



FOLIA FORESTALIA

METSÄNTUTKIMUSLAITOS
THE FINNISH FOREST RESEARCH INSTITUTE
HELSINKI 1992

788

Martti Saarilahti

TURPEEN KOKOONPURISTUVUUS JA TIEALUEEN
KUIVATUSPAINUMAN ARVIOINTI

Compressibility of peat and estimation of drainage settlement
of a road right-of-way

FOLIA FORESTALIA

Julkaisija — *Publisher*

Metsäntutkimuslaitos

The Finnish Forest Research Institute

Toimitus — *Editors*

Päätoimittaja — *Editor in chief:*

Erkki Annila

Toimittaja — *Editor:*

Seppo Oja

Toimittaja — *Editor:*

Tommi Salonen

Unioninkatu 40 A, SF-00170 Helsinki, Finland

tel. +358-0-857 051, fax +358-0-625 308

Toimituskunta — *Editorial Board*

Erkki Annila (pj. — *chairman*), Pentti Hakkila, Seppo Kaunisto, Jari Kuuluvainen, Juha Lappi, Eino Mälkönen

Tavoitteet ja tarkoitus — *Aim and Scope*

Sarjassa julkaistaan tutkimuksia, tilastoja ja kirjallisuuskatsauksia, joilla on ensisijaisesti kotimaista merkitystä. Julkaisukielenä on kotimainen kieli, mutta julkaisut sisältävät englanninkielisen selosteen tärkeimmistä tutkimustuloksista.

Folia Forestalia publishes research reports, statistics and literature reviews relevant to Finnish forestry.

Tilaukset — *Subscriptions*

Tilaukset ja tiedustelut pyydetään osoittamaan Metsäntutkimuslaitoksen kirjastolle. *Subscriptions and orders for back issues should be addressed to the Library of the Institute.*

FOLIA FORESTALIA 788

Metsäntutkimuslaitos. Institutum Forestale Fenniae. Helsinki 1992

Martti Saarilahti

TURPEEN KOKOONPURISTUVUUS JA TIEALUEEN
KUIVATUSPAINUMAN ARVIOINTICompressibility of peat and estimation of drainage settlement of
a road right-of-way

Approved on 21.2.1992

SISÄLLYS

1. JOHDANTO	3
2. AINEISTO JA MENETELMÄT	4
3. TULOKSET	5
31. Painumaprocentti	5
32. Kokoonpuristuvuusmoduuli	5
33. Kokoonpuristuvuusindeksi	7
331. Kokoonpuristuvuusindeksin määrittäminen	7
332. Kokoonpuristuvuusindeksin määrittäminen	7
333. Huokosluku	9
334. Painumissuhde	9
335. Esikuormitus	10
4. SUON KUIVATUKSESTA JOHTUVAN TIEALUEEN PAINUMAN ARVIOINTI ..	11
41. Painumalaskelmat geotekniikassa	11
42. Painumalaskelmien kokeilu kuivatuspainumien arvioimiseksi	12
43. Ojan etäisyyden vaikutus painumaan	14
44. Pohjaveden pinnan arviointi ojitussyvyyden perusteella	14
45. Kuivatusajan huomioonottaminen	15
46. Tiealueen painuman arviointimenetelmän testaus	15
5. TULOSTEN SOVELTAMINEN KÄYTÄNTÖÖN	16
KIRJALLISUUS — REFERENCES	16
Liite	18

Saarilahti, M. 1992. Turpeen kokoonpuristuvuus ja tiealueen kuivatuspainuman arviointi. Summary: Compressibility of peat and estimation of drainage settlement of a road right-of-way. Folia Forestalia 788. 18 p.

Turvekentän tai tiealueen painuman suuruuden arvioimiseksi laadittiin malleja, joissa käytettiin ödometrikkein mitattua turpeen kokoonpuristuvuusmoduulia ja kokoonpuristuvuusindeksiä sekä kirjallisuudesta saatua painuma-aineistoa. Kun painumaa arvioitiin kokoonpuristuvuusmoduulin avulla ja käytettiin kuormitussuhdetta selittäjänä (ojan syvyys), mallilla lasketut arvot olivat hyvin lähellä kokeellisesti mitattuja arvoja ($r = 0,84$). Ottamalla huomioon turpeen kosteussuhde mallia voitiin edelleen parantaa ($r = 0,92$). Käyttämällä kokoonpuristuvuusindeksiin perustuvaa mallia olivat laskettujen ja mitattujen painumien väliset erot hyvin vähäisiä ($r = 0,92...0,94$). Täten näyttää mahdolliselta kehittää yksinkertaisia painumanlaskentamalleja metsätiensuunnittelun ja -rakennuksen tarpeisiin.

The settlement of peatland or road right-of-way can be estimated based on geotechnics. The modulus of compression and compression index measured by consolidation tests and the obtained values were tested against the observed settlement data from a literature survey. The regression coefficient between observed and calculated settlement was 0,84 when using only load factor (depth of ditches) as an independent variable and 0,92 when peat moisture content was included into the model. Compression index gave a little higher correlation coefficients, 0,92...0,94. It seems possible to develop simple settlement calculation methods for forest road planning and construction.

Keywords: peat, compressibility, forest road, settlement, drainage.
FDC 383+114

Author's address: The Finnish Forest Research Institute, Department of Forest Production, Unioninkatu 40 A, SF-00170 Helsinki, Finland

ISBN 951-40-1198-8
ISSN 0015-5543

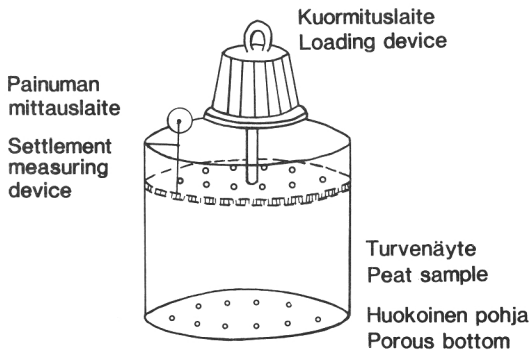
Tampere 1992. Tammer-Paino Oy

1. Johdanto

Metsätieteissä maantutkimus on yleensä suuntunut maatieteeseen, ts. suota tai turvetta tarkastellaan kasvualustana. Geotekniikassa tarkastelukulma on maamekaaninen, ts. tutkitaan maassa vaikuttavia jännityksiä ja maan lujuus- ja kokoonpuristuvuusominaisuuksia. Turpeen kokoonpuristuvuuden tunteminen on tarpeen arvioitaessa suoteiden pengerkuorman tai ojituksen aiheuttaman painuman suuruutta.

Turpeen puristuskokeet voidaan suorittaa joko sallimalla turpeen laajentua sivullepäin, jolloin kyseessä on kimmomoduulin eli E-moduulin (E) mittaustila, tai estämällä turpeen sivulaajeneminen, jolloin mitataan turpeen kokoonpuristuvuusmoduulia (M). Kokoonpuristuvuusmoduulin mittaustilanne vastaa laajan turvekentän painumistilannetta, jossa turve ei pääse siirtymään sivullepäin. Kimmomoduuli soveltuu paremmin tilanteisiin, joissa tutkitaan kapean kuormituspinnan, esim. tien, aiheuttamaa painumista.

Turpeen kokoonpuristuvuutta mitataan ödometrilaitteella (kuva 1). Turvenäyte sijoitetaan rasiaan, jossa sitä kuormitetaan ja vastaava kuormituksen aiheuttama painuma mitataan. Koska painuman suuruus riippuu ajasta, painuma luetaan määrääjoin (esim. 30 s: 1, 2, 4, 8, 15; 30 min: 1, 2, 4, 8 h ja 1, 2, 4, 8 d), kunnes näyte ei enää havaittavasti painu tai haluttu painuma-aika on saavutettu, jonka jälkeen lisätään kuormitusta. Käytetyt kuormitusportaat ovat esim. 6,25; 12,5; 25; 50; 100; 200; ja 400 kN/m².



Kuva 1. Ödometrilaitte.
Fig. 1. Oedometer test.

Ödometrikokeessa painuman suuruus esitetään suhteellisena painumana (kuva 2)

$$s\% = 100 \frac{s}{h_0} \quad (1)$$

jossa

s% = suhteellinen painuma, %

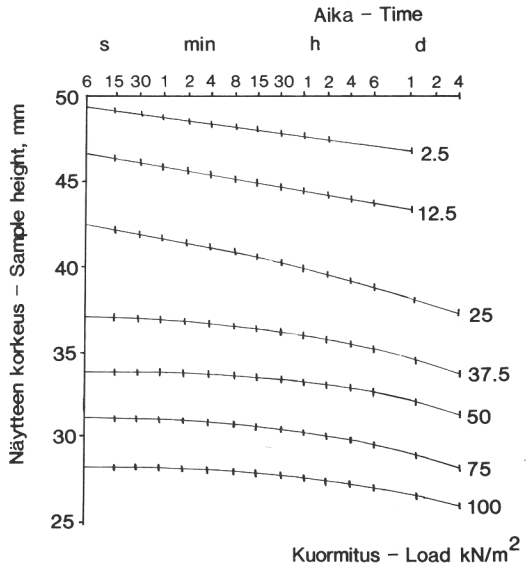
s = painuman suuruus, m

h₀ = näytteen alkuperäinen korkeus, m

Tässä tutkimuksessa suhteellisesta painumasta käytetään nimitystä painumaprosentti.

Ödometrikokeen tulokset esitetään yleensä puolilogaritmisena kokoonpuristumana — kuormitus koordinaatistossa (kuva 3). Kokoonpuristuma ilmaistaan kuormitusportaitten joko loppu- tai alku- ja loppupainumien avulla. Koska ödometrikokeessa turvenäytteen sivulaajeneminen on ehkäisty, saadut tulokset vastaavat kokoonpuristuvuusmoduulia (M).

Ödometrikoe on pitkän seuranta-ajan vuoksi hidas ja sitoo resursseja, joten turpeen kokoonpuristuvuuden mittausta ödometrikokein tulee kalliiksi. Lisäksi turvenäytteiden otto mäntäkairalla sekä näytteiden kuljetus ja käsittely lisäävät



Kuva 2. Turvenäytteen painuma ödometrikokeessa.
Fig. 2. Settlement of a peat sample in oedometer test.

kustannuksia. Ödometrikokeeseen perustuvat suunnittelumenetelmät tulevat tuskin kustannussyistä käyttöön metsäteitä koskevissa tutkimuksissa. Mikäli turpeen kokoonpuristuvuusominaisuudet voitaisiin määrittää jollain epäsuoralla menetelmällä, voitaisiin näitä arvoja käyttää geoteknisissä painumalaskelmissa.

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan pienen empiirisen aineiston ja kirjallisuustutkimuksen avulla mahdollisuuksia käyttää epäsuoria menetelmiä turpeen kokoonpuristuvuuden arvioimiseksi ja kuivatuspainuman laskemiseksi.

Tutkimuksen maastotyöt liittyvät tekijän aikaisempiin tutkimuksiin (Saarilahti 1977). Prof. K.V. Helenelundin tuki mahdollisti tutkimuksen suorittamisen. Tekn.yo. Vesa Oksanen teki pääosan ödometrikokeista ja osallistui monin tavoin tutkimuksen toteuttamiseen. Teknillisen korkeakoulun pohjatutkimuksen ja maarakennusmekaniikan laboratorion henkilökunta on avustanut maasto- ja laboratoriokokeissa. Parhaat kiitokset kaikille tutkimukseen osallistuneille.

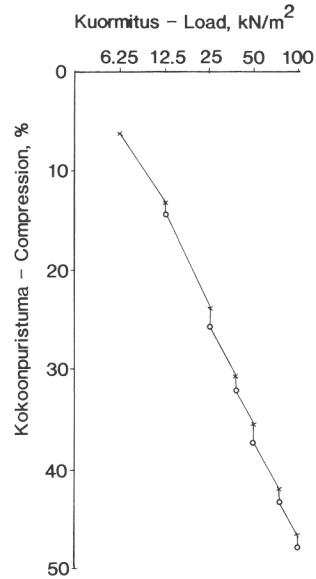
2. Aineisto ja menetelmät

Tutkimuksessa käytetty aineisto kerättiin kesällä 1976 suodatinkankaiden käyttöä koskevan tutkimuksen yhteydessä (Saarilahti 1977). Tällöin otettiin kolmelta suolta 300 mm:n läpimittaisella näytteenottosylinterillä turvelieriö 1150 mm:n syvyyteen saakka. Näyte kuljetettiin Teknillisen korkeakoulun pohjarakennus- ja maarakennusmekaniikan laboratorion kylmähuoneeseen.

Talvella 1977 tutkittiin pohjarakennus- ja maarakennusmekaniikan laboratoriossa kaikkiaan 16 turvenäytteen kokoonpuristuvuus ödometrikokein, ja samalla näyteistä mitattiin kosteussuhde ja kuivatuoretiheys.

Ödometrikokeissa käytettyjen turvenäytteiden korkeus oli kokeen alussa 50 mm ja halkaisija 80 mm. Turpeen ominaisuudet oli luokiteltu vierekkäiskairauksin maastossa kesällä 1977. Pääosa näytteistä oli keskinkertaisesti maatunutta turvetta, josta ei selvästi voida erottaa rahka- tai saraturvetyyppiä. Näytesyvyys oli 50...1100 mm (taulukko 1).

Ödometrikokeissa kuormitusportaat olivat 6,25; 12,5; 25; 50 ja 100 kN/m². Kuormitusaika kullakin portaalla oli 2...4 vuorokautta. Kullakin kuormitusportalla mitattu painuma muunnettiin painumaprosentiksi. Tämän lisäksi aineistosta laskettiin kokoonpuristuvuusmoduuli ja kokoonpuristuvuusindeksi, joita verrattiin kirjallisuudessa esiintyviin tutkimustuloksiin. Laskentamenetelmä selostetaan tulosten esittelyn yhteydessä. Ödometriko-



Kuva 3. Turpeen painuman riippuvuus kuormituksesta.
Fig. 3. Relative compression vs. load of a peat sample in oedometer test.

Taulukko 1. Tutkitut turvenäytteet soittain.
Table 1. Peat samples used in oedometer tests.

Näytesyvyys Sample depth, m	1	Suo — Peatland 2 Suotyyppi — Site IRoj Pohjavesi — Water table, m 0,4 Näytteiden lukumäärä — No. of samples	3 MK 0,1
0,05			2
0,10	2	2	
0,50	3		1
0,75			2
1,10	2	2	
Turvekaava — Peat type			
0,25	S, H2	LSC, H5-6	SL, H6
0,50	ES, H5-6	SC, H6	SCL, H5
1,00	SLC, H5-6	SL, H8	SCL, H8
1,25	LSC, H5-6	SLC, H7	—
1,50	SC, H6-7	SC, H4	—
2,00	SC, H5-6	SC, H6	—
2,50	—	SC, H6	—
3,00	—	SC, H8	—

English names (after Heikurainen 1979):
LkN = Ordinary small-sedge bog
IRoj = Dwarf-shrub pine swamp (drained)
MK = Myrtillus spruce swamp

keiden jälkeen turvenäytteet kuivattiin ja kosteussuhde määritettiin gravimetrimenetelmällä. Tässä tutkimuksessa turpeen kosteussuhde kahta pintaturvenäytettä ($w = 310 \%$) lukuun ottamatta vaihteli 727...1399 % (87,9...93,3 %) keskiarvon ollessa 1009 % ($s = 90,9 \%$). Arvot ovat korkeat verrattaessa niitä Kor-

hosen & Helenelundin (1963) keskimääräiseen vaihtelualueeseen 500...1100 % (83,3...91,7 %). Sen sijaan verrattaessa arvoja Heikuraisen (1960) luonnontilaisen turpeen kosteuden vaihtelurajoihin 90...95 % tämän tutkimuksen turpeita voidaan pitää kuivina.

3. Tulokset

31. Painumaprosentti

Varsinkin alhaisille kuormitusportaille tutkimuksessa saadut painumaprocentit ovat korkeammat kuin Karesniemen (1972) ja Vilpon (1975) ödometrikokeissa (kuva 4). Karesniemen tulokset on laskettu liitteessä esitetyllä tavalla määritettyä turpeista. Suuremmillakin kuormituksilla Karesniemen mittaamat painumat ovat alhaisempia, mutta sen sijaan tämän tutkimuksen ja Vilpon tulokset ovat samansuuruiset.

Painumaprocentin suuruuteen voimakkaimmin vaikuttava tekijä oli kuormitus, joka yksinään selitti yli 90 % painumasta (malli (2)). Valikoivalla askeltavalla regressioanalyysillä saatuun parhaaseen malliin tuli kuormituksen jälkeen kuivatuoretiheys ja melkein merkitsevä maatumisaste. Selityssasteeltaan saman arvoinen oli malli, jossa kuivatuoretiheys korvattiin kosteussuhteella. Parhaat mallit olivat seuraavat:

$$\begin{aligned} s &= -19,62 + 16,24 \ln p & R^2 &= 90,9 \% & (2) \\ s &= -6,917 + 16,24 \ln p - 0,131 d & R^2 &= 93,7 \% & (3) \\ s &= -27,76 + 16,24 \ln p + 0,0088 w & R^2 &= 93,4 \% & (4) \\ s &= -63,09 + 16,24 \ln p + 6,92 \ln w - 0,65H & R^2 &= 94,5 \% & (5) \end{aligned}$$

joissa
 s = painumaprocentti, suhteellinen painuma, %
 p = kuormitus, kN/m^2
 d = kuiva-tuoretiheys, kg/m^3
 w = kosteussuhde, %
 H = maatumisaste

Yleisessä muodossaan painumaprocentti voidaan esittää yhtälönä $y = a + b \ln p$. Tässä tutkimuksessa näytteittäin a :n arvot vaihtelivat -5,00...-28,62, $\bar{x} = -19,62$ ja b :n arvot vaihtelivat 13,26...17,77, $\bar{x} = 16,24$. B :n arvo vastaa puolilogaritmisella asteikolla painumaprocentin kuvaajan kulmakerrointa, a taas x -akselin leikkauskohtaa. Voitiin todeta, että kerroin b riippui kosteussuhteesta ($r = 0,665^{**}$), mutta sen sijaan a näytti voimakkaimmin korreloituvan maatumis-

asteen kanssa ($r = -0,336$ NS), vaikka korrelaatio ei ole merkitsevä.

Parametrejä voidaan estimoida seuraavilla arvoilla

$$\begin{aligned} a &= -0,85H - 16,35 & (6) \\ b &= 0,00458w + 12,0 & (7) \end{aligned}$$

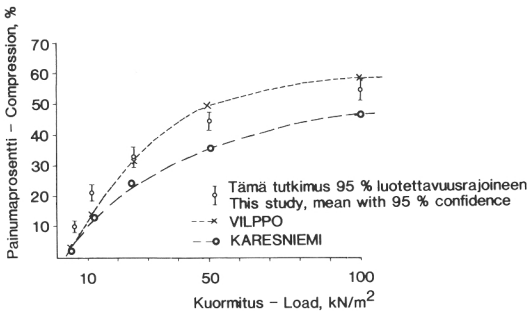
joissa
 a ja b = yhtälön $s = a + b \ln p$ kertoimet
 w = turpeen kosteussuhde, %
 H = on maatumisaste

32. Kokoonpuristuvuusmoduuli

Kokoonpuristuvuusmoduuli (M) määritellään seuraavasti (esim. Helenelund 1974)

$$s = \frac{p \times h_0}{M} \tag{8}$$

joissa
 s = kerroksen kokoonpuristuminen (painuma), m
 p = kuormitus, kN/m^2
 h_0 = kerroksen alkuperäinen paksuus, m
 M = kokoonpuristuvuusmoduuli, kN/m^2



Kuva 4. Keskimääräinen painumaprocentti verrattuna Karesniemen (1972) ja Vilpon (1975) tuloksiin.
Fig. 4. Relative compression compared with results of Karesniemi (1972) and Vilpo (1975).

Taulukko 2. Kokoonpuristuvuusmoduuli eri tutkijoiden mukaan.
Table 2. Modulus of compression after different authors.

Tutkija — Author	Kuormitus — Load, kN/m ²				
	6,25	12,5	25,0	50,0	100,0
	Kokoonpuristuvuusmoduuli — M-modulus, kN/m ²				
Tämä tutkimus, mitattu <i>This study, measured</i>	64,5	58,7	75,1	118,8	184,2
Tämä tutkimus, laskettu <i>This study, calculated</i>	55,4	55,4	73,6	111,0	177,6
Vilppo (1975)	206,7	105,6	84,8	110,4	172,4
Karesniemi (1972)					
märkä — wet	—	94,5	101,9	139,5	212,0
kuiva — dry	—	147,1	137,5	179,2	265,9
TVH (1977)	—	—	77,0	106,0	182,0
Largin ym. (1972)	75,4	82,9	97,8	127,5	187,0
Tkačenko (1972)					
a) eq. (9)	—	—	—	126,3	—
b) eq. (10)	—	—	—	134,3	—

Koska kuormitus-kokoonpuristuvuuskuvaaja on yleensä epälineaarinen (vrt. kuva 4), ei kokoonpuristuvuusmoduulin arvo ole vakio, vaan kuormitusalueesta riippuva suure. Yleensä se määrätään jollekin kuormitusalueelle, jolla kuormituksen aiheuttama muodonmuutos oletetaan lineaariseksi.

Saatuja kokoonpuristuvuusmoduuleita verrataan eri tutkijoiden antamista tuloksista laskettuihin arvoihin (taulukko 2). Vilppo (1975) tutki Tampereen lähellä olevaa 4 m syvää suota, ja kokoonpuristuvuusmoduuli on laskettu yhden kairauspisteen eri syvyyksien näytteiden keskiarvoina. Vilpon aineistossa ei syvyyden voida todeta suoranaisesti vaikuttavan kokoonpuristuvuusmoduulin arvoon, vaan erot johtuvat turpeen ominaisuuksien vaihteluista.

Karesniemi (1972) tutki luonnontilaisten (määrät) ja 15 vuotta ojitettuina olleiden (kuivat) soiden turpeen kokoonpuristuvuutta maatumisasteittain. Aineisto on laaja, sillä ödometrikokeita on 419 kpl. Taulukossa 2 ilmoitettu kokoonpuristuvuusmoduuli on laskettu liitteessä selostetulla tavalla. TVH:n arvot perustuvat TVH:ssa (1977) laaditusta nomogrammist laskettuihin arvoihin. Tkačenko (1972a,b) antaa kokoonpuristuvuusmoduulin laskemiseksi seuraavat mallit

$$M = \frac{980}{1,80 + 0,0059w} \quad (9)$$

ja

$$M = 3,92R^{0,77} + \frac{677}{1,80 + 0,0059w} \quad (10)$$

joissa

M = kokoonpuristuvuusmoduuli, kN/m²

w = kosteusuhde, %

R = maatumisprosentti, %.

Em. moduulit vastaavat n. 50 kN/m² kuormitus-
aluetta.

Edellä mainittu kuormituksen vaikutus kokoonpuristuvuuteen on otettu huomioon Largin ym. (1972) esittämässä mallissa

$$M = E_0 + \frac{p}{\lambda} \quad (11)$$

jossa

M = kokoonpuristuvuusmoduuli, kN/m²

E₀ = kokoonpuristuvuuden alkumoduuli, kN/m²

p = normaaliännitys, kN/m²

λ = turpeen ominaisuuksia kuvaava vakio

Taulukossa 2 annetut eri tutkijoiden vertailutulokset on laskettu käyttämällä tämän tutkimuksen keskimääräistä kosteussuhdetta (w = 1010) ja maatuneisuutta (H = 5, R = 25). Tämän tutkimuksen "laskettu arvo" on saatu mallilla (4), jolloin painumaprocentti on muunnettu kokoonpuristuvuusmoduuliksi.

Koska kokoonpuristuvuusmoduulin arvo voidaan laskea suoraan suhteellisen kokoonpuristumisen avulla, ei kokoonpuristuvuusmoduulin riippuvuutta turpeen ominaisuuksista laskettu tarkemmin.

33. Kokoonpuristuvuusindeksi

331. Kokoonpuristuvuusindeksin määrittäminen

Huokosluvulla (e) tarkoitetaan maassa olevan veden ja ilman yhteenlasketun tilavuuden suhdetta kiinteän maa-aineksen tilavuuteen (Korhonen & Helenelund 1963). Turvetta kokoonpuristettaessa kiintoaineksen (turvehiukkasten) tilavuutta voidaan pitää muuttumattomana. Tilavuuden muutos aiheutuu turvehiukkasten puristumisesta lähemmäksi toisiaan, jolloin huokosluku pienenee. Turpeen kokoonpuristuvuutta voidaan täten ilmaista myös kuormitus-huokossuhteen avulla (kuva 5).

Huokosluku voidaan esittää mallilla (12) (Helenelund 1974)

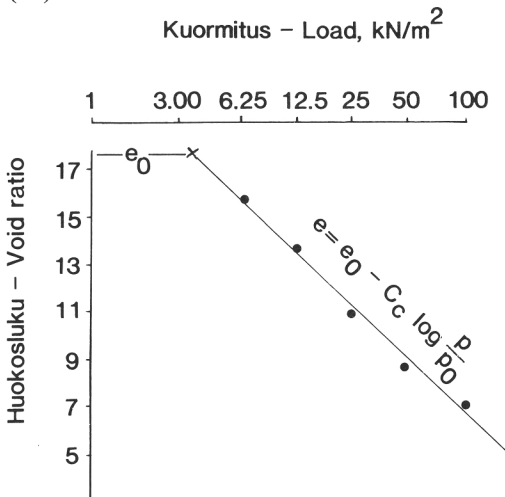
$$e = e_0 - C_c \log \frac{p}{p_0} \quad (12)$$

jossa

- e = huokosluku kuormituksessa p
- e_0 = luonnollinen huokosluku
- C_c = kokoonpuristuvuusindeksi
- p = kuormitus, kN/m^2 ($p_0 + p$)
- p_0 = huokoslukua e_0 vastaava kuormitus (esikuormitus), kN/m^2 .

Kokoonpuristuvuusindeksi C_c on kuormituksesta riippumaton ainevakio eli huokosluku – $\log \times$ kuormituskuvaajan kulmakerroin.

Turvekerroksen kokoonpuristuminen lasketaan kokoonpuristumisindeksin avulla mallilla (13)



Kuva 5. Turpeen huokosluvun riippuvuus kuormituksesta.

Fig. 5. Void ratio vs. load of a peat sample.

$$s = \frac{C_c}{e_0 + 1} \log \frac{p}{p_0} h_0 \quad (13)$$

jossa

- s = painuma, m
- C_c = kokoonpuristuvuusindeksi
- e_0 = luonnollinen huokosluku
- p = kuormitus, kN/m^2
- p_0 = esikuormitus, e_0 vastaava kuormitus, kN/m^2
- h_0 = turvekerroksen paksuus, m.

Kerrointa $\frac{C_c}{e_0 + 1}$ kutsutaan painumissuhteeksi.

Huokosluku määrittiin ödometrikokeen tuloksista eri kuormitusportaille mallilla

$$e_i = \frac{v_i \times y}{g_k} - 1 \quad (14)$$

jossa

- e_i = huokosluku kuormitusportaalla i
- v_i = näytteen tilavuus kuormitusportaalla i , m^3
- y = turpeen aineistiheys, kg/m^3
- g_k = näytteen kuivamassa, kg

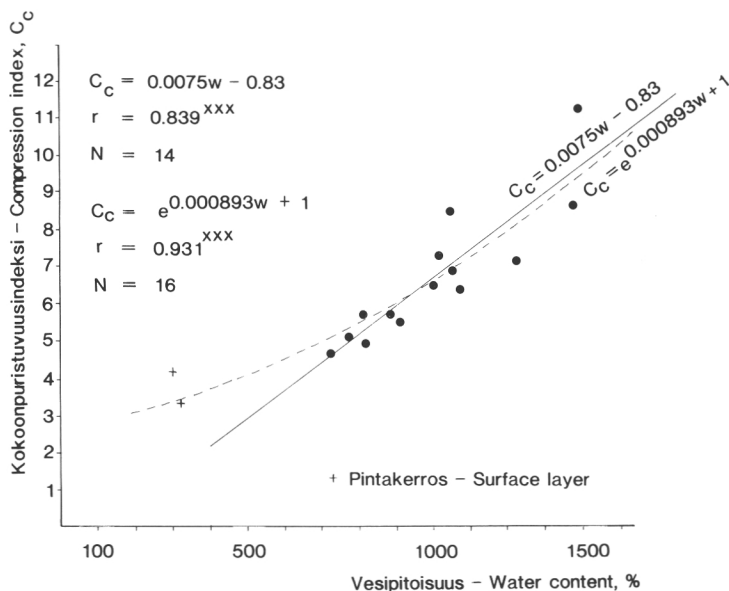
Koska aineistiheyttä ei oltu mitattu, laskelmissa käytettiin arvoa 1500 kg/m^3 . Päiväsen (1969, 1973) tutkimusten mukaan keskimääräinen aineistiheys eri turvelajeille on:

S- eli rahkaturpeet	1400 kg/m^3
C- eli saraturpeet	1350 kg/m^3
L- eli puuturpeet	1390 kg/m^3
Keskimäärin	1380 kg/m^3

Käytetty arvo on näihin nähden korkea. Kuitenkin kirjallisuudessa yleensä esitetyt arvot ovat suurempia, $1300\text{...}1600 \text{ kg/m}^3$ (esim. Päiväsen 1973). Korhosen & Helenelundin (1963) mittauksissa aineistiheys oli $1300\text{...}1800 \text{ kg/m}^3$. Karesniemen (1972) 0 %-tuhkapitoisuutta vastaava aineistiheyden arvo oli 1440 kg/m^3 ja kasvoi tuhkapitoisuuden kasvaessa.

332. Kokoonpuristuvuusindeksin määrittäminen

Ödometrikokeen tuloksista laskettu kokoonpuristuvuusindeksi oli kuormitusvälistä lähes riippumaton (taulukko 3). Keskimääräiseksi kokoonpuristuvuusindeksiksi saatiin 6,1. Korhonen & Helenelund (1963) antavat kokoonpuristuvuusindeksille keskimääräiset raja-arvot 3,3...7,2, joten nyt esillä olevassa tutkimuksessa saadut arvot ovat lähellä asteikon yläpäättä, mutta myös



Kuva 6. Kokoonpuristuvuusindeksin ja vesipitoisuuden välinen riippuvuus.
Fig. 6. Compression index vs. water content.

kosteussuhde oli korkeampi (vrt. luku 3).

Kokoonpuristuvuusindeksin ja kosteussuhteen välille saatiin seuraava riippuvuus

$$C_c = -0,83 + 0,0075w \quad (15a)$$

$$C_c = e^{0,00089w+1} \quad (15b)$$

joissa

C_c = kokoonpuristuvuusindeksi

w = kosteussuhde, %

Mallin (15a) selitysaste oli 80 % ($r = 0,839^{***}$, $N = 14$) ja mallin (15b) selitysaste oli 87 % ($r = 0,931^{***}$, $N = 16$) (kuva 6). Malli (15a) on laskettu jättämällä pois pohjavesipinnan yläpuoliset havainnot jossa osa huokostilasta on ilman täyttämää. Muut näytteet ovat pohjaveden pinnan alapuolisia kerroksista, joten malli (15a) soveltuu pohjaveden pinnan alaisten kerrosten kokoonpuristuvuusindeksin arvioimiseen. Puolilogaritminen malli näyttäisi soveltuvan yleismalliksi.

Macfarlane (1969) esittää kanadalaisten tutkijoiden raporteista tekemänsä yhteenvedon perusteella C_c :n laskemiseksi seuraavan mallin

$$C_c = 0,010w \quad (16)$$

jossa

C_c = kokoonpuristuvuusindeksi

w = kosteussuhde, %.

Taulukko 3. Keskimääräinen kokoonpuristuvuusindeksi C_c kuormitusväleittäin ($N = 16$).

Table 3. Compression index (C_c) at different loadings ($N = 16$).

Kuormitusväli Loading, kN/m ²	Keskiarvo Mean	Hajonta STD	Maksimi Maximum	Minimi Minimum
6,25...12,5	6,26	2,31	10,7	3,3
12,5...25	6,55	2,14	11,3	3,5
25...50	6,25	2,13	11,3	3,3
50...100	5,03	1,50	8,6	3,0
12,5...50	6,39	1,95	11,3	3,4
12,5...100	6,00	1,75	10,4	3,3
6,25...100	6,10	1,85	10,6	3,3

Raja-arvoina Macfarlane antoi C_c :lle $0,0075w > C_c > 0,11w$.

Keene & Zawodniak (1968) totesivat C_c :n arvon $w/100$ vastaavan hyvin mittaustuloksia. Tuhkapitoisuudet Keenen ja Zawodniakin turpeissa olivat korkeampia (30 %:iin asti) kuin suomalaisissa keskimäärin. Keenen ja Zawodniakin mittaamat C_c -arvot olivat 10,3...4,7 ($\bar{x} = 7,6$).

Tässä tutkimuksessa saatu arvo alittaa lievästi Macfarlanen alarajan. Syynä saattaa olla, että suomalaiset turpeet poikkeavat kanadalaisista, tutkitut näytteet poikkeavat tavanomaisista suomalaisista turpeista tai kosteuden määrittäyksissä tai indeksin mittaustavassa on oleellisia eroja

(systemaattisia virheitä).

Koska tutkimuksen aineisto on pieni, ei erojen syitä voida tarkemmin arvioida. Riittää, kun todetaan, että tulokset ovat samaa suuruusluokkaa. Kuitenkin kerroin 0,01 näyttää hiukan suurelta.

Maatuneisuuden tai syvyyden ei todettu vaikuttavan C_c -arvoon. Eroa ei myöskään ollut soiden tai näytesyvyyksien välillä. Näiltä osin aineisto on kuitenkin liian suppea, jotta tuloksia voitaisiin pitää yleistettävänä.

333. Huokosluku

Kokoonpuristuvuusindeksin käyttö painumien arvioinnissa edellyttää luonnontilaisen (luonnollisen) huokosluvun (e_0) tuntemista. Luonnollinen huokosluku on se suhteellinen huokostila, joka turpeella on kuormituksen alkamishetkellä. Koska turpeen aineistiheys ja pohjaveden alaisen kerrosten kaasutilavuus ovat lähes vakioita, voidaan luonnollinen huokosluku arvioida kosteusuhteen perusteella.

Huokosluvun ja vesipitoisuuden välille saatiin seuraava riippuvuus (malli (17)), kun pohjaveden yläpuoliset havainnot jätettiin pois

$$e_0 = -1,17 + 0,017w \quad (17)$$

jossa

e_0 = luonnollinen huokosluku

w = kosteussuhde, %

Saadun mallin selitysaste oli $R^2 = 91$ % ($r = 0,954^{***}$, $N = 14$). Mitattu huokosluku vaihteli 9,8...23,9 keskiarvon ollessa $15,3 \pm 4,0$ ($N = 16$). Karesniemen (1972) mittaamat eri maatumisasteiden keskimääräiset huokosluvut voidaan estimoida mallilla

$$e_0 = \frac{24,6}{H^{0,62}} \quad (18)$$

jossa

e_0 = luonnollinen huokosluku

H = maatumisaste

Karesniemen (1972) saamat huokosluvut ovat oleellisesti alhaisemmat kuin tässä tutkimuksessa. Täten myös kokoonpuristuminen (vrt. kuva 4) on alhaisempi.

Kanadalaisten tutkijoiden yhteenvedosta (Macfarlane 1969, kuva 4.12) voidaan laskea huokosluvun ja vesipitoisuuden väliseksi malliksi

$$e_0 = 2,07 + 0,016w \quad (19)$$

jossa

e_0 = luonnollinen huokosluku

w = kosteussuhde, %

Verrattaessa tässä tutkimuksessa saatua riippuvuutta (malli (17)) kanadalaiseen, voidaan todeta, että malli (19) antaa yli 10 % korkeampia huokosluvun arvoja.

Irwinin (1968) mukaan huokosluku voidaan laskea seuraavasti:

$$e = \frac{w \times y}{100000} \quad (20)$$

jossa

e = huokosluku

w = kosteussuhde, %

y = aineistiheys, kg/m^3

Näin saadut arvot ovat lähellä tässä tutkimuksessa mitattuja.

334. Painumissuhde

Painumissuhteen

$$\frac{C_c}{e_0 + 1}$$

muuttujat C ja e_0 ovat korreloituneita vesipitoisuuden kanssa, kuten edellä ilmeni. Täten myös painumissuhde voidaan ilmaista suoraan riippuvuutena vesipitoisuudesta.

Kombinoimalla mallit (13) ja (17) saadaan painumissuhteelle malli

$$\frac{C_c}{e_0 + 1} = \frac{0,0075w - 0,83}{0,017w - 0,17} \quad (21)$$

Suoraan aineistosta laskettu malli oli

$$\frac{C_c}{e_0 + 1} = 0,00009w + 0,31 \quad (22)$$

jossa

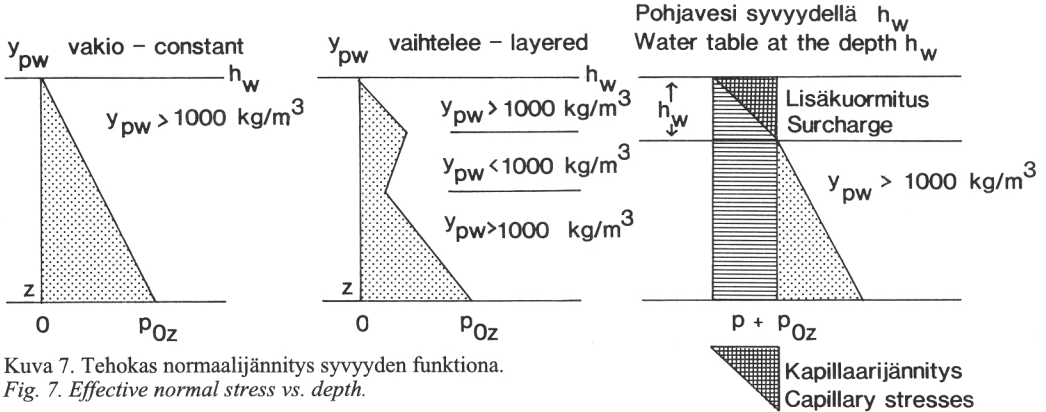
$\frac{C_c}{e_0 + 1}$ = painumissuhde

w = kosteussuhde, %

Yhtälön selitysaste oli 56 % korrelaatiokertoimen ollessa $r = 0,749^{***}$, $N = 15$.

Kanadalaisista tutkimuksista mallit (13) ja (18) kombinoiden saadaan

Pohjavesi pinnassa – Water table at surface



Kuva 7. Tehokas normaalijännitys syvyyden funktiona.
Fig. 7. Effective normal stress vs. depth.

$$\frac{C_c}{e_0 + 1} = \frac{0,010w}{3,07 + 0,016w} \quad (23)$$

Painumissuhde on Korhosen & Helenelundin (1963) mukaan välillä 0,35...0,45, joten malli (22) lieenee parhaiten käyttöön soveltuva (taulukko 4). Kanadalaisista keskiarvoista saadulla mallilla (23) saadaan ehkä liian suuria painumissuhteen arvoja suomalaisiin olosuhteisiin sovellettaviksi. Keenen & Zawodniakin (1968) mittaamat painumasuhteen arvot olivat 0,40...0,55 ($\bar{x} = 0,48$).

335. Esikuormitus

Kokoonpuristuvuusindeksin soveltaminen maastossa esiintyviin painumalaskelmiin edellyttää kokoonpuristuvuusindeksin ja huokosluvun lisäksi myös esikuormituksen (p_0) tuntemista. Esikuormitus on kuormitus, jonka alaisena turve on suossa, ts. kuormitus, jolla turve on luonnossa puristunut e-huokoslukuun.

Geotekniikassa esikuormituksella tarkoitetaan tarkastelusyvyiden yläpuolisten maakerrosten aiheuttamaa tehokasta normaalijännitystä (esim. Korhonen 1961). Mikäli pohjavesi on suon pinnassa tai sen yläpuolella, esikuormitus (tehokas normaalijännitys) voidaan laskea tehokkaan tuoretiheyden ja kuormitusyvyiden perusteella (malli (24)) (kuva 7)

$$p_{0z} = z \times (y_{pw} - y_w) \times 0,0098 \quad (24)$$

jossa

p_{0z} = tehokas normaalijännitys syvyydellä z , kN/m²

z = etäisyys suon pinnasta (= syvyys), m

Taulukko 4. Painumissuhde laskettuna yhtälöillä (21), (22) ja (23).

Table 4. Compression ratio by water content calculated using equations (21), (22) and (23).

Kosteussuhde Water content %	Yhtälö — Equation		
	(21) Painumissuhde — Compression ratio	(22)	(23)
500	0,36	0,35	0,45
750	0,38	0,38	0,50
1000	0,40	0,40	0,52
1250	0,42	0,41	0,54
1500	0,45	0,41	0,55
2000	0,49	0,42	0,57

y_{pw} = turpeen tuoretiheys, kg/m³

y_w = veden tiheys, kg/m³

Turpeen tuoretiheyden tyypillisenä arvona kirjallisuudessa annetaan yleensä $y_{pw} = 1100 \text{ kg/m}^3$ ja veden 1000 kg/m^3 , jolloin tehokas tuoretiheys on vain 100 kg/m^3 . Turpeen tuoretiheys vaihtelee suuresti ja useissa tutkimuksissa tuoretiheys on alle 1000 kg/m^3 , ts. pienempi kuin veden, jolloin turvekerros aiheuttaisi nostetta (kuva 7). Tässä tutkimuksessa ödometrinäytteiden turpeen (pohjaveden alapuolisesta turpeesta) tuoretiheys vaihteli $987...1018 \text{ kg/m}^3$, ts. osa turpeista "kellui". Rummukaisen (1982) tutkimuksessa Suolamminnevan tuoretiheys oli alle 1000 kg/m^3 . Alhainen tuoretiheys saattaa johtua veden poistumisesta näytettä käsiteltäessä jne., mutta varmasti voidaan sanoa, että useissa luonnontilaisissa soissa turve on osittain kelluvassa tilassa. Tästä johtuu, että tehokas normaalijännityksen syvyyden suuntainen lisäys turvekerroksis-

sa on hyvin pieni ($>1 \text{ kN/m}^2$) ja saattaa vaihdella "sahaavasti" eikä kasva säännöllisesti syvempiä kerroksia kohti kuten muissa maalajeissa. Turpeen omasta tehokkaasta tuoretiheydestä aiheutuva esikuormitus on siten verraten vähäinen ja sitä voitaneen pitää lähes syvyydestä riippumattomana.

Mikäli pohjavesi on syvyydellä h_w , kuormitavat pohjaveden yläpuoliset kerrokset alempia tasaisella kuormalla, jonka suuruus on

$$p = h_{wi} \times y_i \quad 0,0098 \quad (25)$$

jossa

p = lisäkuormitus, kN/m^2

h_{wi} = pohjaveden yläpuolisen kerroksen paksuus, m

y_i = pohjaveden yläpuolisen kerroksen tuoretiheys, kg/m^3

Luonnossa kerroksia voi olla useita, esim. turvekerros, kasvipeite (biomassa), lumi jne. Samoin lisäkuormaa syntyy mm. muualta tuoduista pengermassoista (kuva 7).

Pohjaveden yläpuolisten turvekerrosten tuoretiheys on n. 900 kg/m^3 (Helenelund 1974), mutta sen suuruus riippuu suuresti kuivatuksen tehokkuudesta.

Tämän tutkimuksen aineistosta laskettu esikuormituksen arvo oli keskimäärin $3,75 \text{ kN/m}^2$ ja näytti olevan sama eri soilla ja riippumaton syvyydestä. Kuitenkin on huomattava, että suu-

rin näytesyvyys oli vain 1,15 m.

Tulos voitaisiin tulkita siten, että mitattu esikuormitus 3,75 vastaa ns. esikonsolidaatioastetta, ts. turve on jossain vaiheessa ollut edellä mainitun jännityksen alaisena. Tämä on saattanut aiheutua lumikuorman ja pohjaveden ym. vaihtelun synnyttämästä lisäkuormasta tai kuivumisesta ja kostumisesta aiheutuneista koheesiovoimista, jäätymiseen liittyvistä muodonmuutosjännityksistä jne. sekä kapillaarivoimista. Em. esikuormituksen arvo vastaa esim. 40 cm:n pohjaveden korkeutta tai 0,6...1,0 m:n lumikuormaa.

Saarilahden (1978, 1980) tietutkimusaineistossa alle 0,30 m penkereiden painuma oli 0, ts. tämän paksuinen penger ei vielä aiheuttanut havaittavaa painumaa, jolloin p voidaan olettaa olevan kuormitusta suuremman. 0,25 m pengerpaksuutta vastaava esikuormitus on $4,5 \text{ kN/m}^2$.

Esikuormitus ja luonnollinen huokosluku saatavat olla korreloituneita (vrt. Drozd & Burtys 1972). Tämän tutkimuksen aineistossa riippuvuus näytti jokseenkin merkitsevältä. Mallin mukaan riippuvuus olisi

$$p_0 = \frac{65}{e_0^{1,1}} \quad (26)$$

jossa

p_0 = alkukuormitus, kN/m^2

e_0 = luonnollinen huokosluku.

4. Suon kuivatuksesta johtuvan tiealueen painuman arviointi

Kuivatuksesta johtuvaa pinnan alenemista metsäojituksen jälkeen ovat tutkineet mm. Lukkala (1949) ja turvetuotannossa Mikola (1961) ja Lehtimäki (1979). Heikurainen (1957) on tutkinut kuivatuksen aiheuttamaa ojien mataloitumista. Timonen (1971) tutki ojien muodonmuutoksia välittömästi ojituksen jälkeen. Lähestymistapa näissä tutkimuksissa on ollut tilastollinen, ts. suon pinnan keskimääräinen painuma on laskettu joidenkin ulkoisten muuttujien muodostamissa luokissa. Yleisin luokitusperuste on ollut suotyypä.

Seuraavaksi tarkastellaan suon pinnan kuivatuksesta johtuvaa painumaa geoteknistä tarkastelukulmaa hyväksi käyttäen. Tavoitteena on tutkia mahdollisuuksia kehittää laskentamenetelmä tiealueen ojituksen aiheuttaman kuivumisen arvioimiseksi. Tien rakennustulosta arvioitaessa pohjaveden pinnan tasolla on suuri merkitys,

sillä vain riittävän kuiva tien runko on kantava. Painuman suuruuden tunteminen on tarpeen myös tielinjan tasausviivaa määrittäessä.

Tarkastelu suoritetaan teoreettisesti soveltaen tämän tutkimuksen tuloksia eri tutkijoiden raporteista saatua aineistoon.

4.1. Painumalaskelmat geotekniikassa

Painumalaskelma voidaan tehdä joko kokoonpuristuvuusmoduulia tai kokoonpuristuvuusindeksiä käyttäen.

Kokoonpuristuvuusmoduulia käytettäessä turvekerros voidaan ajatella kerrokselliseksi, jolloin kokonaispainuma on (esim. Helenelund 1974, Kankare 1981)

$$s = \frac{\Sigma \Delta p h_0}{M} \quad (27)$$

jossa

s = kokonaispainuma, m
 Δp = kuormituslisäys, joka johtuu pohjaveden pinnan alentamisesta, kN/m²
 h_0 = kokoonpuristuvan kerroksen alkupaksuus, m
 M = kokoonpuristuvuusmoduuli (kerroksessa 1).

Koska kuormittava pinta on leveä, on p :n arvo kaikissa syvyyksissä sama eli pohjaveden pinnan alentamisesta johtuva kuormituslisäys.

Myös kokoonpuristuvuusindeksimenetelmän laskelmat voidaan tehdä kerroksittain. Todetakaan, että Korhosen (1961) mukaan savimaille kehitetty C_c -menetelmä ei sellaisenaan sovellu turpeen kuivatuspainuman arvioimiseen. Keene & Zawodniak (1968) ovat soveltaneet menetelmää turpeelle rakennetun maatyteen painumalaskelmiin hyvin tuloksin.

Kerroksittain painuma lasketaan mallilla

$$s = \Sigma \frac{C_c}{e_0 + 1} \log \frac{\Delta p + p_0}{p_0} \times h_0 \quad (28)$$

s = painuma, m
 C_c = (kerroksen) kokoonpuristuvuusindeksi
 e_0 = (kerroksen) luonnollinen huokosluku
 Δp = kuormituslisäys (kerroksessa)
 p_0 = esikuormitus (kerroksessa)
 h_0 = kerroksen alkupaksuus, m

Kuten I-osassa todettiin, esikuormitus ei ehkä kasvakaan turpeessa säännöllisesti vaan "sahaavasti". Mikäli esikuormitus kasvaisi säännöllisesti (ts. $y > 1000 \text{ kg/m}^3$), painuma pieneneisi syvempiä kerroksia kohti, jolloin suurin painuma olisi pintaosissa. Mikäli p on syvyydestä riippumaton vakio ja turpeen ominaisuudet pysyisivät muuttumattomina, painuminen olisi yhtä suuri kaikissa syvyyksissä. Jos taas p vaihtelisi sahaavasti, painumisen suuruus vaihtelisi kerroksittain.

Kun verrataan kokoonpuristuvuusmoduuliin ja kokoonpuristuvuusindeksiin perustuvia menetelmiä, näyttäisi niillä olevan se periaatteellinen ero, että oletettaessa turvekerros homogeeniseksi (ja $y_w > 1000 \text{ kg/m}^3$), kokoonpuristuvuusmoduulilla painuma saataisiin joka kerroksessa yhtä suureksi ja kokoonpuristuvuusindeksillä pintaosien painuma suuremmaksi kuin syvemmissä kerroksissa. Tämä johtuu siitä, että kokoonpuristuvuusmoduuli määrätään yleensä kuormitusväliä suurempana keskiarvona.

Käyttäjien kannalta kokoonpuristuvuusmoduulin käyttö olisi yksinkertaisempi, sillä tarvittavia riippumattomia muuttujia on vain (Δp :n ja h_0 :n lisäksi) kokoonpuristuvuusmoduuli, joka voidaan estimoida kosteussuhteen ja maatumisasteen perusteella. Kokoonpuristuvuusindeksimenetelmässä sen sijaan edellytetään tunnetuiksi huokosluku ja esikuormitus varsinaisen indeksin lisäksi. Koska painumasuhdetta voidaan estimoida kosteussuhteen perusteella, malli yksinkertaistuu kaksiosaiseksi, joissa ensimmäinen tekijä on painumasuhde ja toinen "kuormitustekijä" on

$$\log \frac{\Delta p + p_0}{p_0} \quad (29)$$

Koska Δp on vakio, "kuormitustekijä" riippuu esikuormituksesta. Tämän tutkimuksen pienen ja turvesyvyyksiltään riittämättömän aineiston perusteella voidaan olettaa, että p_0 on vakio ($3,5 \text{ kN/m}^2$) tai p_0 on vesipitoisuuden funktio.

42. Painumalaskelmien kokeilu kuivatuspainumien arvioimiseksi

Seuraavaksi tarkastellaan kuivatuksen aiheuttaman painuman arvioimista, jolloin testiaineistona käytetään kirjallisuudesta saatuja kenttämitaustuloksia. Tarkastelu on suuntaa-antava, sillä kaikkia tarvittavia tietoja ei ollut saatavissa. Parhaaksi vertailuaineistoksi osoittautui Mikolan (1961) tutkimus, jossa kuivatussyvyys, suon syvyys ja painuma olivat annetut. Lisäksi mukaan otettiin joitakin Lukkalan (1949) tuloksia. Käytetyt laskenta-arvot ilmenevät taulukosta 5.

Laskelmissa ojituksen jälkeisen lisäkuorman suuruus arvioitiin olettamalla pohjaveden yläpuolisen turvekerroksen tuoretiheydeksi 800 kg/m^3 . Tällöin kuormitus on

$$p = 8 \times h_w \quad (30)$$

p = kuormitus, kN/m²
 h_w = pohjaveden etäisyys suon pinnasta (kuivatussyvyys), m

Näin laskettua arvoa käytettiin laskelmissa kuormituksen suuruutena.

Suon keskimääräinen vesipitoisuus arvioitiin suon syvyyden tai suotyypin perusteella laske-malla ensin keskimääräinen leikkauslujuus eri syvyyksille Saari-lahden (1982c) mallilla. Näin saaduista leikkauslujuuksista laskettiin vesipitoisuus niin ikään Saari-lahden (1982c) mallilla.

Taulukko 5. Mallien testauksessa käytetyt Mikolan* (1961) A ja Lukkalan (1949) B tutkimusten painumaprozentit ja lähtöarvot sekä eri malleilla lasketut painumaprozentit.
Table 5. Material after Mikola (1961)* A and Lukkala (1949) B used in tests of eq. (4) and (13) and calculated relative settlement.

Lähde Source	Suon syvyys, m Peat layer, m	Kuivatus- syvyys, m Drainage depth, m	Arvioitu kosteus- suhde, % Estimated water content, %	Mitattu painuma-% Measured relative settlement-%	Laskettu painuma-% Calculated settlement-%	
					eq. (4)	p ₀ = 3,5 eq. (13)
A	2,30	1,75	1178	24	25	29
A	2,73	1,70	1278	27	26	29
A	3,42	2,00	1437	34	30	33
A	3,78	2,20	1520	38	32	35
A	4,25	2,12	1629	40	33	35
A	4,83	2,70	1763	40	38	40
A	5,30	2,05	1871	41	34	36
A	5,80	1,70	1987	46	32	34
A	6,12	2,45	2061	44	39	41
A	6,83	2,15	2225	46	38	39
A	3,60 RiN	1,30**	2200	31	30	30
A	2,80 SR	1,30**	1000	11	19	24
B	0,90	0,95**	855	15	13	19
B	1,50	1,00**	994	22	15	21
B	2,50	1,10**	1225	23	18	23
B	3,30	1,10**	1409	17	20	24
B	2,60 VSR	0,75	1000	13	10	17
B	3,02 R	0,76	1500	19	15	19

* Pohjautuu Karesniemen (1972) aineistoon — Based on Karesniemi (1972)

** Arvioitu — Estimated

Mikäli suotyyppi oli ilmoitettu, laskettiin vesipitoisuus Saarilahden (1982b) suotyyppien keskimääräisiin leikkauslujuuksiin perustuvilla arvioilla. Taulukosta 5 ilmenevät käytetyt kosteussuhteet. Tämän jälkeen testattiin eri malleja käyttämällä taulukon 5 kuivatus- ja suon syvyyden arvoja. Laskettua tulosta verrattiin tutkijoiden esittämiin painumaprosentteihin.

Painumaprosentti laskettiin malleilla (2) ja (4). Lasketun ja mitatun painumaprosentin väliset korrelaatiot olivat seuraavat (y = mitattu painuma, x = laskettu painuma)

Malli (2) $y = 1,56x - 3,16$; $r = 0,842^{***}$; $N = 19$ (31)

Malli (4) $y = 1,20x - 2,00$; $r = 0,922^{***}$; $N = 19$ (32)

Arvioidun kosteussuhteen ja kuivatussyvyyden avulla päästiin lähelle mitattuja painumaprosentin arvoja. Mallilla (4) saadut arvot ovat oleellisesti paremmat kuin pelkästään kuivatussyvyyteen (kuormitukseen) perustuvalla mallilla (2) lasketut tulokset, joten kosteussuhde täytynee ottaa huomioon. Tuoretiheyteen ja kosteusmaatumisasteisiin perustuvia malleja ei kokeiltu, koska em. lähtötietoja ei ollut käytettävissä.

Kokoonpuristuvuusindeksiin perustuvissa

malleissa lähtötietoina tarvitaan kuormituksen lisäksi kokoonpuristuvuusindeksi, luonnollinen huokosluku ja esikuormitus. Tässä yhteydessä kokeiltiin ainoastaan painumasuhteeseen perustuvaa mallia, jolloin suhde laskettiin kosteussuhteen arvioon perustuvana mallilla (21). Tällöin tuntemattomaksi jää esikuormitus.

Kuten luvussa 435 todettiin, turpeen omasta tuoretiheydestä ($9...11 \text{ kN/m}^2$) johtuva turpeen esikuormitus jää pieneksi ja turve saattaa jopa kellua, jolloin kerrokset kuormittavat yläpuolisia kerroksia. Laskelmat suoritettiin olettamalla $p_0 = 3,5$ ja $p = f(w)$ mallin (26) mukaan.

Laskettujen ja mitattujen painumaprosenttien väliset korrelaatiot olivat

$p = 3,5$; $y = 1,44x - 13,24$, $r = 0,918^{***}$; $N = 19$ (33)

$p = \text{eq. (26)}$; $y = 0,83x - 3,0$; $r = 0,936^{***}$; $N = 19$ (34)

Myös kokoonpuristuvuusindeksiin perustuva menetelmä näyttää antavan oikeansuuntaisia painuman estimaatteja, vaikka esikuormituksessa käytettäisiin vakiota $p_0 = 3,5 \text{ kN/m}^2$. Malli näyttää antavan liian suuria estimaatteja pienille painumille, sillä vakion arvo $-13,2$ on iso.

Korkein selitysaste saatiin mallille, jossa p

yrityttiin estimoida huokosluvun (= kosteussuhde) avulla. Malli on myös verraten hyvä, koska kuvaaja kulkee origon läheltä.

Kulmakertoimen arvo 0,83 osoittaa, että malli antaa liian suuria estimaatteja, ts. käytetty p_0 -arvo on liian alhainen. Koska kuitenkin $p_0 = f(w \text{ tai } e_0)$ näyttäisi johtavan oikeimpiin estimaatteihin, laskettiin testiaineistosta kosteusarvoihin parhaiten soveltuvat mallit p_0 :n arvioimiseksi. Malleiksi saatiin

$$p_0 = \frac{37,5}{e_0^{0,75}} \quad (35)$$

ja

$$p_0 = \frac{1058}{w^{0,78}} \quad (36)$$

joissa

p_0 = esikuormitus, kN/m²

e_0 = luonnollinen huokosluku

w = kosteussuhde

Mikäli vesipitoisuuden arviointi on edes suunta-antavasti oikea, niin kuivatuksen aiheuttamaa painumaa voidaan siis arvioida mallilla (29), jolla painumasuhde lasketaan vesipitoisuuden perusteella mallilla (22) ja p_0 mallilla (35) tai (36).

Vaikka edellä suoritetuissa laskelmissa saatiinkin erittäin merkitseviä korrelaatioita mitattujen ja laskennallisten painumien välille, ei niiden perusteella voida tuloksia yleistää siten, että menetelmä soveltuisi kuivatukselta johtuvien painumien arvioimiseen. Turpeen tilavuuden muutokset johtuvat paitsi kuormituksen muutoksen aiheuttamasta konsolidaatiosta myös kuivumisesta johtuvista koheesiovoimien muutoksista. Viimeksi mainittuja ei tutkimuksissa käsitelty lainkaan, vaan niistä johtuva painuma oletetaan pieneksi pääjännityksen muutoksista johtuvaan painumaan verrattuna.

Päiväsen (1982) mukaan (kylästettyjen) turvenäytteiden tilavuuden (dm³) pienenemisen (y) ja näytteestä poistuneen veden määrän (dm³) välillä vallitsee seuraava (keskiarvoinen) riippuvuus:

$$y = 0,41x - 3,7 \quad (37)$$

Olettaen, että ojittamattoman turpeen kosteus on 90 % ja se laskee ojituksessa 85 %:iin, saadaan 1 m³:stä poistuneeksi veden määräksi n. 0,050 m³ (em. laskelma sisältää kutistumisvirheen), josta mallilla saamme tilavuuden pienene-

miseksi n. 0,017 m³. Koska tämä on tilavuuskutistuma, saataisiin yhden tahon (z-akseli eli pystysuora kutistuma) kutistuneeksi pituudeksi 0,994 m. Kuivumisesta aiheutuva painumaprosentti olisi siten vain 0,6 % eli voitaisiin jättää em. tapauksissa huomioonottamatta. Tehokkaan kuivatuksen on todettu aiheuttavan turvemaille jopa kuivatushalkeamia (esim. Pyatt 1973), mutta metsätien pohjan kuivatuksessa tuskin saavutetaan näin tehokasta kuivatusta.

43. Ojan etäisyyden vaikutus painumaan

Tienrakennuksessa laskelmat perustuvat tien keskiviivan painumiin. Ojat kaivetaan yleensä 10 m:n etäisyydelle keskiviivasta, jolloin tielänsän painuma tulisi arvioida ojien kaivussyvyyden perusteella. Pohjaveden pinnan aleneminen riippuu ojan syvyydestä ja etäisyydestä ojaan (esim. Huikari 1959). Lukkalan (1949) tutkimusten mukaan painuman suuruus ojan etäisyyden funktiona noudattaa mallia

$$S_1\% = (-0,17 \sqrt[3]{1 + 1,0}) \times S_{1=0\%} \quad (38)$$

jossa

$S_1\%$ = painumaprosentti etäisyydellä l

l = etäisyys ojaista, m

$S_{1=0\%}$ = painumaprosentti ojan laidalla

44. Pohjaveden pinnan arviointi ojitussyvyyden perusteella

Koska ojat mataloituvat, ei kuivatussyvyys ole ojien kaivussyvyys vaan pienempi. Lukkalan (1949) aineiston mukaan ojien reunojen painumisen perusteella kuivatussyvyys voitaneesti estimoida mallilla

$$\begin{aligned} h_0 < 0,6 \text{ m, } h_w &= h_0 \\ h_0 > 0,6 \text{ m} &\leq 1,20; h_w = 0,7 h_0 \\ h_0 > 1,20 \text{ m; } h_w &= 0,8 \times h_0 \end{aligned} \quad (39)$$

jossa

h_0 = ojan kaivussyvyys, m

h_w = kuivatussyvyys, m

Heikuraisen aineiston (1957) mukaan malli olisi

$$\begin{aligned} h_0 < 0,4 \text{ m, } h_w &= h_0 \\ h_0 \geq 0,4 \text{ m, } h_w &= 0,42 h_0 + 0,21 \end{aligned} \quad (40)$$

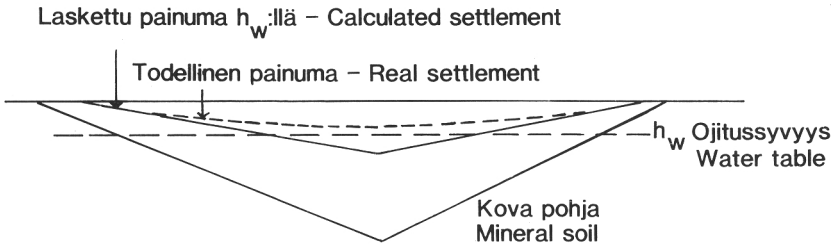
jossa

h_0 = ojan kaivussyvyys, m

h_w = kuivatussyvyys, m

Taulukko 6. Mitattu (Lehtimäki 1979) ja laskettu painuma.
Table 6. Measured (Lehtimäki 1979) and predicted settlement.

Suotyyppi Site	Ojitus Ditching	Arvioitu kosteussuhde, % Estimated water content, %	Mitattu painuma, m Measured settlement, m	Laskettu painuma Predicted settlement	
				Eq. (2) m	Eq. (4) m
SR	OJA	1400	0,28	0,23	0,29
"	KOPO	1400	0,16	0,16	0,24
TR	OJA	1150	0,25	0,20	0,25
RR	OJA	1600	0,27	0,26	0,32
RiN	OJA	2200	0,43	0,34	0,42
"	KOPO	2200	0,20	0,26	0,35
SN	OJA	1400	0,30	0,23	0,29
"	KOPO	1400	0,14	0,16	0,24
LkN	OJA	1800	0,26	0,28	0,35
"	KOPO	1800	0,14	0,21	0,30
RN	OJA	1100	0,29	0,20	0,24



Kuva 8. Ojituksen aiheuttama kuormituslisäys eri syvyyksillä soilla.
Fig. 8. Surcharge due to ditching.

Ojituksen aiheuttamaa kuormituslisäystä arvioitaessa oletetaan, että ojan pohja on kuiva, ts. pohjavesi on suunnilleen ojan pohjan tasossa. Suo on usein maljomainen, ja laskettu painuma suon keskiosissa tulee suuremmaksi kuin kuivavara (kuva 8). Tämäntapaisissa tilanteissa yksinomaan ojitusvyvyyteen perustuva painumalaskelma antaa virheellisiä tuloksia. Kuormitus tulisi siis pyrkiä arvioimaan pohjaveden todellisen korkeuden perusteella tapauksissa, joissa ei saada riittävää kuivatusta laskuojaan.

45. Kuivatusajan huomioonottaminen

Kuivatusajan vaikutuksen arvioimiseksi voidaan käyttää Lukkalan (1949, kuva 19) tuloksista laskettua riippuvuutta ojan painumisen ja painumisajan välillä. Saatu riippuvuus oli

$$c_a = 0,20 \ln(a) + 0,55 \quad (41)$$

jossa

c_a = ojitusikäkerroin

a = ojitusikä, vuotta

46. Tialueen painuman arviointimenetelmän testaus

Edellä hahmoteltua tielinjan painuman laskentamenetelmää testattiin käyttämällä Lehtimäen (1979) mittaamia suotyyppittäisiä keskimääräisiä painumia. Laskentamenetelmä oli seuraava:

Turpeen kosteussuhde arvioitiin Saarilahden (1982a) keskimääräisten leikkauslujuuksien perusteella, ja käytetyt kosteussuhteen arviot ovat taulukossa 6.

Kuivatusvyvyys laskettiin ojitusvyvyydestä mallilla (40). Ojitusvyvyytenä käytettiin sarkaojilla 1,5 m ja KOPO-ojilla 1,0 m. Kuormittavan kerroksen massaksi arvioitiin 800 kg/m³. Painumaprosentti laskettiin mallilla (4). Keskimääräinen sarkaleveys Lehtimäellä oli 20 m ja keskimääräinen pisteen etäisyys ojasta 5,1 m. Tätä käytettiin mallilla (38) ojitusetäisyytenä. Koska ojitus oli nuorta, tuloksiin tehtiin aika-
korjaus. Taulukossa 6 esitetään Lehtimäen mitaamat painumat sekä selostetulla tavalla lasketut painumat. Kun mitattuja arvoja selitettiin lasketuilla, regressioyhtälöksi saatiin

$y = -3,0 + 1,2x$; $r = 0,757^{**}$; $N = 11$.

Erityisesti KOPO-jyrsityille ojille saatiin liian suuria estimaatteja; sen sijaan avo-ojille malli

antoi oikeampia tuloksia.

Näyttäisi siis mahdolliselta kehittää kosteus-suhteen mittaukseen perustuvia painuman laskentamenetelmiä.

5. Tulosten soveltaminen käytäntöön

Koska mineraalimaalajien (erikoisesti hienoja laitteita sisältävien moreenien, joita yleensä metsäautoteillä käytetään) ja myös turpeen kantavuus huononevat vesipitoisuuden kasvaessa, kuivatuksella (pohjaveden pinnan asemalla) on huomattava merkitys tien rakennustulokseen. Tällöin suunnittelun tulisi koskea myös tealueen kuivattamista, jonka oikea arviointi on vaikeaa, ellei painumisesta johtuvia suon pinnan muutoksia oteta huomioon. Metsäojitustutkimuksista saatuja tuloksia voidaan käyttää hyväksi tealueen kuivatuksesta johtuvien painumien estimointiin ja niiden perusteella näyttää mahdolliselta kehittää riittävän tarkkoja malleja tiesuunnittelun apuvälineeksi.

Tutkimuksessa esitetyt tulokset perustuvat pienen empiiriseen aineistoon ja joidenkin tutki-

joiden tulosten perusteella laadittujen mallien kokeiluihin. On selvä, että edellä hahmoteltu menetelmä ei nykyisellään ole riittävän luotettava tai tarkka, vaan sisältää useita virhemahdollisuuksia. Tämä vaatisi lisätutkimuksia, joilla kehitettäisiin luotettava todellisiin kuormituksiin ja turpeen vesipitoisuuteen perustuva käytännön laskentamenetelmä painuman määrittämiseksi.

Uudet tutkimusvälineet helpottavat nimenomaan turpeen vesipitoisuuden mittausta (Ronnell 1980), joten geotekniikkaan perustuvien, kuivatuksen aiheuttamien painumien laskentamenetelmien kehittäminen näyttää mielekkäältä. Tämän suppean pääosin kirjallisuuteen perustuvan tutkimuksen mukaan se näyttäisi myös mahdolliselta.

Kirjallisuus — References

- Drozd, I.A. & Burtys, Ju.F. 1972. Soprotivlenje sdvinu zatorfovannogo ila i sapropelja. Materialy k pervoj vsesojuznoj konferenčii po stroitel'stvu na torfjanuk gruntah. Kalinin. Čast 1. s. 180–185.
- Heikurainen, L. 1957. Metsäojien syvyyden ja pintaleveyden muuttuminen sekä ojien kunnon säilyminen. Summary: Changes in depth and top width of forest ditches and the maintaining of their repair. Acta Forestalia Fennica 65(5). 45 s.
- 1960. Metsäojitus ja sen perusteet. Werner Söderström Oy. Porvoo. 378 s.
- 1979. Peatland classification in Finland and its utilization for forestry. Proceedings of the International Symposium on Classification of Peat and Peatlands. Hyytiälä, Finland, 17–21 September. s. 135–145.
- Helenelund, K.V. 1974. Maanrakennusmekaniikka 137. Otakustantamo. Otaniemi. 277 s.
- Huikari, O. 1959. Metsäojitettujen turvemaiden vesitaloudesta. Deutsches Referat: Über die Wasserhaushalt waldentwässerter Torfböden. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 51(2). 45 s.
- Irwin, R.W. 1968. Soil water characteristics of some Ontario peats. Proceedings of the 3rd International Peat Congress. Quebec, Canada. s. 219–233.
- Kankare, E. 1981. Maa- ja pohjarakennuksen perusteet. Rakennustekniikan opisto. Otapaino, Espoo. 164 s.
- Karesniemi, K. 1972. Dependence of humification degree on certain properties of peat. Proceedings of the 4th International Peat Congress. Otaniemi, Finland 2. s. 273–282.
- Keene, P. & Zawodniak, 1968. Embankment construction on peat utilizing hydraulic fill. Proceedings of the 3rd International Peat Congress. Quebec, Canada. s. 45–50.
- Korhonen, K.-H. 1961. Vesijättöjen kuivattamisesta. Suo 12(1). 11 s.
- & Helenelund, K.V. 1963. Geotekniikka ja pohjarakennus. Teoksessa: Maa- ja vesirakentajan käsikirja. Maa- ja vesirakennusinsinöörien yhdistyksen vuosikirja. Helsinki. Maa- ja vesirakentaja 5. s. 93–162.
- Largin, I.F., Amarjan, L.C., Korolev, A.C. & Ivkina, T.B. 1972. Statističeskii analiz kompressioniyh svojstv torfa pa genetičeskim gruppam. Materialy k pervoj vsesojuznoj konferenčii po stroitel'stvu na torfjanuk gruntah. Kalinin. Čast 1. s. 249–256.
- Lehtimäki, M. 1979. Ojituksen vaikutus suon pinnan painumiseen polttoturvesoilla. Helsingin yliopisto. Suomensäätieteen laitos. Laudaturtyö. 28 s. + liitt.
- Lukkala, O.J. 1949. Soiden turvekerroksen painuminen ojituksen vaikutuksesta. Referat: Über die Setzung des Moortorfes als Folge der Entwässerung. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 37(1). 67 s.
- Macfarlane, I.C. 1969. Engineering characteristics of peat. Teoksessa: Muskeg engineering handbook (Toim. I.C. Macfarlane). University of Toronto Press.

- Canada. s. 78–126.
- Mikola, I. 1961. Suon painumisesta polttoturvesoilla. Summary: On soil settling on fuel bogs. *Suo* 12(1). s. 15–16.
- Pyatt, D.G. 1973. The effects of drainage treatments and tree crops on soil physical properties. Report on forest research for the year ended. March 1973. Forestry Commission, London. s. 62–66.
- Päivänen, J. 1969. The bulk density of peat and its determination. Seloste: Turpeen tilavuuspaino ja sen määrittäminen. *Silva Fennica* 3(9). 19 s.
- 1973. Hydraulic conductivity and water retention in peat soils. Seloste: Turpeen vedenläpäisevyys ja vedenpidätyskyky. *Acta Forestalia Fennica* 129. 70 s.
- 1982. Physical properties of peat samples in relation to shrinkage upon drying. Seloste: Turvenäytteiden fysikaalisten ominaisuuksien suhde kutistumiseen kuivattaessa. *Silva Fennica* 16(3). s. 247–265.
- Rosnell, S. 1980. Suoturpeen ominaisuuksien määrittäminen radiosondilla. Teknillinen Korkeakoulu, Radiolaboratorio. Seminaariesitelmä 12.3.1980. Konekirjoite. Espoo. 21 s.
- Rummukainen, A. 1982. Maaperätutkan soveltuvuus suon ominaisuuksien tutkimiseen. Pro gradu-työ. Helsingin yliopiston metsäteknologian laitos. 89 s. + liitt.
- Saarihahti, M. 1977. Suodatinkankaiden käyttö metsäautotien rakentamisessa turvealustalle. Helsingin yliopiston metsäteknologian laitoksen tiedonantoja 37. 90 s. + liitt.
- 1978. Suon kantavuuden määrittäminen metsätien rakentamista varten. Summary: Determining the bearing capacity of peat soil in forest road planning. Helsingin yliopiston metsäteknologian laitoksen tiedonantoja 37. 90 s. + liitt.
- 1980. Studies on forest road construction on peatland. Proceedings of the 6th International Peat Congress. Duluth, Minnesota. s. 462–468.
- 1982a. Radioaalto menetelmien käyttö turvetuotannon suunnittelussa ja seurannassa. *Turveteollisuus* 2. s. 45–58.
- 1982b. Tutkimuksia radioaalto menetelmien soveltuvuudesta turvemaiden kulkukelpoisuuden arvioimiseen. Summary: Studies on the possibilities of using radar techniques in detecting the trafficability of peatlands. *Acta Forestalia Fennica* 176. 105 s.
- 1982c. Fysikaalisten tutkimusten sovellutuksia turvetutkimuksessa. Helsingin yliopisto, Neuvontaopin ja täydennyskoulutuksen keskus. Monistesarja 2. s. 72–92.
- Timonen, E. 1971. Auraus- ja kaivurioiden koon ja muodon muutoksista. Summary: On the changes of the size and shape of ditches made by plows and tractor diggers. *Silva Fennica* 5(2). s. 70–95.
- Tkačenko, A.A. 1972a. Opređenje koeficienta bokovogo rascinenija i modulja obsei deformacii torfjanogo grunta no rezultatom sbsledsvanij naspej na bolotah. Materialy k pervoj vsesojuznoj konferencii po stroitel'stvu na torfjanuk gruntah. Kalinin. Čast 2. s. 106–107.
- 1972b. Torfjanyje grunty kak os novanija inženeryh svožuženij. Materialy k pervoj vsesojuznoj konferencii po stroitel'stvu na torfjanuk gruntah. Kalinin. Čast 2. s. 123–131.
- TVH 1977. Turvekerroksen kokonaispainuman arviointi. Nomogrammi. Tie- ja vesirakennushallitus. Maa- tutkimustoimisto. Helsinki.
- Vilppo, H. 1975. Maanvahvistuskankaiden vaikutus suon kantavuuteen. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Diplomityö. 90 s. + liitt.

Total of 34 references

Liite. Käytetty menetelmä Karesniemen (1972) mittaamien kokoonpuristuvuusarvojen vertaamiseksi tämän tutkimuksen tuloksiin

Karesniemi (1972) antaa eri maatumisasteita koskevat kokoonpuristuvuudet graafisina. Painuma-% mitattiin kuvasta kullekin maatumisasteluokalle ja kuormitusasteelle, josta regressioanalyysillä laskettiin tasoitusyhtälö erikseen märeille ja kuiville turpeille. Saadut yhtälöt ovat

Kuivat turpeet

$$s\% = \frac{19,4}{H^{0,202}} \ln p - \frac{37,4}{H^{0,204}}$$

Märet turpeet

$$s\% = \frac{21}{H^{0,157}} \ln p - \frac{34,8}{H^{0,136}}$$

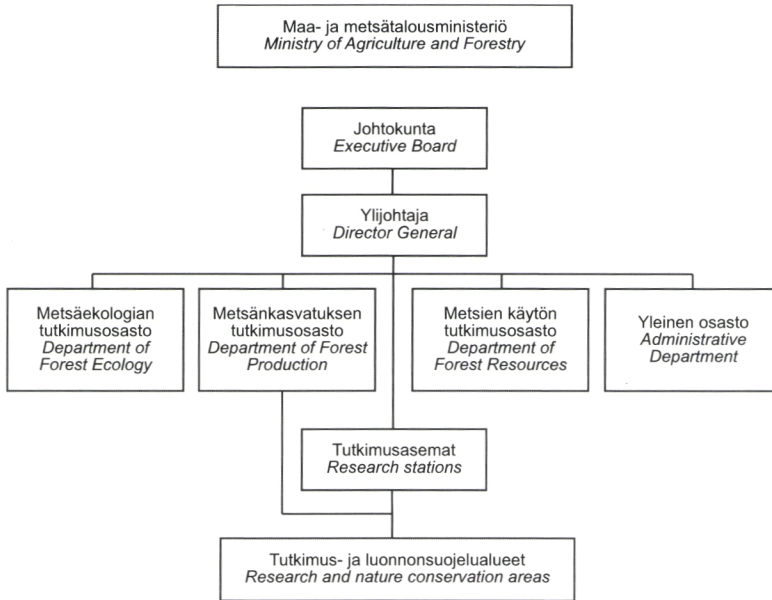
joissa

$s\%$ = painumaprosentti

H = maatumisaste

p = kuormitus, kN/m^2

METSÄNTUTKIMUSLAITOS — *THE FINNISH FOREST RESEARCH INSTITUTE*



Metsäntutkimuslaitos — *The Finnish Forest Research Institute*

Unioninkatu 40 A, SF-00170 Helsinki, Finland

tel. +358-0-857 051, fax +358-0-625 308, telex 121298 metla sf

Ylijohtaja — *Director General*

Eljas Pohtila

Hallintojohtaja — *Administrative Director*

Tero Oksa

Tiedotuspäällikkö — *Head of Information*

Marja Ruutu

Metsäekologian tutkimusosasto — *Department of Forest Ecology*

Tutkimusjohtaja — *Research Director* Eero Paavilainen

Metsänkasvatuksen tutkimusosasto — *Department of Forest Production*

Tutkimusjohtaja — *Research Director* Jari Parviainen

Metsien käytön tutkimusosasto — *Department of Forest Resources*

Tutkimusjohtaja — *Research Director* Risto Seppälä (Aarne Reunala)

Tutkimusasemat — *Research Stations*

Joensuu

Parkano

Kannus

Punkaharju

Kolari

Rovaniemi

Muhos

Suonenjoki



- No 778 Kaunisto, Seppo: Maa-analyysin käyttö kasvupaikan ravinnetilan arvioimiseksi eräillä Alkkian metsitetyillä suopelloilla.
Soil analysis as a means of determining the nutrient regime on some afforested peatland fields at Alkkia.
- No 779 Eeronheimo, Olli: Suometsien puunkorjuu.
Forest harvesting on peatlands.
- No 780 Hytönen, Jyrki & Silfverberg, Klaus: Kuivatustehon vaikutus turvemaan lämpöoloihin.
Effect of drainage on thermal conditions in peat soils.
- No 781 Hökkä, Hannu, Piironen, Marja-Leena & Penttilä, Timo: Lämpimittajakau-
man ennustaminen Weibull-jakaumalla Pohjois-Suomen mänty- ja koivu-
valtaisissa ojitusaluemetsiköissä.
The estimation of basal area-dbh distribution using the Weibull-function for
drained pine- and birch dominated and mixed peatland stands in north
Finland.
- No 782 Niemistö, Pentti. Hieskoivikoiden kasvatustiheys ja harvennusmallit
Pohjois-Suomen turvemilla.
Growing density and thinning models for *Betula pubescens* stands on
peatlands in northern Finland.
- 1992
- No 783 Riihinen, Arto & Uotila, Antti: Versosurman vaikutus varttuneiden männi-
köiden kasvuun.
Effect of Scleroderris canker on the growth of middle-aged Scots pine
stands.
- No 784 Siekkinen, Virpi & Pajuoja, Heikki: Suomen piensahat 1990.
Small sawmills in Finland, 1990.
- No 785 Kinnunen, Kaarlo: Kylvöalustan, ajankohdan ja menetelmän vaikutus
männyn kylvön onnistumiseen.
Effect of substratum, date and method on the post-sowing survival of
Scots pine.
- No 786 Ihalainen, Antti, Korhonen, Kari T. & Varjo, Jari: Puiden käyttöosan
mittauksiin perustuva metsurimittaus.
Estimation of harvested timber volume using treewise measurements
made during felling.
- No 787 Päivinen, Risto, Nousiainen, Merja & Korhonen, Kari T.: Puutunnusten
mittaamisen luotettavuus.
Accuracy of certain tree measurements.
- No 788 Saarilahti, Martti: Turpeen kokoonpuristuvuus ja tiealueen kuivatuspainu-
man arviointi.
Compressibility of peat and estimation of drainage settlement of a road
right-of-way.