SILVA FENNICA VOL. 15, 1981 *N:o* 4:366–376

MIKROAALTOTUTKA JÄÄN PAKSUUDEN MITTAUKSEEN

MARTTI SAARILAHTI

SUMMARY:

RADAR MEASUREMENT OF ICE THICKNESS ON ICE ROADS AND LANDINGS.

Saapunut toimitukselle 1981-02-28

Artikkelissa tarkastellaan FM-tutkan soveltuvuutta jäävarastojen ja -teiden kantavuuden seurantaan. Kantavuus on riippuvainen sekä jään paksuudesta että laadusta. Teknillisessä korkeakoulussa rakennetulla tutkan prototyypillä suoritetut kokeet osoittivat, että mekaanisesti ja elektronisesti mitattujen jäänpaksuuksien korrelaatio oli hyvä (r = 0,99) ja absoluuttinen ero −10 . . . +7 cm, johon sisältyvät myös mahdolliset mittausepätarkkuudet. Jään laadun ei todettu näissä alustavissa kokeissa vaikuttavan kovinkaan suuresti tuloksiin, mutta tulkintatekniikkaa parantamalla myös jään laadussa tapahtuvia muutoksia voidaan seurata.

Tutka painaa n. 10 kg ja prototyypin kustannukset olivat n. 10 000 mk.

JOHDANTO

NSR:n yhteispohjoismaisessa "Puunkorjuu turvemailta" -projektissa tutkitaan suometsien puunkorjuun erityisongelmia ja keinoja niiden ratkaisemiseksi. Maaperän kantavuuden arvioiminen on eräs kuljetusten suunnittelun perusongelmista. Mikroaaltomenetelmien sovellutukset näyttävät tuovan uusia mahdollisuuksia tavanomaisten geobotaanisten ja mekaanisten arviointimenetelmien rinnalle.

Helsingin yliopiston metsäteknologian laitos ja Teknillisen korkeakoulun radiolaboratorio ovat yhteistyössä selvitelleet elektronisen maaperätutkimuksen mahdollisia sovellutuksia.

Kokeissa käytetty tutka on rakennettu TKK:n radiolaboratoriossa prof. Martti Tiurin johdolla. Tutkan kehittelystä on pääosin vastannut TkL Pekka Jakkula. Jatkokehittelyyn ja maastokokeisiin on lisäksi osallistunut tekn. yo. Pekka Ylinen. Tutkan kehittely ja rakentaminen on ollut mahdollista Kauppa- ja teollisuusministeriön rahoituksen turvin. Kokeissa käytetty näytteenottopiiri – A/D muunnin – digitaalinauhuri rakennettiin TKK:n sovelletun elektroniikan laboratoriossa, ja sen suunnittelusta ja rakentamisesta vastasivat tekn. yo. Osmo Moisio ja TkL Raimo Salminen. Metsäteknologian laitoksen esimiehen, prof. Kalle Putkiston monipuolinen tuki koko projektille on merkittävä. Maastotöissä ovat avustaneet metsät. yo Seppo Ollikainen, Tapio Tikkala ja Taina Veltheim. Aineiston käsittelyssä ovat avustaneet MH Arto Rummukainen ja metsät. yo Harri Hänninen. Kirjoitus- ja piirrostyöt on tehnyt ekon. Leena Iisalo. Parhaat kiitokset kaikille tutkimukseen osallistuneille.

TUTKIMUSTEHTÄVÄN ASETTELU JA RAJAUS

Jääkerros veden pinnalla vastaa ihanteellista kaksikerrosmallia tutkakokeiden kannalta, ovathan jääkerroksen ylä- ja alapinta tasaiset ja jään ja veden dielektriset ominaisuudet poikkeavat toisistaan suuresti. Näin ollen on luonnollista, että suon roudan kantavuuden määrityksiin kehitettävää tutkaa testataan ensin tällaisissa ihanneolosuhteissa. Koska jäätiekuljetukset ja -varastointi ovat merkittäviä myös metsätaloudessa, jäätutkalla jo yksinään olisi merkitystä kuljetusten suunnittelussa. Tässä tutkimuksessa tarkastellaan taajuusmodulaatioon perustuvan lyhytaaltotutkan soveltuvuutta jääteiden ja -varastojen kantavuuden selvittämiseksi.

JÄÄVARASTOINNIN OHJEET

Seuraava jäävarastointia koskeva yhteenveto perustuu Työsuojeluhallituksen antamiin voimassaoleviin puutavaran jäälle varastoinnin turvallisuusohjeisiin (Puutavaran . . . 1976) sekä Metsätehon (SALMINEN ym. 1979) ja Enso-Gutzeit OY:n (Ranta- ja saaristometsien . . . 1973) laatimiin yleisohjeisiin. Taulukossa 1 annetaan jään ohjepaksuus eri kuormille.

Taulukko 1. Puutavaran jäälle varastoinnissa noudatettavat enimmäiskuormat eri jään vahvuuksilla (Puutavaran . . . 1976)

Table 1. Maximum loads allowable on various ice thicknesses (Puutavaran . . . 1976)

Jään tehollinen paksuus, cm *Effective ice thickness, cm*	Suurin sallittu ajoneuvopaino, perävaunu mukaan luettuna, t *Maximum GVW, t*
20	2,0
25	3,0
30	4,5
40	7,0
50	12,0
60	17,0
70	23,0
80	31,0
90	39,0
100	48,0

Jään teholliseen paksuuteen luetaan
- teräsjää, mitattu paksuus
- kohvajää (teräsjään yhteydessä), 0,5 × mitattu paksuus

Kovin lumipitoista kohvajäätä ei kuitenkaan lasketa mukaan teholliseen paksuuteen.

Jään paksuus suositellaan mitattavaksi kairaamalla 25 . . . 50 m:n sekä virtapaikoilla ja lähteisillä alueilla vieläkin tiheämmin välein. Pitkällisten suojailmojen aikana jään paksuuden mittaukset on toistettava usein.

Jään kunnon valvontaa on tehostettava, jos ajoneuvojen paino ylittää 17 t, mm. halkeamat on merkittävä. Valvojan tulee seurata myös raiteiden muodostumista ja jään muuttumista huokoiseksi.

Kuormatun auton suurin sallittu nopeus on 15 km/h ja rantamatalassa ainoastaan 5 km/h. Jäävarastosta on pidettävä jäädytyspöytäkirjaa, johon merkitään mm. jään vahvuuden mittaushavaintojen lukumäärä ja tulokset.

Samantapaiset ohjeet ovat myös käytössä esim. Ruotsissa (HUBENDICK 1961).

Jään paksuuden mekaanisella mittaamisella on haittoina mm.
- alueellinen epätarkkuus, jos kairauspisteistö on harva,
- kustannusten nousu, jos pyritään lisäämään alueellista tarkkuutta ja
- jäähän kairatut reiät haittaavat jäädyttämistä ja heikentävät jäätä.

JÄÄN KANTAVUUS

Jäätien ja varaston kantavuus on riippuvainen sekä jään ominaisuuksista että kuormituksesta. Jään ominaisuudet voidaan jakaa kahteen komponenttiin
– jään paksuuteen ja
– jään laatuun.

Myös kuormitus voidaan jakaa kahteen komponenttiin
– kuormituspinnan suuruuteen ja
– kuormitusnopeuteen.

Liikennöinti aiheuttaa lisäksi omat erityispiirteensä, joten jäävaraston tai -tien (jääkentän) kantavuuden määritys on käytännössä vaikeaa. Jään kantavuuden määritys perustuu yleensä kokeellisiin menetelmiin (GOLD 1960). Jään kantavuutta koskeva tutkimustoiminta on verraten laajaa, ja tässä tyydytään vain lyhyeen yleiskatsaukseen.

Jään kantavuuden ja paksuuden välinen riippuvuus kuvataan yleensä (esim. GOLD 1960) seuraavasti:

$$P = Ah^2, \text{ jossa} \qquad (1)$$

P on sallittu ajoneuvon massa, t
A jään laadusta ja varmuuskertoimesta riippuva vakio
h jään paksuus, cm

Vakion A arvoksi eri tutkijat ovat esittäneet:

Kanadassa puutavaran kuljetuksissa ei uppoamisia tapahtunut, jos $A = 3{,}88 \times 10^{-3}$ (GOLD 1960). Yleinen suositus A:n arvoksi on $7{,}0 \times 10^{-3}$, mutta hyvälaatuinen jää kantaa jopa $A = 17{,}5 \times 10^{-3}$ kuorman, jos jään laadun kontrolli on tiukka ja ohjeita noudatetaan (GOLD 1970). Lyhytaikaisille kuormituksille ASSUR (1961) suosittelee A:n arvoa $10{,}0 \times 10^{-3}$. Neuvostoliitossa KORUNOV (1956) pitää A:n arvoa $10{,}0 \times 10^{-3}$ riittävänä puutavarakuljetuksiin.

Taulukossa 1 (s. 367) (turvallisuusohjeet) esitetyt arvot vastaavat A:n arvoa $4{,}8 \times 10^{-3}$.

Kansainvälisen työjärjestön (ILO) suositus edellyttää A:n arvoa $4{,}94 \ldots 5{,}55 \times 10^{-3}$ (Guide pour la sécurité . . . 1978). KANTOLA (1963) ehdottaa A:n arvoa $4{,}65 \times 10^{-3}$. ROSENGREN (1961) antaa A:n arvoksi $5{,}70 \times 10^{-3}$.

Voidaan siis todeta, että A:n arvot teräsjäällä vaihtelevat 10,0 . . . 3,9 eli ero on noin 2,5-kertainen. Tämä johtuu pääosin eri tutkijoiden käyttämistä varmuuskertoimista. Esimerkiksi PERSSONin (1948) teoreettiset laskelmat antavat A:n arvoksi $35{,}0 \times 10^{-3}$.

Edellä mainitut jään paksuudet ovat voimassa teräsjäälle, jossa ei ole halkeamia. Halkeamien vaikutus on yleensä huomioitava siten, että jos virheettömän teräsjään kantavuus on 1 × A, niin jään kantavuus on 0,5 × A jos railo on poikittaissuuntainen, ja 0,25 × A jos railo on pituussuuntainen ajoneuvon kulkusuuntaan nähden (KORUNOV 1956). Railojen merkitys jääkentän kantavuudelle on siten oleellinen.

Railojen lisäksi jään laadun vaikutus kantavuuteen on huomattava. Jo edellisessä luvussa todettiin, että kohvajää, siis ilmaonteloita sisältävä jää on teräsjäätä heikompaa. Tämän lisäksi on huomattava, että mm. jään kantavuus on lämpötilasta riippuvainen; kovalla pakkasella jää on haurasta, eikä kestä kovaa kuormitusta. Kevättalvella syntynyt jää on heikompaa kuin syystalvella syntynyt. Jäässä olevat epäpuhtaudet, kuten ruo'ot tai puun kappaleet heikentävät jään kantavuutta, ja erittäin haitallisia ovat jääkerrosten väliin jäädytettäessä jääneet vesi- tai sohjokerrokset. Kun vielä otetaan huomioon, että ajoneuvon nopeudella ja kuormituspinnan suuruudella on merkitystä, on ymmärrettävää, että myös varmuuskertoimelle kirjallisuudessa esitetään erilaisia arvoja.

Mikäli jään paksuus voitaisiin luotettavasti selvittää koko jäävarastokentällä, ja mikäli voitaisiin saada entistä tarkempaa informaatiota jään laadusta, erityisesti kohvajäästä ja vesikerroksista jään sisällä sekä railoista, voitaisiin varmuuskerrointa alentaa, ja näin ollen sallia suurempia kuormituksia. Tämä taas pidentäisi jäällevarastointiaikaa, mikä useissa tapauksissa tasoittaisi talven kuljetushuippuja. Lisäksi jäädytysaikaa voitaisiin lyhentää, mikä myös alentaisi kustannuksia.

JÄÄN PAKSUUDEN ELEKTRONINEN MITTAUS

Etelänapamantereen jääkerroksen paksuuden mittauksissa käytettiin tutkamenetelmää 1960-luvun lopulla (EVANS & SMITH 1969 ja EVANS ym. 1972). Tutka oli sijoitettu lentokoneeseen ja jääkerroksen paksuus oli useita kilometrejä. Tulokset olivat positiivisia, sillä mitaustulokset korreloivat hyvin muilla menetelmillä mitattujen jääkerrospaksuuksien kanssa. 1970-luvun puolivälissä tutkamenetelmää kokeiltiin Yhdysvalloissa merenkulun piirissä, ja käytetyllä lyhytpulssitutkalla pystyttiin suurten järvien jääpeitteen paksuus mittaamaan hyvin tarkasti (COOPER ym. 1976). Meri- ja järvijäällä tutkaa kokeilivat CAMPBELL ja ORANGE (1974) niinikään positiivisin tuloksin. Merenkulkuhallitus ja TKK:n radiolaboratorio tutkivat Suomessa 1970-luvun puolivälissä radiometrin soveltuvuutta merijään mittauksiin (TIURI ym. 1976). Myös näissä kokeissa saavutettiin positiivisia tuloksia.

Mikään em. menetelmistä ei sinänsä ollut suoraan sovellettavissa metsätalouteen. Käytetyt tutkat olivat liian kalliita tai suurikokoisia. Tämän vuoksi radiolaboratoriossa ryhdyttiin kehittämään yksinkertaisempaa laitetta, joka paremmin soveltuisi metsätalouden erilaisiin maastomittauksiin. Alustavien selvitysten perusteella soveltuvimmalta näyttäisi taajuusmodulaatioon perustuva jatkuva-aalto -tutka, ns. FM-CW -tutka (JAKKULA 1979).

TUTKAMITTAUKSEN PERIAATE JA KÄYTETYN TUTKAN RAKENNE

Jään paksuuden mittaus radioaalloilla voidaan suorittaa joko aktiivisilla tai passiivisilla menetelmillä. Aktiivisissa menetelmissä kohteeseen lähetetään radioaalto, jonka heijastumista seurataan vastaanottimella. Passiivitutkassa eli radiometrissä on vain vastaanotin, jolla mitataan kohteen lähettämää radiosäteilyä. Tämän avulla on mahdollista määrittää jääpeitteen paksuus.

Mittaus perustuu radioaaltojen kulkuun väliaineessa seuraavien sääntöjen mukaan
– aalto heijastuu osittain dielektrisiltä ominaisuuksiltaan erilaisten aineiden rajapinnasta,
– aallon kulkunopeus ja vaimeneminen ovat riippuvaisia väliaineen dielektrisistä vakioista.

Tutka lähettää kohteeseen radioaaltoja ja heijastukset rekisteröidään. Radioaaltojen kulku, ts. aallon etenemisnopeus, vaimeneminen ja heijastuminen rajapinnoista ovat suuresti riippuvaisia jaksoluvusta, joten jaksoluvun valinnalla on huomattava osuus laitteen suunnittelussa ja käytössä. Yleisesti voidaan todeta, että mitä suurempi jaksoluku (lyhyempi aallonpituus), sitä nopeammin aalto vaimenee vedessä. Kuitenkin suurempaa jaksolukua käytettäessä paranee erottelukyky, eli voidaan havaita pienempiä kohteita.

Taulukossa 2 annetaan eräitä dielektrisyysvakioita (ε_r) käytetyllä UHF-taajuusalueella.

Voidaan siis todeta, että lumessa ja ilmassa käytetyn taajuusalueen radioaalto kulkee yhtäläisesti. Jään ja ilman rajapinnasta saa-

Taulukko 2. Jään dielektrisyysvakiot 1 GHz:n taajuudella (COOPER ym. 1976)
Table 2. Dielectric constants of ice at 1 GHz.

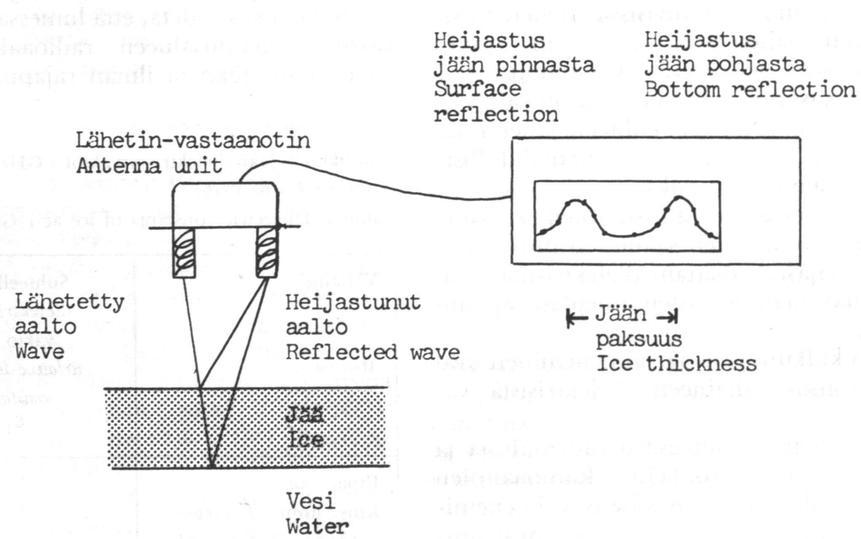
Väliaine *Medium*	Suhteellinen dielektrisyysvakio, ε_r *Relative dielectric constant,* ε_r
Ilma – *Air*	1
Kuiva lumi – *Dry snow*	1
Teräsjää – *Lake ice with no air inclusion*	3,17
Kohvajää, pieniä ilmaonteloita – *Milky ice*	3,08
Kohvajää, isoja ilmaonteloita – *Ice with great air inclusion*	2,99
Vesi – *Water*	80

daan heijastus ja erittäin voimakas heijastus saadaan jään pohjasta, sillä jään ja veden dielektristen vakioiden suhde on suuri. Aallon kulkema matka väliaineessa voidaan laskea kaavalla (2), jos kulkuaika t tunnetaan.

$$V = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \cdot t \quad \text{, jossa} \qquad (2)$$

V on aallon kulkumatka, m
c valon nopeus tyhjiössä, 0,2998 m/ns
t kulkuaika, ns
ε_r väliaineen dielektrisyysvakio

Kokeissa käytetty tutka oli TKK:n radiolaboratorion suunnittelema ja rakentama nimenomaan jään ja roudan paksuuden mittaamiseen (JAKKULA 1979). Se perustuu taajuusmodulaatioon, jossa lähettimen taajuutta pyyhitään 1 GHz:n taajuuskaistalla. Tutkan toimintaperiaate esitetään kuvassa 1. Tutka lähettää 1 . . . 1,8 GHz taajuista radioaaltoa ja sen teoreettinen erottelukyky on 10 cm, eli ohuin mitattava jään paksuus on 10 cm. Dielektristen ominaisuuksien muutoksesta johtuen tapahtuu ilman ja jään rajapinnassa heijastus ja osa aalloista palaa vastaanottoantenniin, osa kulkeutuu jäähän ja osittain heijastuu veden ja jään rajapinnasta. Näyttölaite muodostuu 12 x 32:n valodiodin matriisista, ja sillä voidaan nähdä jään pinnasta ja pohjasta tulevat heijastukset. Näiden etäisyydestä voidaan laskea aallon matkaan käyttämä aika. Näyttölaitteessa on myös nauhuriliitäntä, joten mittaukset voidaan nauhoittaa ja esittää myöhemmin näyttölaitteella tai piirturilla. Rakennettu prototyyppi painoi noin 10 kg, ja sen käyttöjännite on 12 V. Laitetta voidaan käyttää noin kolme tuntia sisäänrakennetulla, ladattavalla akulla, tai sitä voidaan käyttää myös ulkoisella virtalähteellä, esim. auton akulla. Nykyisen laitteen komponenttikustannukset olivat noin 10 000 mk. Laitetta voidaan käyttää joko pistemäiseen mittaukseen, jolloin tutka pysäytetään määrätylle kohdalle, tai sillä voidaan saada jatkuva profiili kuljettamalla tutkaa ajoneuvolla jään pinnalla.



Kuva 1. Tutkan toimintaperiaate
Fig. 1. Operational diagram of radar

Maastokokeiden järjestely ja aineiston laajuus

Maastotyöt suoritettiin helmi–huhtikuussa 1980. Tutkan prototyyppiä kokeiltiin sekä järven että meren jäällä. Aineiston laajuus ja tutkimuskohteiden esittely on taulukossa 3.

Tutkaa kokeiltiin sekä luonnontilaisella jäällä että jäälle auratulla talvitiellä. Längelmäellä kohteena oli lisäksi jäädytetty talvitie. Kuivajärvellä tutkimukset suoritettiin ainoastaan luonnontilaisella jäällä. Tutkaa kokeiltiin sekä lumipeitteen läpi että auratuilla kohteilla. Mittauksia suoritettiin sekä pistemäisinä että jatkuvina. Pistemäisissä mittauksissa tutkaa kuljetettiin yleensä kelkassa, jatkuvissa profiileissa taas henkilö- tai pakettiautoon kiinnitettynä (kuva 2.)

Kuva 2. Jatkuva profilointi henkilöautolla.
Fig. 2. Continuous profiling by a car.

Pistemäisissä mittauksissa tutka pysäytettiin mittauskohdalle, ja näyttöpäätteeltä laskettiin pulssien välinen etäisyys, ns. LED-etäisyys. Mikäli huippu sattui kahden LEDin kohdalle, käytettiin tarkkuutena 0,5 LED-väliä. Mikäli pylväät olivat eri korkuisia, etäisyys laskettiin korkeammasta pylväästä ja se ilmoitettiin täysinä LED-väleinä. Tämän jälkeen kelkka työnnettiin sivuun ja jäähän kairattiin reikä, josta koukkupäisen kepin avulla mitattiin jään paksuus 1 cm alenevin luokin. Jään pinnan määritys jäi tulkinnan varaiseksi, sillä joskus jäätynyt lumi laskettiin mukaan, joskus se taas jätettiin huomioon ottamatta. Tämän lisäksi muistiin kirjattiin silmävaraisesti arvioitu jään laatu, halkeamat jne., näkyvät viat sekä jään pinnan laatu (sileä tai karhea, kuiva tai kostea). Lumipeitteen paksuus mitattiin 5 cm luokin. Myös veden syvyys mitattiin, sillä osa tutkimuspisteistä sijoitettiin tarkoituksella aivan rannan tuntumaan.

Jatkuvassa profiilissa tutka oli kiinnitettynä autoon, jolla ajettiin jäätiellä. Signaali nauhoitettiin, ja toiselle kanavalle annettiin kohdennusmerkit. Tämän jälkeen joidenkin kohdennusmerkkien kohdalta käytiin kairaamalla selvittämässä jään todellinen paksuus.

Tulosten käsittely suoritettiin HYLPS-ohjelmilla (HYLK 1980). Jään paksuus laskettiin LED-etäisyyksistä käyttäen teräsjään dielektristä vakiota $\varepsilon_r = 3{,}2$.

Taulukko 3. Aineiston laajuus (166 havaintoa)
Table 3. Data presentation (166 observations)

Vesistö *Lake or sea*	Jään laatu *Ice quality*	Kunta *Locality*	Havaintoja, kpl *No. of observations*	Jään paksuus, cm *Ice thickness, cm*		Lumen paksuus, cm *Snow thickness, cm*		Jäätie *Ice road*
				Min.	Max.	Min.	Max.	
Kuivajärvi	J	Juupajoki	23	15	39	0	20	Ei – No
Musturinlampi	J	–"–	30	0	48	0	40	On – Yes
Längelmävesi	J	Längelmäki	78	30	100	0	25	On – Yes
Laajalahti	M	Espoo	35	25	73	0	50	On – Yes

J = järvi – *lake*
M = meri – *sea (low salinity)*

TUTKIMUSTULOKSET

Pistemäiset mittaukset

Mitattujen ja laskettujen jään paksuuksien välinen riippuvuus esitetään kuvassa 3. Voidaan todeta, että tutka on toiminut hyvin, sillä mitatun ja lasketun jään paksuuden välinen riippuvuus on selvä. Saadun regressioyhtälön selitysaste on 97 %.

Absoluuttisesti suurimmat erot lasketun ja mitatun jään paksuuden ($h_L - h_M$) välillä olivat −13 cm ja +5 cm, eli jään mitattu paksuus oli 13 cm paksumpi tai 5 cm ohuempi kuin tutkalukemien perusteella laskettu arvo. Erotusten jakautuminen esitetään kuvassa 4. Voidaan todeta, että

- tuloksiin sisältyy systemaattista virhettä, sillä 0-kohta ei osu jakautuman keskelle. Tämä on myös nähtävissä vakion a arvosta regressioyhtälöstä (taulukko 4).
- 55 % havainnoista osuu ∓ 2,5 cm luokkiin keskiarvon molemmin puolin.

Tuloksia käsiteltäessä todettua systemaattista virhettä ei poistettu, koska tutkimuksen kannalta sillä ei ole merkitystä. Todettakoon, että absoluuttiset virherajat, mikäli systemaattinen virhe korjataan, ovat −10 . . . +7 cm, joten tuloksia voidaan pitää erittäin hyvinä, koska lukematarkkuus oli vain yksi LED-väli, mikä vastaa noin 5 cm:iä.*)

Päivittäiset ja järvittäiset tulokset esitetään taulukossa 4.

Tuloksissa on selvästi havaittavissa 2 ryhmää

- a-tyyppinen $y = 1{,}0x + 1{,}5$
- b-tyyppinen $y = 0.85x + 8{,}5$

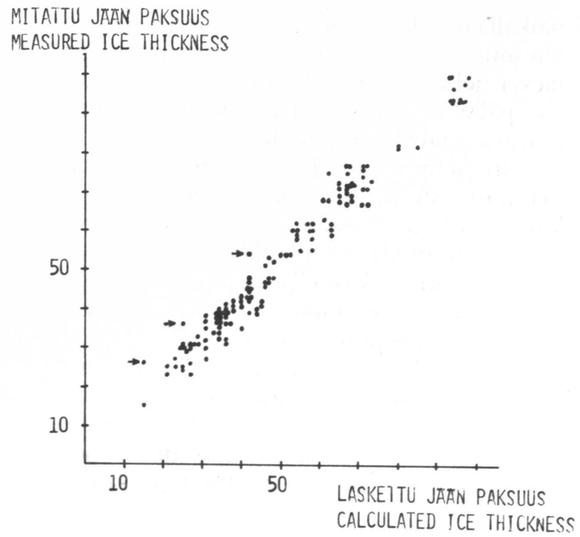
Koska regressioyhtälön kuvaajan periaatteessa tulisi kulkea origon kautta ja kulmakertoimen olla 1, on a-tyyppi oikeampi. b-tyyppisissä kohteissa on ohuilla jäänpaksuuksilla saatu laskennallisesti liian ohut jää.

Analyyseissä, joissa käytettiin sekä regressio- että varianssianalyysiä, testattiin useita hypoteeseja, joilla koetettiin selittää tuloksissa havaittuja vaihteluja. Päivien ja järvien välillä ei voida todeta selviä eroja, ei myöskään meren jään ja järven jään välillä. Tulosten mukaan lumipeitteellä ei ollut merkittävää vaikutusta. Systemaattista eroa talvitien ja

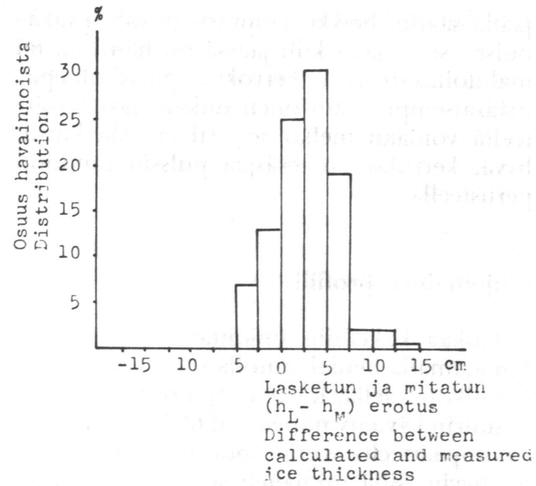
Taulukko 4. Jään lasketun ja mitatun paksuuden regressioyhtälöt
Table 4. Regression between calculated and measured ice thicknesses

Järvi *Lake*	Päivä *Day*	Havaintoja, kpl *No. of observations*	Vakio *Constant*	Kulmak. *Slope*	Selitysaste R^2	Tyyppi *Type*
1	2	23	8.3	0.84	.674	b
2	3	26	-0.7	1.09	.922	a
2	4	4	8.2	0.87	.900	b
3	3	30	0.1	1.08	.954	a
3	5	48	1.5	1.01	.963	a
4	1	15	8.3	0.84	.957	b
4	6	13	9.2	0.87	.964	b
4	7	7	1.5	1.01	.802	a
Yht. – *Total*		166	3.1	0.99	.973	

*) Tutkan rakennetta muutettiin tutkimuksen aikana, ja yhtä LED-väliä vastaava jään paksuus vaihteli n. 4 . . . 5 cm.



Kuva 3. Mitatun ja lasketun jään paksuuden välinen riippuvuus.
Fig. 3. Correlation between measured and calculated ice thickness.



Kuva 4. Lasketun ja mitatun jään paksuuden erotus.
Fig. 4. Difference between calculated and measured ice thickness.

luonnontilaisen jään välillä ei voitu todeta, ei edes olosuhteissa, joissa jäätien pinta oli säröillyt liikenteen johdosta. Myöskään pinnan kosteus ei näyttänyt merkitsevältä koko aineistossa, vaikka se yhdellä järvellä kahden rinnakkaisen alueen välillä näyttikin hivenen lisäävän laskettua jään paksuutta (vrt. YLINEN 1980). Tähän saattoi olla syynä se, että pinnan kosteuden rekisteröinti saattoi olla vaillinaista. Vaikka analyyseissä ei jään laadun vaihtelu näyttänytkään tulevan mukaan selittävänä tekijänä, saattavat jään laadun vaihtelut näkyä tarkemmissa mittauksissa. Kuvassa 3 nuolella merkityt pisteet poikkesivat kaikki jollain tavoin normaalista, ts. huomautussarakkeella oli jokin kommentti: yhdessä tapauksessa jään päällä oli ohut vesikerros, toisessa jään välissä oli vesikerros, kolmannessa tapauksessa jään sisässä oli ilmaontelo. Kuitenkaan kaikki tällaiset tapaukset, joissa huomautussarakkeella oli kommentteja, eivät näkyneet poikkeuksina, eivätkä tästä syystä tulleet selittävinä muuttujina mukaan.

Voidaan todeta, että kaikki kuvassa 3 nuolella merkityt kolme pistettä kuuluivat b-tyypin päiviin ja pääosin ero selittyykin sekä tällaisista poikkeuksellisista havainnoista että todennäköisesti suuremmista mittausepätarkkuuksista (mittausvirheistä) b-päivinä.

Tutkimuksen systemaattista virhettä, joka liittyy lähinnä radiotekniikan piiriin, käsiteltiin jo edellä. Tämän lisäksi tutkimukseen saattaa liittyä satunnaisvirheitä:

- inhimillinen virhe laskettaessa LED-etäisyyksiä näyttöpäätteeltä
- satunnaisvirhettä mitattaessa mekaanisesti jään paksuutta. Nämä virheet voivat olla kahdenlaisia, joko inhimillinen virhe, jolloin tulos luetaan tai kirjataan virheellisesti, tai systemaattiseen suuntaan vaikuttava virhe, mikäli kairattaessa kaira on irrottanut avannon reunoilta jäälohkareita ja mittakoukku ei ole todellisen jään pohjan tasolla.

Edellä mainitut virheet sisältyvät aineistoon, mutta niiden merkitys on todennäköisesti pieni. Ne saattavat kuitenkin jonkin verran lisätä hajontaa.

Tutkaa kokeiltiin lisäksi 28. 3. 1980 Suomenlinnan jäätiellä, jolloin tie oli jo kevään tulosta johtuvan sulamisen vuoksi suljettu liikenteeltä. Tällöin jään päällä oli 5 . . . 10 cm paksuinen märkä sohjokerros. Tutkaaallot eivät enää lävistäneet tätä, joten varsinaisesta jään paksuudesta ei saatu havaintoja, vaan tutkakaiku oli muodoltaan epämääräinen.

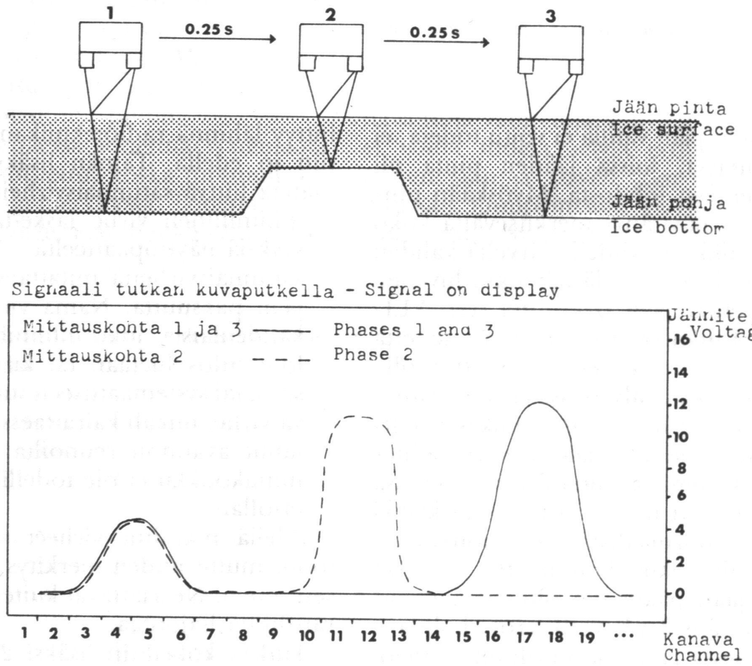
Talvella tutkaa kokeiltiin myös ohuilla, alle 10 cm jäillä. Tällöin voitiin todeta, että kaiku oli niin ikään epämääräinen. Hyvälaatuisella

jäällä saatiin heikko etupulssi ja vahva takapulssi, sen sijaan kun jäässä oli häiriöitä tai mahdollisesti useita kerroksia, pulssi oli epämääräisempi. Näin ollen tutkan näyttöpäätteeltä voidaan melko selvästi erottaa kuiva, hyvä, kerrokseton teräsjää pulssin muodon perusteella.

Linjoittainen profiili

Tutkaa kokeiltiin linjoittaiseen profiilointiin ajamalla henkilöautolla sekä jäätiellä että sen ulkopuolella. Käytetty ajonopeus vaihteli, ja suurin käytetty nopeus oli 60 km/h. Tutkan näyttöpäätteeltä voitiin todeta, että tutka toimi hyvin, sillä pohjaheijastus pysyi vakaasti paikallaan talvitien suunnassa ajettaessa (jään paksuus vakio), mutta siirtyi vasemmalle ajettaessa tieltä luonnontilaiselle jäälle (ohuempi jää) palaten takaisin oikealle jään paksuuden kasvaessa talvitielle palattaessa.

Paitsi seuraamalla jään paksuuden vaihtelua mittaushetkellä mittausajoneuvosta, jatkuvaa profiilia voidaan seurata myös jälkeenpäin nauhoituksen avulla. Nauhoitettu tutkasignaali voidaan käsitellä usealla eri menetelmällä. Tässä tutkimuksessa esitellään lyhyesti vain tietokonepohjaista analyysiä ja sen mahdollisuuksia, koska puutavaran korjuuorganisaatiossa hajautettu tietojenkeruujärjestelmä on yleistymässä. Kentällä suoritettu nauhoitus voitaisiin ajaa tietokoneen käsiteltäväksi joko vain profiilin piirtämistä tai myös tarkemman kantavuusanalyysin tekemistä varten.



Signaali digitaalimuodossa - Digitalized signal

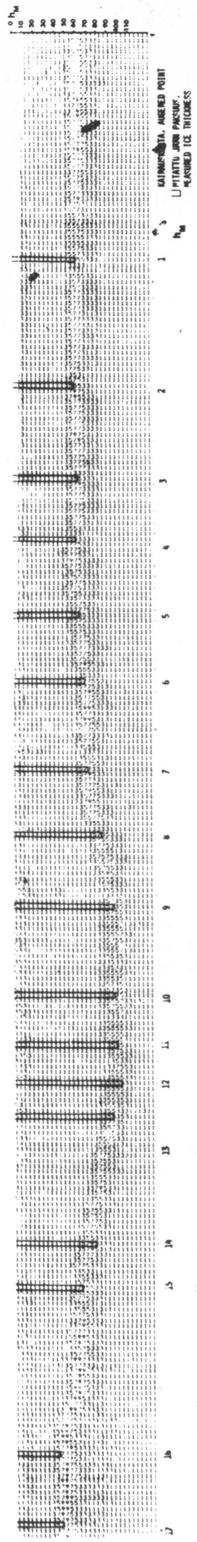
Piste Point	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	...
1	0	0	1	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	10	12	2	0	
2	0	0	1	4	4	0	0	0	1	4	11	10	2	0	0	0	0	0	0	
3	0	0	1	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	10	12	2	0	

Kanava n:o Channel

Jännite Voltage

Kuva 5. Tutkasignaalin digitalisointi

Fig. 5. Digital-sampling of continuous radar signal



Kuva 6. Tietokonepäätteellä piirretty tutkagrammi ja kairauksin mitatut jään paksuudet.

Fig. 6. Computer plotted radar signal compared with auger measured ice thickness.

Linjoittainen signaali voidaan ajatella koostuvaksi jonossa olevista pistemäisistä luotauksista, jolloin jatkuva signaali koostuu tiuhaan otetuista näytteistä. Näytteenotto voi olla tahdistettu aikaan, jolloin näytteiden välinen etäisyys on ajonopeudesta riippuvainen. Käytännön kannalta olisi matkaimpulssiin perustuva näytteenotto soveliaampi, koska näin saataisiin näyte määrätyin välimatkoin.

Teknillisen korkeakoulun sovelletun elektroniikan laboratoriossa rakennetulla näytteenottopiiri – A/D -muunnin-digitaalinauhurilla tutkasignaalista otettiin näyte, muunnettiin se digitaalimuotoon ja nauhoitettiin digitaalisena.

Laitteen toimintaperiaate esitetään kuvassa 5. Tutkasignaali jaetaan 32 kanavaan ja kullekin kanavalle saapuva jännite mitataan ja koodataan heksadesimaaliluvuksi (0 . . . F), joka on siis riippuvainen kanavalle tulevasta jännitteestä. Kun kaikki 32 kanavaa on luettu, annetaan tietueen lopetusmerkki ja siirrytään seuraavaan näytteenottoon. Näytteenotto tapahtui aikaan tahdistettuna näytteenottovälin ollessa n. 0.25 s. Vastaava välimatka eri ajonopeuksilla on seuraava:

ajonopeus km/h	näytepisteiden välimatka m
1	0.07
5	0.35
10	0.70
50	3.50
60	4.20

Nauhoitettu signaali piirrettiin tämän jälkeen tietokoneen päätteellä, kuva 6. Voidaan todeta, että pinta ja pohjakaiku ovat nähtävissä ja jäänpaksuus niiden perusteella laskettavissa. Kyseessä on vasta ensimmäinen prototyypin kokeilu, mutta sen perusteella voitiin todeta myös tietokonepohjaisen analyysimenetelmän olevan mahdollisen. Koska tämä ei kuitenkaan kuulu suoranaisesti varsinaisen projektin alaan, ei kehittelytyötä ole jatkettu tämän pidemmälle resurssien rajallisuuden vuoksi.

TULOSTEN SOVELTAMINEN KÄYTÄNTÖÖN

Jo tämän alustavan prototyyppikokeilun perusteella voidaan todeta, että tutka soveltuu hyvin jään paksuuden mittauksiin jäävarastojen ja -teiden kuntoa seurattaessa. Laite on helppokäyttöinen ja riittävän luotettava jo nykyisessä muodossaan. Tarvitaan kuitenkin lisätutkimuksia, joissa selvitetään tutkan soveltuvuus nimenomaan jään laadun kontrollointiin. On mahdollista, että jäässä olevat häiriöt näkyvät häiriöinä myös tutkalla (ks. esim. MOREY 1974, kuva 6 B), mutta tämä edellyttäisi huomattavasti parempaa signaalin rekisteröintiä kuin nykyinen LED-matriisi, sekä nopeampaa näytteenottoväliä kuin 0.25 s.

KIRJALLISUUSLUETTELO

ASSUR, A. 1961. Traffic over frozen or crusted surface. Proceedings of the 1st ISTVS Int. Conf. Torino-Saint Vincent, 12 . . . 16 Giugno 1961. ss. 913 . . . 923.

CAMPBELL, K. J. & ORANGE, A. S. 1974. A continuous profile of sea ice and freshwater ice thickness by impulse radar. Polar Record Vol. 17, No. 106.

COOPER, D. W., MUELLER, R. A. & SCHERTLER, R. J. 1976. Measurement of lake ice thickness with a short-pulse radar system. NASA Technical Note, NASA TN D-8189. Washington, D. C.

EVANS, S., DREWRY, D. J. & ROBIN, G. de Q. 1972. Radio echo sounding in Antarctica 1971–72. Polar Record Vol. 16, No. 101.

– " – & SMITH, B. M. E. 1969. A radio echo equipment for depth sounding in polar ice sheets. Journal of scientific instruments. Series 2 Vol. 2.

GOLD, L. W. 1960. Field study on the load bearing capacity of ice covers. NRCC, Division of building research. Technical Paper No. 98. Ottawa, June 1960.

– " – 1970. Use of ice covers for transportation. Canadian Geotechnical Journal. Vol. 8.

Guide pour la sécurité et l'hygiéne dans les travaux forestiers. Bureau International du Travail. BIT, ILO. Genève 1968. 243 s.

HUBENDICK, P-E. 1961. Vinterväghållning. Biblioteksförslaget, Stockholm.

JAKKULA, P. 1979. FM-tutka jään paksuuden mittaukseen. Teknillinen korkeakoulu. Radiotekniikan lisensiaattikurssin "Mikroaaltokaukokartoitus". Erikoistyö. Konekirjoite. Espoo 1980.

KANTOLA, M. 1963. Tietoja jään kestävyydestä puutavaran moottoroidussa kuljetuksessa. Työtehoseuran metsätiedotus N:o 57.

KORUNOV, N. M. 1956. O gruzopodjemnosti ledjanovo pokrova pri transportirovke lesa. Lesnaja Promyslennost. No 11. 1956 ss. 18 . . . 19.

MOREY, R. 1974. Continuous subsurface profiling by impulse radar. Proceedings of Engineering Foundation Conference on Subsurface Exploration for Underground Excavation and Heavy Construction. Henniken N. H. August 1974.

PERSSON, B. O. E. 1948. Beständighet och bärighet hos ett istäcke. Sveriges Vägföreningens tidskrift Nr. 10.

Puutavaran jäällevarastoinnin turvallisuusohjeet. 1976. Työsuojeluhallitus. Turvallisuusmääräykset ja -ohjeet 36. Tampere.

Ranta- ja saaristometsien puunkorjuuopas. 1973. Enso-Gutzeit Oy. Metsäosasto. Päivitettävät ohjeet. Jäävarastointiohjeet.

ROSENGREN, S. 1961. Isens bärförmåga – praktiska överslagsberäkningar. Skogen Nr. 4.

SALMINEN, J., SAVOLAINEN, R. & YLÄ-HEMMILÄ, V. 1979. Puutavaran pudotus- ja jäälleajopaikoille asetettavat vaatimukset.

TIURI, M., 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 S89.

YLINEN, P. 1980a. Taajuusmoduloitu tutka suon routakerroksen mittauksessa. Seminaariesitelmä 20. 2. 1980. Teknillinen korkeakoulu, Radiolaboratorio. Konekirjoite.

– " – 1980b. Taajuusmoduloitu tutka jään ja roudan mittaukseen. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. Otaniemi 1980.

SUMMARY:

RADAR MEASUREMENT OF ICE THICKNESS ON ICE ROADS AND LANDINGS

Light and economic FM-CW radar has been developed for controlling the bearing capacity of ice roads and landings. It was tested on natural ice and ice roads of 3 lakes and 1 sea. Ice thickness varied from 0 to 100 cm and the total number of observations was 166. Correlation coefficient between auger and radar measured ice thicknesses was r = 0.99 and absolute error varied from −10 to +7 cm. The quality of ice had no influence, but by improving the interpretation of results also the quality factors might be detectable.