

63

*Ari Pöyhönen, Laura
Alakukku, Jukka Ahokas,
Erkki Aura ja Mikko Sampo*

**Traktorista välittyvän
pystysuoran jännityksen
mittaus kynnyksessä ja
sänkimuokatussa
savimaassa**

*Ari Pöyhönen, Laura Alakukku, Jukka Ahokas,
Erkki Aura ja Mikko Sampo*

**Traktorista välittyvän
pystysuoran jännityksen mittaus
kynnetyissä ja sänkimuokatussa
savimaassa**

Maatalouden tutkimuskeskus

ISBN 951-729-551-0

ISSN 1238-9935

Copyright

Maatalouden tutkimuskeskus
Ari Pöyhönen, Laura Alakukku, Jukka Ahokas,
Erkki Aura ja Mikko Sampo

Julkaisija

Maatalouden tutkimuskeskus, 31600 Jokioinen

Jakelu ja myynti

Maatalouden tutkimuskeskus, tietopalveluyksikkö, 31600 Jokioinen
Puh. (03) 4188 2327, telekopio (03) 4188 2339

Painatus

Jyväskylän yliopistopaino 1999

Sisäsivujen painopaperille on myönnetty pohjoismainen joutsenmerkki.
Kansimateriaali on 75-prosenttisesti uusiokuitua.

Pöyhönen, A.¹⁾, Alakukku, L.^{2,3)}, Ahokas, J.⁴⁾, Aura, E.²⁾ & Sampo, M.⁵⁾ 1999. Traktorista välittyvän pystysuoran jännityksen mittausta kynnetyssä ja sänkimuokatussa savimaassa. Maatalouden tutkimuskeskuksen julkaisuja. Sarja A 63. Jokioinen: Maatalouden tutkimuskeskus. 33 p. + 1 app. ISSN 1238-9935, ISBN 951-729-551-0.

¹⁾ Sisä-Savon Seutuyhtymä, Jalkalantie 160, 77600 Suonenjoki

²⁾ Maatalouden tutkimuskeskus, Kasvintuotannon tutkimus, Peltokasvit ja maaperä, 31600 Jokioinen, laura.alakukku@mtt.fi, erkki.aura@mtt.fi

³⁾ Helsingin yliopisto, Maa- ja kotitalousteknologian laitos, PL 27, 00014 Helsingin yliopisto

⁴⁾ Maatalouden tutkimuskeskus, Maatalousteknologian tutkimus, Mittaus ja standardisointi, Vakolantie 55, 03400 Vihti, jukka.ahokas@mtt.fi

⁵⁾ Modulaire Oy, 14201 Turenki

Tiivistelmä

Avainsanat: akselipaino, jännityksen mittausta, maan rakenne, maan tiivistyminen, makrohuokokset, miehittämätön traktori, pintapaine

Tutkimuksessa selvitettiin, millainen jännitys kevyestä, miehittämättömästä Modulaire-tractorista (paino 2,5 Mg, keskimääräinen telasta maahan kohdistuva pintapaine 30 kPa) välittyi maahan ja miten jännitys vaikutti savimaan makrohuokostoon. Verranteena oli keskikokoinen pyörätraktori, joka painoi varustuksesta riippuen 4–5 Mg (60–140 kPa). Tutkimuksen yhteydessä rakennettiin mittauslaitteisto, jolla voitiin mitata koneista maahan välittyvä pystysuora normaalijännitys. Laitteistolla mitattiin kahtena syksynä viiden ajokerran aikana välittynyt jännitys 0,2 m:n syvyydessä. Jännitys mitattiin sekä kynnetyssä että sänkimuokatusta maasta. Samalla mitattiin jännityksen vaikutus aitosavimaan fysikaalisiin ominaisuuksiin.

Tela- ja pyörätraktorin maahan aiheuttama dynaaminen kuormitus oli erilainen. Telatraktorin veto- ja tukipyörien kohdalta maahan välittyi selvät jännityshuiput. Pyörätraktorin alla jännityshuippu saavutettiin pyörän akselin ylittäessä mittauspisteen. Lisäksi telatraktorin yhtäjaksoinen kuormi-

tusaika oli pidempi kuin pyörätraktorin.

Telatraktorista välittynyt suurin jännitys oli mittaustulosten mukaan keskimäärin pienempi kuin pyörätraktorista ilman paripyöriä maahan kohdistunut jännitys. Kun pyörätraktorissa oli paripyörät, maahan kohdistui jännitys, joka oli keskimäärin samaa suuruusluokkaa kuin telatraktorista välittynyt jännitys. Paripyörien alla jännitys kohdistui kuitenkin suurempaan maatalavuuteen kuin telan alla.

Modulaire-tractorin tiivisti maata 0–0,20 metrissä vähemmän kuin keskikokoinen traktori ilman paripyöriä. Paripyörien käyttö lievensi keskikokoisen traktorin aiheuttamaa maan tiivistymistä. Tutkimuksen perusteella todettiin, että jatkotutkimusta tarvitaan seuraavista aiheista: telan kautta maahan välittyvän värinän mittaus ja värinän vaikutus maan tiivistymiseen sekä telan ja erilaisten rengasvarustusten kautta rakenteelliseen maahan välittynyt jännitys ja sen vaikutus pinta- ja pohjamaan makrohuokostoon erilaisissa olosuhteissa.

Alkusanat

Maatalouden tutkimuskeskuksessa (MTT) aloitettiin vuonna 1995 tutkimus, jossa selvitettiin kevyen, miehittämättömän traktorin vaikutusta savimaan rakenteeseen. Monivuotisissa kenttäkokeissa tutkittiin, miten keskikokoisen traktorin korvaaminen muokkauksessa ja kylvössä kevyellä traktorilla vaikutti maan makrohuokostoon ja viljojen satoon kynnettäessä ja siirryttäessä kyntämättä viljelyyn. Monivuotisten kenttäkokeiden lisäksi tutkimuksessa tehtiin erillisiä kenttäkokeita, joissa selvitettiin, millainen kuormitus traktorista välittyi maahan.

Tutkimuksen kuluessa rakennettiin mittauslaitteisto, jolla mitattiin maahan välittyvä pystysuora normaalijännitys. Savi-

maalla sijainneilla kentillä mitattiin maahan välittynyt jännitys kyntökerroksen pohjasta kevyellä ja keskikokoisella traktorilla ajettaessa. Samalla määritettiin jännityksen vaikutus savimaan fysikaalisiin ominaisuuksiin.

Mittauslaitteisto rakennettiin MTT/Vakolan ja Kasvintuotannon tutkimuksen yhteistyönä. Kasvintuotannon tutkimus toteutti kenttäkokeet ja määrittäi maan fysikaaliset ominaisuudet. Modulaire Oy antoi puolestaan tutkimuskäyttöön kehittämässä kevyen traktorin. Tutkimusta rahoitti maa- ja metsätalousministeriö.

Esitämme lämpimät kiitokset kaikille tutkimuksen rahoitukseen ja toteutukseen osallistuneille.

Jokioisilla heinäkuussa 1999

*Ari Pöyhönen
Laura Alakukku
Jukka Abokas
Erkki Aura
Mikko Sampo*

Sisällys

Tiivistelmä	3
Alkusanat	4
1 Johdanto	7
1.1 Koneiden aiheuttama jännitys	7
1.2 Vertikaaliseen jännitykseen vaikuttavat tekijät	8
1.2.1 Maan ominaisuudet	8
1.2.2 Rengaskoko, luisto, ajonopeus ja ajokerrat	8
1.2.3 Pyörän ja telan ero jännityksen välittymisessä maahan	10
1.3 Maassa välittyvän jännityksen mittaust	11
1.4 Tutkimuksen tavoitteet	12
2 Aineisto ja menetelmät	13
2.1 Vertikaalisen normaalijännityksen mittaussysteemi ja sen testaus	13
2.1.1 Mittalaitteisto	13
2.1.2 Antureiden kalibrointi	14
2.1.3 Antureiden asentaminen maahan	14
2.1.4 Mittaustaajuus	16
2.2 Kenttämittaukset	17
2.2.1 Mittauksissa käytetyt traktorit	17
2.2.2 Kenttäkokeet	17
2.2.3 Jännityksen mittaust kenttäkokeissa	18
2.2.4 Maan ominaisuuksien ja ajourien syvyyden mittaust	20
2.2.5 Aineisto ja sen käsittely	20
3 Tulokset	21
3.1 Maan kosteus ajettaessa ja ajourasyvyys	21
3.2 Vertikaalisen normaalijännityksen muoto ja kuormitusaika	22
3.3 Suurin maahan välittynyt jännitys	24
3.4 Jännityksen vaikutus maan ominaisuuksiin	28
3.4.1 Maan mekaaninen vastust	28
3.4.2 Kyllästetyn maan vedenjohtavuus ja makrohuokostot	28
4 Tulosten tarkastelu	29
4.1 Traktoreista maahan välittynyt jännitys	30
4.2 Maan tiivistyminen	31
Kirjallisuus	31

1 Johdanto

Pitkällä aikavälillä pellon tuottokykyä uhkaavat maan tiivistyminen, eroosio ja orgaanisen aineksen kuluminen, jotka ovat maailmanlaajuisia ongelmia. Raskaiden koneiden ja voimakkaan muokkauksen on todettu huonontavan maan rakennetta. Viime vuosikymmeninä maataloustuotanto on tehostunut ja koneiden paino sekä peltotöiden intensiteetti ovat lisääntyneet huomattavasti. Yhteisvaikutuksena pitkäaikaiset tiivistymishaitat lisääntyvät. Maan tiivistyminen on haitallista sekä satotappioiden että ympäristöhaittojen vuoksi.

Modulaire-traktori edustaa uudentyyppistä ratkaisua maan tiivistymisongelmaan. Modulaire Oy:n kehittämä traktori on teltta-alustainen, miehittämätön traktori, jota ohjataan joko kauko-ohjauksella tai autonomisesti (Nieminen et al. 1994). Autonomisessa ohjauksessa traktoria ohjataan tietokoneohjelmalla ja traktorin sijainti määritetään satelliittipaikannuksen avulla. Maatalouden tutkimuskeskuksen (MTT) kenttäkokeissa käytetyn Modulaire-traktorin kokonaispaino on ollut 2,5 Mg ja laskennallinen keskimääräinen pintapaine n. 30 kPa. MTT:ssa tutkitaan Modulairin vaikutusta savimaan rakenteeseen kahdessa kenttäkokeessa (kevät- ja syysviljakoe), jotka on perustettu vuonna 1995 (Alakukku et al. 1999). Modulaire-traktoria verrataan tavalliseen traktoriin (kokonaispaino n. 5,0 Mg ja rengaspaine alle 150 kPa). Kokeissa on kaksi syysmuokkaustapaa: kyntö (0,2 m) ja kultivointi (0,10–0,15 m). Kenttäkokeiden tuloksia täydennetään mittauksilla, joissa selvitetään eri koneratkaisujen vaikutusta maahan kohdistuviin puristus- ja leikkausvoimiin.

Maassa esiintyviä puristus- ja leikkausjännityksiä on mitattu paineantureilla useissa eri maissa (mm. Australia, Hollanti, Saksa, USA). Mittauksissa maahan asennetaan eri syvyyksille paineantureita, joilla mitataan maan jännitystilän vaihtelua ja jännityksen sivusuuntaista jakautumista renkaan kulkiessa antureiden ylitse. Paine-

antureiden käyttö mahdollistaa maan jännitystilojen muutosten suoran mittauksen. Koneiden aiheuttamat maan rakenteen muutokset syntyvät, kun koneista välittyvä jännitys ylittää maan lujuuden. Bailey et al. (1995) mukaan tietämys maan ja renkaan välisistä jännityksistä on oleellista esimerkiksi silloin, kun kehitetään mallia, jolla voidaan ennustaa renkaan aiheuttamaa maan tiivistymistä.

1.1 Koneiden aiheuttama jännitys

Koneista ja laitteista kohdistuu maahan voimia, jotka kuormittavat sitä. Voima kohdistuu usein tietylle pinta-alalle, jolloin jakamalla voima pinta-alalla saadaan jännitys. Jännitys on vektorisuure, jolla on sama yksikkö kuin paineella (kPa). Esimerkiksi keskimääräinen pintapaine voidaan laskea yksinkertaisesti jakamalla pyörän kantama paino pyörän ja maan välisellä kontaktialalla. Pintapaine on myös mitattavissa oleva suure. Sen tarkka mittaaminen on kuitenkin hankalaa, koska maan ominaisuuksista sekä renkaan rakenteesta ja dynamiikasta johtuen paineen jakauma pyörän alla on yleensä epätasainen.

Koneesta välittyvä maassa olevaan mittauspisteeseen jännitys. Jännitys voidaan jakaa kahteen pääkomponenttiin. Kohtisuoraan maan pintaa vastaan vaikuttaa normaalijännitys ja pinnan (tangentin) suuntaan leikkausjännitys. Traktorin paino aiheuttaa normaalijännityksen, joka vaikuttaa maan hiukkasiin ja huokostoon pyörän kohdalla. Leikkausjännitys muodostuu pyörän luistosta (Arvidsson 1997). Kun Koolen et al. (1992) mittasivat maassa leviävää jännitystä, he oletivat 0,30 m:n syvyydestä mitattujen tulosten riippuneen akselikuorman ja pintapaineen yhteisvaikutuksesta. Matalammalla (0,15 m) tulokset tuottivat tietoa pintapaineen jakautumisesta etenkin, jos käytettiin suuria renkaita ja akselipainoja.

Tutkiessaan telatraktorin aiheuttamia jännityksen muutoksia maassa Blunden et al. (1992) havaitsivat telojen välittävän merkittävää värinää maahan. Lisäksi työko-

neet muuttivat jännityksen jakaantumista ratkaisevasti telan etumaisen ja takimaisen vetopyörän suhteen. Käännöksissä, jolloin työkonne oli ylhäällä, jännityksen huipparvo oli noin kolme kertaa suurempi kuin keskimääräinen jännitys (Blunden et al. 1992).

1.2 Vertikaaliseen jännitykseen vaikuttavat tekijät

Maahan kohdistuvan vertikaalisen jännityksen voimakkuuteen ja leviämiseen vaikuttavat sekä maan että kuormittavan koneen ominaisuudet. Jännityksen jakautumista ja siihen vaikuttavia tekijöitä on pyritty ymmärtämään erilaisten mittausten ja mallinnuksen avulla. Esimerkiksi Akkerin (1988) kehittämän SOCOMO-mallin avulla lasketaan renkaan pysty- ja pinnansuuntaisesta kuormasta aiheutuvan jännityksen jakautuminen erilaisissa oloissa. Tiedettäessä jännityksen muodostumisesta ja vaikutuksista maassa voidaan etsiä keinoja, joilla tiivistymisen aiheuttamaa maan rakenteen huonontumista vältetään.

1.2.1 Maan ominaisuudet

Maan ominaisuudet (maalaji, maan rakenne, tilavuuspaino ja kosteus) sekä vaste jännitykseen, eli tiivistyminen ja jatkuvien huokosten rikkoontuminen vaikuttavat maan rakenteen kestävyyyteen sekä jännityksen kulkeutumiseen maassa. Block et al. (1994) mittasivat hietaiseen hiuemaahan ja saviseen hiuemaahan kohdistuvaa vertikaalista jännitystä 0,30 m leveän jäykän pyörän keskilinjalla 0,15 ja 0,30 m:n syvyydessä. Heidän mukaansa savisessa maassa keskimääräinen jännitys oli hieman suurempi kuin karkeassa maassa. Blockin et al. (1994) mukaan maassa ollut muokkausantura ei selkeästi vaikuttanut jännityksen mittautuloksiin. Hietaisella hiuemaalla antura pienensi maassa välittyvää jännitystä, kun anturi oli anturan alapuolella. Savisella hiuemaalla antura ei vaikuttanut jännityksen ja-

kaantumiseen. Antureita maahan asennettaessa on kuitenkin huomioitava mahdollisen muokkausanturan tai tiivistyneen maakerroksen olemassaolo.

Maan kosteus vaikuttaa erittäin merkittävästi maassa välittyvän vertikaalisen jännityksen jakaumaan ja sen aiheuttamaan tiivistymiseen. Kosteassa maassa jännitys kulkeutuu syvemmälle kuin kuivassa (Danfors 1974, Bolling 1986). Larson et al. (1980) tutkivat jännityksen, kosteuden ja tilavuuspainon välisiä vuorovaikutuksia. He totesivat, että maahan kohdistuvan jännityksen lisääntyminen 50 %:lla vaikutti tilavuuspainon suurenemiseen lähes yhtä paljon kuin 4–5 g 100 g⁻¹ lisäys kivennäismaan kosteudessa.

Maan kosteuden tarkka mittaus on edellytys jännityksen mittaustulosten vertailtavuudelle ja luotettavuudelle. Tästä syystä Blunden et al. (1994) kastelivat maan sadettamalla ennen mittauksia halutun kosteustilan saavuttamiseksi (0,30 m:n syvyydessä, vettä 40 g 100 g⁻¹). Sadetuksen jälkeen maakerros vielä muokattiin kosteuden tasaamiseksi.

1.2.2 Rengaskoko, luisto, ajonopeus ja ajokerrat

Viime vuosikymmeninä koneet ovat jatkuvasti suurentuneet ja samalla niiden paino on lisääntynyt. Rengaskuorman vaikutusta maan jännitykseen on verrattu useissa tutkimuksissa. Bailey et al. (1989) mukaan maahan välittynyt jännitys suureni jankon pinnassa sekä pyörän keskellä että pyörän keskeltä 0,38 m sivussa olleessa mittauskohdassa, kun rengaskuormaa suurennettiin. Block et al. (1994) kuormittivat jäykkää pyörää, jonka halkaisija oli 1,37 m kahdella eri kuormalla. Heidän mukaansa kuorman ollessa 11,6 kN maahan välittyi 0,15 ja 0,30 m:n syvyyteen suurempi jännitys kuin ajettaessa 5,8 kN:n kuormalla. Samanlaisia tuloksia saivat Bailey et al. (1988a) ja Arvidsson (1997) maatalousrenkailla.

Rengaskoon suuretsa kontaktiala maahan yleensä kasvaa, mikä pienentää pintapainetta rengaskuorman pysyessä samana. Jännityksen mittaustulokset osoittivat, että jännitys pieni ni muokkaukskerroksessa, kun tietyllä rengaskuormalla ajettaessa käytettiin mahdollisimman suuria renkaita (Lebert et al. 1989). Pohjamaassa erikokoisten renkaiden välinen ero maan jännityksessä pieni ni (Lebert et al. 1989), koska pohjamaan tiivistymiseen vaikutti pääasiassa rengaskuorma (akselipaino). Hornin (1994) mukaan tietty jännitys kulkeutuikin suuren kontaktialan alla syvemmälle kuin pienen kontaktialan alla, kun pintapaine oli sama. Pohjamaan tiivistymisen ehkäisemiseksi yhdelle akselille kohdistuva paino ei saisi ruotsalaisten suositusten mukaan ylittää 6 Mg ja teliakselipaino 8 Mg (Danfors 1974, 1994), vaikka rengaspaine olisikin 50 kPa (Danfors 1994).

Renkaan suurentaminen kuorman pysyessä samana antaa mahdollisuuden pienentää rengaspainetta. Samalla myös keskimääräinen pintapaine yleensä pienenee. Bailey et al. (1991) tulokset osoittivat, että hietamaassa jännityksen huippuarvo pieni ni, kun renkaan ilmanpaine pieni ni. Savi maassa jännitys ei pienentynyt yhtä selvästi kuin hietamaassa. Myös myöhemmissä mittauksissa Bailey et al. (1993) havaitsivat, että rengaspaineen pienentäminen rengaskuorman pysyessä ennallaan piens i maassa levinnyttä jännitystä. He totesivat myös, että rengaspaineen pienentäminen paransi renkaan veto hyötysuhdetta. Näiden syiden perusteella rengaspaine kannattaakin laskea renkaan valmistajan suositamaan minimiarvoon kyseisellä rengaskuormalla ja ajonopeudella.

Rengaspaineen ja pintapaineen välistä riippuvuutta on tarkasteltu monissa tutkimuksissa. Siihen vaikuttavat mm. renkaan rungon jäykkyys ja ajoalustan ominaisuudet. Plackettin (1984) mukaan jäykkärunkoisen maatalousrenkaan pintapaine oli kovalla alustalla suurempi kuin rengaspaine. Burtin et al. (1992) mukaan traktorin vyö renkaan (18.4R-38) keskimääräinen pintapaine oli kovalla alustalla kuitenkin lähes

yhtä suuri kuin rengaspaine. Peltomaa antaa yleensä myöten renkaan alla. Håkanssonin et al. (1988) mukaan keskimääräinen pintapaine ja rengaspaine ovat lähes yhtä suuria, kun joustavan renkaan rivat painuvat maahan. Burt et al. (1992) raportoivat, että vyö renkaan keskimääräinen pintapaine oli sekä pehmeällä että tiivistetyllä maalla ajettaessa pienempi kuin rengaspaine.

Pyörän ja maan välisen pintapaineen jakaumaa kontaktialalla on tutkittu asentamalla renkaan sisälle paineantureita (Burt et al. 1992, Raper et al. 1995). Mittausten perusteella Raper et al. (1995) raportoivat, että rengaspaineen ollessa 41 kPa maahan kohdistuva jännitys oli suuri pyörän (rengas 18.4R-38, kuorma 25,3 kN) reunoilla. Kun rengaspaine oli 124 kPa, jännitys keskittyi pyörän keskilinjan ympärille (Raper et al. 1995). Myös joidenkin matalapainerenkaiden jäykkä runkorakenne vaikuttaa selvästi pintapaineen jakaumaan: renkaan rungon kantaessa merkittävän osan rengaskuormasta renkaan reunojen alle keskittyy keskimääräistä pintapainetta suuremmat painehuiput. Akkerin et al. (1994) mittauksissa matalapainerenkaan ilmanpaine (80 kPa) oli 33 % vakio renkaan ilmanpaineesta. Matalapainerenkaan aiheuttaman jännityksen huippuarvo oli 0,35 m:n syvyydessä kuitenkin 60 % vakio renkaan aiheuttamasta jännityksestä. Hän epäili, että renkaan reunat kantoivat merkittävän osan rengaskuormasta. Epätasaisen pintapaineen jakauman aiheuttamat painehuiput kuormittavat maata selvästi enemmän kuin keskimääräinen pintapaine.

Blockin et al. (1994) mukaan pyörän luisto ei vaikuttanut maahan kohdistuneen normaalijännityksen suuruuteen. Siihen vaikutti pääasiassa dynaaminen eli ajon aikana vallinnut pyöräkuorma. Myös Bailey & Burt (1988) raportoivat, että pyörän luisto (5 tai 20 %) vaikutti suhteessa vähän jännitykseen verrattuna dynaamiseen pyöräkuormaan (23,4 kN) löyhällä hietamaalla ajettaessa. He mittasivat jännitystä pyörän keskilinjan alta traktorin vyö renkaalla (18.4R-38, rengaspaine 110 kPa) ajettaessa. Bailey et al. (1989) mittasivat jännitystä

0,38 m:n etäisyydellä sivusuunnassa pyörän keskilinjalta. Heidän mukaansa pyörän luiston suureneminen lisäsi maahan välittyntä jännitystä ko. mittauskohdassa. Luiston suureneminen ei tässäkään tutkimuksessa vaikuttanut jännitykseen niin paljoa kuin dynaaminen kuorma (Bailey et al. 1989).

Maahan kohdistuvan kuormituksen kesto vaikuttaa jännityksen leviämiseen maassa ja maan tiivistymiseen. Bollingin (1984) sekä Lebertin et al. (1989) mukaan jännitys kulkeutui pitkän kuormitusajan aikana syvemmälle maahan kuin lyhyen kuormitusajan kuluessa. Bolling (1986) totesi myös, että maa tiivistyi enemmän kynthökeroksessa, kun kuormitusaika oli pitkä. Suurimmat ajonopeudet, joita tutkimuksissa käytettiin, olivat 8–12 km h⁻¹.

Monta ajokertaa samassa urassa voi syventää vertikaalisen jännityksen kulkeutumista maassa. Horn (1994) mittasi vertikaalista normaali jännitystä savimaan eri syvyyksissä ajettaessa useita ajokertoja samassa urassa. Ajokertojen määrän lisääntyessä yhdestä kymmeneen jännitys pieneni 0,25 metrissä, koska pintamaan rakenne tiivistyi. Tiivistynyt kerros kantoi maahan kohdistuvaa kuormaa ja oli elastista. Sama suuntaus oli havaittavissa 0,35 metrin syvyydessä toisen ajokerran jälkeen. Pintamaan muuttuessa elastiseksi jännitys suureni 0,45 metrissä ajokertojen lisääntyessä viidestä kymmeneen (Horn 1994). Sommer & Altemüller (1982) totesivat ajokertojen määrän lisääntymisen syventäneen tiivistymää. Mikäli pellolla joudutaan ajamaan paljon raskaalla kalustolla, ajojäljet on keskittettävä samoihin ajouriin. Ajouran kohdalta maa tiivistyy voimakkaasti, mutta samalla minimoidaan raskaasti kuormitettava peltoala.

1.2.3 Pyörän ja telan ero jännityksen välittymisessä maahan

Viime vuosien aikana traktoreiden valmistajat ovat tuoneet markkinoille telatraktoreita. Nykyaikainen kumitela tarjoaa vaihtoehdon maataloustraktorin renkaille. Telan etu pyörään verrattuna on mm. se, että telatraktorin vetovoima on samalla luistolla yleensä suurempi kuin samankokoisen pyörätraktorin (Evans & Gove 1986). Kumitelatraktorilla voidaan ajaa tiellä myös lähes samaa ajonopeutta kuin pyörätraktorillaakin. Marsili & Servadio (1996) vertasivat kumi- ja terästeloja 3,8 Mg painaneessa traktorissa. Heidän mukaansa terästela oli maan rakenteen kannalta parempi kuin kumitela. Metallitelan alla jännitys jakaantui tasaisemmin kuin kumitelan alla. Kumitelan reunat joustivat, jolloin telan keskelle, veto- ja tukipyörien kohdalle, keskittyi painehiippu.

Telan kontaktiala on samalla pintapaineella kapeampi ja pidempi kuin pyörän. Olsenin (1994) laskelmien mukaan keskimääräisen pintapaineen ja kontaktialan ollessa sama jännitys alkoi vähentyä maassa suorakaiteen muotoisen kontaktialan alla hieman lähempänä maan pintaa kuin ympyrän muotoisen alan alla. Kontaktialan muotojen välinen ero jännityksen vähentämisessä tasoittui kuitenkin syvällä maassa. Olsen (1994) laski, että 13,5 Mg:n painoisen telatraktorin, jonka laskennallinen pintapaine oli 40 kPa (tela 0,62 x 2,7 m), alla 10 kPa:n jännitys ulottui 1,5 metrin syvyyteen. Jännitys vaikutti 1,4 m³ suuruiseen maatilavuuteen. Tarvittiin 0,70 m leveät renkaat levikkeineen (leveys 0,70 m, väli 0,1 m), jotta samanpainoisen pyörätraktorin keskimääräinen pintapaine oli 40 kPa. Pyörätraktorin alla 10 kPa:n jännitys ei ulottunut yhtä syvälle kuin telatraktorin alla, mutta se vaikutti 1,7 m³ maatilavuuteen. Jännityksen ulottuminen eri syvyyteen johtui siitä, että pyörätraktorissa paino jakaantui kahdelle erilliselle akselille, joiden välille ei muodostunut jännitysten yhdysvaikutusta.

Evans ja Gove (1986) vertasivat teholtaan yhtäsuurta nelivetoista pyörätraktoria ja telatraktoria. Telatraktorin keskimääräinen pintapaine oli 38 kPa ja pyörätraktorin 83 kPa. He mittasivat traktoreiden työntuottavuuden sekä niiden aiheuttaman maan tiivistymisen. Traktoreiden tuottavuus olisi ollut sama, jos telatraktorin akseliteho olisi ollut 18 % ja paino 19 % pienempi kuin pyörätraktorin. Mittausten mukaan pyörätraktorista välittyneen normaalijännityksen huippuarvo oli tietystä syvyydessä kaksi kertaa niin suuri kuin telatraktorista välittyneen jännityksen arvo. Evansin ja Goven (1986) mukaan molemmat traktorit tiivistivät kuitenkin maata yhtä paljon: maan mekaaninen vastus yhden ajokerran jälkeen oli molempien traktoreiden ajourassa lähes sama. Eräs syy siihen, että traktorit tiivistivät maata yhtä paljon, lienee se, että tela kuormitti maata yhtäjaksoisesti pidempään kuin pyörä. Lisäksi maahan välittyi telan kautta tärinää. Telojen tukipyörästöjen maahan kohdistama tärinä on telakoneiden ominaispiirre, joka vaatii lisätutkimusta (Evans ja Gove 1986, Blunden et al. 1992).

Blunden et al. (1994) mittasivat hiekkaan vertikaalista jännitystä 0,15–0,50 m:n syvyydessä tela- ja pyörätraktorin alla. Telatraktorin keskimääräinen pintapaine oli 58 kPa (paino 15 Mg) ja pyörätraktorin 74–81 kPa (18 Mg, paripyörät edessä ja takana). Telan keskilinjan alla jännityksen huippuarvo oli 0,30 m:n syvyydessä 187 kPa ja pyörän keskilinjan alla 171 kPa (Blunden et al. 1994). Pyörätraktorin alla paineen huippuarvo oli 0,40 m:n syvyydessä 100 kPa ja telatraktorin alla 70 kPa. Vastaavat luvut olivat 0,50 m:n syvyydessä 80 ja 30 kPa. Maan mekaaninen vastus oli 0,10–0,30 metrissä telatraktorin alla suurempi kuin pyörätraktorin alla. Mekaaninen vastus oli 0,40 m:n syvyydessä telatraktorin alla 1,51 MPa ja pyörätraktorin alla 1,48 MPa (Blunden et al. 1994). Maan mekaaninen vastus oli 0,50 metrissä lähes sama molemmissa koejäsenissä. Telan leveys oli 0,62 m ja paripyörien 1,9 m. Telatraktorin etuolikin se, että sen tiivistämä ala oli muokka-

uksen yhteydessä selvästi pienempi (6 %) kuin pyörätraktorin tiivistämä ala (19 %).

1.3 Maassa välittyvän jännityksen mittaus

Maassa esiintyvän normaali- ja leikkausjännityksen mittauksissa käytettäviä paineantureita on hyvin monenlaisia (Horn & Lebert 1994). Blackwell & Soane (1978) käyttivät mittauksissaan nestetäytteisiä kalvoja. Nykyisin tavallisimmin käytetyt paineanturit perustuvat kuitenkin venymäliuska-mittaukseen, jossa venymäliuska on kiinnitetty ohuen kalvon alapintaan. Kalvon jännityksenmuutokseen perustuva mittausmekaniikka on kehittynyt viimeaikoina nopeasti yhdessä muun mittaustekniikan kanssa. Blunden et al. (1994) totesivatkin, että paineantureiden, mittauskortin ja tietokoneen muodostama mittausjärjestelmä tallensi riittävän hyvin ja täsmällisesti liikkuvan maatalouskoneen aiheuttamia nopeita muutoksia maan jännitystilassa. Järjestelmä pystyi mittamaan myös koneesta välittyneen tärinän. Blunden et al. (1994) mittasivat jännitystä ajettaessa tavallisilla pelto-työnopeuksilla (10–11 km h⁻¹).

Maahan välittyvän jännityksen mittauksessa käytettyjen paineantureiden koko vaihtelee paljon. Blunden et al. (1992) käyttivät pyöreää paineanturia, jonka runko oli alumiinia ja halkaisija 23 mm sekä korkeus 8 mm. Paineherkkä kalvo oli halkaisijaltaan 12 mm ja se oli 0,2 mm korkea. Dexter et al. (1988) mittasivat halkaisijaltaan 30 mm:n anturilla, Koolen et al. (1992) halkaisijaltaan 50 mm:n anturilla ja Akker et al. (1994) halkaisijaltaan 76 mm (korkeus 17 mm) anturilla.

Edellä esitetyillä antureilla jännitystä voidaan mitata yhdestä suunnasta kerrallaan. Jännitystilojen mittauksiin on rakennettu myös erilaisia usean paineanturin muodostamia paketteja. Nichols et al. (1987) rakensivat anturipaketin, jonka runkoon oli asennettu kuusi venymäliuska-anturia. Jokainen anturi mittasi siihen suoraan kohdistuvaa jännitystä. Anturit olivat 90

asteen kulmassa toisiinsa nähden (Nichols et al. 1987). Antureiden tuloksista voitiin laskea eri suunnista maahan kohdistunut jännitys sekä siihen kohdistunut kokonaisjännitys. Harris & Bakker (1994) sekä Horn et al. (1996) käyttivät myös anturipakettia, johon oli asennettu kuusi paineanturia. Bailey et al. (1988b) mittasivat jännitystä kahdella anturipaketilla: toisen koko oli 40 mm (yhden painekalvon halkaisija 6,35 mm) ja toisen 60 mm (9,53 mm). Heidän mukaansa jännityksen huippuarvo oli suurempi mitattaessa suurella anturipaketilla kuin pienellä anturipaketilla. Lisäksi suuren anturipaketin mittaustulosten hajonta oli pienempi kuin käytettäessä pientä anturipakettia.

Antureiden rakenteellisia ominaisuuksia on tarkasteltu useissa tutkimuksissa. Weiler & Kulhaway (1982) tarkastelivat itse anturin aiheuttamia mittaustulosten vääristymiä sekä muita mittaustulosten vääristymiin vaikuttavia tekijöitä. Tutkimustensa ja kirjallisuuskatsauksen perusteella he antoivat suosituksia ja ohjeita antureiden rakenteellisille mitoille, kalvon paksuudelle, venymäliuskan sijoitukselle, anturin koolle, rungon materiaalille, kalibrointimenetelmille, korroosion ja veden kestävyydelle sekä lämpötilakompensoinnille.

Mittausalueelle asennetaan yleensä useita antureita. Ne voidaan asentaa esimerkiksi renkaan keskilinjan alle eri syvyyksiin. Tällöin voidaan tarkastella, miten syvälle jännitys maassa kulkeutuu. Akker et al. (1994) mittasivat jännityksen jakaumaa tietyssä syvyydessä. He asensivat viisi anturia rinnakkain samaan syvyyteen. Samalla voitiin tarkastaa mittausten luotettavuus (10 %:n tarkkuudella) vertaamalla reaktiivoimaa ja rengaskuormaa. Reaktiivoima voitiin laskea yhdistämällä antureilla mitattu paineen jakautuminen. Reaktiivoiman tuli olla rengaskuorman suuruinen, jotta mittaukset olivat luotettavia (Akker et al. 1994).

1.4 Tutkimuksen tavoitteet

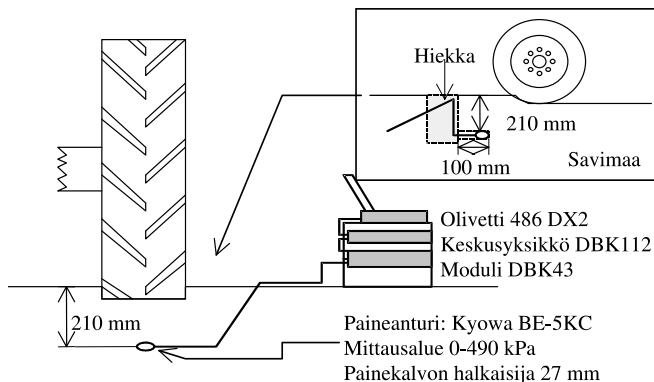
Maatalouskoneiden painon jatkuva suurenneminen lisää tavanomaista perusmuokauskerrosta syvemmälle ulottuvan tiivistymisen riskiä. Tavanomaisen muokauskerroksen alapuolelle ulottuva tiivistymä on yleensä pitkäikäinen. Joissakin tapauksissa se voi olla jopa pysyvä. Pohjamaan rakenne on helppo rikkoa mekaanisesti. Mekaaninen syväkuohkeutus ei ole kuitenkaan yleensä parantanut tiivistyneen pohjamaan rakennetta.

Modulaire Oy on kehittänyt miehittämättömän telatraktorin, joka on kevyt (paino 2,5 Mg) ja jonka laskennallinen pintapaine on pieni (30 kPa). Kun peltotyöt tehdään kevyellä koneella, pohjamaan tiivistymisriski on pienempi kuin painavalla koneella ajettaessa. Vuonna 1995 MTT:ssa perustettiin kaksi kenttäkoetta, joissa tutkittiin kevyen, miehittämättömän telatraktorin vaikutusta savimaan makrohuokostoon ja viljojen kasvuun kynnettäessä ja sänkimuokattaessa peltoa (Alakukku et al. 1999). Kevyttä traktoria käytettiin muokkauksissa ja kylvössä. Verranneruuduissa ko. peltotyöt tehtiin keskikokoisella traktorilla. Tutkimuksen yhteydessä mitattiin erillisissä kenttäkokeissa traktoreista maahan välittynyt vertikaalinen normaalijännitys 0,2 m:n syvyydessä sekä kynnetyssä (0,2 m) että sänkimuokatussa (0,10–0,15 m) maassa. Suomessa ei tiettävästi ole aikaisemmin mitattu vastaavanlaisesti koneista maahan välittyvää jännitystä. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää:

- a) kuinka suuri pystysuora normaalijännitys kevyestä traktorista välittyy maahan
- b) miten traktoreista välittyvä jännitys vaikuttaa maan makrohuokostoon
- c) arvioida tulosten perusteella jännityksen raja-arvoja, joita maa erilaisissa oloissa sietää.

Vuoden 1995 loppupuolella ja alkuvuodesta 1996 MTT:ssa suunniteltiin ja rakennettiin mittauslaitteisto, jolla voitiin mitata ajonaikana koneista maahan välittyvä pystysuora normaalijännitys. Kesällä 1996

Kuva 1. Mittauslaitteisto ja paineantureiden asennus maahan pyörän keskilinjan kohdalle.



mittausmenetelmää kehitettiin edelleen sekä mitattiin koesarjoja pellolla. Tutkimukseen liittyvät mittaukset tehtiin syksyllä 1996 ja 1997. Syksyllä 1997 mitattiin myös jännityksen vaikutusta maan makrohuokostoon. Tässä julkaisussa raportoidaan mittauslaitteiston rakentaminen ja kehittäminen sekä peltomittausten tulokset. Vuonna 1995 perustettujen kenttäkokeiden kolmen ensimmäisen koevuoden tulokset raportoidaan erikseen (Alakukku et al. 1999).

2 Aineisto ja menetelmät

2.1 Vertikaalisen normaalijännityksen mittausjärjestelmä ja sen testaus

2.1.1 Mittalaitteisto

Kuvassa 1 esitetään mittauksissa käytetyn laitteiston rakenne ja teknisiä yksityiskohtia. Maassa esiintyvän vertikaalisen normaalijännityksen mittalaitteistoa koottaessa pyrittiin löytämään toimiva ja joustava laitteistokokonaisuus. Esimerkiksi tiedonkeruulaitteiston tuli toimia kenttäolosuhteissa, sietää häiriötekijöitä ja olla helposti laajennettavissa.

Anturin valinnassa kiinnitettiin huomiota sen ulkoiseen suojaukseen, mittausalueeseen, kokoon ja valmistajan sille esittä-

mään käyttötarkoitukseen. Vaatimusten ja vaihtoehtojen pohjalta päädyttiin KYOWA:n paineanturiin (BE-5KC), joka oli venymäliuska-anturi. Sen halkaisija oli 30 mm ja korkeus 6 mm. Anturi oli suunniteltu maassa esiintyvän paineen mittaukseen.

Peruslaitteisto valittiin IOtech:n DaqBook™ -sarjasta. Keskusyksikössä (Daq Book 112, Kuva 1) oli 16 (SE) analogista kanavaa, joihin voitiin kytkeä erilaisia mittakortteja tai -moduleja tarpeista riippuen. Paineantureille oli kahdeksankanavainen mittausmoduli DBK 43 (Kuva 1). Yksiköt kytkettiin rinnakkaisportin kautta kannettavaan tietokoneeseen, Olivetti 486 DX2 (8 Mt/340 Mt), jolla mittauksia ohjattiin. Erilisten moduleiden valinta perustui laitteiston laajennusmahdollisuuksiin, pienempiin häiriöihin ja tietokoneen muun käytön joustavuuteen verrattuna siihen, että mittakortti olisi asennettu kiinteästi tietokoneeseen. Ulkoista mittalaitteistoa voitiin käyttää kannettavalla tietokoneella, jota oli helpompaa ja kevyempää siirtää pellolla kuin pöytä-tietokonetta. Lisäksi mittalaitteistoa voitiin käyttää toisella tietokoneella laboratoriomittauksissa. Kenttämittauksissa laitteisto toimi 12 voltin akusta saadulla jännitteellä.

Mittalaitteistoa testattiin talvella 1996 laboratoriossa. Antureita asennettiin hietaamalla täytettyyn laatikkoon (0,5 x 0,6 x 0,85 m) useisiin eri syvyyksiin ja mitattiin maan sisällä esiintyvää jännitystä. Näin voitiin arvioida mm. mittauslaitteiston herkkyyttä. Antureiden kalibrointia testattiin

kuormittamalla niitä maassa, ilmassa ja paineastiassa.

2.1.2 Antureiden kalibrointi

Antureiden kalibrointi on luotettavien mittaustulosten perusta. Paineantureiden toimintaa testattiin ja mittalaitteisto kalibroitiin laboratorioissa paineastiassa, jonka painealue oli 0–400 kPa. Jokaisen anturin nol-lakohta säädettiin mittaosmodulin avulla nolllaan, kun astiassa ei ollut ylipainetta. Tämän jälkeen astiaan lisättiin vaiheittain 0–350 kPa ylipainetta ja antureiden vahvistukset ja asteikko säädettiin siten, että mit-tausten tulos oli sama kuin astiassa vaikutanut paine. Antureiden toiminta testattiin suurentamalla ja pienentämällä painetta astiassa useita kertoja peräkkäin. Kalibroinnissa käytettiin 5 Hz:n mittaustaajuutta ja 4 V:n antureiden syöttöjännitettä. Useiden peräkkäisten sekä eri päivinä tehtyjen kalibrointien ja koemittausten tuloksena voitiin todeta, että anturit olivat lineaarisia 2 %:n tarkkuudella 0–300 kPa:n painealueella. Kenttämittausten yhteydessä anturit kalibroitiin paineastiassa päivittäin ennen mittausten aloittamista.

Muissa vastaavissa mittauksissa paineanturi kalibrointiin sekä maassa että ilmassa. Harris & Bakker (1994) kalibroivat anturit paineastiassa, jonka ilmanpainetta voitiin säätää. Anturin ollessa astiassa jokaiselle elementille määritettiin siltajännite, offset ja vahvistus siten, että anturit antoivat samanlaisen lukeman todelliseen ilmanpaineeseen verrattuna. Harris & Bakker (1994) kalibroivat anturit myös maassa. Anturi asennettiin astiaan, jossa oli seulottua maata (2,5 mm). Astia pantiin paineasti-iaan, jossa antureihin kohdistettiin paine. Harris & Bakker (1994) raportoivat, että maan tilavuus tietyn paineen alla ja maala-jin sekä kosteuden yhteisvaikutuksen hal-linta oli hankalaa. Heidän mukaansa maa-han asennettuna jokainen elementti aliarvi-oi paineen, kun maan kosteus oli 31–41 g 100 g⁻¹. Maan kosteuden ollessa 55 g 100 g⁻¹ elementit mittasivat niihin kohdistu-

neen paineen samanalaisesti maassa ja ilmassa. Vertailun perusteella Harris & Bakker (1994) totesivat, että mitattaessa maa-han kohdistuvaa painetta maan kosteuden tuli olla suurempi kuin kriittisen kosteuden. Tällöin anturi ei enää vaikuttanut paineen jakautumiseen maassa. Jos maa oli liian kui-vaa, anturin ”vaikuttava koko” oli suurempi ja mitatut arvot todellisia arvoja pienempiä (Harris & Bakker 1994).

Weilerin & Kulhawyn (1982) mukaan anturi tuli kalibroida juoksevassa aineessa (ilma, vesi, öljy) sekä maassa, jossa sitä käytettiin (maa ”astian” sisälle, johon voitiin kohdistaa paine). Tuloksista laskettiin suhde (korjauskerroin), jonka perusteella ver-rattiin, olivatko mittaustulokset liian pieniä vai suuria todellisuuteen nähden. Weilerin & Kulhawyn (1982) mukaan oli tärkeää huomata, että anturin hystereesi maassa ei johtunut pelkästään anturista vaan myös muuttuneista maan jännitysolosuhteista. Jos maan tiheys anturin ympärillä oli erilai-nen kuin muualla maassa, voi tuloksissa olla virhettä (taskuvaikutus). Ympäröivän maan ollessa liian tiivis mitattiin ylilukemia ja maan ollessa liian löyhää mitattiin alilukemia. Virhe (jopa 10–20 %) oli vaikea ha-vaita ja kontrolloida.

Myös Nichols et al. (1987) kalibroivat anturit paineastiassa sekä maassa että ilmassa. Maakalibroinnissa anturit olivat halkaisijaltaan 130 mm:n muovipussissa, jossa oli seulottua (2 mm) hietaa ja savea. Ilmaka-libroinnissa anturit olivat paljaina paine-kammiossa (Nichols et al. 1987). Maaka-librointi on toteutettavissa, kun jännitystä mitataan tasalaatuistetussa maassa. Kun jännitystä mitataan strukturoidussa eli rakenteellisessa maassa, kalibrointitulokseen vaikuttaa mm. maan rakenteen luontainen heterogeenisuus eli vaihtelevuus.

2.1.3 Antureiden asentaminen maahan

Lähtökohtana antureiden asennuksessa oli, että jännitys mitataan rakenteellisesta pel-tomaasta. Maan rakenne ei saanut häiriin-tyä antureiden asennuksen yhteydessä. Ke-

sällä 1996 mitattiin alustavia koesarjoja pellolla. Niissä vertailtiin antureiden erilaisia asennustapoja. Asennustavat poikkesivat toisistaan lähinnä anturin alla olleen pohjalevyn suuruuden ja materiaalin suhteen. Anturit asennettiin esimerkiksi neliöprofiilin sisälle, joka työnnettiin maahan tehtyyn suorakaiteen muotoiseen reikään renkaiden ajolinjan alle. Tämä asennusmenetelmä hylättiin muutaman koemittauksen jälkeen, koska ajon aikana profiili taipui ja vaikutti mittaustuloksiin. Tämän perusteella asennusprofiilin käytöstä luovuttiin.

Esikokeiden perusteella päädyttiin asentamaan anturit yksittäin suoraan maahan. Antureiden asennus aloitettiin kaivamalla maahan kuoppa, josta tehtiin haluttuun mittaussyvyyteen onkalo anturille (Kuva 1). Anturi asennettiin traktorin ajosuuntaa vastaan pyörän keskilinjalle (Kuva 1) ja vuonna 1997 myös pyörän sivujen alle. Onkalo tehtiin tiukaksi antureille (halkaisija 30 mm, korkeus 6 mm), jotta antureiden ja maan välille muodostui tiivis kontaktipinta jo asennuksen aikana. Kun anturi oli asennettu paikoilleen, onkalo tiivistettiin kostealla savella. Näin anturi pysyi paikoillaan, eikä ympärillä oleva maa murtunut ajon aikana. Asennusta varten kaivettu kuoppa täytettiin hiekalla, jotta sen seinämät eivät sortuneet ajon aikana. Hiekka helpotti myös antureiden poistamista maasta mittausten jälkeen. Asennustapa oli varma ja kohtuullisen helppo. Sitä käytettiin varsinaisissa mittauksissa syksyllä 1996 ja 1997.

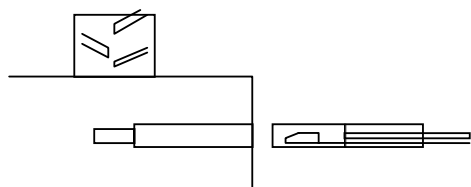
Ulkomaisissa tutkimuksissa antureiden maahan asennuksessa on käytetty erilaisia menetelmiä ja antureiden sijoittelua. Dexter et al. (1988) asensivat anturit hyvin samanlaisesti kuin tässäkin tutkimuksessa. He kaivoivat maahan kuopan, jonka kylkeen kaivettiin anturille sopiva onkalo. Anturi työnnettiin koskemattomaan maahan kaivettuun suorakulmaiseen onkaloon. Tämän jälkeen onkalo täytettiin ja tiivistettiin maalla anturin ja maan välisen kontaktin varmistamiseksi (Dexter et al. 1988). Myös Blunden et al. 1992 käyttivät edellä esitettyä asennustapaa, kun maa oli pehmeää ja märkää. Maan ollessa kovaa ja kuivaa siihen

kaivettiin 0,5 m syvä kuoppa, jonka pohjalle anturit asennettiin. Lopuksi kuoppa täytettiin hienolla maalla ja tiivistettiin (Blunden et al. 1992).

Koolen et al. (1992) kiinnittivät anturit ensin levyn päälle, jotta pyörän uppoaminen ei muuttaisi antureiden asemaa ja asentoa ajon aikana. Levy asetettiin maahan kaivetun kuopan pohjalle. Kuoppa täytettiin ja anturien päälle tullut maa tiivistettiin, jotta antureiden kohdalle ei muodostunut ajouria. Akker et al. (1994) mittasivat jännitystä hiekkamaassa. Mitta-anturien asennusta varten he kaivoivat perusmuokkauskerroksen ja jankon rajapintaan ulottuneen 1,5 m x 1,5 m -kokoisen kuopan. Kuopan pohjalle he asensivat anturit. Sen jälkeen kuoppa täytettiin maalla, joka tiivistettiin alkuperäiseen tilavuuspainoonsa. He mittasivat jännitystä vain hiekkapitoisissa maissa, koska savimaassa anturien asennus muutti merkittävästi maan alkuperäisiä ominaisuuksia (Akker et al. 1994).

Harris & Bakker (1994) asensivat anturit maahan ajolinjan sivulle tehdystä kaivannosta. Antureiden asennussyvyyteen tehtiin vaakasuora ympyränmuotoinen onkalo. Onkalon alkuosaa laajennettiin ja siihen pantiin pleksiputki (Kuva 2). Mitta-anturi työnnettiin putken sisältä onkaloon, minkä jälkeen onkalo täytettiin maalla. Pleksiputkessa anturia ympäröi kostea maa (Kuva 2).

Jännitys jakaantuu yleensä epätasaisesti pyörän alla. Useimmiten anturit asennettiin pyörän keskilinjan ja sen reunan kohdalle (mm. Bailey & Burt 1988, Horn et al. 1989). Jos käytössä oli useita antureita, voitiin mitata myös jännityksen leviämistä



Kuva 2. Anturin asentaminen renkaan alle pleksiputken avulla (Harris & Bakker 1994).

pyörän sivuille. Tällöin antureita asennettiin tietyille etäisyyksille sivusuunnassa pyörän reunasta.

Harris & Bakker (1994) raportoivat, että maan kosteustila vaikutti merkittävästi mitta-anturin ja maan väliseen kontaktiin. Heidän mukaansa anturi oli asennettava maahan, jonka kosteus ylitti kriittisen rajan, jotta maan jännityksen muutos välittyi maasta anturiin. Jos maa oli anturin ympärillä kuivaa, anturi piti asentaa kostean maan sisälle. Paineen mittauksen virhe oli tuolloin pienempi kuin, jos anturi olisi asennettu suoraan kuivaa maata vasten, jolloin sen kontakti maahan ei olisi ollut kunnollinen. Harris & Bakker (1994) asensivat anturit maahan, jonka kosteus oli $55 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$. Tällöin maan kosteus ylitti kriittisen rajan ja tulokset olivat luotettavia (kieritysraja $30 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$, juoksutusraja $76 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$).

Mitta-antureihin vaikuttaa usein asennuksesta johtuva alkujännitys, joka on otettava huomioon mittaustuloksia tarkasteltaessa. Alkujännitys on merkki antureiden maakontaktista. Harris & Bakker (1994) raportoivat, että antureiden tiivis asennus aiheutti 20 % alkujännityksen suhteessa mitattuihin maksimiarvoihin. Joissakin tutkimuksissa alkujännitystä yritettiin vakioida antureiden asennuksen yhteydessä. Bakker et al. (1995) asensivat anturit siten, että alkujännitys oli 10–50 kPa. Blundenin et al. (1992) tutkimuksissa ensimmäisen ajon tarkoituksena oli varmistaa hyvä kontakti maan ja anturin välille, jotta asennuksen aiheuttamat vaihtelut tuloksiin tasoituivat. Varsinaiset mittaukset tehtiin seuraavilla ajokerroilla.

2.1.4 Mittaustaajuus

Mittalaitteisto ja tiedonkeruujärjestelmä on mitoitettava niin, että mittaus voidaan aloittaa hyvissä ajoin ennen pyörän tai telan saapumista antureiden kohdalle. Tällöin mitataan maan jännitystilän lähtötaso. Mittausta jatketaan koneen ohitettua anturin. Näin voidaan ottaa ajon jälkivaikutus huomioon.

Mittaustaajuus ratkaisee yhdessä ajonopeuden kanssa sen, pystytäänkö koneesta maahan välittyvä jännityshuippu rekisteröimään mittaustulotteistolla. Vuonna 1996 normaalijännityksen mittausten ohjauksessa käytettiin Labtech Notebook 8.1 -ohjelmaa. Vuonna 1997 ohjelma vaihdettiin DaqView 4.1:een, koska Notebook pystyi käsittelemään vain 1000 mittausta sekunnissa. Tästä johtuen maksimi mittaustaajuus oli vuonna 1996 250 Hz, kun mitattiin neljällä anturilla yhtä aikaa. Ajonopeus oli $0,86 \text{ m s}^{-1}$ ($3,1 \text{ km h}^{-1}$). Traktori eteni tällöin 3,5 mm kahden mittauksen välisenä aikana. DaqView-ohjelmaa käytettäessä mittaustaajuus ei asettanut rajoituksia. Vuoden 1997 mittauksissa käytettiin 300 Hz:n taajuutta kuudella anturilla mitattaessa. Traktori kulki nyt 3 mm kahden mittauksen välisenä aikana.

Muissa tutkimuksissa mittaustaajuus vaihteli paljon tiedonkeruulaitteiston nopeudesta riippuen. Bailey & Burt (1988) aloittivat tiedonkeruun pyörän ollessa kahden metrin päässä ja jatkoivat mittausta kunnes rengas oli kulkenut metrin päähän anturista. Kolmen metrin matkalta heidän laitteistonsa mittasi maan jännityksen 150 kertaa. Tällöin pyörä eteni kahden mittauksen välillä 20 mm matkan (Bailey & Burt 1988). Way et al. (1993) tallensivat tuloksen aina renkaan edettyä 25 millimetriä. Dexter et al. (1988) ja Horn et al. (1989) käyttivät mittaustaajuutena 10 Hz ajonopeuden ollessa $0,7 \text{ m s}^{-1}$ ($2,5 \text{ km h}^{-1}$). Horn et al. (1989) mittasivat 10 Hz:n taajuudella jopa $2,2 \text{ m s}^{-1}$ ($7,9 \text{ km h}^{-1}$) ajonopeudella, jolloin mittausvälin aikana traktori eteni noin 70 mm. Kun mittausväli oli 20 mm tai suurempi, oli todennäköistä, että jännityshuippu jäi usein mittaamatta.

Laitteiden kehittyessä mittaustaajuutta suurennettiin. Blunden et al. (1994) käyttivät 200 Hz:n taajuutta, kun traktorin ajonopeus oli $2,78 \text{ m s}^{-1}$ (10 km h^{-1}). Tuolloin pyörä eteni 14 mm kahden mittauksen välisenä aikana. Harris & Bakker (1994) mittasivat 250 Hz:n taajuudella ajonopeuden ollessa 1 m s^{-1} ($3,6 \text{ km h}^{-1}$): pyörä kulki mittausvälin aikana 4 mm. Kyseisellä mittaus-

Taulukko 1. Vertikaalisen jännityksen mittauksissa käytetyn keskikokoisen (Valmet) ja kevyen (Modulaire) traktorin tekniset tiedot.

	Valmet 755 (1996)	Valmet 705 (1997) ^{a)}	Modulaire
Moottoriteho (kW)	66	66	43
Paino (Mg)	5,25	3,8 (4,7)	2,5
Taka-akselipaino (Mg)	2,6	2,2 (2,8)	
Etu/takarenkaat, tela	14.9R24 / 16.9R38	380/70R24 / 480/70R34 ^{b)}	2000/320/500 ^{c)}
Etu/takarengaspaine (kPa)	220 / 200	150 / 140 (90 / 90)	
Etu/takarenkaiden pintapaine (kPa) ^{d)}	140 / 100	80 / 70 (60 / 60)	30

^{a)} Suluissa vastaavat arvot paripyörillä

^{b)} Paripyörät edessä 13.6R24 ja takana 16.9R34

^{c)} Telan pituus/leveys/korkeus (mm)

^{d)} Keskimääräinen, laskennallinen pintapaine saatiin jakamalla pyöräkuorma pyörän kontaktialalla kovalla alustalla

järjestelyllä huippupaine tallennettiin tiedonkeruujärjestelmään ilman leikkautumista. Viime vuosina jännityksen mittauksissa on yleisesti siirrytty käyttämään suuria mittaustaajuuksia, mikä varmistaa huippujännitysten tallentumisen. Tavallisesti käytetty mittaustaaajuus on 200–300 Hz (Koolen et al. 1992, Harris & Bakker 1994, Bakker et al. 1995), mikä vastaa tässä tutkimuksessa käytettyä mittaustaajuutta.

2.2 Kenttämittaukset

Mittalaitteiston rakentamisen ja mittausjärjestelmän testaamisen jälkeen mitattiin traktorista maahan välittynyt vertikaalinen normaali-jännitys kenttäkokeissa syksyllä 1996 ja 1997. Jännitys mitattiin sekä kynnetystä että sänkimuokattusta maasta. Kenttäkokeissa mitattiin myös jännityksen vaikutus maan ominaisuuksiin.

2.2.1 Mittauksissa käytetyt traktorit

Jännityksen mittauksissa käytettyjen traktoreiden tekniset tiedot esitetään Taulukossa 1. Samoja traktoreita käytettiin monivuotisissa kenttäkokeissa muokattaessa ja kylvettäessä (Alakukku et al. 1999). Maahan välittyvää jännitystä mitattaessa traktoreissa ei ollut kytkettyä työkoneita.

2.2.2 Kenttäkokeet

Kuvassa 3 esitetään vuoden 1996 kokeen kenttäkokekartta. Mittauksissa käytetty alue oli edellisenä syksynä syysmuokattu kahdella eri tavalla. Osa ruuduista kynnettiin 0,22 m:iin ja osa sänkimuokattiin kultivaattorilla 0,15 m:n syvyyteen (Kuva 3). Molemmista muokkauksesta mitattiin kevyen ja keskikokoisen traktorin (Taulukko 1) aiheuttama jännitys (Kuva 3). Ennen kenttäkoetta koalueella oli viljelty kevätiljoja (1990–92) ja säilörehunurmea (1994). Vuosina 1993 ja 1995 alue oli kesantona (ei muokattu). Koalueen maalaji oli aitosavi, jonka orgaanisen hiilen pitoisuus ja kivennäisaineksen lajitekoostumus on esitetty Taulukossa 2.

Kuivan syyskesän vuoksi koko koalue sadetettiin ennen mittauksia 17.9.–28.9.1996 välisenä aikana, jotta maan kosteus oli lähellä kenttäkapasiteettia. Puolet koalueesta sadetettiin ensin ja toinen puoli seuraavana päivänä. Sama toistettiin viidesti. Kokonaissadetuspäämäärä oli 80 mm. Kosteusolosuhteita tasoitti myös 29.9. alkanut sade. Sateinen kausi kesti useita päiviä. Sen jälkeen pellon pinta oli pitkään niin märkää, ettei mittauksia voitu tehdä. Tästä johtuen vertikaalisen jännityksen mittaukset tehtiin vasta 15.–18.10.1996.

Vuonna 1997 kenttämittaukset tehtiin samana vuonna lopetetun viisivuotisen kenttäkokeen kahdessa ruudussa. Toisessa

Taulukko 3. Kenttäkokeiden koeruutujen kerranteittain (1-5) arvottu ajojärjestys vuonna 1997. V = keskikokoinen traktori ilman paripyöriä, VPP = keskikokoinen traktori paripyörin, M = kevyt traktori.

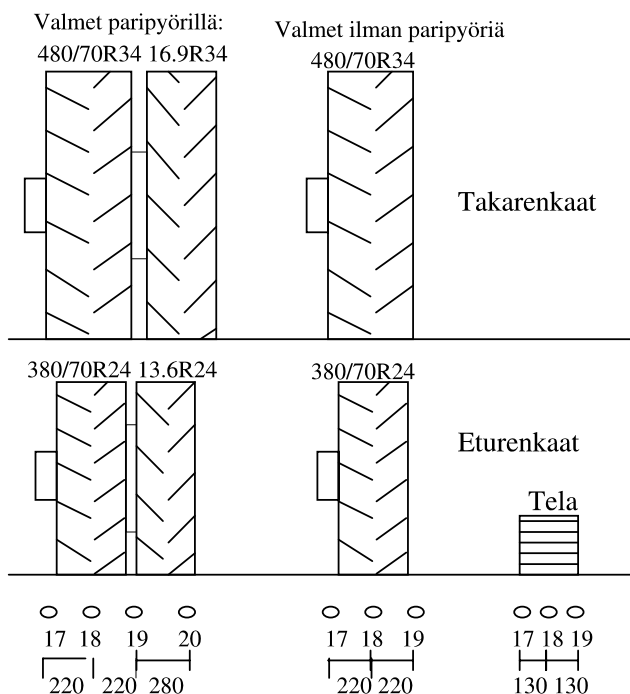
Traktorikoejäsenen ajojärjestys koekentillä kerranteittain															
Perusmuokkaus	1			2			3			4			5		
Kyntö	VPP	V	M	M	V	VPP	V	VPP	M	M	V	VPP	V	VPP	M
Säinkimuokkaus	VPP	V	M	V	VPP	V	V	M	VPP	M	V	VPP	M	VPP	V

tujen antureiden yli (Kuva 1). Ajonopeus oli alhainen, jotta ajo antureiden yli oli mahdollisimman tarkka ja hallittu. Traktoreiden ajonopeudet tarkistettiin etukäteen aika- ja matkamittausten avulla. Vertikaalisen jännityksen mittausta aloitettiin noin 1,5 sekuntia ennen kuin traktorin pyörä tai tela tuli anturin kohdalle. Näin saatiin mitattua anturin alkujännitys. Mittausta jatkettiin n. 1,5 s sen jälkeen, kun pyörä/tela oli ohittanut anturin. Vertikaalinen jännitys pyörän/telan alla mitattiin jokaisessa koeruudussa viiden ajokerran aikana.

Syksyllä 1996 anturit asennettiin kahteen erilliseen asennuskuoppaan. Toisessa kuopassa anturit asennettiin 0,15 ja toiseen 0,22 m:n syvyyteen (etäisyys anturin paine-

herkästä kalvosta maan pintaan). Anturi asennettiin etupyörän/telan keskilinjan kohdalle (Kuva 1). Etupyörän keskilinja oli n. 0,02 m sisempänä kuin takapyörän keskilinja. Vuonna 1997 anturit asennettiin yhteen asennuskuoppaan 0,21 m:n syvyyteen maan pinnasta Kuvassa 4 esitetyllä tavalla.

Kun anturit poistettiin maasta, mitattiin anturin ja maanpinnan välinen etäisyys. Mittauksen perusteella voitiin arvioida, kuinka paljon maa oli tiivistynyt ajon vaikutuksesta anturin yläpuolella ja olivatko anturit painuneet maassa ajon aikana. Käytetyn asennus- ja mittaustarkkuuden (50 mm) rajoissa antureiden ei havaittu painuneen ajon aikana. Antureiden poistamisen



Kuva 4. Antureiden sijainti taka- ja etupyörän sekä telan suhteen vuonna 1997. Anturit asennettiin 0,21 m:n syvyyteen. Antureiden numerointi 17–20 ja etäisyydet viereisestä anturista millimetreinä.

yhteydessä havaittiin myös, että anturien asento ei ollut muuttunut mittausajojen aikana.

2.2.4 Maan ominaisuuksien ja ajourien syvyyden mittaus

Samaan aikaan jännityksen mittauksen kanssa mitattiin maan kosteus tilavuusyksikköä kohti 0–0,15 m:n syvyydessä. Kosteus mitattiin TDR-menetelmällä (Time Domain Reflectometry) TRASE-system I:ä käyttäen (Soilmoisture Equipment Corp.). Kosteus mitattiin jokaisesta ruudusta vuonna 1996 yhdestä ja vuonna 1997 neljästä paikasta läheltä jännityksen mittauskohtaa.

Syksyllä 1996 mitattiin maan mekaaninen vastus ennen traktorilla ajoa ja sen jälkeen 0,5 m:n etäisyydeltä mitta-antureiden asennuskohdasta. Syksyllä 1997 mekaaninen vastus mitattiin vain viiden ajokerran jälkeen. Mekaaninen vastus mitattiin kahden metrin matkalta 0,05 metrin välein. Mittauslinja oli kohtisuorassa ajolinjaa vastaan. Se ulottui ajouran molemmille puolille vähintään 0,4 metriä. Mekaaninen vastus mitattiin syksyn 1996 koealueen ajourista uudelleen keväällä 1997. Mittauksella haluttiin selvittää, muuttuiko mekaaninen vastus ajourissa ajan kuluessa (age hardening). Mekaaninen vastus mitattiin kartio-penetrometrillä. Se mittasi voiman, joka tarvittiin painamaan kartio maahan. Mekaaninen vastus mitattiin 0,025 m:n välein 0,38 m:n syvyyteen asti. Kartion halkaisija oli 12,8 mm ja se painettiin maahan noin $0,03 \text{ m s}^{-1}$ nopeudella. Mekaaninen vastus (MPa) saatiin kertomalla mitattu voima kartion alan huomioivalla kertoimella 0,0762.

Syksyllä 1996 sateiden kastelemasta maasta ei pystytty ottamaan näytteitä. Syksyllä 1997 otettiin viiden ajokerran jälkeen häiriintymättömiä (maan rakenne ei muuttunut näytteen oton yhteydessä) maanäytteitä laboratoriomäärityksiä varten. Näytteet otettiin PVC-putkeen (halkaisija 0,15 m, pituus 0,20 m) traktorisovitteisella kairalla maan ollessa kostea. Jokaisesta ruu-

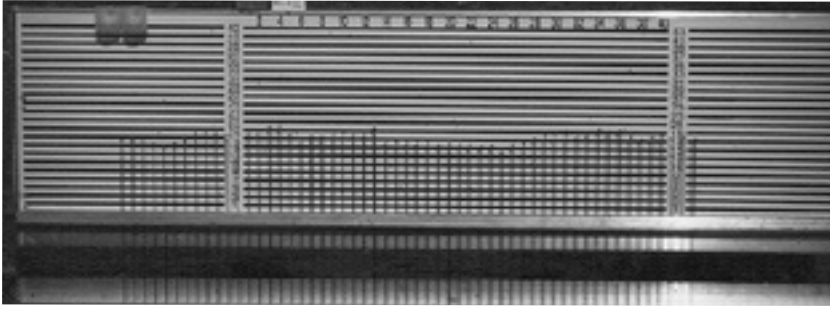
dusta otettiin yksi näyte ajouran keskeltä (paripyörän sisemmän uran keskeltä) mahdollisimman läheltä jännityksen mittauskohtaa. Verrannenäyte otettiin kerranteittain kuormittamattomasta maasta. Laboratoriossa näytteiden alaosan leikkauspinnalta poistettiin tahtaantunut maa veistä ja pölynimuria käyttäen, jotta maan rakenne oli näytteen pohjassa häiriintymätön ja huokokset avoimia. Näytteistä määritettiin kyllästetyn maan vedenjohtavuus (constant head method) ja makrohuokosto (alipainemenetelmällä, halkaisija 300 m, veden potentiaali -1 kPa) Auran (1990) selostamalla tavalla. Tämän jälkeen näytteet pantiin keramiikkalevyille ja määritettiin maan makrohuokosto, jonka halkaisija oli suurempi kuin 30 m, -10 kPa:n potentiaalissa Auran (1990, 1995) kuvaamalla tavalla.

Ajourasyvyydet mitattiin neulareliefillä viidennen ajokerran jälkeen ruuduittain läheltä jännityksen mittauskohtaa. Vuonna 1996 ajouran syvyys mitattiin kahdesta ja vuonna 1997 yhdestä kohdasta. Kentällä reliefi asetettiin ajouran päälle poikkisuuntaan ja siitä otettiin valokuva. Myöhemmin neulojen korkeuksista laskettiin muodostuneen ajouran syvyys. Nollatasona oli ajouraton maan pinta ajouran molemmin puolin. Neulareliefin leveys oli 2 m ja neulojen väli 0,025 m (Kuva 5).

2.2.5 Aineisto ja sen käsittely

Tässä julkaisussa esitetään 0,2 m:n syvyydessä ajouran keskeltä mitatut jännitystulokset. Maahan välittyneen vertikaalisen normaalijännityksen suurin arvo määritettiin jännityskäyrältä. Tulokset esitettiin koejäsenittäin ja ajokerroittain kerranteiden keskiarvona. Jännityskäyrästä laskettiin myös kuormitusajoin jännityksen loppumisajan ja alkamisajan erotuksena. Pyörätraktorilla etu- ja takapyörien kuormitusajoin laskettiin yhteen.

Ajourien syvyys laskettiin urasta mitattujen syvyyksien keskiarvona ruuduittain. Lopulliset keskimääräiset ajourasyvyydet esitettiin koejäsenittäin kerranteiden



Kuva 5. Neulareliefi, jolla ajourien syvyys mitattiin viiden ajokerran jälkeen.

keskiarvona. Maan mekaaninen vastus ajourassa laskettiin ajourasta mitattujen vastuslukemien keskiarvona syvyyksittäin. Kunkin koejäsenen keskimääräinen mekaaninen vastus laskettiin kerranteiden keskiarvona syvyyksittäin. Kuormittamattoman maan mekaaninen vastus laskettiin ruuduittain ajourien ulkopuolelta mitattujen vastuslukemien mediaanina (keskilukuna). Lopullinen kuormittamattoman maan mekaaninen vastus laskettiin ruutulukemien keskiarvona mittaussyvyyksittäin.

Vuonna 1997 määritetty kyllästetyn maan vedenjohtavuus- ja makrohuokostoa-aineisto testattiin tilastollisesti muokkauksittain erikseen. Tulokset testattiin varianssianalyysillä lohkoittain satunnaistetun kokeen mallia käyttäen. Kyllästämättömän

maan vedenjohtavuutta testattaessa käytettiin logaritmuunnosta ($\log(K_{\text{sat}} + 1)$). Mikäli koejäsenten välillä oli tilastollisesti merkitsevä ero ($p < 0,05$), keskiarvojen välinen pienin merkitsevä ero laskettiin Tukeyn HSD -testin mukaan 5 %:n riskitasolla.

3 Tulokset

3.1 Maan kosteus ajettaessa ja ajourasyvyys

Taulukossa 4 esitetään maan kosteus 0–0,15 m:n syvyydessä jännityksen mittauksen yhteydessä. Maan kosteus oli keski-

Taulukko 4. Keskimääräinen maan kosteus 0–0,15 m:n syvyydessä koejäsenittäin ja muokkauksittain jännityksen mittauksen yhteydessä. STDEV = keskihajonta, n = mittausten lukumäärä.

Muokkaus ja traktori		Kosteus ($\text{m}^3 \text{100 m}^{-3}$)	STDEV	n
Vuosi 1996				
Kyntö	Keskikokoinen, ei paripyöriä	38	1	5
	Kevyt, tela	37	5	5
Kultivointi	Keskikokoinen, ei paripyöriä	44	7	6
	Kevyt, tela	44	10	6
Vuosi 1997				
Kyntö	Keskikokoinen, ei paripyöriä	30	3	20
	Keskikokoinen, paripyörät	29	5	20
	Kevyt, tela	30	4	20
Kultivointi	Keskikokoinen, ei paripyöriä	28	2	20
	Keskikokoinen, paripyörät	29	5	20
	Kevyt, tela	28	3	20

Taulukko 5. Keskimääräinen ajourasyvyys koejäsenittäin viiden ajokerran jälkeen vuosina 1996 ja 1997. STDEV = keskihajonta, n = mittauksen lukumäärä.

Muokkaus ja traktori		Ajourasyvyys (cm)	STDEV	n
Vuosi 1996				
Kyntö	Keskikokoinen, ei paripyöriä	6,7	1,0	10
	Kevyt, tela	2,0	0,4	10
Kultivointi	Keskikokoinen, ei paripyöriä	3,8	1,1	12
	Kevyt, tela	1,4	0,5	12
Vuosi 1997				
Kyntö	Keskikokoinen, ei paripyöriä	3,3	0,5	5
	Keskikokoinen, paripyörät	1,4	0,6	5
	Kevyt, tela	2,3	0,4	5
Kultivointi	Keskikokoinen, ei paripyöriä	2,5	0,6	5
	Kevyt, tela	1,1	0,2	5
	Keskikokoinen, paripyörät	2,4	0,9	5

määrin lähes sama kaikissa ruuduissa. Syksyllä 1996 maa oli kosteampaa kuin kenttäkapasiteetissa. Syksyllä 1997 maa oli kuivempaa kuin kenttäkapasiteetissa. Kultivoitu maa oli syksyllä 1997 hieman kuivempaa kuin kynnetty, koska jännityksen mittauksen välillä sade kasteli kynnetyn maan.

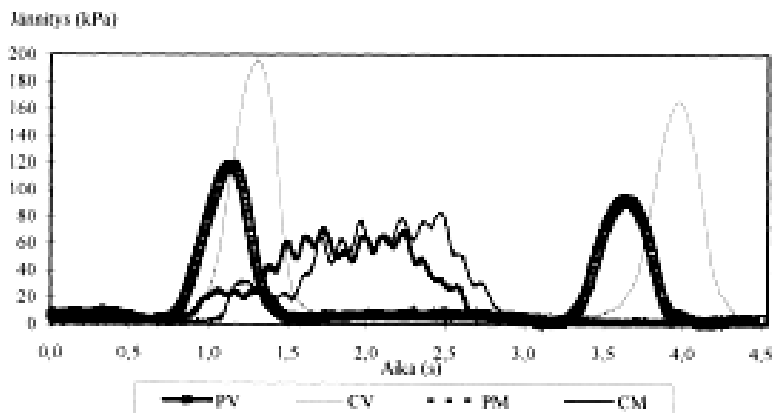
Vuosien välisestä kosteuserosta huolimatta anturien asennus onnistui hyvin molempina vuosina. Maa oli muovailtavaa eikä halkeillut, kun siihen kaivettiin onkalo anturille. Antureiden asennuksen yhteydessä todettiin kuitenkin, että maa ei saanut olla yhtään kuivempaa kuin se syksyllä 1997 oli. Jos maa olisi ollut kuivempaa, se olisi todennäköisesti halkeillut antureiden yläpuolelta tai kaivannon pystysuora reuna olisi lohkeillut. Tällöin anturit eivät olisi olleet kunnolla maassa ja tulosten luotettavuus olisi huonontunut.

Keskimääräiset ajourasyvyudet viiden ajokerran jälkeen esitetään Taulukossa 5. Vuonna 1996 ajourat olivat selvästi syvemmät kynnetyssä maassa kuin sänkimuokatussa (Taulukko 5), vaikka kynnetyt ruudut olivat sänkimuokattuja kuivempia (Taulukko 4). Kynnetyn maan mekaaninen vastus 0–0,10 m:n syvyudessa oli kuitenkin pienempi kuin sänkimuokatun (kappale 3.4.1), mikä todennäköisesti edesauttoi pyörän painumista maahan.

Paripyörällisen keskikokoisen traktorin laskennallinen pintapaine oli vuonna 1997 kaksi-kolme kertaa suurempi kuin kevyen traktorin pintapaine (Taulukko 1). Tästä huolimatta keskimääräinen ajouran syvyys oli paripyörän alla matalampi kuin telan alla (Taulukko 5). Tämä johtui todennäköisesti siitä, että samalla traktorin ajomatkalalla kapea (0,32 m), pitkä tela kuormitti selvästi pienempää maa-alaa kuin leveä (1,0 m), lyhyt paripyörä.

3.2 Vertikaalisen normaalijännityksen muoto ja kuormitusaika

Traktoreiden välillä oli selvä ero maahan välittyneen vertikaalisen normaalijännityksen muodossa (Kuva 6). Telatraktorin alla jännitys jakaantui epätasaisesti ja kuormituksen aikana oli useita peräkkäisiä huippuja. Saman totesivat mittauksissaan myös Wong (1986) sekä Blunden et al. (1992, 1994). Telatraktorin alla jännitys kasvoi telan edetessä ja saavutti maksimi-arvon takimmaisena vetopyörän kohdalla (Kuva 6). Syytä jännityksen kasvuun ajon edetessä ei voitu päätellä aineiston perusteella. Traktorin paino jakaantui lähes tasaisesti koko telan pituudelle. Lisäksi traktori kulki kuormittamattomana mittaustaikana yli, eikä ajon aikana havaittu traktorin etuosan kul-



Kuva 6. Tyypillinen vertikaalisen normaalijännityksen käyrän muoto ajettaessa pyörä- ja telatraktorilla. Ajosuunta on kuvassa vasemmalta oikealle. P = kynnety, C = sänkimuokattu, V = keskikokoinen traktori, M = kevyt traktori.

kevan ylempänä kuin takaosan. Näin tapahtuu usein traktorin vetäessä voimakkaasti.

Pyörätraktorin etu- ja takapyörästä välittyi oma jännityshuippunsa, mikä vastasi mm. Blundenin et al. (1994) sekä Bakkerin et al. (1995) mittaustuloksia. Etupyörien alla jännitys oli yleensä suurempi kuin takapyörien alla (Kuva 6). Ero johtui todennäköisesti renkaiden välisestä pintapaine-

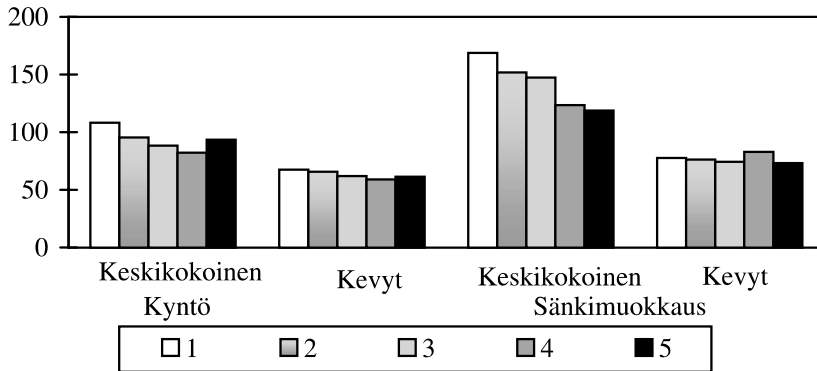
erosta: eturenkaiden alla laskennallinen pintapaine oli suurempi kuin takarenkaiden alla (Taulukko 1).

Vertikaalisen normaalijännityksen mitaustuloksista laskettiin jännityksen kesto-aika (Taulukko 6). Telatraktorin vaikutusaika oli yhtäjaksoinen. Pyörätraktorin etu- ja takapyörät aiheuttivat selvästi erilliset kuormitukset (Kuva 6). Kun pyörätraktorin etu- ja takapyörien vaikutusaika lasket-

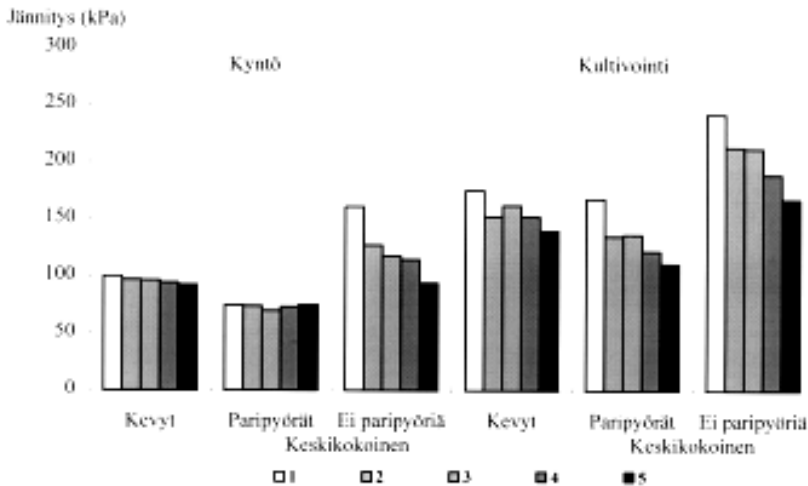
Taulukko 6. Vertikaalisen jännityksen keskimääräinen kesto-aika vuosittain. Pyörätraktorin etu- ja takapyörien vaikutusaika laskettiin yhteen. Lisäksi vuonna 1997 laskettiin yhteen ajot keskikokoisella traktorilla paripyörillä ja ilman. Vuonna 1996 mittaussyvyys oli 0,22 m ja vuonna 1997 0,21 m. STDEV = keskihajonta, n = mittausten lukumäärä.

Muokkaus ja traktori		Jännityksen kesto (s)	STDEV	n
Vuosi 1996				
Kyntö	Keskikokoinen, ei paripyöriä	1,7	0,1	23
	Kevyt, tela	2,0	0,1	24
Kultivointi	Keskikokoinen, ei paripyöriä	1,8	0,1	27
	Kevyt, tela	2,0	0,2	29
Vuosi 1997				
Kyntö	Keskikokoinen, pyörä keskimäärin	1,9	0,2	40
	Kevyt, tela	1,8	0,1	25
Kultivointi	Keskikokoinen, pyörä keskimäärin	2,0	0,3	40
	Kevyt, tela	2,0	0,2	19

Jännitys (ka)



Kuva 7. Traktoreista maahan välittyneen vertikaalisen normaalijännityksen suurin arvo, 0,22 m:n syvyydessä ajokerroittain (1–5) vuonna 1996 kynnyssä (0,22 m) ja sänkimuokatussa (0–0,12 m) maassa.



Kuva 8. Traktoreista maahan välittyneen vertikaalisen normaalijännityksen suurin arvo, 0,21 m:n syvyydessä ajokerroittain (1–5) vuonna 1997 kynnyssä (0,21 m) ja sänkimuokatussa (0–0,12 m) maassa.

tiin yhteen, oli traktoreiden aiheuttaman jännityksen kokonaisvaikutusaika samaa suuruusluokkaa (Taulukko 6). Koejäsenittäin kuormituksen keskimääräinen kestoai-
ka oli lähes sama. Tämän perusteella ajoneu-
peuden vaihtelu kokeiden aikana oli pieni.

3.3 Suurin maahan välittynyt jännitys

Kuvissa 7 ja 8 esitetään maassa 0,2 m:n sy-
vyydessä mitattu vertikaalisen normaalijän-
nityksen suurin arvo ajokerroittain. Keski-
arvot ja tulosten hajonta esitetään Liitteessä
1. Suurin maahan kohdistunut jännitys mi-

tattiin pyörän/telan keskipisteen alta, mikä tuki Koolenin et al. (1992) sekä Blockin et al. (1994) tuloksia. Kyseisestä kohdasta mitatun jännityksen perusteella voitiin vuonna 1997 tarkastella myös maahan kohdistuvaa jännitystä kohdassa, josta maanäyte ajon jälkeen otettiin.

Vuonna 1997 jännityksen huippuarvo oli selvästi suurempi kuin vuonna 1996 (Kuvat 7 ja 8). Vuosittaiset erot maan ominaisuuksissa vaikuttivat todennäköisesti tuloksiin. Syksyllä 1996 maa oli kosteampaa (Taulukko 4) ja mekaaniselta lujuudeltaan heikompaa kuin syksyllä 1997 (Kuvat 9 ja 10). Pyörä/tela painui kosteaan maahan enemmän kuin kuivaan maahan. Tällöin keskimääräinen pintapaine oli ilmeisesti pienempi kuin maan ollessa kuivaa, koska renkaan ripojen painuessa kosteaan maahan myös ripojen väli kanto. Kun maa oli kuivahkoa, renkaan rivat eivät tunkeutuneet kokonaan maahan. Tällöin pyörän ja maan välinen kontaktiala, jolle kuorma kohdistui, oli pienempi ja keskimääräinen pintapaine suurempi kuin ripojen välien kantaessa osan kuormasta.

Mittausten variaatiokertoimet on esitetty Taulukossa 7. Vuonna 1996 mittaustulosten hajonta oli pieni. Syksyllä 1997 hajonta oli selvästi suurempi kuin syksyllä 1996 (Liite 1). Vuosien välinen ero tulosten hajonnassa johtui todennäköisesti osittain siitä, että keskimääräinen pintapaine jakaantui epätasaisesti kontaktialalle syksyllä 1997 pyörän/telan painuessa vähän kuivahkoon maahan. Pyörän/telan kulkiessa anturin ylitse rivat eivät painuneet maahan aina samassa kohtaa anturiin nähden. Mittaustuloksissa hajontaa aiheutti se, että rivin painuessa maahan anturin kohdalla jännitys oli suurempi kuin anturin jäädessä kahden rivin väliin.

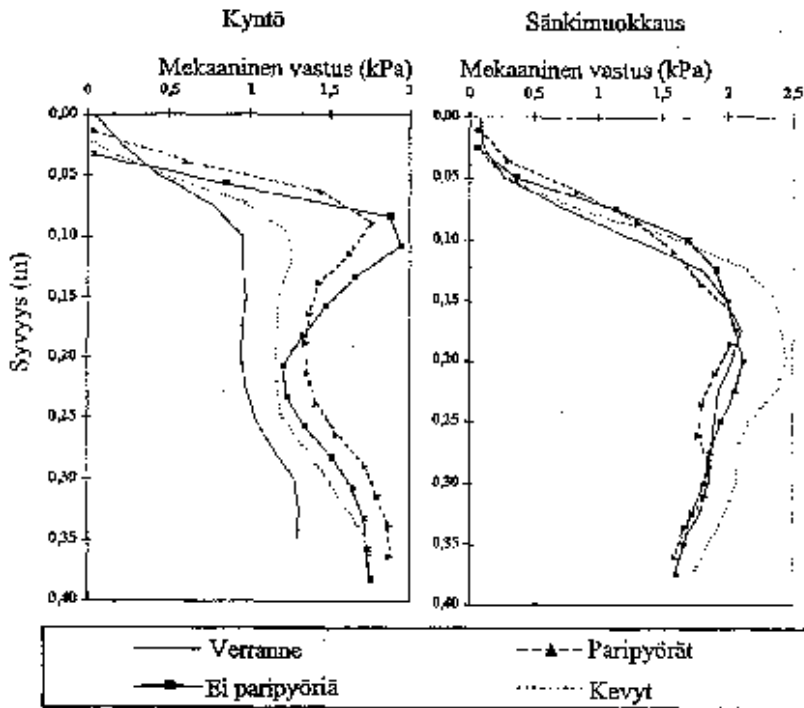
Vuonna 1996 tulosten hajonta oli kynnetyissä (0,2 m) maassa suurempi kuin sänkimuokatussa (0,10–0,15 m). Muokkautapojen väliseen eroon vaikutti ilmeisesti se, että kynnetyissä maassa anturi asennettiin muokatun ja muokkaamattoman maan rajapintaan (0,22 m). Koska asennussyvyys oli muokkauksesta riippumatta sama, sän-

kimuokatussa koejäsenessä anturi asennettiin suhteellisen tiiviiseen, muokkamattoon maahan. Kynnetyissä koejäsenessä antureiden ympärillä ollut maa oli todennäköisesti heterogeenisempää kuin sänkimuokatussa koejäsenessä, mikä lisäsi mittaustulosten hajontaa kynnetyissä koejäsenessä.

Ajokertojen määrän lisääntyessä jännitys 0,2 metrissä yleensä pieneni pyörän alla (Kuvat 7 ja 8), mikä tuki Hornin (1994) tuloksia. Hornin mukaan tämä johtui siitä, että ajokertojen lisääntyessä samassa urassa anturin yläpuolella olleen maan rakenne tiivistyi. Tiivistynyt kerros kanto maahan kohdistuvaa kuormaa ja oli elastista. Näiden mittaustulosten perusteella syytä jännityksen pienenemiseen ei pystytty selvittämään. Mittausten aikana havaittiin, että ajettaessa useita kertoja samasta kohtaa maa löyheni ajourassa. Renkaan rivat tunkeutuivat jälkimmäisillä ajokerroilla syvemmälle maahan kuin ensimmäisellä ajokerralla. Tällöin pintapaine todennäköisesti pieneni ajokertojen lisääntyessä, mikä saattoi samalla pienentää myös jännityksen huippuarvoa.

Molempina vuosina jännityksen huippuarvo oli kynnetyissä maassa pienempi kuin sänkimuokatussa maassa (Kuvat 7 ja 8). Wiermannin (1998) ja Hornin (1998) tulosten mukaan kynnetyissä (0,25–0,30 m) maassa jännityksen huippuarvo oli 0,10 m:n (Wiermann 1998) ja 0,30 m:n (Horn 1998) syvyydessä suurempi kuin sänkimuokatussa maassa (0,08–0,12 m). He mittasivat jännitystä hiesu- ja hiesusavimaassa. Syytä erilaisiin tuloksiin ei aineiston perusteella pystytty selvittämään.

Vuonna 1996 pyörätraktorin rengaskuorma oli samaa suuruusluokkaa kuin telakuorma (Taulukko 1). Pyörätraktorin alla suurin jännitys 0,22 metrissä oli kuitenkin selvästi suurempi kuin telatraktorin alla (Kuva 7). Tämä johtui todennäköisesti siitä, että telatraktorin kontaktiala ja sitä kautta laskennallinen pintapaine oli pienempi kuin pyörätraktorin (Taulukko 1). Tämä vastasi Olsenin (1994) teoreettisella mallilla laske- mia tuloksia pintapaineen vaikutuksesta jännityksen kulkeutumiseen maaprofiilin



Kuva 10. Kynnetyn (0,21 m) ja sänkimuokatun (0,10–0,15 m) maan mekaaninen vastus ajourassa viiden ajokerran jälkeen ja kuormittamattomassa maassa syksyllä 1997. Mittaustuloksiin tehtiin ajourista johtuva syvyyskorjaus.

yläosassa (Olsen 1994). Lisäksi Lebert et al. (1989) raportoivat, että maassa välittynyt jännitys pieneni muokauskerroksessa, kun tietyllä rengaskuormalla ajettaessa käytettiin mahdollisimman suurta kontaktialaa.

Molempina vuosina telatraktorista maahan välittynyt jännitys oli merkittävästi suurempi kuin sen laskennallinen keskimääräinen pintapaine (Kuvat 7 ja 8, Taulukko 1). Pintapaine ei todennäköisesti ja-

kaantunut kumitelan alla tasaisesti, vaan pintapaine keskittyi veto- ja tukipyörien alle kuten Wong (1986) raportoi. Marsilin & Servadion (1996) mukaan kumitelan reunat joustivat, jolloin telan keskelle keskittyi painehuippu. Heidän mukaansa pintapaine jakaantui terästelän alla tasaisemmin kuin kumitelan alla.

Taulukko 7. Vertikaalisen jännityksen mittaustulosten variaatiokerroin (CV = hajonta/keskiarvo *100 %) koejäsenittäin ja mittausvuosittain.

Variaatiokerroin (%)						
		Kyntö		Sänkimuokkaus		
	Kevyt, tela	Keskikokoinen, ei paripyöriä	Keskikokoinen, paripyörät	Kevyt, tela	Keskikokoinen, ei paripyöriä	Keskikokoinen, paripyörät
1996	22	22	-	12	11	-
1997	55	32	52	74	14	49

3.4 Jännityksen vaikutus maan ominaisuuksiin

3.4.1 Maan mekaaninen vastus

Syksyllä 1996 ja keväällä 1997 mekaaninen vastus mitattiin maan kosteuden ollessa lähellä kenttäkapasiteettia. Syksyllä 1997 maa oli kenttäkapasiteettia kuivempaa 0–0,20 metrissä, mikä todennäköisesti korosti koejäsenten välisiä eroja. Molempina vuosina sänkimuokatun maan mekaaninen vastus oli verranneruuduissa 0,10–0,20 metrissä suurempi kuin kynnetyn (Kuvat 9 ja 10). Sama todettiin monivuotisissa kenttäkokeissa (Alakukku et al. 1999). Ero johdettiin perusmuokkaussyvyydestä, sillä kyntö kuohkeutti 0,10–0,22 m:n kerroksen mutta sänkimuokkaus ei.

Mekaanisen vastuksen mittausten mukaan molemmat traktorit tiivistivät maata perusmuokkauskerroksessa (Kuvat 9 ja 10). Molempina syksyinä kynnetyn maan mekaaninen vastus oli viiden ajokerran jälkeen 0,07–0,20 m:n syvyydessä pienempi kevyellä traktorilla ajetuissa ruuduissa kuin keskikokoisella traktorilla ajetuissa ruuduissa (Kuvat 9 ja 10). Tämä tuki monivuotisten kenttäkokeiden tuloksia (Alakukku et al. 1999). Tiivistymä oli voimakkain 0,07–0,10 m syvyydessä ajourien pohjasta (Kuvat 9 ja 10), mikä tuki aikaisempia mittauksia (Aura 1983, Elonen et al. 1995).

Kun mekaaninen vastus mitattiin syksyllä pian kokeen perustamisen jälkeen, traktori koejäsenten välillä ei ollut merkittäviä eroja mekaanisessa vastuksessa sänkimuokatussa maassa (Kuvat 9 ja 10). Mekaaninen vastus mitattiin uudelleen keväällä 1997 syksyn 1996 ajourista. Kevään mittausten mukaan 0,05–0,10 m:n kerroksessa sekä kynnetyn että sänkimuokatun maan mekaaninen vastus oli verranteessa pienempi kuin edellisenä syksynä syntyneissä ajourissa (Kuva 9). Maan rakenne oli talven kuluessa saavuttanut uuden tasapainotilan

syksyn kuormituksen jälkeen. Maan murujen väliset sidokset olivat stabiloituneet ja maa oli kovettunut ajan myötä ajourissa (age hardening). Saman totesivat myös Dexter et al. (1988) tutkimuksessaan.

3.4.2 Kyllästetyn maan vedenjohtavuus ja makrohuokosto

Sänkimuokatun kyllästetyn maan vedenjohtavuus (K_{sat}) oli 0–0,2 metrin syvyydessä pienempi kuin kynnetyn maan (Taulukko 8), mikä tuki monivuotisten kenttäkokeiden tuloksia (Alakukku et al. 1999). Jännityksenmittauskentillä K_{sat} oli perusmuokauskerroksessa samaa suuruusluokkaa kuin monivuotisissa kenttäkokeissa (Alakukku et al. 1999). Viisi ajokertaa samassa ajourassa pienensi kynnetyn maan K_{sat} selvästi (Taulukko 8). Tilastollisesti merkitsevästi K_{sat} pieneni vain, kun keskikokoisella traktorilla ajettiin ilman paripyöriä.

Verranteessa makrohuokoston tilavuusosuus (halkaisija $> 300 \mu\text{m}$) oli kynnetyssä ja sänkimuokatussa maassa 0–0,2 m:n syvyydessä samaa suuruusluokkaa kuin monivuotisissa kenttäkokeissa aitosavimaalla keskimäärin (Alakukku et al. 1999). Verranteen makrohuokoston, jonka halkaisija oli $> 30 \mu\text{m}$, tilavuusosuus maassa oli hie-man suurempi kuin monivuotisissa kenttäkokeissa keskimäärin. Kynnetyn maan makrohuokosto ($> 300 \mu\text{m}$ ja $> 30 \mu\text{m}$) oli verranteessa suurempi kuin sänkimuokatun maan 0–0,2 metrin kerroksessa (Taulukko 9). Sama todettiin usein myös monivuotisissa kenttäkokeissa (Alakukku et al. 1999). Viisi ajokertaa samassa urassa pienensi sekä kynnetyn että kyntämättömän maan suurinta makrohuokostoa ($> 300 \mu\text{m}$, Taulukko 9), mikä tuki Auran (1983) tuloksia savi- ja hiesumaalta. Eniten makrohuokostoa pienensi ajo keskikokoisella traktorilla ilman paripyöriä.

Taulukko 8. Kynnetyn ja kultivoidun kyllästetyn maan keskimääräinen vedenjohtavuus (K_{sat}) 0–0,2 metrin syvyydessä ajourien kohdalla viiden ajokerran jälkeen sekä kuormittamattomassa verranteessa. Koejäsenet testattiin tilastollisesti muokkauksittain erikseen. Mikäli logarimuunnettujen lukujen keskiarvojen yhteydessä on sama kirjain, niiden välillä ei ole tilastollisesti merkitsevää eroa.

	K_{sat} (cm h^{-1})	Keskiarvo $\log(K_{\text{sat}}+1)$
Kyntö (n=5)		
Verranne	130	2,0 ^a
Kevyt traktori, tela	61	1,4 ^a
Keskikokoinen traktori, ei paripyöriä	20	0,5 ^b
Keskikokoinen traktori, paripyörät	51	1,5 ^a
	p-arvo	0,007
Kultivointi (n=4)		
Verranne	30	1,5
Kevyt traktori, tela	28	1,3
Keskikokoinen traktori, ei paripyöriä	23	1,1
Keskikokoinen traktori, paripyörät	34	1,4
	p-arvo	NS

Taulukko 9. Kynnetyn ja kultivoidun maan makrohuokosto (>300 μm ja >30 μm) 0–0,2 metrin syvyydessä viiden ajokerran jälkeen ajourissa sekä kuormittamattomassa maassa. Mikäli keskiarvojen yhteydessä on sama kirjain, niiden välillä ei ole tilastollisesti merkitsevää eroa.

	Makrohuokosto >300 μm ($\text{m}^3 100 \text{ m}^{-3}$)	Makrohuokosto > 30 μm ($\text{m}^3 100 \text{ m}^{-3}$)
Kyntö (n=5)		
Verranne	12,9 ^a	17,1 ^a
Kevyt traktori, tela	8,7 ^b	12,8 ^b
Keskikokoinen traktori, ei paripyöriä	3,4 ^c	7,6 ^c
Keskikokoinen traktori, paripyörät	8,6 ^b	13,6 ^b
	p-arvo	0,001
Kultivointi (n=4)		
Verranne	9,6 ^a	12,4
Kevyt traktori, tela	7,0 ^b	10,0
Keskikokoinen traktori, ei paripyöriä	5,1 ^b	8,1
Keskikokoinen traktori, paripyörät	6,9 ^b	9,7
	p-arvo	0,03

4 Tulosten tarkastelu

Koneista maahan välittyvän vertikaalisen normaalijännityksen mittaukseen rakennettu mittaustaitteisto toimi hyvin kenttä-

olosuhteissa. Kenttämittauksissa käytetty mittaustaaajuus (250–300 Hz) oli samaa suuruusluokkaa kuin muissa vastaavissa mittauksissa 1990-luvulla (Harris & Bakker 1994, Bakker et al. 1995). Mittaustaa-

juus oli riittävän suuri rekisteröimään traktoreista maahan välittyvän jännityshuipun.

Jännitys mitattiin häiriintymättömässä, rakenteellisessa maassa. Monissa aiemmissa tutkimuksissa jännitys mitattiin homogenisoidusta maasta (mm. Akker et al. 1994). Jännitys mitattiin kyntökerroksen pohjasta 0,2 metrin syvyydestä. Tässä syvyydessä maan tiivistymiseen vaikutti pääasiassa pintapaine (Horn & Lebert 1994, Olsen 1994). Se, kuinka syvälle jännitys maassa kulkeutuu, riippuu kuitenkin rengaskuormasta (akselipainosta) (Olsen 1994, Danfors 1994). Jatkotutkimuksissa on mitattava myös pohjamaahan kohdistuva jännitys, jotta voidaan tarkastella kevyen traktorin merkitystä pohjamaan tiivistymisen kannalta.

Olosuhteiden vaikutus mittaustuloksiin oli tulosten mukaan merkittävä. Ensimmäisenä mittaussyksynä tulosten hajonta oli pieni (suurin jännitys, variaatiokerroin $CV < 20\%$) verrattuna esimerkiksi maan makrohuokoston ja kyllästetyn maan vedenjohdavuuden mittauksiin ($CV > 50\%$, Alakukku et al. 1999). Toisena mittaussyksynä jännitystulosten hajonta oli selvästi edellisyyksiä suurempi. Tämä johtui todennäköisesti siitä, että toisena mittaussyksynä pintapaine jakaantui epätasaisemmin kontaktialalle kuin ensimmäisenä mittaussyksynä. Ensimmäisenä mittaussyksynä maa oli kostea ja renkaan rivat tunkeutuivat maahan, mutta toisena syksynä ne eivät täysin tunkeutuneet kuivaan pintamaahan. Maan kastelu ennen jännityksen mittausta olisi todennäköisesti parantanut renkaan ripojen tunkeutumista maahan ja samalla pienentänyt mittaustulosten hajontaa. Pintamaan kuohkeuttaminen n. 0,10 metriin olisi myös parantanut renkaan ripojen tunkeutumista. Kun verrataan koneista maahan välittyvää jännitystä, renkaiden ripojen tunkeutuminen maahan on varmistettava. Näin mittaustulosten hajonta todennäköisesti pienenee.

4.1 Traktoreista maahan välittynyt jännitys

Tela- ja pyörätraktori aiheuttivat maahan erilaisen kuormituksen. Telan alla jännitys jakaantui epätasaisesti ajosuunnassa. Telatraktorin veto- ja tukipyörien kohdalta maahan välittyi selvät jännityshuiput, mikä tuki aiempia mittauksia (Wong 1986, Blunden et al. 1992, 1994). Pyörätraktorin alla jännityshuippu saavutettiin pyörän akselin ylittäessä mittauspisteen. Saman totesivat mittauksissaan Blunden et al. (1994) ja Akker et al. (1994). Lisäksi mittausten aikana havaittiin, että telasta välittyi maahan tärinää, mikä tuki Evansin ja Goven (1986) sekä Blundenin et al. (1992) havaintoja. Wolf & Hadas (1984) vertasivat maan tiivistymistä, kun maata kuormitettiin samanpainoisella tela- ja pyörätraktorilla. Traktorit tiivistivät maata lähes yhtä paljon, vaikka telatraktorin keskimääräinen pintapaine oli 40 kPa ja pyörätraktorin 160 kPa. Tämän Wolf & Hadas (1984) epäilivät johtuneen telan pidemmästä vaikutusajasta ja sen kautta maahan välittyneestä tärinästä. Telan kautta maahan välittyvän tärinän mittausta ja tärinän vaikutus maan tiivistymiseen vaatii jatkotutkimusta.

Ensimmäisenä mittaussyksynä traktorin rengaskuorma (sekä etu- että taka-akselilla) oli lähes sama kuin telan kantama kuorma. Telan ja maan välinen kontaktiala oli kuitenkin suurempi kuin pyörän kontaktiala. Pyörätraktorin laskennallinen keskimääräinen pintapaine kovalla alustalla oli 79 % suurempi kuin telan pintapaine. Pyörätraktorista maahan välittynyt huippujännitys oli kuitenkin renkaan keskilinjan alla 0,22 metrissä 40–67 % suurempi kuin telatraktorista maahan välittynyt jännitys. Pyörän uppoaminen pehmeään maahan pienensi todennäköisesti keskimääräisen pintapaineen eroa renkaan ja telan välillä. Toisaalta kuormituksen epätasainen jakautuminen telan alla voi osaltaan vaikuttaa siihen, että maasta mitatun jännityksen suhteellinen ero traktoreiden välillä oli pienempi kuin laskennallisten pintapaineiden ero.

Sekä pyörän että telan alla suurin mitattu jännitys oli selvästi suurempi kuin keskimääräinen pintapaine, joka mitattiin kovalta alustalla koneen ollessa paikallaan. Pyörän alta mitattu suurin jännitys oli 1–3-kertainen (paripyörät 1–2) ja telan alla 2–6-kertainen keskimääräiseen pintapaineeseen verrattuna. Myös Blunden et al. (1994) totesivat, että pyörä- ja telatraktorin alla mitattu suurin normaalijännitys oli 2–3-kertainen staattisessa tilassa määritettyyn keskimääräiseen pintapaineeseen verrattuna. He mittasivat jännitystä hietamaasta 0,30 metrin syvyydestä. Keskimääräisen pintapaineen ja maassa mitatun suurimman normaalijännityksen välinen ero johtui osittain todennäköisesti siitä, että pintapaine jakaantui ajon aikana epätasaisesti pyörän ja telan alla. Tätä tukee myös se, että em. ero oli toisena mittaussyksynä, jolloin maa oli pinnasta kuiva ja kantava, suurempi kuin ensimmäisenä syksynä.

Telatraktorista välittynyt suurin jännitys oli mittaustulosten mukaan keskimäärin pienempi kuin pyörätraktorista ilman paripyöriä maahan kohdistunut jännitys. Kun pyörätraktorissa oli paripyörät, maahan kohdistui jännitys, joka oli keskimäärin samaa suuruusluokkaa kuin telatraktorista välittynyt jännitys. Paripyörän alla jännitys kohdistui kuitenkin suurempaan maatilavuuteen kuin telan alla. Telan kontaktiala

oli pitkä ja kapea, mutta pyörän kontaktiala oli leveä ja lyhyt.

4.2 Maan tiivistyminen

Mittausten mukaan viisi ajokertaa traktorilla tiivisti maata 0–0,2 metrin kerroksessa. Kevyt traktori tiivisti maata vähemmän kuin keskikokoinen traktori ilman paripyöriä. Paripyörien käyttö pienensi selvästi keskikokoisesta traktorista maahan välittyvää suurinta jännitystä. Se lievensi myös keskikokoisen traktorin aiheuttamaa maan tiivistymistä, mikä tuki Auran (1983) savi- ja hiesumailla saamia tuloksia. Näiden tulosten mukaan paripyörillä ja telalla ajon vaikutus maan makrohuokostoon oli hyvin samanlainen. Maahan välittyneen jännityksen ja sen aiheuttaman tiivistymisen välisen riippuvuuden tarkasteluun mittaussaineisto oli liian pieni. Koneista rakenteelliseen maahan välittyvä jännitys ja sen vaikutus pinta- ja pohjamaan makrohuokostoon on tärkeä jatkotutkimusaihe. Mittausten perusteella voidaan määrittää, miten pohjamaa tiivistyy erilaisten jännitysten vaikutuksesta. Tätä kautta voidaan tarkastella jännitystä, jonka pohjamaa kestää tiivistymättä.

Kirjallisuus

Akker, J.J.H. van den 1988. Model computation of subsoil stress distribution and compaction due to field traffic. Wageningen, Netherlands: Institute for land and water management research (ICW). Report 23. 6 p.

–, **Arts, W.B.M., Koolen, A.J. & Stuver, H.J.** 1994. Comparison of stresses, compaction and increase of penetration resistances caused by a low ground pressure tyre and a normal tyre. *Soil & Tillage Research* 29: 125–134.

Alakukku, L., Aura, E., Pöyhönen, A. & Sampo, M. 1999. Miehittämättömän traktorin käytön lyhytaikaiset vaikutukset savimaan rakenteeseen. Maatalouden tutkimuskeskuksen julkaisuja. Sarja A. Jokioinen: Maatalouden tutkimuskeskus. Käsikirjoitus.

Arvidsson, J. 1997. Soil compaction in agriculture - from soil stress to plant stress. *Acta Universitatis Agriculturae Sueciae. Agraria* 41. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences. 38 p. Academic dissertation.

- Aura, E.** 1983. Soil compaction by the tractor in spring and its effect on soil porosity. *Journal of Scientific Agricultural Society of Finland* 55: 91–107.
- 1990. Salaojien toimivuus savimaassa. Maatalouden tutkimuskeskus, Tiedote 10/90. Jokioinen: Maatalouden tutkimuskeskus. 93 p.
- 1995. Finite element modelling of subsurface drainage in Finnish heavy clay soils. *Agricultural Water Management* 28: 35–47.
- Bailey, A.C. & Burt, E.C.** 1988. Soil stress states under various tire loadings. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers* 31: 672–676.
- , **Burt, E.C., Raper, R.L. & Monroe, G.E.** 1989. Tire-generated stress states above a hard pan. St. Joseph, Michigan: American Society of Agricultural Engineers. Paper. 89–1098. 10 p.
- , **Burt, E.C., Wood, R.K. & Johnson E.** 1988a. The effects of tire dynamic load on soil stress state. St. Joseph, Michigan: American Society of Agricultural Engineers. Paper 88–1511. 11 p.
- , **Nichols, T.A. & Johnson, C.E.** 1988b. Soil stress state determination under wheel loads. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers* 31: 1309–1314.
- , **Raper, R.L. & Burt, E.C.** 1991. The effects of tire inflation pressure on soil stresses. St. Joseph, Michigan: American Society of Agricultural Engineers. Paper 911062. 12 p.
- , **Raper, R.L., Johnson, C.E. & Burt, E.C.** 1995. An integrated approach to soil compaction prediction. *Journal of Agricultural Engineering Research* 61: 73–80.
- , **Raper, R.L., Way, T.R., Burt, E.C. & Johnson, C.E.** 1993. Soil stress under tractor tires at various inflation pressures. Proceedings of the 11th International Conference of the International Society for Terrain-Vehicle Systems, Incline Village, NV, USA, Sept 27–30. Vol. I. p. 276–285.
- Bakker, D.M., Harris, H.D. & Wong, K.Y.** 1995. Measurement of stress paths under agricultural vehicles and their interpretation in critical state space. *Journal of Agricultural Engineering Research* 61: 247–260.
- Blackwell, P.S. & Soane, B.D.** 1978. Deformable spherical devices to measure stresses within field soils. *Journal of Terramechanics* 15: 207–222.
- Block, W.A., Johnson, C.E., Bailey, A.C., Burt, E.C. & Raper, R.L.** 1994. Soil stress measurement under rigid wheel loading. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers* 37: 1753–1756.
- Blunden, B.G., McBride, R.A., Daniel, H. & Blackwell, P.S.** 1994. Compaction of an earthy sand by rubber tracked and tyred vehicles. *Australian Journal of Soil Research* 32: 1095–1108.
- , **McLachlan, C.B. & Kirby, J.M.** 1992. A recording system for measuring in situ soil stresses due to traffic. *Soil & Tillage Research* 25: 35–42.
- Bolling, I.** 1984. Bodenverdichtung und Bereifung bei landwirtschaftlichen Fahrzeugen. *Landtechnik* 39: 449–452.
- 1986. Beanspruchung des Bodens beim Schlepper- und Maschineneinsatz. *KTBL-Schrift* 308: 49–71.
- Burt, E.C., Wood, R.K. & Bailey, A.C.** 1992. Some comparisons of average to peak soil-tire contact pressures. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers* 35: 401–404.
- Danfors, B.** 1974. Packning I alven. Summary: Compaction in the subsoil. Swedish Institute of Agricultural Engineering. Special Report S24: 1–91.
- 1994. Changes in subsoil porosity caused by heavy vehicles. *Soil & Tillage Research* 29: 135–144.
- Dexter, A.R., Horn, R. Holloway, R. & Jakobsen, B.F.** 1988. Pressure transmission beneath wheels in soil on the eyre peninsula of south Australia. *Journal of Terramechanics* 25: 135–147.
- Elonen, E., Alakukku, L. & Koskinen, P.** 1995. Renkaiden vaikutus traktorin vetokykyyn ja maan tiivistymiseen. VAKOLAn tiedote 69/95. Vihti: Maatalouden tutkimuskeskus. 28 p.
- Evans, W.G. & Gove, D.S.** 1986. Rubber belt track in agriculture. St. Joseph, Michigan: American Society of Agricultural Engineers. Paper 86–1061. 14 p.
- Harris, H.D. & Bakker, D.M.** 1994. A soil stress transducer for measuring in situ soil stresses. *Soil & Tillage Research* 29: 35–48.
- Horn, R.** 1994. Stress transmission and recompaction in tilled and segmently disturbed subsoils under trafficking. In: Jayawardane, N. S. & Stewart, B.A. (eds.). *Subsoil management techniques*. Boca Raton: Lewis Publishers. p. 187–210. ISBN 1-56670-020-5.
- 1998. Assessment, prevention and rehabilitation of soil degradation caused by compaction and surface sealing. *Advances in GeoEcology* 31: 527–538.

- , **Blackwell, P.S. & White, R.** 1989. The effect of speed of wheeling on soil stresses, rut depth and soil physical properties in an ameliorated transitional red-brown earth. *Soil & Tillage Research* 13: 353–364.
- , **Gräsle, W. & Kühner, S.** 1996. Einige theoretische Überlegungen zur Spannungs- und Deformationsmessung in Böden und ihre meßtechnische Realisierung. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 159: 137–142.
- & **Lebert, M.** 1994. Soil compactability and compressibility. In: Soane, B.D. & Ouwerkerk, C. van. (eds.). *Soil compaction in crop production*. The Netherlands: Elsevier Science B.V. p. 45–70.
- Håkansson, I., Voorhees, W.B. & Riley, H.** 1988. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. *Soil & Tillage Research* 11: 239–282.
- Koolen, A.J., Lerink, P., Kurstjens, D.A.G., Akker, J.J.H. van den & Arts, W.B.M.** 1992. Prediction of aspects of soil-wheel systems. *Soil & Tillage Research* 24: 381–396.
- Larson, R., Gupta, S.C & Useche, R.A.** 1980. Compression of agricultural soils from eight soil orders. *Soil Science Society of American Journal* 44: 450–457.
- Lebert, M., Burger, N. & Horn, R.** 1989. Effects of dynamic and static loading on compaction of structured soils. *NATO Advanced Science institutes Series. Series E: Applied Science* 172. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers. p. 73–80.
- Marsili, A. & Servadio, P.** 1996. Compaction effects of rubber or metal-tracked tractor passes on agricultural soils. *Soil & Tillage Research* 37: 37–45.
- Nichols, T.A., Bailey, A.C., Johnson, C.E. & Grisso, R.D.** 1987. A stress state transducer for soil. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers* 30: 1237–1241.
- Nieminen, T., Mononen, J. & Sampo, M.** 1994. Unmanned tractors for agricultural applications. XII CIGR World Congress and AgEng '94 Conference Agricultural Engineering, Milano, Italy, 29 August - 1 September 1994. 11 p.
- Olsen, H.J.** 1994. Calculation of subsoil stresses. *Soil & Tillage Research* 29: 111–123.
- Plackett, C.W.** 1984. The ground pressure of some agricultural tyres at low and with zero sinkage. *Journal of Agricultural Engineering Research* 29: 159–166.
- Raper, R.L., Bailey, A.C., Burt, E. C. & Liberati, P.** 1995. Inflation pressure and dynamic load effects on soil deformation and soil-tire interface stresses. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers* 38: 685–689.
- Sommer, C. & Altemüller, H.J.** 1982. Direkt- und Nachwirkungen starker Verdichtungen auf das Bodengefüge und den Pflanzenertrag. *Mitteilungen Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft* 34: 187–192.
- Way, T.R., Bailey, A.C. Raper, R.L. & Burt, E.C.** 1993. Tire lug height effect on soil stress measurements. St. Joseph, Michigan: American Society of Agricultural Engineers. Paper 93–1033. 11 p.
- Weiler, W.A.Jr & Kulhawy, F.H.** 1982. Factors affecting stress cell measurements in soil. *Journal of Geotechnical Engineering* 108: 1529–1549.
- Wiermann, C.** 1998. Auswirkungen differenzierter Bodenbearbeitung auf die Bodenstabilität und das Regenerationsvermögen lössbürtiger Ackerstandorte. *Schriftenreihe. Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde Universität Kiel*. Nr 45. 215 p.
- Wolf, D. & Hadas, A.** 1984. Soil compaction effects on cotton emergence. *Transaction of American Society of Agricultural Engineers* 27: 655–659.
- Wong, J.Y.** 1986. Computer aided analysis of the effects of design parameters on the performance of tracked vehicles. *Journal of Terramechanics* 23: 95–124.

Maassa mitatun vertikaalisen normaalijännityksen suurimman arvon keskiarvo (ka) ja hajonta (STDEV) ajokerroittain kynnyksessä (0,2 m) ja sänkimuokatussa (0,10–0,15 m) maassa vuosina 1996 ja 1997. P = kynnetty, C = sänkimuokattu, V = keskikokoinen traktori ilman pariipyöriä, VPP = keskikokoinen traktori pariipyörin, M = kevyt traktori.

		Vertikaalisen jännityksen suurin arvo (kPa) vuonna 1996							
Ajokerta	PV		PM		CV		CM		
	ka	STDEV	ka	STDEV	ka	STDEV	ka	STDEV	
1	108	41	68	16	169	25	78	8	
2	94	12	66	11	152	11	76	16	
3	88	10	62	13	147	14	74	8	
4	82	13	59	15	124	15	83	6	
5	93	26	61	15	119	11	73	8	

		Vertikaalisen jännityksen suurin arvo (kPa) vuonna 1997											
Ajo- kerta	PV		PVPP		PM		CV		CVPP		CM		
	ka	STDEV	ka	STDEV	ka	STDEV	ka	STDEV	ka	STDEV	ka	STDEV	
1	161	52	74	42	100	53	242	23	168	31	175	86	
2	127	50	74	39	97	52	213	29	135	72	152	119	
3	118	37	70	35	96	50	212	23	137	83	162	135	
4	115	35	73	35	94	52	189	37	122	65	152	128	
5	94	26	75	40	92	56	168	24	111	65	140	105	

Julkaisija



31600 JOKIOINEN

	Julkaisun sarja ja numero Maatalouden tutkimuskeskuksen julkaisuja. Sarja A 63	
	Julkaisu aika (kk ja vuosi) Syyskuu 1999	
Tekijä(t) Ari Pöyhönen et al.	Tutkimushankkeen nimi	
	Toimeksiantaja(t) Maatalouden tutkimuskeskus	
Nimike Traktorista välittyvän pystysuoran jännityksen mittausta kynnetyssä ja sänkimuokatussa savimaassa		
Tiivistelmä Tutkimuksessa selvitettiin, millainen jännitys kevyestä, miehittämättömästä Modulaire-traktorista (paino 2,5 Mg, keskimääräinen telasta maahan kohdistuva pintapaine 30 kPa) välittyi maahan ja miten jännitys vaikutti savimaan makrohuokostoon. Verranteena oli keskikokoinen pyörätraktori, joka painoi varustuksesta riippuen 4–5 Mg (60–140 kPa). Tutkimuksen yhteydessä rakennettiin mittaustaitteisto, jolla voitiin mitata koneista maahan välittyvä pystysuora normaali jännitys. Laitteistolla mitattiin kahtena syksynä viiden ajokerran aikana välittynyt jännitys 0,2 m:n syvyydessä. Jännitys mitattiin sekä kynnetystä että sänkimuokatusta maasta. Samalla mitattiin jännityksen vaikutus aitosavimaan fysikaalisiin ominaisuuksiin. Tela- ja pyörätraktorin maahan aiheuttama dynaaminen kuormitus oli erilainen. Telatraktorin veto- ja tukipyörien kohdalta maahan välittyi selvät jännityshuiput. Pyörätraktorin alla jännityshuippu saavutettiin pyörän akselin ylittäessä mittauspisteen. Lisäksi telatraktorin yhtäjaksoinen kuormitusaika oli pidempi kuin pyörätraktorin. Telatraktorista välittynyt suurin jännitys oli mitaustulosten mukaan keskimäärin pienempi kuin pyörätraktorista ilman paripyöriä maahan kohdistunut jännitys. Kun pyörätraktorissa oli paripyörät, maahan kohdistui jännitys, joka oli keskimäärin samaa suuruusluokkaa kuin telatraktorista välittynyt jännitys. Paripyörien alla jännitys kohdistui kuitenkin suurempaan maatilavuuteen kuin telan alla. Modulaire-traktori tiivisti maata 0–0,20 metrin välein vähemmän kuin keskikokoinen traktori ilman paripyöriä. Paripyörien käyttö lievensi keskikokoisen traktorin aiheuttamaa maan tiivistymistä. Tutkimuksen perusteella todettiin, että jatkotutkimusta tarvitaan seuraavista aiheista: telan kautta maahan välittyvän värinän mittausta ja värinän vaikutusta maan tiivistymiseen sekä telan ja erilaisten rengasvarustusten kautta rakenteelliseen maahan välittynyt jännitys ja sen vaikutus pinta- ja pohjamaan makrohuokostoon erilaisissa olosuhteissa.		
Avainsanat: akselipaino, jännityksen mittausta, maan rakenne, maan tiivistyminen, makrohuokokset, miehittämätön traktori, pintapaine		
Toimintayksikkö Maatalouden tutkimuskeskus, Kasvintuotannon tutkimus, Peltokasvit ja maaperä, 31600 Jokioinen		
ISSN 1238-9935	ISBN 951-729-551-0	<input checked="" type="checkbox"/> Tuloksia voi soveltaa luomuviljelyssä
Myynti: MTT tietopalveluyksikkö, 31600 JOKIOINEN Puhelin (03) 4188 2327 Telekopio (03) 4188 2339	Sivuja 33 s. + liite	Hinta

Jyväskylän yliopistopaino 1999
ISBN 951-729-551-0
ISSN 1238-9935