkoja kantavuusanalyysijä.

Tämäntapaisten laitteiden käyttöönottoon ja niiden tarpeeseen vaikuttavat monet tekijät. Menetelmiä tarvitaan ehkä vain tutkimus- ja kehittäelyvaiheessa, joissa suon ulkoisten ominaisuuksien ja kulkukelpoisuuden luokituksia kehitetään entistä tarkemmiksi l. geobotaanisten luokitusten tarkentamiseen. Radioaaltojen menetelmien käyttöönottoon lisäävästi vaikuttavia tekijöitä ovat mm.

- elektroniikan hintakehitys, joka on huomattavasti hitaammin kohoavaa, ja jopa laskevaa, verrattuna työpalkkojen ja konekustannusten hintakehitykseen,
- koko puunkorjuuketjujen kohoava automaatioaste sekä suunnittelun ja toteutuksen yhä kiinteämpi nitoutuminen toisiinsa ja
- ympäristölle aiheutettavien muutosten (esim. raiteistuminen) määrää ja laatua koskevien rajoitusten todennäköinen lisääntyminen.

On myös mahdollista, että teknisten toteutusten kustannukset kohoavat siksi korkeiksi, että saatavan informaation arvo jää negatiiviseksi, varsinkin jos silmävaraisten luokituksen tarkkuutta voidaan tutkimuksien avulla oleellisesti parantaa. Edelleen on mahdollista, että varsinaiset kaukokartoitusmenetelmät kehittyessään osoittautuvat edullisimmiksi.

Myös koneiden liikkumiskyvyn parantaminen saattaa vähentää suunnittelun tarvetta.

Tutkimus osoitti, että teoriassa ja käytännössä radioaalloilla saatava sähköinen signaali suosta sisältää informaatiota kulkukelpoisuuden arvioimiseksi. Tutkimuksia saatavan informaation parantamiseksi, saadun informaation tulkitsemiseksi ja soveltamiseksi turvemaiden puun korjuun suunnitteluun tulisi jatkaa, ja mahdolliset sovellutukset kivennäismaidan puun korjuun liikennöitävyyden arvioimiseksi tulisi liittää mukaan.

Paitsi metsätalouden puunkorjuuta elektronista maaperän luotauksia voidaan hyödyntää suomensien hoidossa, mm. suon vesipitoisuuden vaihteluiden seurannassa, tai met-

sänviljelyssä istutuskohteiden tunnistamisessa. Sovellutuskohteita löytyy myös metsäiden tutkimisen ja suunnittelun sektorilla (esim. Saarilahti ja Rummukainen 1980, Pulkki ja Saarilahti 1981, Saarilahti 1982).

Metsätalouden ulkopuolella esim. turvevarojen inventoinnissa (ks. Bjelm ja Ulriksen 1980, Peat resource estimation... 1980 ja Malterer 1981), geotekniikan, kunnallistekniikan ja sotatieteiden piirissä tutkamenetelmien sovellutukset ovat myös mahdollisia ja monipuolisia. Tutkimuksia tulisi edelleen jatkaa eri intressipiirien yhteistyönä, koska tällöin tutkimuksiin saatavat sekä henkiset että aineelliset resurssit voitaisiin tehokkaimmin hyödyntää.

KIRJALLISUUSLUETTELO

Kirjallisuusluettelossa yleisimmin esiintyvien lyhenteiden selitys

Proc. IPS Int. Peat Congr. — Proceedings of the International Peat Society's International Congress.

Proc. ISTVS Int. Conf. — Proceedings of the International Conference of the International Society for Terrain-Vehicle Systems. Hanover, New Hampshire, 03755 USA.

Kirjallisuus

- ADAMS, J. I. 1961. Laboratory compression tests on peat. Proc. 7th Muskeg Res. Conf. 18–19 April 1961. NRCC, ACSSM TM 71, s. 36–53.
- ALDABAGH A. S. Y. & BEER, C. E. 1975. Economics of increased mobility from tile drainage. Transactions of the ASAE 18:1, s. 116–121. (Julkaistu myös SFM TN 3, 1976).
- AMARJAN, L. S. 1972. Metody rasceta prognosti i svigamosti torfjanuh gruntov. Materialy k pervoj vsesojuznoj konferencii po stroitel'stvu na torfjanuk gruntah. Kalinin. Čast 1, s. 69–90.
- , KOROLEV, A. C., STREKALKIN, E. A. & IVKINA, T. H. 1972a. Kolicestnyj analiz prognostnyh svoistv torfa. Materialy k pervoj vsesojuznoj konferencii po stroitel'stvu na torfjanuk gruntah. Kalinin. Čast 1, s. 257–262.
- , LISTVAN, I. I., BAZIN, E. T., KOROLEV, S. S. & STREKALKIN, E. A. 1972b. Izmemenija fiziko — mehaniceskih svojstv torfjanuk gruntov po profilu neosucenogo mestorosdenija. Materialy k pervoj vsesojuznoj konferencii po stroitel'stvu na torfjanuk gruntah. Kalinin. Čast 1, s. 99–104.
- ANDERSON, K. O. & HAAS, C. G. 1962. Construction over muskeg on the Red Deer bypass. Proc. 8th Muskeg Res. Conf. NRCC, ACSSM TM 74, s. 31–41.
- & HEMSTOCK, R. A. 1959. Relating some engineering properties of muskeg to some problems of field construction. Proc. 5th Muskeg Res. Conf. NRCC, ACSSM TM 61, s. 16–25.
- APINIS, J. J. & PEAKE, W. H. 1977. Passive microwave mapping of ice thickness. GRA 77 (1977)5. Ohio State University Columbus Electro Science Lab. 130 s.

Proc. Muskeg Res. Conf. NRCC, ACSSM t. ACGR, TM. — Proceedings of the Muskeg Research Conference. National Research Council of Canada. Associate Committee for Soil and Snow Mechanics t. Associate Committee for Geotechnical Research. Technical Memorandum. Ottawa, Canada.

SFM — Samarbetsorganisationen för Fordon-Markforskning. Stockholm, Sverige.

- ARESKOUG, S. 1972. Off-road mobility demonstration. Proc. 4th ISTVS Int. Conf. Stockholm—Kiruna 24–28 April 1972. Vol. 3, s. 184–192.
- ASHDOWN, K. & RADFORTH, N. W. 1965. Trafficability of organic terrain. Proc. 11th Muskeg Res. Conf. 6–7 May 1965. NRCC, ACGR TM 87, s. 184–190.
- ASSARSSON, G. 1944. Torvsubstansstillgång och vattenhalt i torvmarker i Södra Sverige. Sveriges Geologiska Undersökning. Ser. C. Avhandlingar och Uppsatser 462. Årsbok 38(1944)4, s. 7–25.
- ASSUR, A. 1961. Traffic over frozen or crusted surface. Proc. 1st ISTVS Int. Conf. Torino—Saint Vincent 12–16 Giugno 1961, s. 913–923.
- BAREMBERG, E., DOWLAND, J. & HALES, J. 1975. Evaluation of soil-aggregate systems with Mirafi fabric. The Highway research laboratory, University of Illinois, 52 s. + 3 liit.
- BEKKER, M. G. 1960. Off-the-road locomotion. Research and development in terramechanics. Univ. Michigan Press. Ann Arbor. 220 s.
- 1961. Evaluation and selection of optimum vehicle types under random terrain conditions. Proc. 1st ISTVS Int. Conf. Torino—Saint Vincent 12–16 Giugno 1961, s. 772–790.
- 1969. Introduction to terrain-vehicle systems. Univ. Michigan Press. Ann. Arbor. 846 s.
- 1975. Tracks in Muskeg. Specialnotiser från SFM 17. 38 s.
- 1976. Wheels and tracks. Armor 85:3. (Julkaistu myös SFM TN 7, s. 11–16).
- BJELM, L. 1980. Geological interpretation with subsurface interface radar in peat lands. Engineering Geology Dept. of Water Resources Engineering,

Lund Institute of Technology, University of Lund. 6 s.

- & ULRIKSEN, P. 1980. Ett system för torvmarksundersökning med radar. Slutrapport Etapp 1(2) Project No. 3062–281. Engineering Geology Dept. of Water Resources Engineering. Lund Institute of Technology, University of Lund. 104 s.
- BJÖRKHEM, U., LUNDEBERG, G. & SCHOLANDER, J. 1975. Rotförekomst och tryckhållfasthet i skogsmark. Skogshögskolan, Institutionen för växekologi och marklära. Rapporter och uppsatser 22. (SFM 4/76). 9 s.
- BONMARTINI, F. 1961. Puheenvuoro. Proc. 1st ISTVS Int. Conf. Torino—Saint Vincent 12–16 Giugno 1961, s. 169.
- BRYAN, R. W. 1976. In peat-bog logging, name of the game is flotation. Forest Industries 103:10, s. 54–55.
- BURRELL, G. A. & PETERS Jr., L. 1979. Pulse propagation in lossy media using the low-frequency window for video-pulse radar application. Proc. IEEE 67:7, s. 981–990.
- BUSCH, C. 1980. The stress dependent moduli of unbound materials. The institute of roads, transport and town planning. The Technical University of Denmark. Report 10. Lyngby. 187 s.
- CAMPBELL, K. J. & ORANGE, A. S. 1974. A continuous profile of sea ice and freshwater ice thickness by impulse radar. Polar Record 17/106, s. 31–41.
- CHAN, L. C., MOFFAT, D. L. & PETERS Jr., L. 1979. A characterization of subsurface radar targets. Proc. IEEE 67: 7, s. 991–1000.
- 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. 24 s.
- DAVIES, J. L., TOPP, C. 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, s. 33–36.
- 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, s. 1584–1590.
- Definition av bearbetbarhet för olika jordar. Slutrapport. Statens vägverk. Stockholm 1976. 29 s.
- EKSTRÖM, A. 1979. Geoteknisk introduktion. Summary: Geotechnical introduction. SFM Medd. 27, s. 23–36.
- ERIKSSON, T., NILSSON, G. & SKRÄMO, G. 1978. The Inter-Nordic project of forest terrain and machines in 1972–1975. Yhteisprojeksin metsäntutkimusprojekti "Maasto-Kone" 1972–1975. Acta For. Fenn. 164. 61 s.
- ERONEN, J. 1976. Soiden ojitus — valtaisa virhesijoitus. Helsingin Sanomat 1976-09-28, s. 2.
- ERVASTI, S., HEIKINHEIMO, L., HOLOPAINEN, V., KUUSELA, K. & SIRÉN, G. 1965. The development of Finland's forests in 1964–2000. Memorandum to the Economic Council. Forecast of the development of removals, growing stock and the growth of Finland's forests for a silvicultural programme for a sustained supply of industrial raw wood. Silva Fenn. 117:2, 35 s.
- , HEIKINHEIMO, L., KUUSELA, K. & MÄKINEN, V. O. 1969. Suomen metsä- ja puutalouden tuotantomahdollisuudet vuosina 1970–2015. Talousneuvosto, Helsinki. 172 s.
- , HEIKINHEIMO, L., KUUSELA, K. & MÄKINEN, V. O. 1970. Forestry and forest industry production alternatives in Finland, 1970–2015. Folia For. 88, 65 s.
- ESKELINEN, A. & PELTONEN, J. 1977. Puunhankinnan suunnittelumalleilla suoritettava raakapuun varastojen koon optimointi. Summary: Optimization of the size of roundwood storages performed by logging planning models. Metsäteho Tied. 343. 29 s.
- EVANS, S., DREWRY, D. J. & ROBIN, G. de Q. 1972. Radio echo sounding in Antarctica 1971–72. Polar Record 16:101, s. 207–212.
- FISKE, P. M. & FRIDLEY, R. B. 1975. Some aspects of selecting log skidding tractors. Transactions of the ASAE 18:3, s. 497–502.
- GARBER, M. & WONG, J. Y. 1981. Prediction of ground pressure distribution under tracked vehicles. I. An analytical method for predicting ground pressure distribution. Journal of terramechanics 18:1, s. 1–23.
- GARDEMEISTER, R. 1977. Suomen maaperä rakentajan kannalta. Maarakentee ja niiden suunnittelu. Insinöörien koulutuskeskus INSKO. Julkaisu 73–77, s. 1–27.
- GEE-CLOUGH, D. 1976. The Bekker-theory of rolling resistance amended to take account of skid and deep sinkage. Journal of terramechanics 13:2, s. 87–105.
- GOLOB, T. B. 1978. Current progress in research on terrain properties. Forest Management Institute. Ottawa. Information Report FMR-X-110, 21 s.
- 1981a. Development of terrain strength measu-

- ring system. *Journal of terramechanics* 8:2, s. 109–118.
- 1981b. Effects of soil strength parameters on terrain classification. *Proc. 7th ISTVS Int. Conf. Aug. 16–20. 1981, Calgary, Alberta. Vol. 3, s. 901–927.*
- GREEN, W. A. R. 1963. Mechanical design features of bog development and production machinery. 2nd Int. Peat Congr. Leningrad 1963. Edinburgh 1968. Dept. of Agriculture and Fisheries for Scotland. *Trans. 1, s. 291–315.*
- HAARLAA, R. 1971. Maaston ja kuorman vaikutus metsätraktoreiden ajonopeuteen. Effect of terrain and load on the driving speed of logging tractors. Helsingin yliopiston metsäteknologian laitos. *Tiedonantoja 9, 88 s.*
- 1972. Lisättyjen konekomponenttien vaikutus metsätraktoreiden maastokelpoisuuteen. Summary: Effect of additional machine components on the mobility of forest tractors. Helsingin yliopiston metsäteknologian laitos. *Tiedonantoja 15, 35 s.*
- HAKKARAINEN, A. E. 1949a. Tilapäisten talviautoteiden käytöstä talvella 1947–48 saaduista kokemuksista. *Metsäteho Tied. 17, 15 s.*
- 1949b. Routa talviteiden rakentajana. *Metsäteho Tied. 29, 13 s.*
- 1949c. Maan roudaantumisen tilapäisten talviautoteiden roudaantumisen kannalta. Helsingin yliopiston metsäteknologian laitos. *Pro gradu. Konekirjoite. 82 s.*
- HANNELIUS, S. 1975. Ojitusalueiden kulkukelpoisuudesta puunkorjuussa. Summary: On the trafficability of drained peatlands in harvesting. *Silva Fenn. 9:3, s. 181–211.*
- HANSON, T. L., JOHNSON, H. P. & YOUNG, D. F. 1967. Dynamic shearing resistance of soils. *Transactions of the ASAE 10: 4, s. 439–443, 447.*
- HARDY, R. M. 1964. Research on shearing strength of muskeg and its application. *Proc. 10th Muskeg Res. Conf. 21–22 May 1964. NRCC, ACSSM TM 85, s. 25–31.*
- HARRISON, W. C. 1955. Primary and secondary access over muskeg in forestry practice. *Proc. Western Muskeg Research Meeting. 2nd March 1955. NRCC, ACSSM TM 38, s. 6–13.*
- Harvesting man-made forests in developing countries. A manual on techniques, roads, production and costs. *FAO, Rome 1976. 185 s.*
- HARWOOD, T. A. 1964. Trafficability and mobility in muskeg. *Proc. 10th Muskeg Res. Conf. 21–22 May 1964. NRCC, ACSSM TM 85, s. "B" 25–40.*
- HASSAN, A. E. 1977. Trafficability study of a cable-skidder. *Transactions of the ASAE 20: 1, s. 26–29.*
- 1978. Effect of mechanization on soils and forest regeneration I. Coastal plain organic soil. *Transactions of the ASAE 21:26, s. 1107–1112.*
- 1979. Research methods applied to terrain classification – planting machine systems. *IUFRO Proc. of the Symposium on stand establishment techniques and technology in Moscow and Riga, 3rd–8th September 1979. Moscow 1980. Part II, s. 253–292.*
- HEIKURAINEN, L. 1960. Metsäojitus ja sen perusteet. *Werner Söderström Oy. Porvoo. 378 s.*
- 1961. Metsäojituksen vaikutuksesta puuston kasvuun ja poistumaan hakkuusunnitteiden laskeamista varten. Summary: The influence of forest drainage on growth and removal in Finland for estimations of allowable cut. *Acta For. Fenn. 71:8, 71 s.*
- 1979. Peatland classification in Finland and its utilization for forestry. *Proc. of the international symposium on classification of peat and peatlands. Hyytiälä 17–21 Sept. 1979, s. 135–145.*
- 1980a. Soiden käytössä päälinjat jo ratkaistu. *Metsä ja puu 8, s. 4–7.*
- 1980b. Input and output in Finnish forest drainage activity. *Proc. 6th IPS Int. Peat Congr. Duluth, Minn 17–23 August 1980, s. 398–402.*
- & LAINE, J. 1980. Finnish peatlands and their utilization. Text for slide presentation. *Proc. 6th Int. Peat Congr. Duluth, Minn. 17–23 August 1980. 10 s.*
- HEINÄMÄKI, M., LEHTINEN, U., VIRTANEN, E. & LAMPEN, S. 1979. Leimikon suunnittelu. *Metsätehon opas. 36 s.*
- HELENELUND, K. V. 1974. Maanrakennusmekaniikka 137. *Otakustantamo. Otaniemi. 277 s.*
- HEMSTOCK, R. A. 1968. Transportation over muskeg. *Proc. 3rd IPS Int. Peat Congr. Québec 18–23 August 1968, s. 57–59.*
- 1969. Trafficability and vehicle mobility. *Teoksessa: Muskeg engineering handbook. Toim. I. C. Macfarlane. University of Toronto press, s. 261–286.*
- HOLM, I. C. 1970. Articulated wheeled off the road vehicles. *Journal of terramechanics 7:1, s. 19–52.*
- 1972. Das Verhalten von Reifen beim mehrmaligen überfahren einer Spur auf nachgiebigem Boden und der Einfluss auf die Konzeption mehrachsiger Fahrzeuge. *Forstschritt-berichte der VDI Zeitschriften. Reihe 14:17. Düsseldorf. VDI-Verlag. 132 s.*
- HUIKARI, O. 1958. Metsäojituksen koneellistamisesta. *Ref.: Über die Mechanisierung der Waldentwässerung. Commun. Inst. For. Fenn, 50.5 (1960). 93 s. (Numero julkaisussa: 49:7 (1958)).*
- , MUOTIALA & WÄRE. 1963. *Ojitusopas. Kirjayhtymä. Helsinki. 257 s.*
- HYLK. Käyttäjän käsikirja. 1981. Helsingin yliopiston laskentakeskus. Päivitetty käsikirja.
- ISTVS Standards. 1977. International society for terrain-vehicle systems standards. *Journal of terramechanics 3:3, s. 153–182.*
- JAKKULA, P. 1979a. Soiden kaukokartoitus UHF-radiometrialla. *Lisensiaattityö. Teknillinen korkeakoulu. Sähköteknillinen osasto. Otaniemi. 68 s. + 10 liitettä.*
- 1979b. FM-tutka jään paksuuden mittaukseen. *Teknillinen korkeakoulu. Radiotekniikan lisensiaattikurssin "Mikroaaltokaukokartoitus" erikoistyö. Espoo 9. 2. 1980. Konekirjoite. 21 s.*
- , YLINEN, P. & TIURI, M. 1980. Measurement of ice and frost thickness with an FM-CW radar. *Helsinki University of Technology. Radio laboratory. Espoo. 4 s.*
- JARRET, P. M. 1975. The strength of the surface mat in a fibrous peat. *Proc. 16th Muskeg Res. Conf. October 7, 1975. NRCC, ACGR TM 116, s. 133–143.*
- , LEE, R. A. & RIDELL, D. B. V. 1977. The use of fabrics in road pavements constructed on peat. *Colloque international sur l'emploi des textiles en géotechnique. Paris 21–23 avril 1977. Vol. 1, s. 19–22.*
- KAITERA, P. 1968. Maankuivatus. *Luku 11 teoksessa: Maa- ja vesirakennus. Suomen rakennusinsinöörien liitto. Helsinki 1968, s. 529–585.*
- KAJE, L. 1968. Maaston kulkukelpoisuus. Summary: Terrain trafficability. *Helsinki. Reprint. 53 s.*
- KARAFIATH, L. L. 1971. Plasticity theory and the stress distribution beneath wheels. *Journal of terramechanics 8:2, s. 49–60.*
- & NOWATZKI, E. A. 1978. Soil mechanics for offroad vehicle engineering. *Trans. Tech. publications series on rock and soil mechanics. 2:5 (1974/77). 515 s.*
- KARESNIEMI, K. 1972. Dependence of humification degree on certain properties of peat. *Proc. 4th IPS Int. Peat Congr. Otaniemi, Finland. 25–30 June 1972. Vol. 2, s. 273–282.*
- KNIGHT, S. J. & MEYER, M.P. 1961. Soil trafficability classification scheme. *Proc. 1st ISTVS Int. Conf. Torino–Saint Vincent 12–16 Giugno 1961, s. 567–574.*
- & RULA, A. A. 1961. Measurement and estimation of the trafficability of fine-grained soils. *Proc. 1st ISTVS Int. Conf. Torino–Saint Vincent 12–16 Giugno 1961, s. 371–384.*
- KORHONEN, K. H. & HELENELUND, K. V. 1963. *Geotekniikka ja pohjanrakennus. Teoksessa Maa- ja vesirakentajan käsikirja. Maa- ja vesira-*
- kennusinsinöörien yhdistyksen vuosikirja. *Maa- ja vesirakentaja 5. Helsinki, s. 93–162.*
- KORPIJAAKKO, E. O. & WOOLNOUGH, D. F. 1973. *Peatland survey and inventory. Luku 3 teoksessa: Muskeg and the northern environment in Canada. Toim. N. W. Radforth & C. O. Brawner. NRCC, ACGR. University of Toronto Press. Toronto, Canada, s. 63–81.*
- KORPIJAAKKO, M., HÄIKIÖ, J. & LEINO, J. 1981. Vesipitoisuuden ja maatunneisuuden vaikutus turpeen kuivatilavuuspainoon. Effect of water content and degree of humification on dry density of peat. *Suo 32:2, s. 39–43.*
- KOSTIAINEN, T. 1972. Turvemaan vaaka- ja pystysuora kantavuus kuormituskoekiteen perusteella. *Teknillinen korkeakoulu. Diplomityö. Helsinki. 77 s.*
- LANDVA, A. O. & MACFARLANE, H. W. 1975. Equipment for field and laboratory testing of peat. *Proc. 16th Muskeg Res. Conf. 7 Oct. 1975. NRCC, ACGR TM 116, s. 142–143.*
- LAPPALAINEN, E., STEN, C-G. & HÄIKIÖ, J. 1978a. Turvetutkimusten maasto-opas. *Geologinen tutkimuslaitos. Opas 6. Espoo. 46 s.*
- , HÄIKIÖ, J., KORPIJAAKKO, M. & MÄKILÄ, M. 1978b. Siikajokilaakson turvevarat ja niiden käyttömahdollisuudet. Summary: The peat resources of Siikajokilaakso and their potential use. *Geologinen tutkimuslaitos. Tutkimusraportti 33. Espoo. 260 s.*
- LEA, N. D. 1962. Recent experiences in major highway and construction developments over peatlands near Vancouver B. C. *Proc. 8th Muskeg Res. Conf. 17–18 May 1962. NRCC, ACSSM TM 74, s. 59–67.*
- LEHTINEN, E. 1965. Soratien kantavuus. *Teknillinen korkeakoulu. Lisensiaattityö. 202 s.*
- LEMKE, E. 1961. Kongressipuheenvuoro. *Proc. 1st ISTVS Int. Conf. Torino–Saint Vincent 12–16 Giugno 1961, s. 538–540.*
- LUKKALA, O. J. 1940. *Metsämiehen suo-oppi. Keskusmetsäseura Tapion käsikirjasia 28. Helsinki. 192 s.*
- LÖFFLER, H. D. 1979. Recording and classification of soil conditions within the scope of terrain classification. *IUFRO. Proc. of the Symposium on stand establishment techniques and technology in Moscow and Riga. 3rd–8th September 1979. Moscow 1980. Part II, s. 297–317.*
- MACFARLANE, I. C. 1963. Engineering studies on peat soils (muskeg). 2nd Int. Peat Congr. Leningrad 1963. Edinburgh 1968. Dept. of Agriculture and fisheries for Scotland. *Vol. II, s. 853–862.*
- 1964. The engineering characteristics of peat.

- Proc. 10th Muskeg Res. Conf. 21–22 May 1964. NRCC, ACSSM TM 85, "B" s. 41–47.
- 1968. Strength and deformation tests on frozen peat. Proc. 3rd IPS Int. Peat Congr. Québec 18–23 August 1968, s. 143–149.
- 1969a. Special construction problems. Luku 7 teoksessa: Muskeg engineering handbook. NRCC, ACGR. Canadian Building Series 3. University of Toronto Press, s. 209–260.
- 1969b. Engineering characteristics of peat. Teoksessa Muskeg engineering handbook. Toim. I. C. Macfarlane. University of Toronto Press, s. 78–126.
- & RUTKA, A. 1959. Evaluation of road performance over muskeg in Ontario. NRCC, Division of Building Research, Research paper 97. 10 s. (Reprint from Proc. 14th Conf. Can. Good Roads Ass. 1959, s. 396–405).
- MALTERER, T. J. 1981. Ground penetration radar demonstration/evaluation in Minnesota. Minnesota Department of natural resources. Hibbing, Minnesota, s. 313–322.
- MATTILA, V.-P. 1981. Turpeen dielektrisyysvakion mittaust. Teknillinen korkeakoulu. Radiolaboratorio. 1. 26. 92 Radiotekniikan erikoistyö. 24 s.
- Metsätaloustilastollinen vuosikirja 1979. Yearbook of forest statistics. Suomen virallinen tilasto XVII A:11. Folia For. 430. Metsäntutkimuslaitos 1980. 195 s.
- MEYERHOF, G. D. 1961. The bearing capacity of soils under vehicle loads. Proc. 1st ISTVS Int. Conf. Torino–Saint Vincent 12–16 Giugno 1961, s. 81–86.
- MIKKONEN, E., PELTONEN, J., SAVOLAINEN, R. & VESIKALLIO, H. 1975. Puunkorjuun kehitysnäkökulma 1975–1984. Summary: Development prognosis for timber harvesting in 1975–1984. Metsäteho Tied. 336. 28 s.
- MIYAKAWA, I. 1959. Soil engineering research on peaty alluvio. Reports 1 to 3. NRCC, TR 1001. Ottawa 1962. Käännös raportista Bulletin 20. Civil Engineering Research Institute, Development Bureau. Hokkaido, Japan. January 1959. 88 s.
- 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., 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. 72 s.
- MURFIT, A. W., McMULLEN, W. B., BAKER Jr., M. & McPHAIL, J. F. 1975. Design and construction of roads on muskeg in arctic and subarctic regions. Proc. 16th Muskeg Res. Conf. Oct. 7, 1975. NRCC, ACGR TM 116, s. 152–185.
- MURILLO-SOTO, F. & SMITH, J. L. 1978. Traction efficiency of 4 WD tractors: A model study. Transactions of the ASAE 21: 6, s. 1051–1053.
- MUSTONEN, S. E. 1965. Ilmasto- ja maastotekijöiden vaikutuksesta lumen vesiarvoon ja roudan syvyyteen. Summary: Effect of meteorologic and terrain factors on water equivalent of snow cover and frost depth. Acta For. Fenn. 79:1, 36 s.
- MÄKILÄ, M. 1980a. Tutkimus Toholammin turvevarojen käyttökelpoisuudesta ja turpeen eri ominaisuuksien välisestä riippuvuudesta. Summary: The peat resources of Toholampi municipality and their potential use both correlations between different peat factors. Geologinen tutkimuslaitos. Maaperäosasto. Raportti P 13.6/80/5. Espoo. 137 s.
- 1980b. Turpeen ominaisuuksien välinen riippuvuus ja suon energiasäällön määrittäminen. Kurssi: Suo- ja turveteknologian perusteet. Retkeilyjakso. 16–18. 8. 1980. Helsingin yliopisto, Neuvontaopin ja täydennyskoulutuksen keskus. Monistesarja 8/80, s. 8–15.
- NIEMI, E. W. & BAYER, R. 1970. Analytical prediction of vehicle mobility in muskeg. Keweenaw Research Center. Michigan Technological University. Houghton, Michigan. TACOM TR 11108. AD-730792. 103 s.
- NILSSON, B. 1978. Two topics in radiation field electromagnetic prospecting. Doct. thesis, Division of applied geophysics. University of Luleå, Sweden. 78 s. + 62 kuvaa.
- NURMENTO, A. 1969. Turpeen murtokuormitus nopeissa kuormituskokeissa. Teknillinen korkeakoulu. Diplomityö. 48 s.
- OZDEN, Z. S. & WILSON, N. E. 1970. Shear strength characteristics and structure of organic soils. Proc. 13th Muskeg Res. Conf. 7–8 May, 1970. NRCC, ACGR TM 99, s. 8–26.
- PAVLICS, F. 1961. Bevameter 100. A new type of field apparatus for measuring locomotive stress-strain relationships in soils. Proc. 1st ISTVS Int. Conf. Torino–Saint Vincent 12–16 Giugno 1961, s. 443–361.
- Peatland terminology for forestry. 1977. IUFRO Working party S1. 05. 01. Afforestation of peatland and extremely wet soils. Helsinki. 79 s.
- Peat resource estimation in Alaska. Final report 1. Prepared by Northern technical service & EKONO Inc. US Department of Energy, Division of fossil energy. Grant N:o DE-FG01-79ET14689. Anchorage, August 1980.
- Peat testing manual. 1979. Muskeg subcommittee. NRCC ACGR, TM 125. 193 s.
- PELTONEN, J. 1979. Hajautettuun tietojenkäsittelyyn perustuva puunkorjuun suunnittelujärjestelmä. Summary: A planning method for timber harvesting based on decentralized data processing. Metsäteho, Katsaus 3. 4 s.
- & VESIKALLIO, H. 1974. Pystyleimikkovarannon koon vaikutus raakapuun hankintakustannuksiin. Summary: Effect of the size of the standing timber stock on roundwood logging costs. Metsäteho Tied. 333. 21 s.
- PERINA, V. 1979. Technological terrain classification for stand establishment operations in Czechoslovakia. IUFRO Symposium on stand establishment techniques and technology. Moscow and Riga, 3–8. September 1979. 4 s.
- PHASE III. Analysis of results, Waterways experiment station terrain analysis radar (Project WESTAR); Final report 1965. WES contract report 4–93:3. 57 s.
- PIHKALA, R. 1949. Nykyaikaisten ojituskoneiden käytömahdollisuuksista metsäojituksia silmällä pitäen. Metsälehti 18–19, s. 8–9.
- PULKKI, R. & SAARILAHTI, M. 1981. Metsäautoteiden kantavuuden mittaaminen. Metsä ja Puu 5, s. 26–29.
- PUTKISTO, K. 1948. Hajatietoja telaketjutraktoreista ja niiden käytöstä metsätalvitieiden rakentamisessa ja hoidossa. Metsäteho Tied. 5. 13 s.
- 1952. Mootoritalvitieistä ja niiden rakentamisesta. Metsäteho Tied. 52. 9 s.
- Puutavaran jäällevarastoinnin turvallisuusohjeet. Työsuojeluhallitus 1976. Turvallisuusmääräykset ja ohjeet 36. Tampere. 15 s.
- PÄIVÄNEN, J. 1969. The bulk density of peat and its determination. Seloste: Turpeen tilavuuspaino ja sen määrittäminen. Silva Fenn. 3:1, s. 1–19.
- 1973a. Hydraulic conductivity and water retention in peat soils. Turpeen vedenläpäisevyys ja vedenpidätyskyky. Acta For. Fenn. 129. 70 s.
- 1973b. Harvennuksen vaikutus lumi- ja routasuhteisiin nuoressa turvemaan männikössä. Summary: The effect of thinning on the snow cover and soil frost conditions in a young Scots pine stand on drained peat. Silva Fenn. 7:2, s. 114–128.
- RADFORTH, J. R. 1969d. Preliminary engineering investigation. Teoksessa Muskeg engineering handbook. Toim. I. C. Macfarlane. University of Toronto Press, s. 127–149.
- 1975. Future research needs. Off road transportation. Proc. 16th Muskeg Res. Conf. Oct. 7, 1975. NRCC, ACGR TM 116, s. 226–227.
- & BURWASH, A. L. 1973. Transportation. Luku 10 teoksessa: Muskeg and the northern environment in Canada. Toim. N. W. Radforth ja C. O. Brawner. NRCC, ACGR. University of Toronto Press, s. 249–263.
- & ROE, P. H. 1968. Computer modelling of tracked vehicles on muskeg. Proc. 3rd IPS Int. Peat Congr. Québec, 18–23 August 1968, s. 65–68.
- RADFORTH, N. W. 1952. Suggested classification of muskeg for the engineer. Engineering Journal 35:11, s. 1199–1210. (Myös: NRCC, TM 24).
- 1961a. Puheenvuoro. Proc. 1st ISTVS Int. Conf. Torino–Saint Vincent 12–16 Giugno 1961, s. 540.
- 1961b. Puheenvuoro. Proc. 1st ISTVS Int. Conf. Torino–Saint Vincent 12–16 Giugno 1961, s. 1919.
- 1969a. Classification of muskeg. Teoksessa: Muskeg engineering handbook. Toim. I. C. Macfarlane. University of Toronto Press, s. 31–52.
- 1969b. Muskeg as an engineering problem. Teoksessa: Muskeg engineering handbook. Toim. I. C. Macfarlane. University of Toronto Press, s. 3–30.
- 1969c. Att köra på myr. Militärteknisk tidskrift 3. Stockholm, s. 19–25.
- RAGHAVAN, G. S. V., MCKYES, E. & CHASSE, M. 1976. Prediction techniques for traction using field and laboratory data. Transactions of the ASAE 19, s. 405–408.
- RAPELI, P. 1968. Maan lämpötilan mittauksista Sodankylässä. Geofysiikan päivät 18–19. 6. 1968. Toim. P. Tuomikoski. Oulu 1969, s. 108–112.
- REECE, A. R. 1966. Vehicle design and tractive performance. SFM Fordon-markkonferensen 16. 12. 1966 i Philipshuset. Stockholm, s. 29–56.
- 1970. Book review: "Introduction to terrain-vehicle systems". Journal of terramechanics 7:1, s. 75–77.
- RICHARDSON, B. Y. & COOPER, A. W. 1970. Effects of articulated steering on tractive performance of a rubber-tired logging tractor. Transactions of the ASAE 13:5, s. 633–635.
- RIPLEY, C. F. & LEONOFF, C. E. 1961. Embankment settlement behaviour on deep peat. Proc. 7th Muskeg Res. Conf. 18–19, April 1981. NRCC, ACSSM TM 71, s. 185–205.
- ROWLAND, D. 1972. Tracked vehicle ground pressure and its effect on soft ground performance. Proc. 4th ISTVS Int. Conf. Stockholm–Kiruna 24–28 April 1972. Vol. 1, s. 353–384.
- 1975. A review of vehicle design for soft ground operation. Proc. 5th ISTVS Int. Conf. June 2–6, 1975 Detroit, Michigan. Vol. 1, s. 179–219.
- RUSH, E. S., SCHREINER, B. G. & RADFORTH, N. W. 1965. Trafficability tests on confined organic ter-

- rain (muskeg). Summer 1962 tests. US Army, Corps of Engineering, WES TR 3-656. 48 s.
- RYSÄ, M., SAVOLAINEN, R. & VÄISÄNEN, U. 1972. Puunkorjuun kehityssuunnitelma 1970-luvulle. Summary: Forecast of the development of timber harvesting in the 1970's. Metsäteho Tied. 314. 39 s.
- SAARENMAA, L. 1980. Luonnontilaisten turpeiden todellisen tilavuuspainon ja eräiden maatumisasteen määrittämismenetelmien vertailu. Helsingin yliopiston suomensäätieteen laitos. Pro Gradu. 89 s.
- SAARILAHTI, M. 1978. Suon kantavuuden määrittäminen metsätien rakentamista varten. Summary: Determining the bearing capacity of peat soil in forest road planning. Helsingin yliopiston metsäteknologian laitos. Tiedonantaja 37. 98 s.
- 1980. Studies on forest road construction on peatland. Proc. 6th IPS Int. Peat Congr. Duluth, Minn. 17-23 August 1980, s. 462-468.
- 1981a. Koneiden uppoaminen suomensien puunkorjuussa. Summary: Sinkage of forest machines during harvesting operations on peatlands. *Silva Fenn.* 15:3, s. 323-331.
- 1981b. Mikroaaltojutka jään paksuuden mittaukseen. Summary: Radar measurement of ice thickness on ice roads and landings. *Silva Fenn.* 15:4, s. 366-376.
- 1981c. Metsätien rakentaminen turvealustalle. Helsingin yliopisto. Neuvontaopin ja täydennyskoulutuksen keskus. Kurssi: Metsäntutkimuksen teemapäivä 23. 4. 1981. *Monistesarja* 3/81, s. 52-62.
- 1982. Tutkaluotaukseen perustuva metsäautotien kantavuuden arvioimismenetelmä. Summary: Predicting the bearing capacity of forest roads using a radar sounding. *Silva Fenn.* 16:1.
- & RUMMUKAINEN, A. 1980. Maaperätutka suoteiden penkereen tutkimuksissa. Summary: Ground radar in survey on marsh road embankments. *Tie ja liikenne* 8, s. 371-373.
- SALASPURO, V. 1963. Maarakennus ja ruoppaustyöt. Teoksessa Maa- ja vesirakentajan käsikirja. Maa- ja vesirakennusinsinöörien yhdistyksen vuosikirja "Maa ja vesirakentaja 5". 14. luku. Helsinki, s. 457-486.
- SARASTO, J. 1960. Turpeen maatumisuuden määrittämisestä. v. Postin maatumisasteen ja Pjävtsenkon maatumisprosentin vertailu. Referat: Zur Bestimmung der Zersetzung des Torfes. Ein Vergleich der Zersetzungsgrades v. Post mit dem Zersetzungsprozent Pjävtsenkos. *Acta For. Fenn.* 7:2. 16 s.
- SCHMUGGE, T. J., BLANCHARD, B. J., BURKE, W. J., PARIS, J. F. & WANG, J. R. 1976. Results of soil moisture flights during April 1974. NASA TN D-8199. May 1976. Washington D. C. 57 s.
- SCHNEEKLOTH, H. & SCHNEIDER, S. 1976. Proposal for a classification of the decompositions of peat. Transactions of the working group for classification peat. IPS, Commission 1. Helsinki, s. 11-14.
- SCHOLANDER, J. 1970. Hjulbelastning - markens bärformåga. Periferikraft-markens skjvuhållfasthet. Wheel load-bearing capacity of ground. Periphery force-shear strength of ground. SFM studiedagar i Skövde 26-28. 8. 1970. SFM Medd. 10, s. 201-269.
- 1973a. Skogsmarks bärighet för hjulfordon. Några tekniska aspekter och konsekvenser. Summary: The bearing capacity of some forest soils for wheeled vehicles. Some technical aspects and consequences. Skogshögskolan. Institutionen för skogsteknik. Rapporter och uppsatser 64. 120 s.
- 1973b. Fordonets krav på terrängbedömning för framkomlighet. The demand of terrain appraisal for vehicle mobility. SFM årsmöte och konferens i Stockholm 1973-12-06-07. SFM Medd. 15, s. 51-63.
- 1974. Bearing capacity of some forest soils for wheeled vehicles. Some technical aspects and consequences. Specialnotiser från SFM 14. 97 s.
- 1976a. Några jämförande konpenetreringsförsök på elementarmyrmark. Summary: Some comparative cone penetrometer tests on different types of organic soil (muskeg). SFM Medd. 22, s. 31-46.
- 1976b. Körförsök med bandvagn 202 A på myrmark. Summary: Field test on organic terrain with an articulated tracked vehicle. SFM Medd. 22, s. 47-52.
- SCHREINER, B. G. 1967. A technique for estimating the performance of tracked vehicles in muskeg. *Journal of terramechanics* 4:3, s. 23-29.
- SCOTT, W. J., CAMPBELL, K. J. & ORANGE, A. S. 1974. EM-pulse survey method in permafrost. NRCC, ACGR TM 113, s. 92-96.
- SIDDALL, J. N., NEWCOMBE, W. R., RADFORTH, J. R. & GHOSH, K. K. 1965. A rational empirical approach to muskeg vehicle research. Proc. 11th Muskeg Res. Conf. 6-7 May, 1965. NCCR, ACGR TM 87, s. 191-216.
- SILVENNOINEN, U. 1980. Ojitettujen soiden puunkorjuuta kehitettävä. Metsä ja puu 6-7, s. 8-10.
- & HAARLAA, R. 1971. Metsätraktoreiden liikkuvuus lumessa. Summary: The mobility of logging tractors on snow. *Silva Fenn.* 5:2, s. 145-167.
- & HAARLAA, R. 1972. Aspects on the mobility of logging tractors on snow. Proc. 4th ISTVS Int. Conf. Stockholm-Kiruna. 24-28 April 1972. Vol. 2, s. 205-213.
- SIRÉN, G. 1971. Objekt- och terrängklassificering för mekaniserad skogsodling. Teoksessa: Förutsättningar för mekaniserad skogsodling. Statens Råd för skogs- och jordbruksforskning. Sektionen för skogsforskning. Stockholm, s. 93-102.
- Soil assesment cone penetrometer. Leonard Farnell & Co Ltd. Hatfield. Esite. 4 s.
- SOLOPOV, S. G., VOLAROVICH, M. P., KORCHUNOV, S. S., TSUPROV, S. A., MOGILEVSKII, I. I. & ABAKUMOV, O. N. 1968. Physical and mechanical properties of peat. Proc. 3rd IPS Int. Peat Congr. Québec 18-23 August 1968, s. 155-162.
- Swamp Dozer 1979. Canadian forest industry. February 1979, s. 53.
- SÖHNE, W. 1969. Agricultural engineering and terramechanics. *Journal of terramechanics* 6:4, s. 9-30.
- & SONNEN, F. J. 1961. Messungen von Rollwiderstand und Zukunft von luftbereiften Ackerschleppern sowie mechanischen Bodenkenngößen und Versuch einer Zuordnung. Comparison between relationships of agricultural tractors and mechanical soil values. Proc. 1st ISTVS Int. Conf. Torino-Saint Vincent 12-16 Giugno 1961, s. 506-536.
- Tehdaspuu Oy. Korjuuohjeet. Kouvola.
- Terrängmaskinen. Utformning, vård och körteknik. Del 2. Forskningsstiftelsen Skogsarbeten. Stockholm. 1971. 469 s.
- TERWEL, W. 1977. The bearing capacity of frozen peat. Helsingin yliopisto. Metsäteknologian laitos. Konekirjoite. 14 s.
- Texas Instruments. 1978. Manuel d'utilisation. 169 s.
- THOMSON, J. G. 1960. Vehicles in muskeg. *The Engineering Journal*. May 1960, s. 73-78.
- 1961. Vehicle design from field data. Proc. 1st ISTVS Int. Conf. Torino-Saint Vincent 12-16 Giugno 1961, s. 171-182.
- THOMSON, S. 1955. An investigation of the engineering properties of muskeg. M. Sc. thesis. University of Alberta Library. (Mainittu raportissa: Hardy 1964.)
- THURNER, H. 1976. Klassificering av jordars bearbetbarhet. Summary: Classification of soil with respect to the handling of the material. SFM Medd. 19, s. 21-30.
- TIURI, M. 1979. Soiden mitaus radioteknillisin menetelmin. Loppuraportti. Teknillinen korkeakoulu. Radiolaboratorio. Konekirjoite 1979-03-09. 2 s + 9 liitettä.
- , HALLIKAINEN, M. & LÄÄPERI, A. 1976. Microwave radiometer theory and measurements of sea ice characteristics. Project Sea ice 1975. Helsinki University of Technology. Radio Laboratory. Report 589. Otaniemi. 43 s.
- , HALLIKAINEN, M. & LÄÄPERI, A. 1978. Radiometer studies of low-salinity sea ice. *Boundary-Layer Meteorology* 13. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, s. 361-371.
- TKAČENKO, A. A. 1972. Torfjanyje grunty kak os novonija inzeneznyk svojuzenij. Materialy k pervoj vse-sojuznoj konferencii po stroitel'stvu na torfjanuk grunth. Kalinin. Čast 2, s. 129-131.
- TOLONEN, K. 1966. Stratigraphic and rhizopoeal analyses on an old raised bog, Varrassuo, in Hollola, South Finland. *Annales Botanici Fennici* 3, s. 147-166.
- 1979. Peat as a renewable resource: long-term accumulation rates in northeuropean mires. Proc. of the International symposium on classification of peat and peatlands. *Hyttiälä* 17-21 Sept. 1979, s. 282-296.
- 1981. [Dos. Toloselta saatua julkaisematonta materiaalia, joka osittain liittyy julkaisuun Tolonen 1979.]
- & SAARENMAA, L. 1979. The relationship of bulk density to three different measures of the degree of peat humification. Proc. of the International symposium on classification of peat and peatlands. *Hyttiälä* 17-21 Sept. 1979, s. 227-238.
- Trafficability research team 1961a. A suggested empirical combination between the Bekker and the Wicksburg methods in trafficability analyses of deep loose sands. Proc. 1st ISTVS Int. Conf. Torino-Saint Vincent 12-16 Giugno 1961, s. 837-844.
- 1961b. Forecasting of trafficability after traffic for sands possessing structure. Proc. 1st ISTVS Int. Conf. Torino-Saint Vincent 12-16 Giugno 1961, s. 87-95.
- TSUNEMATSU, S. & MATSUI, K. 1961. Relation of shape of track shoes to tractive force of the crawler-type tractor on peat soil. Proc. 1st ISTVS Int. Conf. Torino-Saint Vincent 12-16 Giugno 1961, s. 183-190.
- TURNAGE, G. W. 1972. Tire selection and performance prediction for off-road wheeled-vehicle operations. Proc. 4th ISTVS Int. Conf. Stockholm-Kiruna 24-28 April 1972, s. 61-82.
- VENIER, G. O. & CROSS, F. R. 1975. An airborne linear-sweep FM-radar system for measuring ice thickness. Communication Research Centre. Ottawa CRC-1269. 32 s.
- VESIKALLIO, H. 1975. Korjuuolosuhteiden kehittämisen mahdollistamat kustannussäästöt. Summary: Cost savings through the development of timber harvesting conditions. *Metsäteho Tied.* 338. 20 s.
- VICKERS, R. S., HEIGHWAY, J. & GEDNEY, R. 1973.

- Airborne profiling of ice thickness using a short pulse radar. NASA TM X-71481.
- VUORI, J. 1976. Lokomo 960 S harvesterin prototyyppi. Lokomo 960 S käyttökokeilut 1. Laudaturtyö. Helsingin yliopiston metsäteknologian laitos. Konekirjoite. 73 s.
- VÄHÄSARJA, P. 1978. Soiden arviointimenetelmä. Pääesikunta. Pioneeriosasto. Konekirjoite. 5 s.
- VÄISÄNEN, U. 1964. Maaston kulkukelpoisuuteen vaikuttavat tekijät puutavaran kuljetusten kannalta. Kirjallisuustutkimus. Pro gradu. Helsingin yliopiston metsäteknologian laitos. Konekirjoite. 95 s.
- WELLVING, A. 1980. Kan skogsbrukets terrängklassificering användas på annat sätt? Skogen 8, s. 42–43.
- WIESEL, C-E. 1975. Kan man lita på vingborren. Väg och vattenbyggaren. 21:8–9, s. 26–28. (Myös SFM TN 3/1976, s. 11–13).
- WILSON, N. E. 1968. Influence of track design on soil pressure and deformations. Proc. 3rd IPS Int. Peat Congr. Québec 18–23 August 1968, s. 60–64.
- WISMER, R. D. & LUTH, H. J. 1973. Off-road traction prediction for wheeled vehicles. Transactions of the ASAE. 17:1, s. 8–10, 14.
- ”— & SMITH, M. E. 1961. Puheenvuoro. Proc. 1st ISTVS Int. Conf. Torino–Saint Vincent 12–16 Giugno 1961, s. 762–769.
- WONG, J. Y. 1978. Theory of ground vehicles. John Wiley & Sons Inc. New York. 330 s.
- WYLD, R. C. 1956. A further investigation of the engineering properties of Muskeg. M. Sc. thesis. University of Alberta Library. (Mainittu artikkelissa: Hardy 1964).
- YLINEN, P. 1980a. Taajuusmodulointi tutka suon routakerroksen mittauksessa. Seminaariesitelmä 20. 2. 1980. Teknillinen korkeakoulu. Radiolaboratorio. Konekirjoite. 24 s.
- ”— 1980b. Taajuusmodulointi tutka jään ja roudan mittaukseen. Teknillinen korkeakoulu. Diplomityö. Otaniemi. Konekirjoite. 51 s.
- ”—, TIURI, M. & JAKKULA, P. 1980. Taajuusmodulointi tutka jään ja roudan paksuuden mittaukseen. U.R.S.I. X Radiotieteen päivät. Helsinki. 4 s.

Liite 1

RADFORTH'IN KASVILLISUUSLUOKITUS

Kasvillisuusluokka	Puusto	Korkeus	Kasvillisuuden laatu
A	Puinen	yli 5 m	Puita
B	Puinen	1.5–5 m	Nuoria t. pensastuneita puita
C	Puuton	0.6–1.5 m	Korkea, ruohomainen
D	Puinen	0.6–1.5 m	Korkeita pensaita tai pensastuneita puita
E	Puinen	–0.6 m	Matalia pensaita
F	Puuton	–0.6 m	Rykelmiä tai jänteitä
G	Puuton	–0.6 m	Yksittäisiä tai harvoja ryhmiä
H	Puuton	–0.1 m	Yleensä yhtenäinen matto
I	Puuton	–0.1 m	Usein yhtenäinen matto, joskus mättäinen

Liite 2

KESKIMÄÄRÄISEN MAKSIMIPINTAPAINEEN MÄÄRÄÄMINEN ROWLAND'IN MENETELMÄLLÄ

Rowlandin antamat yhtälöt (Rowland 1972, 1975) erilaisten telojen keskimääräisen maksimipintapaineen laskemiseksi ovat seuraavat:

Perinteisen tela-ajoneuvon telan alla

$$\text{MMP} = \frac{1.26 W}{2 m c b \sqrt{d p}} \quad (29)$$

Kumipyörätela-ajoneuvon telan alla

$$\text{MMP} = \frac{0.50 W}{2 m b \sqrt{d \delta}} \quad (30)$$

”Cross-country” matalapainetela-ajoneuvon telan alla

$$\text{MMP} = \frac{1.18 W}{2 m b \sqrt{d h}} \quad (31)$$

joissa

MMP = keskimääräinen maksimipintapaine, N/m²

W = ajoneuvon massa, N

m = kannatuspyörien lukumäärä yhdessä telassa

b = pyörän t. telan leveys, m

c = telalappujen pinta-alan osuus telan pohjapinta-alasta

d = kannatuspyörien ulkohalkaisija, m

p = kannatuspyörien etäisyys, m

δ = renkaan litistymisen, m

h = renkaan korkeus, m

On huomattava, että em. kaavat on kehitetty lähinnä märille savimaille. Rowlandin menetelmää ovat kritisoineet Garber ja Wong (1981).

Taulukko 28. Turnagen (1972) ja Wismer & Luthin (1973) menetelmillä lasketut CI-arvot eri metsäkoneille.

Table 28. CI values for forwarders based on Turnage's (1972) and Wismer & Luth's (1973) equations.

Kone Forwarder	Etupyörä – Front Wheel		Takapyörä – Rear wheel			
			Tyhjä – Unloaded		Kuormattu – Loaded	
	Eq 29	Eq 30	Eq 29	Eq 30	Eq 29	Eq 30
	CI-arvo – CI-values					
Bruunett Mini	32	45	10	10	42	58
Lokomo 909	54	55	35	35	79	103

Eq 29 Turnage Eq 30 Wismer & Luth

Taulukko 29. Rowlandin (1973) menetelmällä lasketut CI-arvot eri metsätraktoreille.

Table 29. CI-values for forwarders based on Rowland's (1972) method.

Kone Forwarder	Etuosaa Front part	Takaosa – Rear part	
		Tyhjä Unloaded	Kuormattu Loaded
	CI-arvo – CI-values		
Bruunett Mini – leveä tela – broad track	33	7	43
– kapea tela – narrow track	45	10	58
Lokomo 909	–	42	96

Taulukko 30. Schreinerin (1967) kaavalla lasketut CI-arvot eri metsätraktoreille.

Table 30. CI-values for forwarders based on Schreiner's (1967) equation.

Kone Forwarder	Etuosaa Front part	Takaosa – Rear part	
		Tyhjä Unloaded	Kuormattu Loaded
Bruunett Mini – leveä tela – broad track	77	28	95
– kapea tela – narrow track	85	30	106
Lokomo 909	–	56	140

Taulukko 31. WES-menetelmällä (Knight ja Rula 1961) lasketut CI-arvot eri metsäkoneille.

Table 31. CI-values for forwarders based on WES-method (Knight & Rula 1961).

Kone Forwarder	Etuosaa Front part	Takaosa – Rear part	
		Tyhjä Unloaded	Kuormattu Loaded
CI-arvot – CI-values			
Pyöräkoneena, ilman teloja Wheeled vehicle, without tracks			
Bruunett Mini	62	48	70
Lokomo 909	72	52	92
Telakoneena With tracks			
Bruunett Mini – leveä tela – broad track			
– kapea tela – narrow track			
Lokomo 909	–	35	35

Taulukko 32. Eri menetelmillä laskettujen CI-arvojen vertailu.

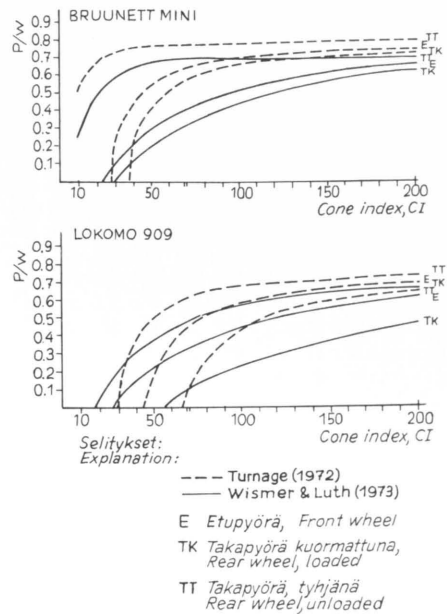
Table 32. Comparison of calculated CI-values.

Pyöräkone – Wheeled vehicle

Menetelmä Calculation method	Lokomo 909			Bruunett Mini		
	Etuosaa Front part	Takaosa Rear part		Etuosaa Front part	Takaosa Rear part	
		Tyhjä Unloaded	Kuormattu Loaded		Tyhjä Unloaded	Kuormattu Loaded
	CI-arvo – CI-values					
Turnage	54	35	79	32	10	42
Wismer	55	35	103	45	10	58
WES	72	52	92	62	48	70

Telakone – Tracked vehicle

Menetelmä Calculation method	Lokomo 909			Bruunett Mini		
	Etuosaa Front part	Takaosa Rear part		Etuosaa Front part	Takaosa Rear part	
		Tyhjä Unloaded	Kuormattu Loaded		Tyhjä Unloaded	Kuormattu Loaded
	CI-arvo – CI-values					
Rowland	–	42	92	45–33	7–10	43–58
Schreiner	–	56	140	77–85	28–30	95–106



Kuva 48. Metsätraktorin pyörän suorituskyky CI-arvon funktiona Turnagen (1972) ja Wismer ja Luthin (1973) kaavoilla laskettuna.

Fig. 48. Relation of performance vs. Cone Index using equations of Turnage (1972) and Wismer & Luth (1973).

Liite 4

TURPEEN CI-ARVON LASKEMINEN KIRJALLISUUDESTA SAATUJEN VIITTEIDEN PERUSTEELLA

CI-arvo on tunkeumavastus ilmoitettuna englantilaisin yksiköin (CI-arvo edellyttää lisäksi standardikärkeä), eli

$$CI = \frac{q}{6.98} \quad (34)$$

jossa

CI = Cone index -arvo l. tunkeumavastus, lb/sq.in.

q = tunkeumavastus, kN/m².

Olettamalla, että tunkeumavastus on turpeen leikkauslujuudesta riippuvainen seuraavasti

$$q = a_q s \quad (35)$$

jossa

q = tunkeumavastus, kN/m²

a_q = tunkeumavastuksen muuntokerroin

s = leikkauslujuus, kN/m²

voimme Amarjanin esittämien yhtälöiden (13) ja (12) perusteella asettaa

$$\frac{2500}{w} (100 - 1.4 R) = a_q \left(\frac{140}{w} (100 - 1.1 R) \right)$$

jossa

w = turpeen vesipitoisuus, %

R = maatumisprosentti

a_q = tunkeumavastuksen muuntokerroin

josta sieventämällä saadaan

$$a_q = \frac{17.86 - 0.25R}{1 - 0.011 R} \quad (36)$$

Koska v. Postin maatumisasteen ja maatumisprosentin välillä on riippuvuutta, joka tässä voidaan kuvata lineaarisena (vrt. liite 5) asettamalla

$$H = \frac{R}{5.5} \quad (37)$$

jossa

H = turpeen maatumisaste

R = turpeen maatumisprosentti

sekä sijoittamalla laatumuutosuhde yhtälöstä (31) voidaan yhtälö sieventää muotoon

$$a_{CI} = \frac{2.6 - 0.2H}{1 - 0.06H} \quad (38)$$

jossa

a_{CI} = Cone index muuntokerroin

H = turpeen maatumisaste.

Kuvassa 49 esitetään kertoimen a_{CI} riippuvuus maatumisasteesta. Heikosti maatuneilla turpeilla kerroin on n. 2.0–2.5 ja hyvin maatuneilla 1.5–2.0. Miyakawa (1959) on saanut muutossuhteeksi a_{CI} = 1.5 hyvin maatuneelle japanilaiselle turpeelle. Hiekassa ko. kerroin on 0.6 (Trafficability research team 1961b). Baremberg ym. (1975) ovat mittanneet kertoimeksi savessa 0.94 ja siltissä 0.62–1.04.

CI-arvo voidaan laskea myös suoraan kaavalla (13) sijoittamalla yksikkö- ja maatuneisuusmuunnokset, jolloin yhtälöksi tulee

$$CI = \frac{363}{w} (100 - 7.7H) \quad (39)$$

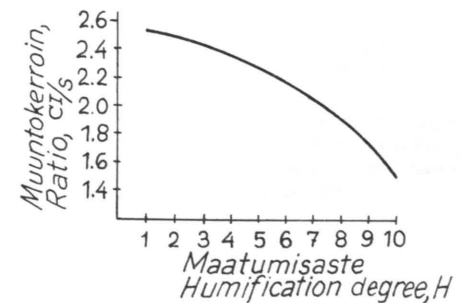
jossa

CI = Cone index-arvo (lb/sq.in.)

w = turpeen vesipitoisuus, %

H = turpeen maatumisaste.

Taulukkoon 33 on laskettu muunnetuilla Amarjanin (1972) kaavoilla turpeen lujuutta kuvaavia arvoja eri maatuneisuusasteita oleville turpeille, jolloin keskimääräisenä vesipitoisuutena oletetaan taulukon 10 (s. 23) keskiarvo.



Kuva 49. Muuntokerroin leikkauslujuuden muuttamiseksi CI-arvoiksi.

Fig. 49. Ratios for transforming vane shear strengths to CI-values.

Saatu leikkauslujuuden arvo näyttää alemmalta kuin esim. Saarilahden (1978) tienrakennustyömailta mitaamat keskiarvot. Arvoissa on mukana varsikitka, joka lisää leikkauslujuuden näennäistä arvoa.

Arvot olivat:
nevoilla 14–16 kN/m² ja
rämeillä 19–21 kN/m²,
joista voidaan CI-arvoiksi laskea
nevoille 21–24 ja
rämeille 30–32.

Taulukko 33. Muunnetuilla Amarjanin (1972) kaavoilla laskettu turpeen leikkauslujuus ja CI-arvo eri maatumisasteluokissa, kun vesipitoisuus oletetaan keskimääräiseksi.

Table 33. Vane shear strength and CI-value for different humification degrees (von Post) calculated after modified Amarjan's (1972) equations and mean water contents.

Maatumisaste v. Post's humification degree	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Vesipitoisuus Water content	1975	1590	1325	1130	985	870	780	700	635	580
Leikkauslujuus Shear strength	7	8	9	9	10	10	10	10	10	10
CI-arvo CI-value	17	19	21	22	23	22	21	20	17	14

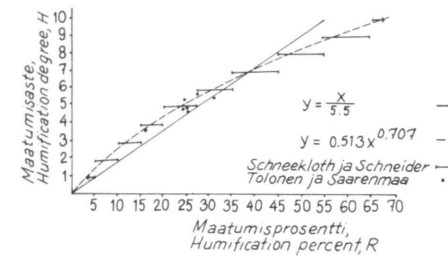
Liite 5

MAATUMISPROSENTIN JA MAATUMIS-
ASTEEN VÄLINEN VERTAILU

Suomessa turpeen maatumiseisuuden kuvaajana käytetään yleensä v. Postin maatumisasteikkoa. Neuvostoliitossa on käytössä maatumisprosentti, joka määrätään sentrifugimenetelmällä. Jotta kirjallisuudessa esitettyjä neuvostoliittolaisia tutkimuksia voitaisiin suoraan soveltaa metsätalouden käyttöön tarvittaisiin näiden kahden eri menetelmällä saatujen tulosten vastaavuusfunktio. Kuvassa 50 esitetään Schneeklothin ja Schneiderin (1976) esittämä riippuvuus näiden menetelmien välille. Kuvaan on piirretty myös Tolosen ja Saarenmaan (1979) tutkimuksesta saadut eri turvelajien keskiarvopisteet. Schneeklothin ja Schneiderin mukaan riippuvuus näyttäisi olevan epälineaarinen ja noudattavan muotoa (40):

$$H = 0.513R^{0.707} \quad (40)$$

jossa
H = maatumisaste
R = maatumisprosentti



Kuva 50. Turpeen maatumisasteen (H) ja maatumisprosentin (R) välinen riippuvuus Schneeklothin ja Schneiderin (1976) ja Tolosen ja Saarenmaan (1979) mukaan.

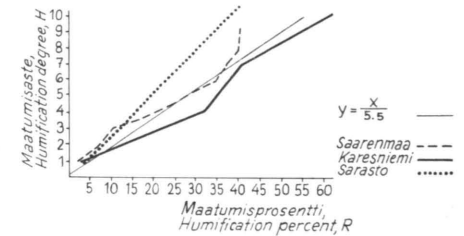
Fig. 50. Dependence between v. Post's scale (H) and humification per cent determined by centrifuge method (after Schneekloth and Schneider (1976) and Tolonen and Saarenmaa (1979).

Kuitenkin laskutoimitusten yksinkertaistamiseksi tässä tutkimuksessa vastaavuus oletetaan lineaariseksi, ja olevan muotoa (41):

$$H = \frac{R}{5.5} \quad (41)$$

jossa
H = maatumisaste
R = maatumisprosentti

Vertailun vuoksi esitetään myös Pjajtšenkon menetelmällä määritellyn maatumisprosentin ja maatumisasteen välinen riippuvuus kolmen eri tutkijan mukaan. (Sarasto 1960, Karesniemi 1972, Saarenmaa 1980). Vaihtelu on erittäin suurta, ja myös tässä yhtälö (41) edustaisi keskimääräistä ta-
soitusta.



Kuva 51. Turpeen maatumisasteen (H) ja Pjajtšenkon maatumisprosentin (R) välinen riippuvuus Saraston (1960), Karesniemen (1973) ja Saarenmaan (1980) mukaan.

Fig. 51. Dependence between peat humification degree (H) and humification per cent determined by Pjajtšenko's method (after Sarasto 1960, Karesniemi 1973 and Saarenmaa 1980).

Liite 6

SUPPEA TUTKIMUS TURVEMAIDEN KANTAVUUTEEN VAIKUTTAVIEN TEKIJÖIDEN ARVIOIMISESTA TURVEMAIDEN PUUNKORJUUN SUUNNITTELUSSA

Tutkimus suoritettiin tammikuussa 1978 kyselytutkimuksena osoittamalla joillekin Puulaaki Oy:n puunkorjuun suunnittelussa työskenteleville henkilöille tiedustelu, jossa kysyttiin heidän käyttämänsä turvemaiden kantavuuden arviointimenetelmää.

Vastauksia saatiin 4 kpl, ja kaikki vastaajat ilmoittivat käyttävänsä suon ulkoisiin tunnuksiin perustuvia päätelmiä suon kantavuudesta (geobaanista menetelmää).

Tekijät tärkeysjärjestyksessä olivat seuraavat:

- 1) Puusto (sijaluvut 1, 1, 1, 2)
Suon on sitä kantavampi, mitä runsaspuus-
toisempi se on.
- 2) Suotyyppi (1, 1, -, -)
Korpi ⇒ räme ⇒ neva. Liittyy myös tekijään 1.

- 3) Suon kosteus (2, 3, 3, 4)
Mitä vetisempi suon on, sitä huonompi kantavuus.
 - 4) Turvekerroksen paksuus (2, 3, 3, 4)
Mitä paksumpi turvekerros on, sitä huonompi on kantavuus.
 - 5) Ojitus (3, 4, -, -)
Ojitus lisää kantavuutta. Liittyy myös tekijään 3.
 - 6) Kivien esiintyminen (3, 4, -, -)
Kivien esiintyminen indikoi parempaa kantavuutta (liittyy tekijään 4).
 - 7) Yksittäisiä mainintoja (suluisia tärkeysjärjestys):
Varpaisuus lisää kantavuutta (2), liittyy tekijään 1. Maatunut turve huonosti kantavaa (2). Rakkaturpeeseen liittyy yleensä huono kantavuus (5).
- 31-46 leikkauslujuus 31 0,25 32 0,5 33 0,75
34 1,0 35 1,5 36 2,0 37 2,5 38 3,0
39 3,5 40 4,0 41 4,5 42 5,0 43 5,5
44 6,0 45 7,0 46 8,0
- 47 liekoisuus
 - 48 mättäisyys
 - 49 karttaluokitus
 - (50) talvitie
 - (51) kannas
 - (52) oja
 - (53) kohonen
 - 54-59 tyhjiä
 - 60 korkeustaso
 - 61 kuivatus 0 luonnontilainen 1 ojitettu
3 turvetuotanto 4 turvekangas

Liite 7

RADIOMETRITUTKIMUKSISSA KÄYTETTY MUUTTUJALUETTELO

1	suo	1 Paloneva 2 Matoneva 3 Isoneva 4 Savilaminneva 5 Kurkisuo	62 suotyyppi 63 kosteus 64 mättäisyys 65 mätäs korkeus
2	linja	1 päälinja 2 poikkilinja	
3	paalu		
4	vetisyys	0-5	
5	mättäisyys, %		66 syv. 0.25 päälisätekijä
6	- " - , dm		67 - " - turvetekijä
7	rimpisyys, %		68 - " - maatumisaste
8	puustoluokka, 0-9		69 - " - vesipitoisuus
9	mä %		70 - " - kuidut
10	ku %		
11	ko %		
12	lh %		71- 75 syv. 0.50
13	kasvu		76- 80 1.0
14	varpupeitto, %		81- 85 1.5
15	ruohopeitto, %		86- 90 2.0
16	sammalpeitto, %		91- 95 2.5
17	paju, 0-1		96-100 3.0
18	ruoho, 0-1		
19	raate, 0-1		
(20) ¹	pohjavesi, kuoppa, ei riittävästi havaintoja		101-105 3.5
(21)	- " - , oja, - " -		106-110 4.0
(22)	ojan kunto		115-120 4.5
(23)	huomautukset		121-125 5.0
24	korkeustaso, vaaattu korkeus, m		126 6.0
25	ojitusvuosi		127 7.0
26	lannoitusvuosi		128 peruspaalu = 1 välipaalu = 2
(27)	ojituskantavuus 2 kantai 7 uppoamisvaara 9 upposi		129-134 radiometriarvot, T _B , K
(28)	vuodenaika 1 talvi 2 kevät 3 kesä 4 syksy		160 suotyyppiluokitus
(29)	täydennysojitusvuosi		0 turvetuotanto
30	suon syvyys		1 saraneva, SN
31-46	leikkauslujuus		2 rimpineva, RiN
34	1.0 35 1.5 36 2.0 37 2.5 38 3.0		3 kalvakkaneva, KN
39	3.5 40 4.0 41 4.5 42 5.0 43 5.5		4 lyhytkortinenn., LkN
44	6.0 45 7.0 46 8.0		5 rahkan., RN
47	liekoisuus		6 sararäme, SR
48	mättäisyys		7 tupasvillaräme, TR
49	karttaluokitus		8 korpiräme, KR
(50)	talvitie		9 kangasräme, KgR
(51)	kannas		10 isovarpuinen räme, IR
(52)	oja		11 rahkaräme, RR
(53)	kohonen		12 korpi, VK
54-59	tyhjiä		13 turvekangas, tk
60	korkeustaso		550 ojituskä, a
61	kuivatus 0 luonnontilainen 1 ojitettu 3 turvetuotanto 4 turvekangas		551 ojikko = 1
			552 pohjavesi = 1
			553 ojan kunto = 1
			554 ojitusvuosi = 1

¹ sulkeissa mainittuja muuttujia ei käytetty analyyseissa

505 pohjamaalaji, 0–9

- 0 järvimuta
1 lieju
2 savilieju
3 lieju
4 sedimentti
5 savi
6 siltti

7	hiekkä		
8	sora		
9	kivi		
150	leikkauslujuuden keskiarvo	0.25–	pohjaan
151	”	”	0.25–0.50 m
152	”	”	0.25–0.50 m
153	”	”	0.25–1.00 m

Muuttuja 4

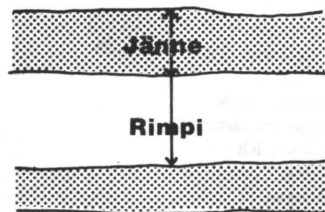
Vetisyys: Suon pinnan kosteusolosuhteet arvioidaan sääolosuhteista riippumatta.

1. Ku = kuiva, kun vesi ei tirsku saappaan pohjan alla.
2. Nor = normaali, kun saappaan pohja kastuu.
3. Vet = vetinen, kun saappaan kärki peittyy vedellä.
4. Hyll = hyllyvä, kun saappaan varsi on vedessä. Suon pinta hyllyy.
5. Rim = rimpinen, kun saappaan varsi ei riitä. Ylipääsemätön.

Muuttujat 5–7

Mättäisyys: Tarkoittaa pinnan kohoumia, jotka muodostuvat pyöreähköistä mättäistä sekä pitkänomaisista ja kapeahkoista kermeistä ja jänteistä. Mättäisyysprosenttia arvioitaessa ei huomioida yksittäisten kasvien (esim. tupasvilla) muodostamia mättäitä. Mättäisyys ilmoitetaan prosentteina 10 %:n tarkkuudella pinta-alasta tutkimuspisteen ympäristössä ja mättäiden keskimääräinen korkeus desimetreinä. Mättäiden puuttuessa merkitään viiva (–).

Rimpisyys: Arvioidaan rimpien pinta-alan osuus koko pinta-alasta



$$100 \frac{R}{R+J}$$

Muuttuja 8

- Puusto 0 = avosuo
1 = harva taimikko
2 = tiheä taimikko

- 3 = harva riukumetsä
4 = tiheä riukumetsä
5 = harva paperipuumetsä
6 = tiheä paperipuumetsä
7 = ollut järeitä puita, hakattu
8 = harva tukkipuusto
9 = tiheä tukkipuusto

Muuttujat 9–12

Puulaji: Arvioidaan % osuus *kuutiomäärästä*

- 10 = 100 %
9 = 90 %
jne.

Muuttuja 13

Kasvu: Arvioidaan 3–5 viimeisen vuosikasvaimen pituus

- 0 = puuton, ei kasvua
1 = ei juuri havaittavissa kasvua
2 = jonkin verran kasvua havaittavissa
männyn tasalatvaisia, pallomaisia, kuuset kituvia
5 = vuosikasvain 5 cm, selvästi havaittava kasvu
10 = hyvä vuosikasvu
15

20 = jo pitkä, selvät vuosikasvaimet
Kasvu arvioidaan useamman puun keskiarvona, yleensä nuorista elpymiskykyisistä puista. Tavoitteena on pikemmin kasvupotentiaalin kuin puuston ko. tilan arviointi.

Muuttuja 14

Varpaisuus: Arvioidaan varpukerroksen peitto-%.

Muuttuja 15

Ruohoisuus: Arvioidaan ruohojen ja sarojen peittävyys.

Muuttuja 16

Sammaleisuus: Arvioidaan elävän sammalen peittämän pinta-alan osuus.

Muuttujat 17–19

Opaskasvit:

RAATE	0 = ei raatetta	1 = on raatetta
PAJU	0 = ei pajuja	1 = on pajuja
RUOKO	0 = ei ruokoja	1 = on ruokoja

Muuttujat 20–21 (ei mitattu resurssirajoitusten vuoksi)

Pohjavesi: Pohjavesi mitataan muutamasta ennalta kaivetusta koekuopasta 1 dm:n luokien. Koekuoppa kaivetaan ojitusalueella saran keskelle.

Tämän lisäksi mitataan ojitusalueilla vedenpinnan korkeus ojissa.

Muuttuja 49

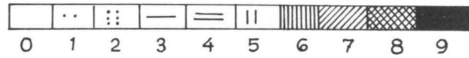
Karttaluokitus:

	lehtimetsä	} 1
	mäntymetsä	
	kuusimetsä	
	taimikko tai pensaikko	
	hakattu ja palanut metsä	
	soistuva maa	
	metsäinen ja aukea suo, heilpökulkuinen	3, 4
	vaikeakulkuinen ja ylipääsemätön suo	5, 6

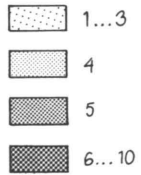
Liite 8

Selitys liitteisiin 8: 1-7
 Explanation for annexes 8: 1-7

Puustoluokka
Tree cover

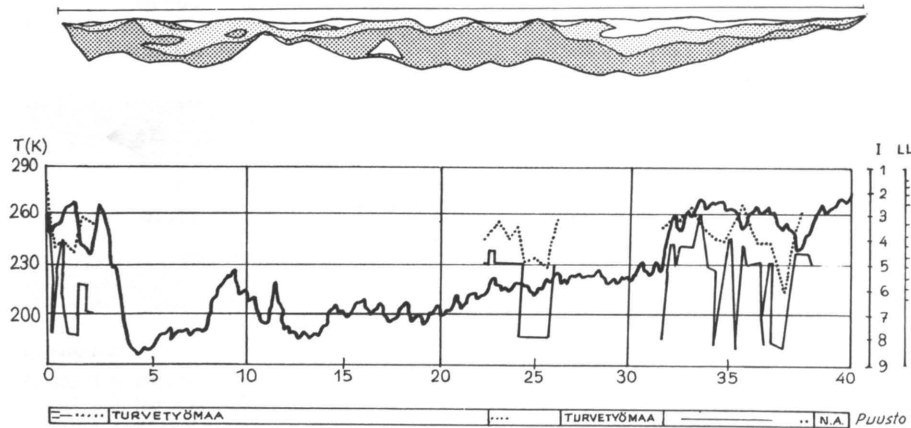


Maatumisaste,
Humification degree

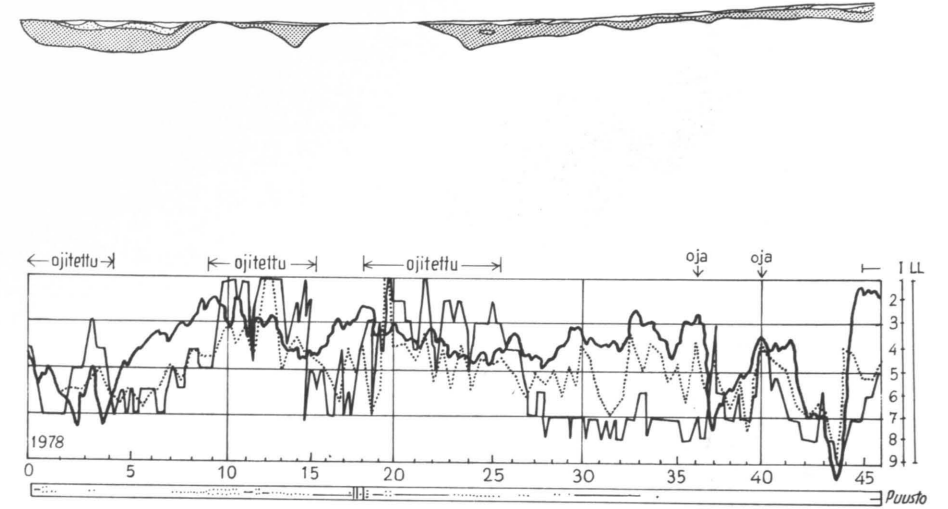


- Kirkkauslämpötila*
Brightness temperature
- Kulkukelpoisuusindeksi*
Index of trafficability
- Turpeen leikkauslujuus*
Vane shear strength

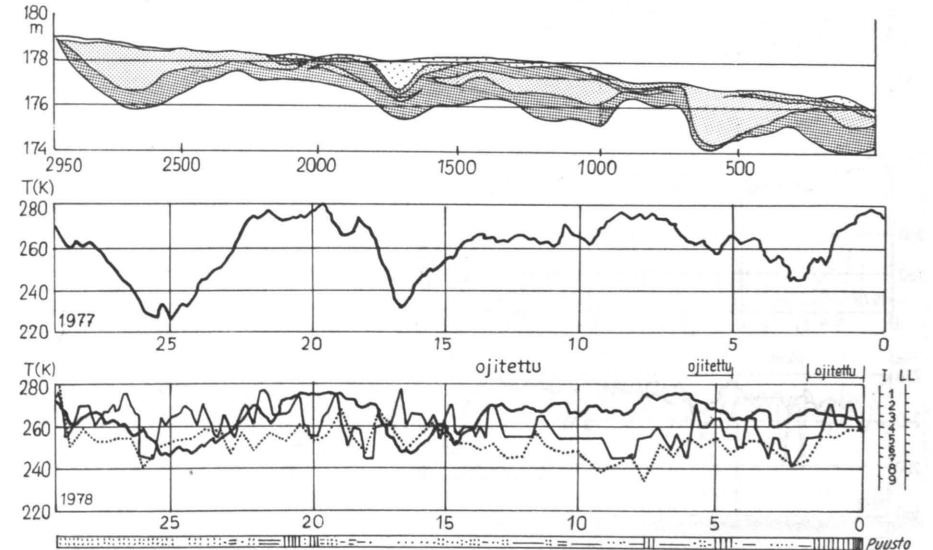
PALONEVA, RANTSILA 1975 A-SELKÄLINJA



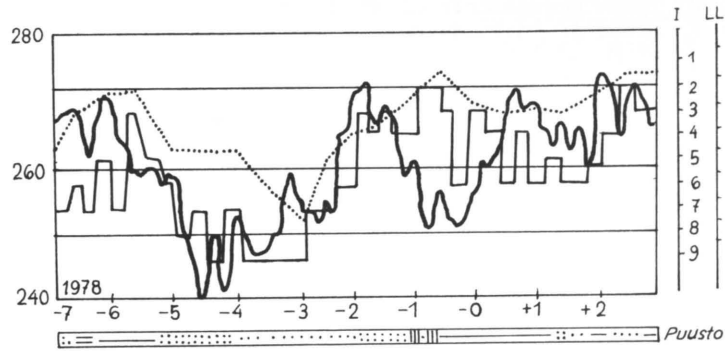
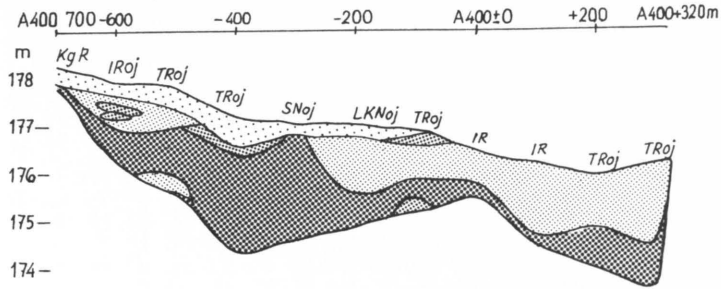
MATONEVA (3017), RUUKKI 1975, A-SELKÄLINJA



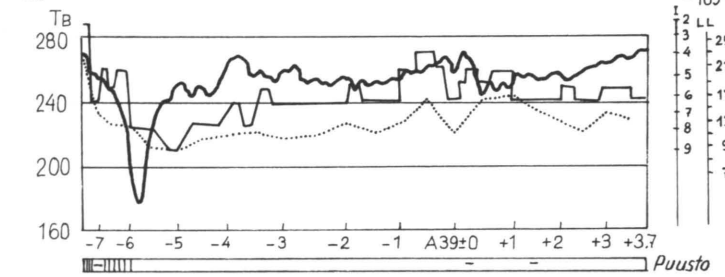
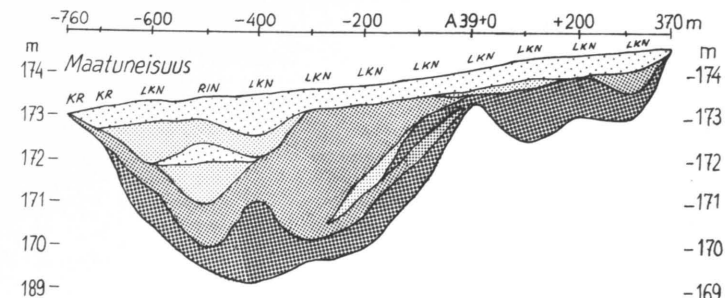
ISONEVA, PERHO 1977 A-SELKÄLINJA



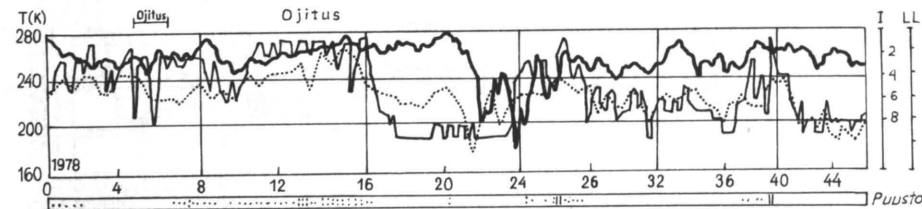
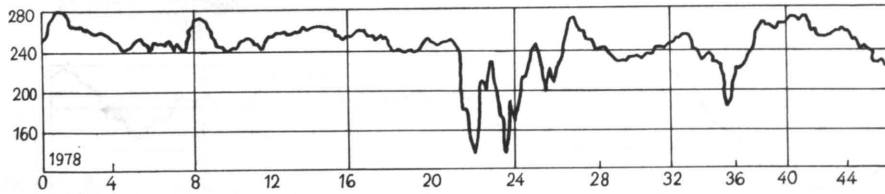
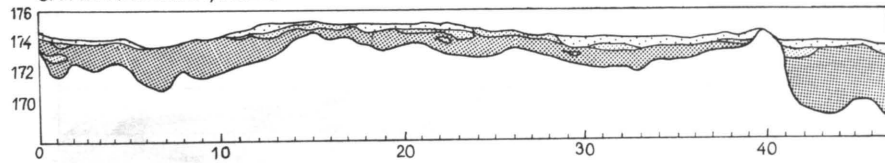
ISONEVA, PERHO A-400 POIKKILINJA



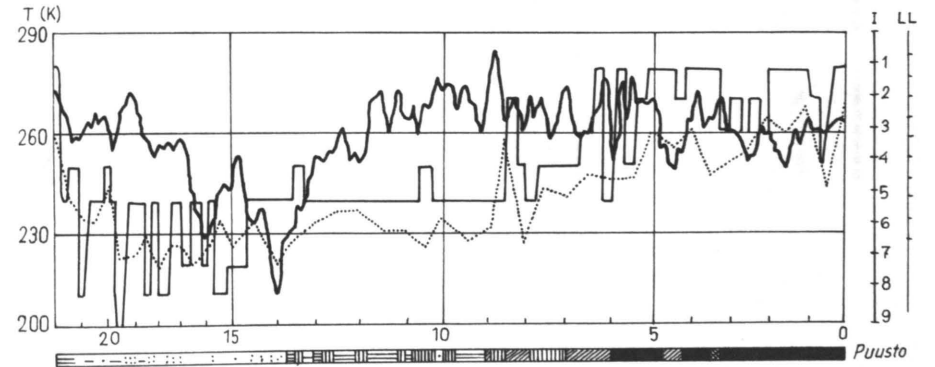
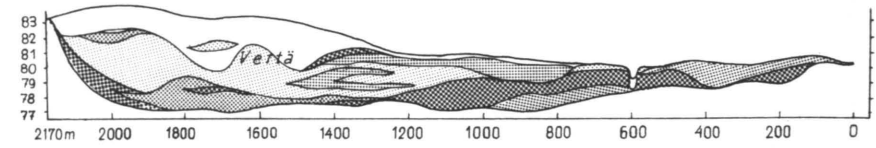
SAVILAMMINNEVA, PERHO A 390 POIKKILINJA



SAVILAMMINNEVA, PERHO



KURKISUO, HYVINKÄÄ



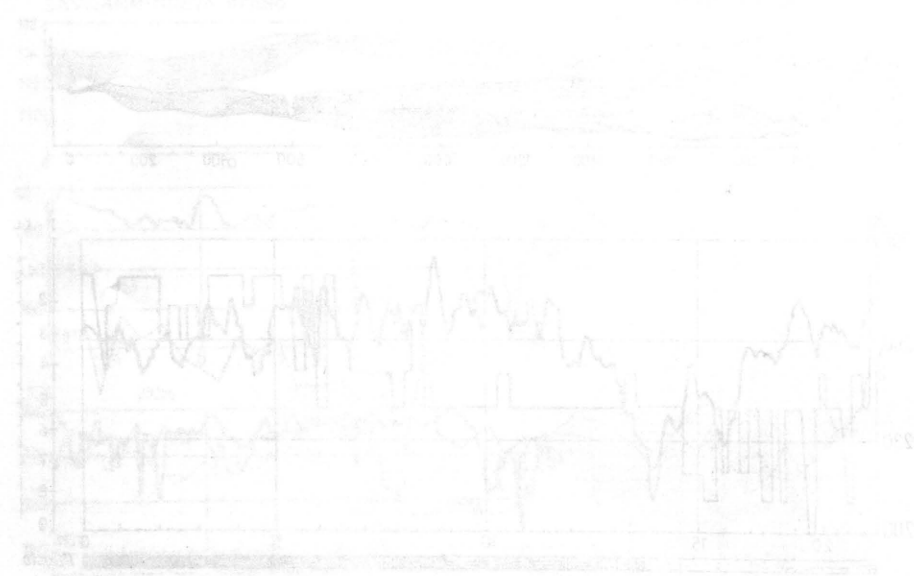
Liite 9

Peatland site types distinguished in Finland, mainly for practical forestry purposes. The Finnish abbreviations at the end of table (Heikurainen 1979).

Table with 3 columns: Treeless peatlands, Spruce swamps VK, and Pine swamps. Lists site types like Ordinary fen, Rimpfen fen, Herb-rich sedge bog, etc.

Nevat ja letot: 1. VL, 2. RiL, 3. RhSN, 4. VSN, 5. LkKN, 6. LkN, 7. RN, 8. RhRiN, 9. VRiN. Korvet: 1. VLK, 2. KoLK, 3. RhSK, 4. VSK, 5. LhK, 6. KgK, 7. RhK, 8. MK, 9. PK, 10. PsK.

Rämeet: 1. VLR, 2. RLR, 3. RhSR, 4. VSR, 5. TSR, 6. LkR, 7. TR, 8. KgR, 9. PsR, 10. KR, 11. Vkr, 12. VIR, 13. RR. tk = well drained, peaty soil



Liite 10

TUTKAKAIKUJA TIEDOSTOSTA HL. TUT

TUTKANAINUJA TIEDOSTOSTA HL. TUT 20-SEP-81 15:44:04

Table with 4 columns: MITTAUS, TULOS ASTEINOLLA 0-F(16), SUMMA(10), TULOS GRAAFISENA, MITTAUKSEN HUIPUT. Contains numerical data for 19 measurements.

Table with 4 columns: MITTAUS, TULOS ASTEINOLLA 0-F(16), SUMMA(10), TULOS GRAAFISENA, MITTAUKSEN HUIPUT. Contains numerical data for measurements 2546 through 2583.

ODC 114.444:114.1- -015

ISBN 951-651-051-5

SAARILAHTI, M. 1982. Tutkimuksia radioaaltomenetelmien soveltuvuudesta turvemaiden kulkukelpoisuuden arvioimiseen. Summary: Studies on the possibilities of using radar techniques in detecting the trafficability of peatlands. Acta For. Fenn. 176:1-105

The possibilities of using microwave techniques in detecting the trafficability of peatlands is discussed. Three microwave methods are tested. 1. A FM-CW radar using 1.0-1.8 GHz frequency was tested in winter conditions. It was possible to follow the variations in snow and frost layer thicknesses. 2. A short-pulse radar with 100 MHz frequency was tested in summer conditions. Good profiling of peat layers was obtained. 3. A mapping of brightness temperature of peatlands in summer conditions using a 790 MHz radiometer showed that brightness temperature and trafficability are correlated.

Author's address: Department of Logging and Utilization of Forest Products, University of Helsinki, Unioninkatu 40 B, SF-00170 Helsinki 17, Finland.

ODC 114.444:114.1- -015

ISBN 951-651-051-5

SAARILAHTI, M. 1982. Tutkimuksia radioaaltomenetelmien soveltuvuudesta turvemaiden kulkukelpoisuuden arvioimiseen. Summary: Studies on the possibilities of using radar techniques in detecting the trafficability of peatlands. Acta For. Fenn. 176:1-105

The possibilities of using microwave techniques in detecting the trafficability of peatlands is discussed. Three microwave methods are tested. 1. A FM-CW radar using 1.0-1.8 GHz frequency was tested in winter conditions. It was possible to follow the variations in snow and frost layer thicknesses. 2. A short-pulse radar with 100 MHz frequency was tested in summer conditions. Good profiling of peat layers was obtained. 3. A mapping of brightness temperature of peatlands in summer conditions using a 790 MHz radiometer showed that brightness temperature and trafficability are correlated.

Author's address: Department of Logging and Utilization of Forest Products, University of Helsinki, Unioninkatu 40 B, SF-00170 Helsinki 17, Finland.

ODC 114.444:114.1- -015

ISBN 951-651-051-5

SAARILAHTI, M. 1982. Tutkimuksia radioaaltomenetelmien soveltuvuudesta turvemaiden kulkukelpoisuuden arvioimiseen. Summary: Studies on the possibilities of using radar techniques in detecting the trafficability of peatlands. Acta For. Fenn. 176:1-105

The possibilities of using microwave techniques in detecting the trafficability of peatlands is discussed. Three microwave methods are tested. 1. A FM-CW radar using 1.0-1.8 GHz frequency was tested in winter conditions. It was possible to follow the variations in snow and frost layer thicknesses. 2. A short-pulse radar with 100 MHz frequency was tested in summer conditions. Good profiling of peat layers was obtained. 3. A mapping of brightness temperature of peatlands in summer conditions using a 790 MHz radiometer showed that brightness temperature and trafficability are correlated.

Author's address: Department of Logging and Utilization of Forest Products, University of Helsinki, Unioninkatu 40 B, SF-00170 Helsinki 17, Finland.

ODC 114.444:114.1- -015

ISBN 951-651-051-5

SAARILAHTI, M. 1982. Tutkimuksia radioaaltomenetelmien soveltuvuudesta turvemaiden kulkukelpoisuuden arvioimiseen. Summary: Studies on the possibilities of using radar techniques in detecting the trafficability of peatlands. Acta For. Fenn. 176:1-105

The possibilities of using microwave techniques in detecting the trafficability of peatlands is discussed. Three microwave methods are tested. 1. A FM-CW radar using 1.0-1.8 GHz frequency was tested in winter conditions. It was possible to follow the variations in snow and frost layer thicknesses. 2. A short-pulse radar with 100 MHz frequency was tested in summer conditions. Good profiling of peat layers was obtained. 3. A mapping of brightness temperature of peatlands in summer conditions using a 790 MHz radiometer showed that brightness temperature and trafficability are correlated.

Author's address: Department of Logging and Utilization of Forest Products, University of Helsinki, Unioninkatu 40 B, SF-00170 Helsinki 17, Finland.

ACTA FORESTALIA FENNICA
EDELLISIÄ NITEITÄ – PREVIOUS VOLUMES

- Vol. 161 Hallman, E., Hari P., Räsänen P.K. & Smolander H. 1978. The effect of planting shock on the transpiration, photosynthesis, and height increment of Scots pine seedlings. Seloste: Istutusshokin vaikutus männyntaimien transpiraatioon, fotosynteesiin ja pituuskasvuun.
- Vol. 162 Luukkanen O. 1978. Investigations on factors affecting net photosynthesis in trees: gas exchange in clones of *Picea abies* (L.) Karst.
- Vol. 163 Nyssönen A. & Mielikäinen K. 1978. Metsikön kasvun arviointi. Summary: Estimation of stand increment.
- Vol. 164 Ericksson, T., Nilsson, C. & Skråmo G. 1978. The inter-Nordic project of forest terrain and machines in 1972–1975. Seloste: Yhteispohjoismainen metsäntutkimusprojekti "Maasto-Kone" 1972–1975.
- Vol. 165 Palosuo, V.J. 1979 MERA-ohjelmat Suomen metsätaloudessa. Svensk resume: Erfarenheter av det riksomfattande virkesproduktionsprogrammet. Summary: MERA-programme in Finnish forestry.
- Vol. 166 Laine, J. & Mannerkoski, H. 1980. Lannoituksen vaikutus männyntaimikoiden kasvuun ja hirvituhoihin karuilla ojitetuilla nevoilla. Summary: Effect of fertilization on tree growth and elk damage in young Scots pines planted on drained, nutrient poor-open bogs.
- Vol. 167 Heikurainen, L. 1980. Kuivautuksen tila ja puusto 20 vuotta vanhoilla ojitusalueilla. Summary: Drainage condition and tree stand on peatlands drained 20 years ago.
- Vol. 168 Wuolijoki, E. 1981. Effects of simulated tractor vibration on the psychophysiological and mechanical functions of the driver: comparison of some excitatory frequencies. Seloste: traktorin simuloitun tärinän vaikutukset kuljettajan psykofysiologisiin ja mekaanisiin toimintoihin. Eräiden herätetaajuuksien vertailu.
- Vol. 169 Chung, Min-Sup. 1981. Flowering characteristics of *Pinus sylvestris* L. with special emphasis on the reproductive adaptation to local temperature factor. Seloste: Männyn (*Pinus sylvestris* L.) kukkimisominaisuuksista, erityisesti kukkimisen sopeutumisesta paikalliseen lämpöilmastoon.
- Vol. 170 Savolainen, R. & Kellomäki, S. 1981. Metsän maisemallinen arvostus. Summary: Scenic value of forest landscape.
- Vol. 171 Thammincha, S. 1981. Climatic variation in radial growth of Scots pine and Norway Spruce and its importance to growth estimation. Seloste: Männyn ja kuusen sädekasvun ilmastollinen vaihtelu ja sen merkitys kasvun arvioinnissa.
- Vol. 172 Westman, C.J. 1981. Fertility of surface peat in relation to the site type class and potential stand growth. Seloste: Pintaturpeen viljavuuden tunnuksat suhteessa kasvupaikkatyyppiin ja puuston kasvupotentiaaliin.
- Vol. 173 Chung, Min-Sup. 1981. Biochemical methods for determining population structure in *Pinus sylvestris* L. Seloste: Männyn (*Pinus sylvestris* L.) populaatiokenteestä biokemiallisten tutkimusten valossa.
- Vol. 174 Kilkki, P. & Varmola, M. 1981. Taper curve models for Scots pine and their applications. Seloste: Männyn runkokäyrämalleja ja niiden sovellutuksia.
- Vol. 175 Leikola, M. 1981. Structure and development of publishing activity in Finnish forest sciences in 1909–1978. Seloste: Suomen Metsätieteellisen julkaisutoiminnan rakenne ja määrällinen kehitys vv. 1909–1978.

KANNATTAJAJÄSENET – UNDERSTÖDANDE MEDLEMMAR

CENTRALSKOGSNÄMNDEN SKOGSKULTUR	VEITSILUOTO OSAKEYHTIÖ
SUOMEN METSÄTEOLLISUUDEN KESKUSLIITTO	OSUUSPANKKIEN KESKUSPANKKI OY
OSUUSKUNTA METSÄLIITTO	SUOMEN SAHANOMISTAJAYHDISTYS
KESKUSOSUUSLIKE HANKKIJA	OY HACKMAN AB
SUNILA OSAKEYHTIÖ	YHTYNEET PAPERITEHTAAT OSAKEYHTIÖ
OY WILH. SCHAUMAN AB	RAUMA REPOLA OY
OY KAUKAS AB	OY NOKIA AB, PUUNJALOSTUS
KEMIRA OY	JAAKKO PÖYRY CONSULTING OY
G. A. SERLACHIUS OY	KANSALLIS-OSAKE-PANKKI
KYMI KYMMENE	SOTKA OY
KESKUSMETSÄLAUTAKUNTA TAPIO	THOMESTO OY
KOIVUKESKUS	SAASTAMOINEN YHTYMÄ OY
A. AHLSTRÖM OSAKEYHTIÖ	OY KESKUSLABORATORIO
TEOLLISUUDEN PUUYHDISTYS	METSÄNJALOSTUSSÄÄTIÖ
OY TAMPELLA AB	SUOMEN METSÄNHOITAJALIITTO
JOUTSENO-PULP OSAKEYHTIÖ	OY KYRO AB
KAJAANI OY	SUOMEN 4H-LIITTO
KEMI OY	SUOMEN PUULEVYTEOLLISUUSLIITTO R.Y.
MAATALOUSTUOTTAJAIN KESKUSLIITTO	OULU OY
VAKUUTUSOSAKEYHTIÖ POHJOLA	OY W. ROSENLEW AB